



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Título del trabajo:

Análisis y optimización del diseño inicial de un pulverizador de barras de 26 metros de pluma.

Title and subtitle (if required):

Analysis and optimization of the initial design of mounted agricultural sprayers with a boom width of 26 meter

Autor/es

Noelia Angosto Játiva

Director/es

Hugo Malón Litago

Escuela de Ingeniería y arquitectura / Universidad de Zaragoza
2018



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

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

D./D^a. Noelia Angosto Játiva,

con nº de DNI 18457392F en aplicación de lo dispuesto en el art.

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

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

Análisis y optimización del diseño inicial de un pulverizador de barras de 26 metros de pluma.

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

Zaragoza, 16 de abril del 2018

Fdo: 

Análisis y optimización del diseño inicial de un pulverizador de barras de 26 metros de pluma.

RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado *Análisis y optimización del diseño inicial de un pulverizador de barras de 26 metros de pluma* se ha realizado para analizar y optimizar el diseño de las barras de un pulverizador agrícola existente destinado a realizar tratamientos en explotaciones agropecuarias, el cual no ha sido analizado en detalle por el fabricante con las solicitaciones a las que se expone en el trabajo diario en campo.

Por ello el fabricante *Industrias Sanz* ha facilitado para la realización de este trabajo un modelo 3D de la geometría inicial del pulverizador.

Se ha realizado la discretización de este modelo con Patran y después se ha analizado numéricamente el apero por el Método de los Elementos Finitos, mediante Abaqus para obtener las tensiones y los desplazamientos de cada componente del modelo. Con la condición de que todos ellos tengan un coeficiente de seguridad menor que 3.

Para ello se han establecido tres casos. En primer lugar, se han calculado los esfuerzos de las barras del pulverizador en caso estático, trabajando bajo la acción de la gravedad (soportando su propio peso). Después se ha realizado un cálculo con el apero sometido a esfuerzos dinámicos que se producen en función del tiempo bajo una carga cuya aceleración es de magnitud 5 veces la aceleración de la gravedad, (condición extrema de trabajo utilizando el apero) es decir, el peor de los casos de uso al que podría someterse, sobrepasando la carga de su uso cotidiano.

El tercer análisis se basa en un cálculo con el apero sometido también a esfuerzos dinámicos, pero en este caso la aceleración es de magnitud 2 veces la aceleración de la gravedad, que sería la condición habitual de trabajo en la realidad, además se hará un cambio en el tiempo en el que va a actuar la carga dinámica.

En los tres casos analizados se han sacado los resultados de desplazamientos y tensiones en Abaqus para cada componente que forma el modelo, después se calcula el coeficiente de seguridad, de manera que los que tengan un coeficiente de seguridad menor que tres se someten a un proceso de optimización.

Los dos casos dinámicos (el de 5g y el de 2g) se optimizan porque presentan coeficientes de seguridad pequeños en alguna de sus piezas. Además, sus resultados son peores que el caso en el que solo actúa la gravedad y esta carga también va incluida en los dos casos dinámicos.

Se han realizado cuatro optimizaciones, dos para el caso de 5g y otras dos para el de 2g, en las que se han cambiado materiales, espesores y tiempos de cálculo computacional.

Una vez finalizado el modelado de las diferentes optimizaciones, se han vuelto a determinar las tensiones, desplazamientos y el coeficiente de seguridad de cada componente hasta encontrar una solución.

Tabla de contenido

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETO.....	3
3.	ALCANCE	4
4.	MODELO INICIAL.....	5
4.1.	DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES.....	5
4.2.	DISCRETIZACIÓN DEL MODELO.....	6
4.3.	MATERIALES. PROPIEDADES DE LOS COMPONENTES.....	8
4.4.	CONDICIONES DE CONTORNO	9
5.	CASOS DE ESTUDIO.....	10
5.1.	CASO 1: CARGA ESTÁTICA, GRAVEDAD.	10
5.2.	CASO 2: CARGA DINÁMICA 5g	10
5.3.	CASO 3: CARGA DINÁMICA 2g	11
6.	RESULTADOS DEL MODELO INICIAL	12
6.1.	CASO 1: CARGA ESTÁTICA, GRAVEDAD.	12
6.2.	CASO 2: CARGA DINÁMICA 5g	15
6.2.1.	DESPLAZAMIENTOS	15
6.2.2.	TENSIONES.....	17
6.3.	CASO 3: CARGA DINÁMICA 2g	19
6.3.1.	DESPLAZAMIENTOS	19
6.3.2.	TENSIONES.....	20
7.	PROCESO DE OPTIMIZACIÓN	22
7.1.	OPTIMIZACIÓN MODELO 5G.....	22
7.1.1.	PRIMERA OPTIMIZACIÓN. RESULTADOS MODELO 5g.....	23
7.1.2.	SEGUNDA OPTIMIZACIÓN. RESULTADOS MODELO 5G.....	24
7.2.	OPTIMIZACIÓN MODELO 2G.....	25
7.2.1.	TERCERA OPTIMIZACIÓN. RESULTADOS MODELO 2G	26
7.2.2.	CUARTA OPTIMIZACIÓN. RESULTADOS MODELO 2G.....	27
8.	CONCLUSIONES.....	29
9.	BIBLIOGRAFÍA	30
	ANEXO A: PRINCIPALES COMPONENTES DE LA ESTRUCTURA DE BARRAS, GEOMETRÍA Y MALLA.....	32
	ANEXO B: DETALLES GEOMETRÍA Y MODELO DISCRETIZADO DE LAS BARRAS DEL PULVERIZADOR.....	66
	GEOMETRÍA	66
	MODELO DE ELEMENTOS FINITOS	69

ANEXO C: RESULTADOS	73
CASO 1: CARGA ESTÁTICA, GRAVEDAD	74
ESTRUCTURA TOTAL	74
COMPONENTES CRÍTICOS.....	78
CASO 2: CARGA DINÁMICA 5g.....	92
1. DESPLAZAMIENTOS	93
2. TENSIONES	99
CASO 3: CARGA DINÁMICA 2g.....	119
1. DESPLAZAMIENTOS	119
2. TENSIONES	124
ANEXO D: RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE TENSIONES Y COEFICIENTE DE SEGURIDAD DE TODOS LOS COMPONENTES QUE FORMAN LAS BARRAS DEL PULVERIZADOR PARA LOS CASOS DE ESTUDIO INICIALES.	135
CASO 1: CARGA ESTÁTICA, GRAVEDAD	135
CASO 2: CARGA DINÁMICA 5g.....	140
CASO 3: CARGA DINÁMICA 2g.....	143
ANEXO E: PROCESO DE OPTIMIZACIÓN	146
PRIMERA OPTIMIZACIÓN, MODELO 5g.....	148
SEGUNDA OPTIMIZACIÓN, MODELO 5g.....	150
TERCERA OPTOMIZACIÓN, MODELO 2g.....	150
CUARTA OPTIMIZACIÓN, MODELO 2g.....	150
ANEXO F: RESULTADOS DE LOS PROCESOS DE OPTIMIZACIÓN	154
PRIMERA OPTIMIZACIÓN	154
1. DESPLAZAMIENTOS	154
2. TENSIONES	159
SEGUNDA OPTIMIZACIÓN	172
1. DESPLAZAMIENTOS	172
2. TENSIONES	177
TERCERA OPTIMIZACIÓN	193
1. DESPLAZAMIENTOS	193
2. TENSIONES	199
CUARTA OPTIMIZACIÓN	205
1. DESPLAZAMIENTOS	205
2. TENSIONES	211
ANEXO G: RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE TENSIONES Y COEFICIENTE DE SEGURIDAD DE TODOS LOS COMPONENTES QUE FORMAN LAS BARRAS DEL	

PULVERIZADOR PARA LOS CASOS DE ESTUDIO OBTENIDOS A PARTIR DE LAS OPTIMIZACIONES.....	212
PRIMERA OPTIMIZACIÓN	212
SEGUNDA OPTIMIZACIÓN	216
TERCERA OPTIMIZACIÓN	219
CUARTA OPTIMIZACIÓN	222

1. INTRODUCCIÓN

Los pulverizadores de barras son aperos que se emplean para la aplicación de productos fitosanitarios (herbicidas, insecticidas y fungicidas) sobre el suelo a trabajar, realizando previamente una dilución de la materia activa en agua, con el fin de eliminar plantas e insectos que perjudiquen al producto sembrado cuya explotación se quiera realizar en el lugar de aplicación.

Se caracterizan por la uniformidad que se puede conseguir en la distribución sobre la superficie tratada, gracias al solapamiento de las boquillas contiguas.

Los elementos principales de los que consta un pulverizador son:

- Depósito para el caldo que contiene el producto comercial mezclado con el diluyente. Debe ser resistente y fácil de limpiar, con un sistema de vaciado total y boca de llenado dotada de cierre hermético.
- Bomba volumétrica que asegure la impulsión con independencia de la presión de trabajo.
- Sistema de regulación proporcional de caudal, con manómetro indicador de la presión de trabajo y tuberías que alimentan los diferentes tramos de boquillas.
- Sistema de barras porta boquillas plegable, que cubre extendido toda la anchura de trabajo, sobre el que se sitúan las boquillas de pulverización.
- Boquillas apropiadas para el tipo de producto que se aplica
- Filtros escalonados con tamaño de malla adecuado al tipo de boquillas utilizado.

Según su disposición con respecto al tractor al que se van a acoplar existen tres tipos, Suspendido en el que el depósito, además del resto de la estructura, va colgado del tractor. Arrastrado, en este el depósito está colocado sobre un chasis con ruedas de forma que, al engancharse al tractor, éste arrastra al pulverizador y autopropulsado, este es independiente y no necesita un tractor para poder moverlo.

Este trabajo se va a centrar en el análisis y optimización del diseño de las barras plegables que sirven de porta-boquillas para las boquillas de pulverización, de un pulverizador de 26 metros de pluma suspendido de tipo SU, del fabricante *Industrias Sanz*. La figura 1 es un esquema de estas barras y en las figuras 2 y 3 aparecen unas barras del pulverizador reales de 18 metros (del mismo fabricante que las de 26 metros que se estudian en el presente trabajo).



Figura 1: Esquema de las barras del pulverizador de 26m

Análisis y optimización del diseño inicial de un pulverizador de barras de 26 metros de pluma.



Figura 2: barras en posición de plegado



Figura 3: barras de 18m completamente extendidas, en la posición de trabajo, del mismo fabricante que las de 26 metros que se presentan en este trabajo.

En las siguientes figuras (de la 4 a la 7) aparecen fotografías tomadas de pulverizadores similares al que se está estudiando en este trabajo, de diferentes fabricantes, tomadas en la FIMA en Zaragoza.



Figura 4



Figura 5



Figura 6



Figura 7

2. OBJETO

El objetivo principal del proyecto es el análisis y optimización de las barras de un pulverizador de barras destinado a realizar tratamientos en explotaciones agropecuarias.

El modelo analizado en el trabajo corresponde a un diseño de 26 metros de pluma, el cual no ha sido analizado en detalle con las solicitaciones existentes en el trabajo diario en campo. Por ello en el presente trabajo se realizará el análisis de las barras de un pulverizador existente en la actualidad mediante un estudio numérico basado en el Método de Elementos Finitos (*FEM*), y en función de los resultados, se propondrán una serie de mejoras estructurales necesarias y que sean lo más sencillas posible, para poderlas adaptar sin dificultad al pulverizador existente.

Para ello se tendrán que determinar los esfuerzos a los que está sometido este apero agrícola en función de la geometría utilizada, los materiales y las condiciones de trabajo. Para obtener los esfuerzos a los que están sometidas las barras, se plantearán varios supuestos, todos ellos con las barras extendidas totalmente, ya que esta posición será la más desfavorable, donde se producirán las mayores cargas.

En primer lugar, se calcularán los esfuerzos de las barras del pulverizador en caso estático, trabajando bajo la acción de la gravedad, es decir, con el apero enganchado en la parte central y suspendido en el aire soportando su propio peso.

En segundo lugar, se realizará un cálculo con el apero sometido a esfuerzos dinámicos que se producen en función del tiempo bajo una carga cuya aceleración es de magnitud 5 veces la aceleración de la gravedad, que sería una condición extrema de trabajo utilizando el apero, es decir el peor de los casos de uso al que podría someterse, sobrepasando con creces la carga de su uso cotidiano.

Por último, se realizará un cálculo con el apero sometido también a esfuerzos dinámicos, pero en este caso la aceleración es de magnitud 2 veces la aceleración de la gravedad, que sería la condición habitual de trabajo en la realidad, además se hará un cambio en el tiempo en el que va a actuar la carga dinámica.

Estos datos de aceleraciones utilizadas para cada caso han sido proporcionados por el laboratorio de maquinaria agrícola de la universidad de Zaragoza (LAMAGRI).

Una vez analizados los resultados, se llevará a cabo el proceso de optimización de las barras del pulverizador, partiendo de los resultados más desfavorables para cada caso. De esta forma se podrá asegurar que no se sobrepasan los límites elásticos en ninguno de los casos.

Para la optimización del modelo se buscará cambiar espesores o materiales en determinadas piezas manteniendo los criterios de resistencia y rigidez exigidos, y en el caso de las zonas más críticas, se aumentarán espesores o lo que se considere necesario para reducir esfuerzos.

3. ALCANCE

A partir de un modelo 3D de la geometría inicial del pulverizador proporcionado por el fabricante *Industrias Sanz*, se realizará la discretización del mismo mediante Patran. Una vez discretizado se procederá al análisis numérico del apero por el Método de los Elementos Finitos, mediante el software Abaqus. Se analizarán, según los criterios de rigidez y resistencia, los resultados tras la primera fase de cálculo y se volverá a hacer otro análisis con las mejoras a introducir en el pulverizador de barras. Después se procederá a realizar un modelado de las modificaciones efectuadas y se volverá a calcular mediante el Método de los Elementos Finitos el modelo optimizado.

Por último, se analizarán las optimizaciones desarrolladas y se obtendrán las conclusiones finales.



Figura 8: barras de un pulverizador del catálogo del fabricante de 18m similar al de 26m que se presenta en este trabajo

4. MODELO INICIAL

El modelo analizado en el trabajo corresponde a un diseño de 26 metros de pluma, el cual no ha sido analizado en detalle por el fabricante con las solicitaciones existentes en el trabajo diario en campo.

Por ello en el presente trabajo se parte de un modelo en 3D facilitado por el fabricante, el cual se ha analizado para ver qué fallos presenta inicialmente y cuáles son sus puntos débiles. Se puede observar la geometría del mismo en las figuras 9 y 10. Se realiza el estudio de la mitad del modelo debido a la condición de simetría que presenta.

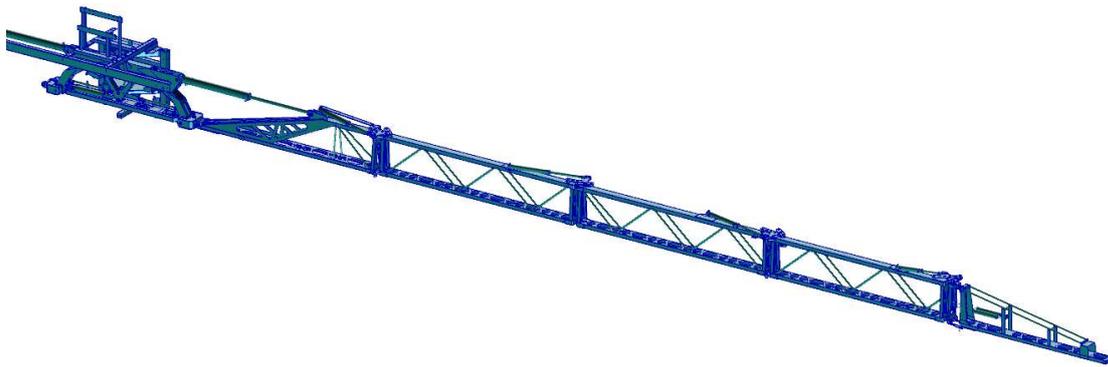


Figura 9: Modelo de la estructura del pulverizador de barras facilitado por el fabricante

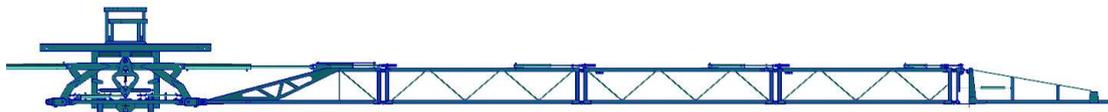


Figura 10: Alzado del modelo del fabricante

4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES

Para facilitar la discretización del modelo se crean grupos en Patran y en cada grupo aparece un sólido del modelo total. Primero se ha dividido la estructura en 6 partes principales, para cada conjunto de componentes: Soporte, C0, C1, C2, C3, C4 que son las agrupaciones de sólidos que aparecen en la figura 11. Después para cada grupo creado se le asignará un nombre, primero con el nombre del conjunto al que pertenece seguido del nombre que se haya querido poner para identificarlo, por ejemplo, el grupo *C1-superior*, corresponde al sólido marcado en la figura 11 con este nombre.

Además, existen piezas de unión para cada conjunto de componentes, a estas se les designará con el nombre de los dos conjuntos que unen más el nombre de identificación de la pieza para diferenciarlo del resto. Por ejemplo, *C2-C3-UnionInferior-Cilindro*, se puede ver también señalado en la figura 11.

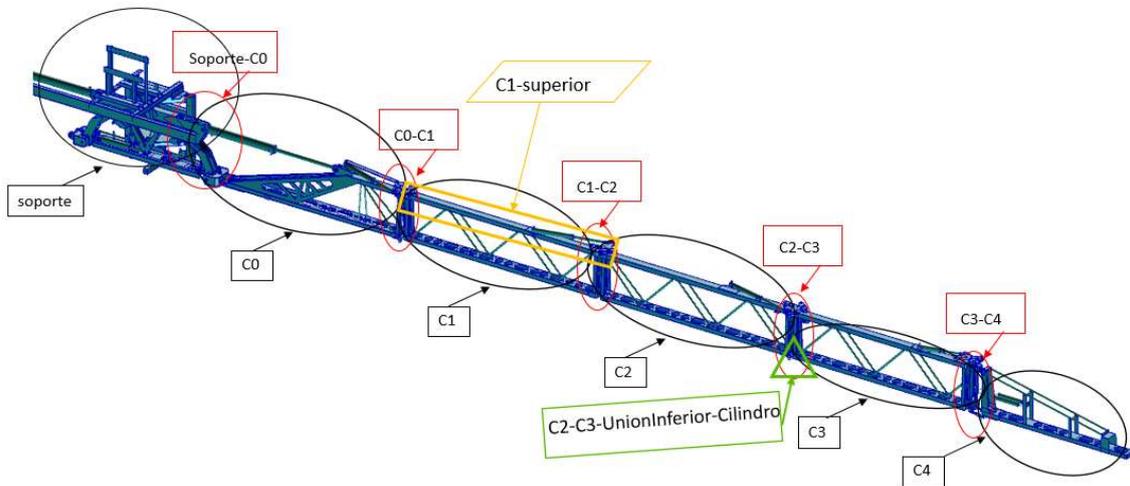


Figura 11: descripción de los componentes del modelo

De esta manera se facilita la identificación de cada componente a la hora de realizar el mallado de cada uno y también resulta más sencillo ver las piezas que están sometidas a mayores cargas poniéndolas cada una de ellas por separado.

En el ANEXO A aparece la geometría de los principales componentes de la estructura de barras y el lugar dónde se encuentra cada uno.

4.2. DISCRETIZACIÓN DEL MODELO

Posteriormente se ha realizado la discretización del modelo con Patran, dividiéndolo en las diferentes partes que componen las barras del pulverizador obteniendo un total de 206 grupos de componentes que forman parte de la estructura para la mitad del modelo, que es con lo que se va a trabajar ya que es simétrico con respecto al plano YZ. Para cada uno de los sólidos, se han creado nuevas curvas y superficies para facilitar el mallado posterior.

Al realizar el mallado de cada grupo, se han utilizado elementos 2D de tipo Shell, que varían su tamaño desde 10x15mm aproximadamente hasta unos 40x40mm dependiendo del tamaño del sólido a mallar y del nivel de precisión que requiera debido a su geometría y a los puntos de unión con otros sólidos, también se han usado elementos barra para partes de la estructura con una geometría cilíndrica y elementos volumétricos cuando la pieza tiene un espesor lo suficientemente grande (unos 10mm) como para no despreciarlo en el mallado. Además, se han creado MPCs en las uniones de pasadores para permitir el giro de la unión y que no sea completamente rígida. En el ANEXO B aparecen detalles del mallado de los componentes de la estructura de barras.

El conjunto total de la estructura de barras con las partes de las que consta malladas da lugar al modelo discretizado de la figura 12 y tiene un total de 27016 nodos y 25979 elementos.



Figura 12: modelo discretizado de la estructura de barras de un pulverizador

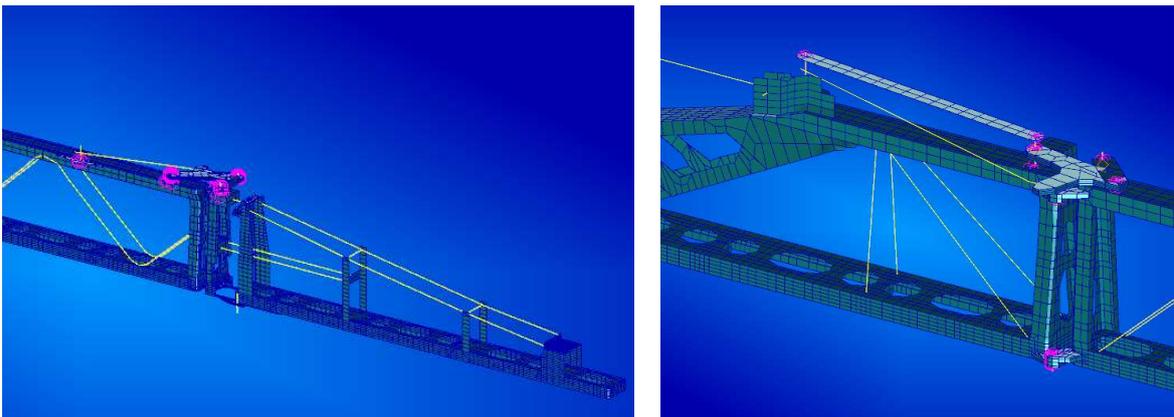


Figura 13: detalles del modelo discretizado

Una vez realizado el mallado de cada grupo creado, se procede a la unión de todos los sólidos hasta obtener el modelo completo discretizado, uniendo dos a dos, o por grupos, los sólidos mallados. Se pueden encontrar dos tipos de uniones dependiendo de si los componentes que están en contacto se pueden mover uno con respecto del otro o deben permanecer unidos rígidamente.

Haciendo uniones con equivalencias entre nodos coincidentes para obtener un único nodo común entre todos los que se quieran unir de las piezas que coincidan en ese punto, esto se aplica para el caso de querer una unión rígida, es decir que no permiten el desplazamiento relativo entre los componentes en las zonas de unión, simulando una unión soldada. Se da en la mayor parte del modelo.

Las uniones móviles se dan en pasadores o cuerpos que tienen que deslizar con respecto a otro al que está unido. Para el caso de los pasadores, se unen con MPCs a los cuerpos con los que tienen que estar en contacto, para así permitir el giro relativo entre el pasador y las piezas que lo rodean. Y en componentes que están juntos unidos por el pasador, bastará con comprobar que los nodos y elementos de la cara de unión de

ambos sólidos son coincidentes, esta conexión permite que un componente deslice sobre otro, obligando a que solo actúe la conexión de la MPC del pasador que atraviesa a los cuerpos.

Las uniones móviles se dan en puntos de la estructura de barras que tienen que girar para que ésta pueda plegarse y así, evitar que aparezcan tensiones erróneas en las uniones entre componentes que tienen giro relativo. En la figura 14 aparecen ejemplos de unión rígida y de unión móvil.

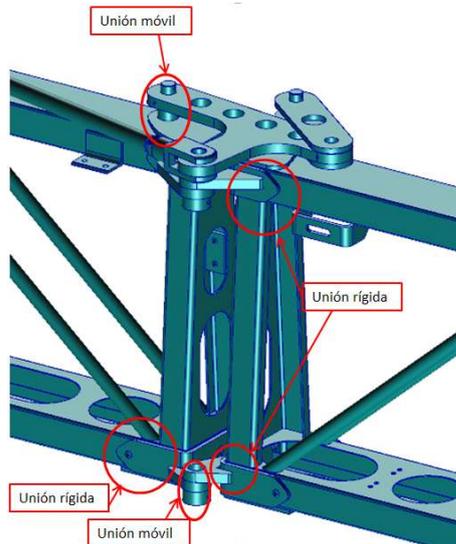


Figura 14: ejemplos de unión rígida y unión móvil

Una vez unidas las mallas de todos los grupos creados anteriormente que forman la estructura de barras, se obtiene el modelo completo discretizado.

4.3. MATERIALES. PROPIEDADES DE LOS COMPONENTES.

A cada uno de los grupos creados en Patran, se le asignan una serie de propiedades que son:

- Malla del componente al que se le aplica la propiedad
- Espesor (en el caso de componentes de 2D, los de 1D se dará el radio y el plano al que son perpendiculares, dando las componentes del vector normal al plano y en los de 3D ya está definido previamente): el espesor de todas las piezas para el modelo inicial es el que ha definido el fabricante y se mide directamente en el modelo que ha facilitado para la realización de este trabajo.
- Materiales: en el modelo inicial, se ha utilizado para todos de los componentes el acero estructural S275JR excepto para elementos de unión como tornillos, bulones y cilindros que se ha usado un acero elástico lineal. En la tabla 1 se pueden observar las propiedades de los aceros empleados.

Propiedades	MATERIALES EMPLEADOS	
	S275JR	ACERO
Módulo de Young (MPa)	210000	210000
Coeficiente de Poisson	0,3	0,3
Densidad (Kg/m^3)	7800	7800
Límite de tracción (MPa)	410	
Límite elástico (MPa)	275	

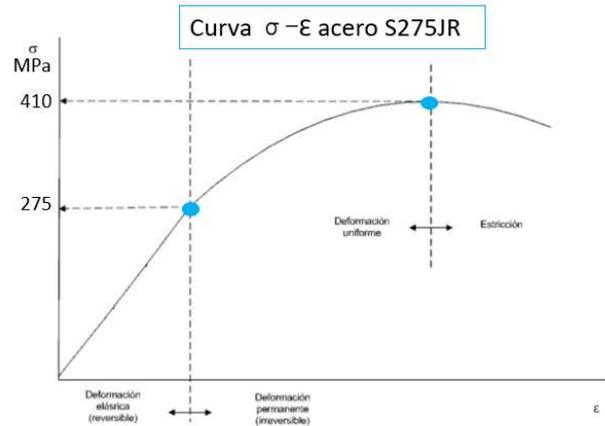


Tabla 1: propiedades de los materiales utilizados Figura 15: curva de comportamiento del acero S275JR

Los materiales utilizados en este caso, definidos anteriormente, se pueden ver en el input obtenido al ejecutar el análisis en Patran.

Para el acero S275JR se ha introducido su curva completa (elástica y plástica), como se puede ver en la figura 15, para poder obtener las deformaciones plásticas (permanentes) que ocurren en el modelo antes de su rotura. De esta forma se obtienen resultados más próximos a la realidad que en el caso de que se hubiera realizado un cálculo elástico-lineal, es decir, sin la inclusión de la curva plástica.

4.4. CONDICIONES DE CONTORNO

Las condiciones de contorno aplicadas sobre la estructura del pulverizador de barras han sido simetrías (aplicada en el centro del apero, que corresponde a la parte izquierda de la figura 16), en la que se impide el desplazamiento y giro en x (eje longitudinal).

Además, en el primer caso en el que se aplica la carga estática de la gravedad, también se impide el desplazamiento en z (eje vertical) para simular la condición de que no mueve por la acción de cargas dinámicas. En la figura 16 se pueden visualizar estas condiciones de contorno.

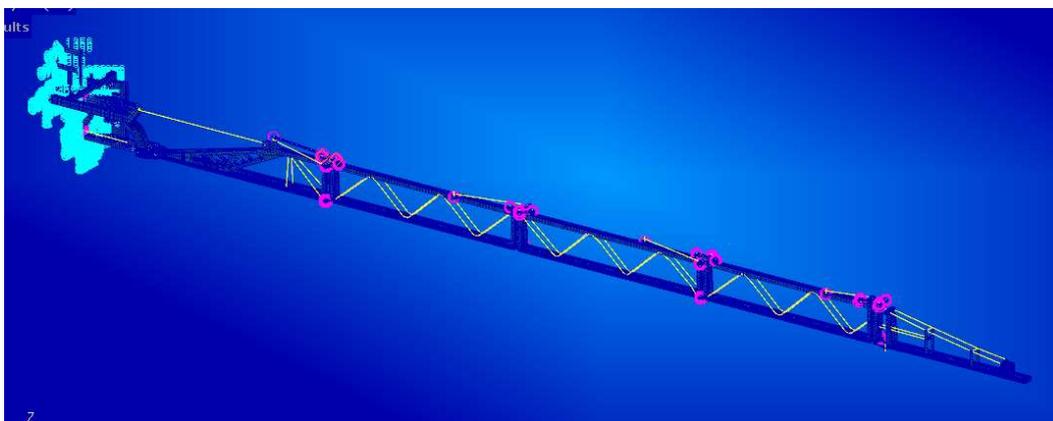


Figura 16: condiciones de contorno (a la izquierda)

5. CASOS DE ESTUDIO

5.1. CASO 1: CARGA ESTÁTICA, GRAVEDAD.

Para el caso de aplicación de la carga de gravedad, es decir, que la estructura del pulverizador de barras soporte su propio peso, se introduce en el fichero del input el valor de la carga de gravedad (9.8N) en la dirección vertical (Z) y aplicada hacia abajo, es decir, -9.8N.

5.2. CASO 2: CARGA DINÁMICA 5g

La carga dinámica se aplica a través de tres pasos (steps). En el primer step se aplica la carga de la gravedad de la misma forma que se ha hecho en el caso estático. En el segundo step se impone un desplazamiento inicial en el eje vertical, de forma que sube 5cm (se explica en el párrafo siguiente por qué son 5cm) la parte central que es donde se apoyaría el apero. Y por último en el tercer step se establece un desplazamiento de igual magnitud, pero con signo contrario al del step 2, en este paso baja el apero, simulando un rebote y así empieza a oscilar el modelo desplazándose cada punto del mismo verticalmente en función del tiempo, hasta que se estabiliza con el tiempo. De esta forma imponiendo un desplazamiento se introduce el efecto que tendría la aceleración en el caso dinámico.

En el step 2 se impone este desplazamiento para simular una aceleración actuante con una magnitud de 5g, que sería una condición extrema de trabajo utilizando el apero, es decir el peor de los casos de uso al que podría someterse, sobrepasando con creces la carga de su uso cotidiano.

Como $a = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}^2}$, teniendo en cuenta que los intervalos de tiempo establecidos son de 0.1s, y la aceleración toma un valor de 5, sustituyendo en la ecuación, la distancia será de 0.05m. En el siguiente step el desplazamiento tomará el mismo valor, pero con signo contrario de forma que el apero baje y se estabilice con el paso del tiempo hasta que vuelva a su posición inicial.

A continuación, se detalla cómo es cada step, su duración y las cargas actuantes, con una gráfica explicativa en función del tiempo (figura 17).

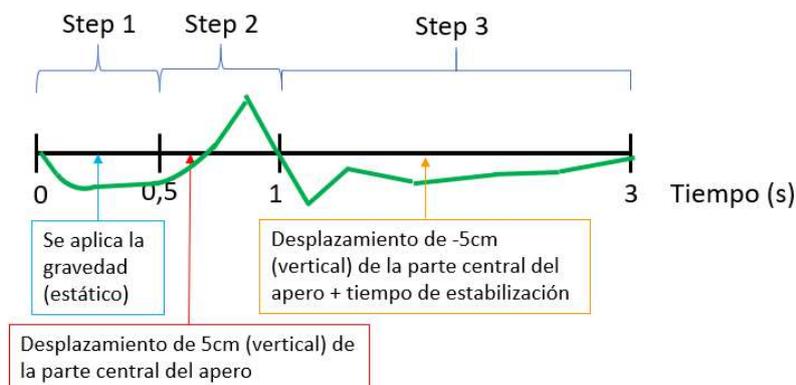


Figura 17: esquema eventos que aparecen en cada step

5.3. CASO 3: CARGA DINÁMICA 2g

Este caso es exactamente igual al anterior en todos sus pasos con la diferencia que la aceleración aplicada es de 2·g en vez de 5·g, por lo tanto, el desplazamiento que hay que introducir en el segundo step es de 2cm.

Se puede comprobar igual que se ha hecho en el caso de 5g, tomando $a = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}^2}$, teniendo en cuenta que los intervalos de tiempo son de 0.1s, y la aceleración toma un valor de 2, sustituyendo en la ecuación, la distancia será de 0.02m. En el siguiente step el desplazamiento tomará el mismo valor, pero con signo contrario de forma que vuelva a su posición inicial.

La aceleración de 2g sería la condición habitual de trabajo en la realidad, además se hará un cambio en el tiempo en el que va a actuar la carga dinámica de forma que se adelanta de 1s a 0.6 s (para disminuir el tiempo de cálculo computacional), como se ve en la siguiente gráfica, estando ahora más próxima del momento en el que actúa la gravedad.

Por tanto, en el step 2 se introducirá un desplazamiento en Z de 0.02m. La gráfica en la que se muestra la evolución de lo que ocurre en cada step en función del tiempo sería similar a la anterior, pero con este nuevo desplazamiento, tal y como se presenta en la figura 18.

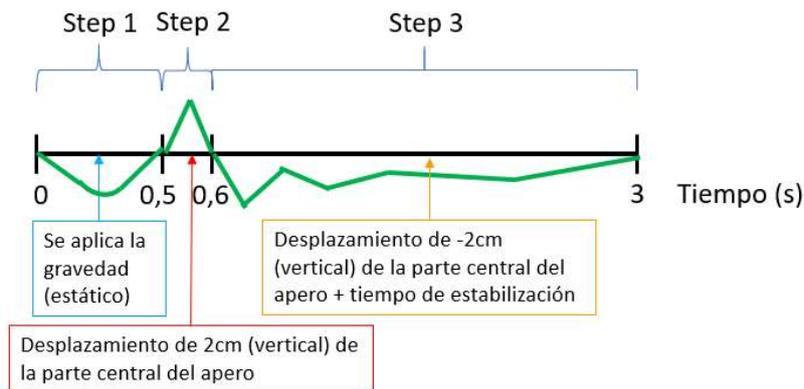


Figura 28: esquema eventos que aparecen en cada step

6. RESULTADOS DEL MODELO INICIAL

En este apartado se van a detallar los resultados generados de los análisis realizados para los diferentes casos de estudio expuestos anteriormente mediante el programa Abaqus, que utiliza como modo de cálculo el Método de los Elementos Finitos.

Los resultados obtenidos se van a analizar a través de las tensiones y de los desplazamientos en el eje vertical (Z), buscando un coeficiente de seguridad en el caso de las tensiones igual o superior a 3 para cada caso de estudio y así poder estar del lado de la seguridad sobre todo para el estudio en el que se aplican cargas dinámicas ya que es el más desfavorable.

Para los casos analizados, se ha creado una tabla en la que se expresan, para cada uno de los componentes que no cumplen los requisitos estructurales (tener un coeficiente de seguridad mayor que tres), el material con el que se ha fabricado, el espesor que posee, y en el caso de barras o bulones el radio que tienen, el límite elástico, la tensión equivalente de Von Mises obtenida a través de los cálculos numéricos de Abaqus, y el coeficiente de seguridad. Las unidades de longitud se expresarán en *mm* y las de tensión en *MPa*.

En el ANEXO C se muestran con más detalle las tensiones a las que está sometida la estructura global y cada uno de los componentes que soportan mayores cargas a través de figuras con el mapa de tensiones.

Los resultados obtenidos en los diferentes casos se tendrán en cuenta para el proceso de optimización de las barras del pulverizador, tomando como punto de partida para la optimización los componentes que están sometidos a mayores tensiones en cada caso de estudio realizado.

Se ha añadido en el ANEXO D una tabla con todos los componentes que forman el modelo para cada caso de carga con sus materiales, espesor, límite elástico, tensión que soportan y coeficiente de seguridad. De esta forma se puede ver de manera más resumida los resultados de tensiones y coeficientes de seguridad obtenidos para todos los componentes.

6.1. CASO 1: CARGA ESTÁTICA, GRAVEDAD.

En este apartado se han analizado las tensiones y desplazamientos que presentan las barras del pulverizador bajo la carga de la gravedad, es decir, soportando su propio peso y usando como materiales el acero estructural S275JR y un acero de alto límite elástico con comportamiento elástico lineal para el caso de las uniones.

En las figuras 19, 20 y 21 aparecen reflejadas la tensión máxima de Von Mises, un detalle de las tensiones en la zona donde éstas son mayores y el desplazamiento máximo respectivamente.

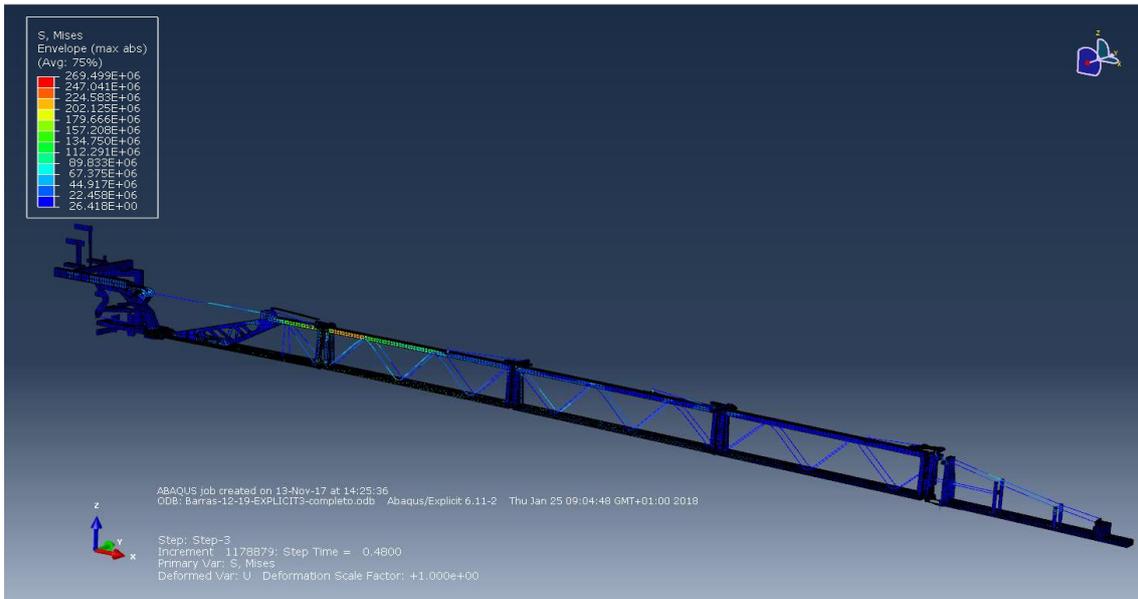


Figura 19: Distribución de tensiones de Von Mises, actuando carga de la gravedad

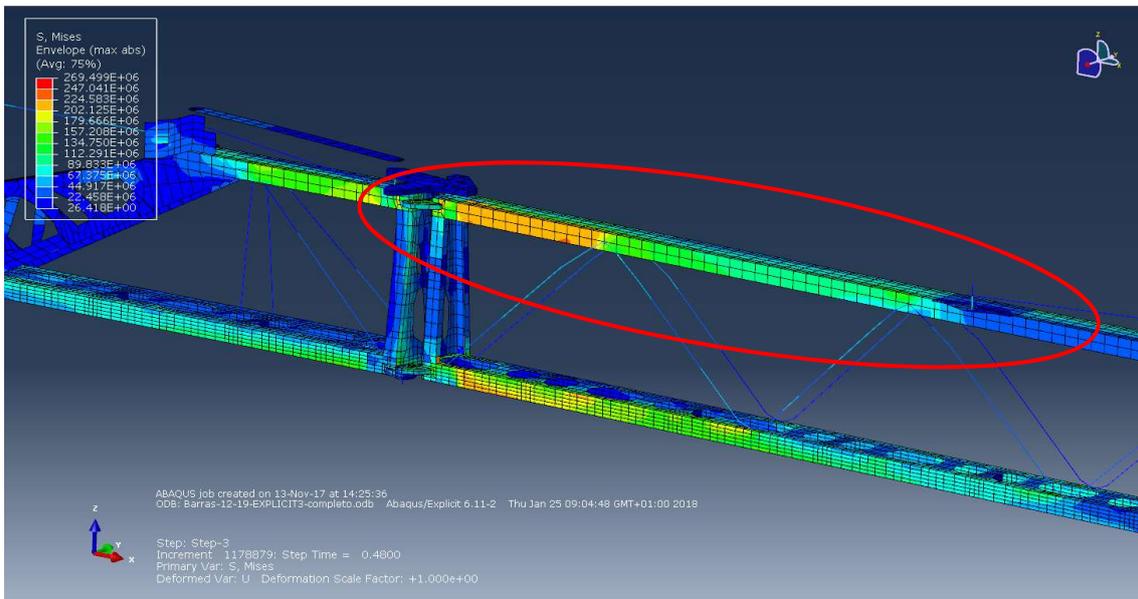


Figura 20: Detalle de tensiones de Von Mises en la zona más cargada, componente C1-superior en un círculo rojo (el mas cargado)

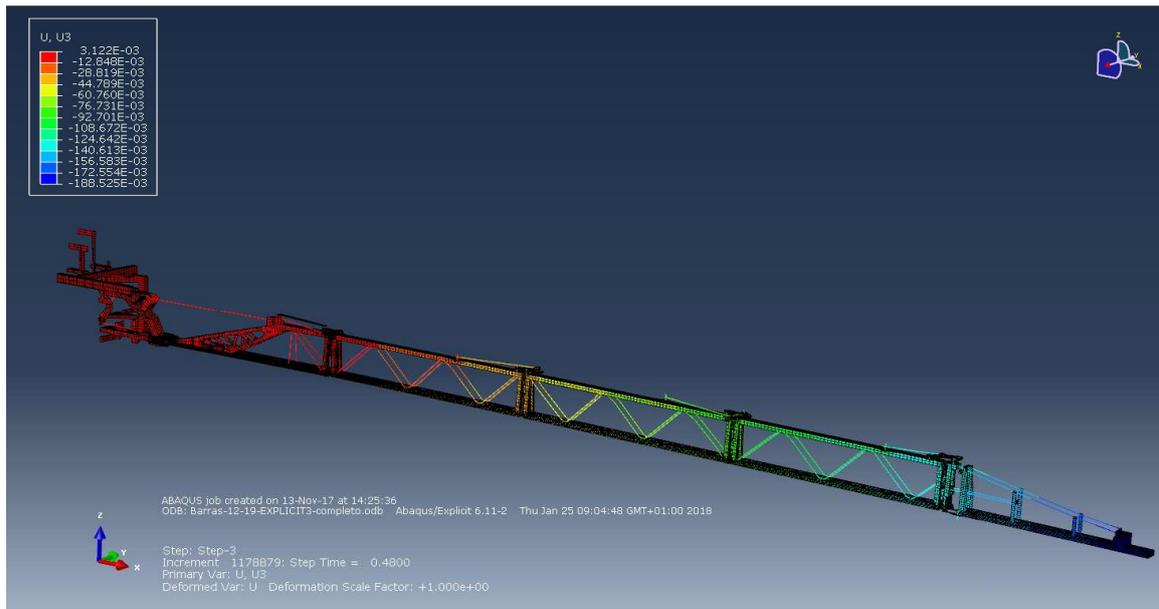


Figura 21: Desplazamientos en el eje vertical generados, actuando la carga de gravedad

Como se puede observar en las figuras 19 y 20, las mayores tensiones aparecen entre el conjunto de componentes C0 y el C1, (y algo también en el C2) que son los que más esfuerzos soportan. Es una zona donde se concentra la mayor flexión de la estructura, y conforme se aleja de esta zona, las tensiones disminuyen, hasta el extremo (C4) donde son mucho menores. La zona del empotramiento también presenta valores más pequeños que en C0 y C1.

La máxima tensión a la que están sometidas las barras es de 243,11 MPa, esta tensión máxima aparece en el componente llamado *C1-superior* (ver Figura 20, rodeado con un círculo rojo), por lo que se espera que la estructura falle primero por este componente en el caso de estudio presente.

El máximo desplazamiento se encuentra representado en azul en la figura 21, y aparece en el extremo opuesto al componente del que se sujeta en el tractor a la hora de usarlo, es decir, en los extremos de las barras, tomando un valor de -0.188m.

La tabla 2 recoge los resultados de material con el que se ha fabricado, el espesor que posee, y en el caso de barras o bulones el radio que tienen, el límite elástico, la tensión equivalente de Von Mises y el coeficiente de seguridad para los componentes de la estructura cuyo coeficiente de seguridad menor a 3. En total hay 26 piezas que no cumplen este requisito.

En el anexo C aparecen imágenes y el lugar de la estructura donde se encuentran estos componentes que no cumplen los requisitos estructurales, y en el anexo D aparece una tabla similar a la 2 pero con la información de todos los sólidos que forman la estructura para este caso de estudio.

NOMBRE	MATERIAL	LÍMITE ELÁSTICO (MPa)	ESPESOR (mm)	TENSIÓN (MPa)	CS
C0-dcha-abajo-placaC	S275JR	275	6	161,464	1,703166031
C0-dcha-abajo-placaC-horizontal	S275JR	275	6	124,312	2,212175816
C0-dcha-vert	S275JR	275	3	114,274	2,406496666
C0-inferior	S275JR	275	3	219,677	1,251837926
C0-placaGrande-triang-delante	S275JR	275	6	100,959	2,72387801
C0-placaGrande-triang-detrás	S275JR	275	6	101,177	2,718009034
C0-superior	S275JR	275	3	218,915	1,256195327
C0-superior-dcha-placaC	S275JR	275	6	205,126	1,340639412
C0-UnionCilindros-placaDetras	S275JR	275	10	122,629	2,242536431
C1-inferior	S275JR	275	2	228,256	1,204787607
C1-izquierda-vert	S275JR	275	3	213,922	1,285515281
C1-placaC-inf-dcha-finaHorizont	S275JR	275	6	123,22	2,231780555
C1-placaC-inf-derecha	S275JR	275	6	207,237	1,326983116
C1-placaC-inf-izquierda	S275JR	275	6	169,363	1,623731275
C1-placaC-sup-derecha	S275JR	275	6	104,342	2,635563819
C1-placaC-sup-izquierda	S275JR	275	6	225,612	1,218906796
C1-superior	S275JR	275	2	243,112	1,131165882
C2-inferior	S275JR	275	1,5	199,99	1,375068753
C2-izquierda-vert	S275JR	275	3	126,582	2,17250478
C2-placaC-inf-izq	S275JR	275	6	208,405	1,319546076
C2-placaC-sup-izq	S275JR	275	6	106,526	2,581529392
C2-superior	S275JR	275	1,5	161,29	1,70500341
C4-izquierda-placaC-arriba	S275JR	275	3	109,312	2,515734778
C4-izquierda-vert-perpentic	S275JR	275	3	105,281	2,612057256
Soporte-barra-delante	S275JR	275	6	103,528	2,656286222
Soporte-Delante-shell	S275JR	275	8	103,084	2,66772729

Tabla 2: Resumen de los resultados para los componentes más cargados de la estructura de barras. Caso 1, carga gravedad, materiales S275JR y acero convencional.

6.2. CASO 2: CARGA DINÁMICA 5g

Las tensiones y desplazamientos que presentan las barras del pulverizador bajo la acción de una carga dinámica, es decir, una carga que soporta la estructura en función del tiempo (un intervalo de 3s), estableciendo una aceleración cinco veces mayor que la de la gravedad, 5g (condición extrema de trabajo del apero sobrepasando con creces la carga de su uso habitual) y usando como materiales el acero estructural S275JR y un acero genérico para el caso de las uniones, se exponen a continuación.

6.2.1. DESPLAZAMIENTOS

En este apartado se estudiarán los desplazamientos que se producen a lo largo de las barras del pulverizador a través del análisis de seis puntos representativos, uno al final de cada grupo de componentes como se describe en la figura 22, de esta forma se obtendrán los desplazamientos en función del tiempo de cada uno de ellos además de poder comparar los desplazamientos producidos entre los diferentes puntos para cada instante de tiempo. Para ello se generarán tablas y a partir de ellas gráficas de cada uno de estos nodos del modelo.

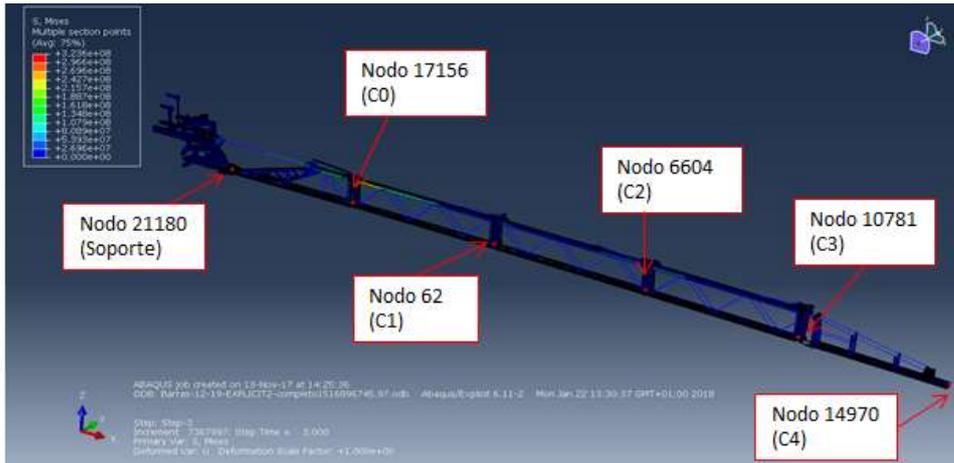


Figura 22: ubicación en el modelo de los nodos con los que se van a graficar los desplazamientos

Se evalúan los desplazamientos de estos nodos a lo largo de un intervalo de tiempo de 0 a 3 segundos, con 600 incrementos, es decir, se calculan los resultados para intervalos de 0.005 segundos.

En la figura 23 se observa una representación del desplazamiento de todos los nodos seleccionados juntos de forma que se puede comparar lo que se desplaza cada nodo para un mismo instante de tiempo. En el ANEXO C aparecen de forma detallada una gráfica para cada uno de los nodos además de otra igual a la de la figura 23.

El movimiento que realizan los seis nodos representativos es en todos los casos sinusoidal. Además, se ve que la onda que describen primero descende por la acción de la gravedad en torno los 0.5 segundos, rebota hasta llegar a un máximo y después empieza a oscilar. También se va amortiguando con el tiempo, disminuyendo su amplitud con el paso de los segundos. Si el intervalo de tiempo que se representa fuera mayor, al final aparecería completamente amortiguado para los seis nodos (cuando el tiempo tiende a infinito el desplazamiento tiende a cero). Se ve que conforme más cerca está del extremo de las barras, la oscilación que tiene es mayor. Mientras que los que están más próximos a la parte del soporte desarrollan una onda de gran amplitud cuando actúa la aceleración de 5g pero luego la oscilación es más leve.

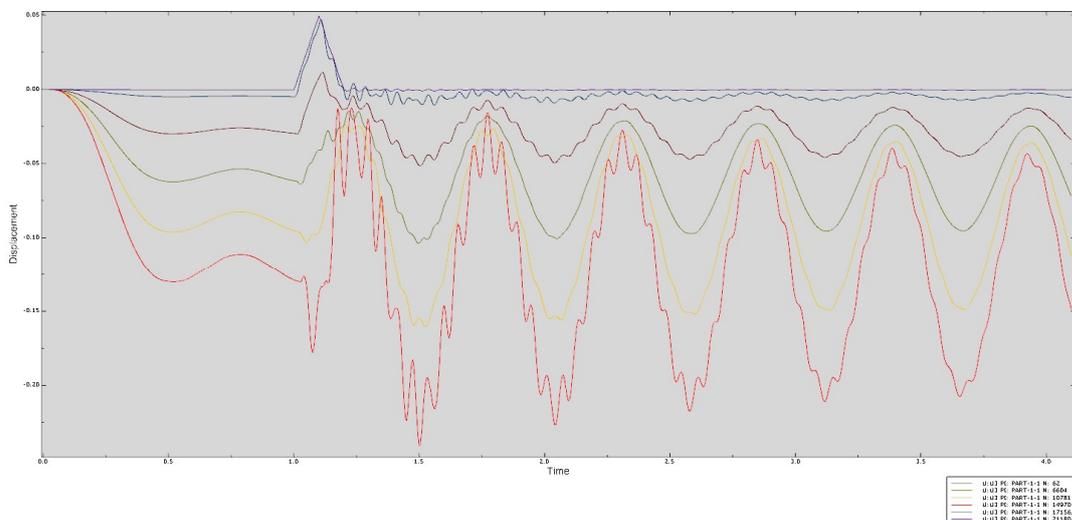


Figura 23: Distribución del desplazamiento en función del tiempo de los nodos seleccionados. 5

6.2.2. TENSIONES

Para cada instante de tiempo, las mayores tensiones estarán situadas en diferentes puntos de la estructura, por lo que en vez de mirar los resultados de cada componente del modelo para el mismo instante habrá que buscar dentro de un intervalo de tiempo la máxima tensión que soporta cada uno de los elementos estructurales.

A través de las gráficas de los desplazamientos para este caso de estudio se observa que los picos más altos aparecen en torno a 1.5s desde que el pulverizador empieza a oscilar para los nodos seleccionados en el apartado anterior de desplazamientos, por lo que se darán las mayores tensiones cerca de ese intervalo de tiempo. Aunque el punto de máximo desplazamiento no tiene por qué ser el de máxima tensión para un mismo elemento, pero sí estará cerca ya que, también las deformaciones en ese entorno serán mayores que en otro instante en el que se desplace menos.

Así, se va a proceder a buscar para cada uno de los componentes la mayor tensión en el intervalo de 1.1s a 1.8s, de esta manera se acota la búsqueda de tensiones en el rango donde serán mayores.

A continuación, se presenta la tabla 3 en la que aparecen los nombres de los componentes (y sus propiedades: material con el que se ha fabricado, el espesor que posee, el límite elástico, la tensión equivalente de Von Mises, el coeficiente de seguridad y el instante de tiempo en el que se da la máxima tensión) que soportan mayores tensiones, hay 35 en total, presentando un coeficiente de seguridad menor que 3. Estos componentes son las partes más críticas modelo y, por lo tanto, estos resultados serán los que se tengan en cuenta para el proceso posterior de optimización de las barras del pulverizador.

Además, en el ANEXO C aparecen las imágenes de cada uno de estos componentes y el lugar de las barras del pulverizador donde se encuentra. En el anexo D aparece una tabla similar a la 3 pero con la información de todos los sólidos que forman la estructura para este caso de estudio.

NOMBRE	MATERIAL	LÍMITE ELÁSTICO (MPa)	ESPESOR (mm)	TENSIÓN (MPa)	CS	tiempo (s)
C0-dcha-abajo-placaC	S275JR	275	6	209,14	1,31490867	1,51
C0-dcha-abajo-placaC-horizontal	S275JR	275	6	160,733	1,71091188	1,51
C0-dcha-vert	S275JR	275	3	138,528	1,98515824	1,48
C0-inferior	S275JR	275	3	247,864	1,10947939	1,5
C0-izq-abajo-placaC	S275JR	275	10	133,007	2,06756035	1,48
C0-placaGrande-triang-delante	S275JR	275	6	173,011	1,58949431	1,48
C0-placaGrande-triang-detrás	S275JR	275	6	169,449	1,62290719	1,48
C0-superior	S275JR	275	3	251,089	1,09522918	1,505
C0-superior-dcha-placaC	S275JR	275	6	242,429	1,13435274	1,505
C0-UnionCilindros-placaDelante	S275JR	275	10	114,931	2,39273999	1,48
C0-UnionCilindros-placaDetras	S275JR	275	10	184,415	1,49120191	1,48
C1-inferior	S275JR	275	2	240,784	1,14210247	1,48
C1-izquierda-vert	S275JR	275	3	241,048	1,14085161	1,48
C1-placaC-inf-dcha-finaHorizont	S275JR	275	6	150,687	1,82497495	1,505
C1-placaC-inf-derecha	S275JR	275	6	249,836	1,10072207	1,51
C1-placaC-inf-izquierda	S275JR	275	6	220,004	1,24997727	1,495
C1-placaC-sup-derecha	S275JR	275	6	123,978	2,21813548	1,45
C1-placaC-sup-izquierda	S275JR	275	6	246,523	1,11551458	1,505
C1-superior	S275JR	275	2	252,522	1,08901403	1,5
C2-derecha-vert	S275JR	275	3	104,083	2,64212215	1,51
C2-inferior	S275JR	275	1,5	239,271	1,14932441	1,51
C2-izquierda-vert	S275JR	275	3	142,356	1,93177667	1,51
C2-placaC-inf-izq	S275JR	275	6	268,27	1,02508667	1,51
C2-placaC-inf-izq-fina	S275JR	275	6	97,275	2,82703675	1,51
C2-placaC-sup-izq	S275JR	275	6	124,236	2,21352909	1,51
C2-superior	S275JR	275	1,5	196,451	1,39984016	1,505
C3-inferior	S275JR	275	1,5	154,457	1,7804308	1,275
C3-izq-abajo-placaC	S275JR	275	6	131,553	2,09041223	1,275
C3-superior	S275JR	275	1,5	95,81	2,87026406	1,485
C4-izquierda-infFinal-placa	S275JR	275	6	103,777	2,64991279	1,3
C4-izquierda-placaC-arriba	S275JR	275	3	149,271	1,84228685	1,42
C4-izquierda-vert-detrás	S275JR	275	3	150,062	1,83257587	1,48
C4-izquierda-vert-perpendic	S275JR	275	3	150,362	1,82891954	1,42
Soporte-barra-delante	S275JR	275	6	129,435	2,12461853	1,34
Soporte-Delante-Shell	S275JR	275	8	180,095	1,52697188	1,48

Tabla 3: Resumen de los resultados para los componentes más cargados de la estructura de barras. Caso 2, carga dinámica 5g

Se puede observar en la tabla 3 que todos los componentes presentan su máxima tensión entre 1.275 y 1.6 segundos. En el anexo D aparecen el resto de los elementos que forman el modelo y también cumplen que la mayor tensión que soportan está en este intervalo de tiempo.

6.3. CASO 3: CARGA DINÁMICA 2g

En este apartado se exponen las tensiones y desplazamientos que presentan las barras bajo la acción de una carga dinámica, en un intervalo de 3s, estableciendo una aceleración dos veces mayor que la de la gravedad, 2g (condición habitual de trabajo del apero, estableciendo una gran similitud con su uso cotidiano) y usando como materiales el acero estructural S275JR y un acero genérico para el caso de las uniones, se exponen a continuación. A parte de esta aceleración, para hacer que sea más realista el modelo, el instante en el que empieza a actuar la carga de la gravedad se ha adelantado de 0,5s a 0.3s, ya que se considera una aproximación mucho más realista que la de actuar 0.5 segundos después de que empiece la simulación.

6.3.1. DESPLAZAMIENTOS

Tal y como se ha hecho en el caso de la carga dinámica de 5g, en este apartado se estudiarán los desplazamientos que se producen a lo largo de las barras del pulverizador a través del análisis de los mismos seis puntos representativos que antes (figura 22). En la figura 24 aparece una gráfica de los desplazamientos de todos los nodos seleccionados juntos de forma que se puede comparar lo que se desplaza cada nodo para un mismo instante de tiempo. En el ANEXO C aparecen de forma detallada una gráfica para cada uno de los nodos además de otra igual a la de la figura 24.

El movimiento que realizan los seis nodos es sinusoidal. Además, la onda que describen desciende por la acción de la gravedad en torno los 0.5 segundos, rebota hasta llegar a un máximo y después empieza a oscilar. Luego se va amortiguando con el tiempo, disminuyendo su amplitud con el paso de los segundos.

Además, en este caso el instante en el que empieza a actuar la carga dinámica se ha adelantado de 1s (como estaba inicialmente) a comenzar justo después de que actúe la gravedad, ya que, de esta forma, se ahorra tiempo computacional ya que en ese intervalo que había antes entre la acción de la gravedad y la carga dinámica no ocurría ningún acontecimiento que diera lugar a tensiones significativas.

Este cambio puede apreciarse muy bien en las gráficas de los desplazamientos de los nodos, ya que se ve el primer salto y el rebote que éste supone al actuar la gravedad y las ondas que generan la carga dinámica más próximos entre sí.

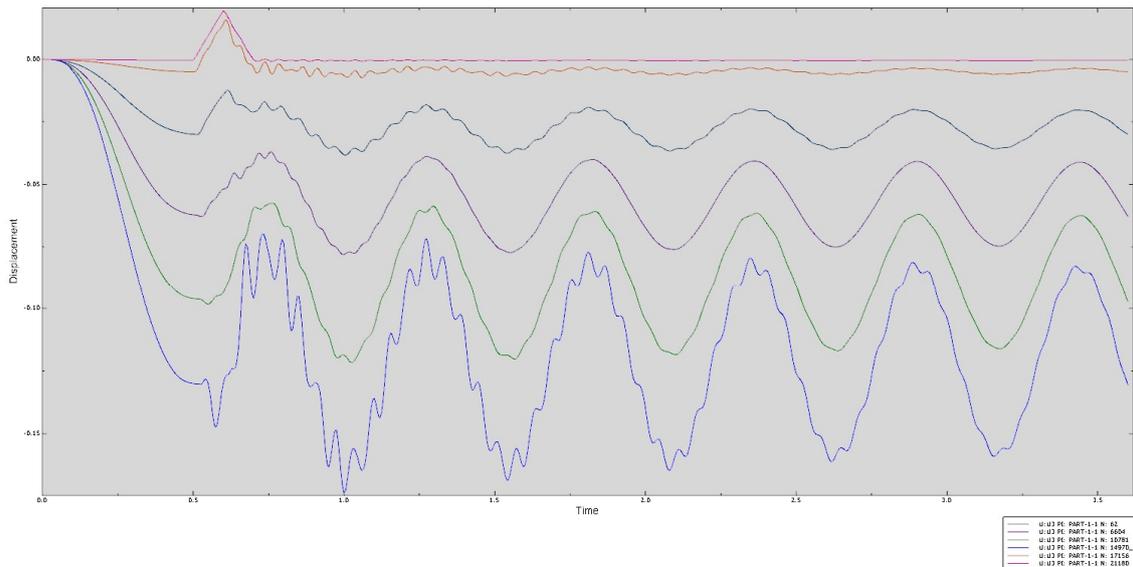


Figura 24: Distribución del desplazamiento en función del tiempo de los nodos seleccionados. 2g.3

Se puede ver fácilmente comparando la gráfica 24 con la 23 (la primera para el caso de 2g y la segunda para el de 5g) que en el de aceleración=5g, los nodos experimentan un desplazamiento máximo que es el doble al caso de $a=2g$, en el apartado de desplazamientos del caso 3 en el anexo C se puede ver un ejemplo de forma más detallada.

6.3.2. TENSIONES

Igual que en el caso 2, habrá que buscar dentro de un intervalo de tiempo la máxima tensión que soporta cada uno de los elementos estructurales.

A través de las gráficas de los desplazamientos para este caso de estudio (Figura 23) se observa que los picos más altos de desplazamiento aparecen en torno a 0.6s y 1s desde que el pulverizador empieza a oscilar, por lo que se darán las mayores tensiones cerca de ese intervalo de tiempo, pero no tienen por qué coincidir los puntos de tensión y desplazamiento máximos.

Así, se va a proceder a buscar para cada uno de los componentes la mayor tensión en el intervalo de 0.3s a 1.2s, de esta manera se acota la búsqueda de tensiones en el rango donde serán mayores.

En la tabla 4 se enumeran los nombres de los componentes (y sus propiedades) que soportan mayores tensiones, presentando un coeficiente de seguridad menor que 3, hay un total de 27. Estas piezas son las partes más críticas modelo y, por lo tanto, estos resultados serán los que se tengan en cuenta para el proceso posterior de optimización de este caso de estudio de las barras del pulverizador.

En el anexo C, aparecen las imágenes de las tensiones de estos componentes para ver de forma más detallada los resultados. En el anexo D aparece una tabla similar a la 4 pero con la información de todos los sólidos que forman la estructura para este caso de estudio.

NOMBRE	MATERIAL	LÍMITE ELÁSTICO (MPa)	ESPESOR (mm)	TENSION (MPa)	CS	tiempo (s)
C0-dcha-abajo-placaC	S275JR	275	6	213,309	1,28920955	0,39
C0-dcha-abajo-placaC-horiz	S275JR	275	6	123,925	2,21908412	0,39
C0-dcha-vert	S275JR	275	3	118,463	2,32139993	0,4
C0-inferior	S275JR	275	3	240,107	1,14532271	0,44
C0-izq-abajo-placaC	S275JR	275	10	120,648	2,27935813	0,46
C0-placaGrande-triang-delante	S275JR	275	6	145,627	1,88838608	0,46
C0-placaGrande-triang-detrás	S275JR	275	6	153,171	1,79537902	0,46
C0-superior	S275JR	275	3	209,723	1,31125342	0,395
C0-superior-dcha-placaC	S275JR	275	6	267,059	1,029735	0,395
C0-UnionCilindros-placaDelante	S275JR	275	10	103,233	2,66387686	0,46
C0-UnionCilindros-placaDetras	S275JR	275	10	154,677	1,77789846	0,46
C1-inferior	S275JR	275	2	236,071	1,16490378	0,44
C1-izquierda-vert	S275JR	275	3	213,507	1,28801398	0,405
C1-placaC-inf-derecha	S275JR	275	6	179,475	1,53224683	0,375
C1-placaC-inf-izquierda	S275JR	275	6	184,028	1,49433782	0,39
C1-placaC-sup-derecha	S275JR	275	6	134,027	2,05182538	0,43
C1-placaC-sup-izquierda	S275JR	275	6	275,138	0,99949843	0,435
C1-superior	S275JR	275	2	275,016	0,99994182	0,435
C2-inferior	S275JR	275	1,5	213,153	1,29015308	0,375
C2-izquierda-vert	S275JR	275	3	108,521	2,53407175	0,435
C2-placaC-inf-izq	S275JR	275	6	206,232	1,33344971	0,375
C2-superior	S275JR	275	1,5	143,321	1,91876975	0,43
C3-inferior	S275JR	275	1,5	130,356	2,10960754	0,375
C4-izquierda-placaC-arriba	S275JR	275	3	107,219	2,56484392	0,4
C4-izquierda-vert-perpendic	S275JR	275	3	124,07	2,21649069	0,345
Soporte-barra-delante	S275JR	275	6	122,076	2,25269504	0,425
Soporte-Delante-shell	S275JR	275	8	197,894	1,38963283	0,46

Tabla 4: Resumen de los resultados para los componentes más cargados de la estructura de barras. Caso 3, carga dinámica + carga de gravedad (2g)

Se puede observar que todos los componentes presentan su máxima tensión entre 0.375 y 0.46 segundos. Además, si se compara con el caso anterior, se puede ver que en este aparecen menos elementos con $CS < 3$ que en el caso anterior (en concreto 9 menos) como era de esperar ya que la carga dinámica a la que está sometido es más pequeña. En el anexo D aparecen el resto de los elementos que forman el modelo y también cumplen que la mayor tensión que soportan está en este intervalo de tiempo.

7. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

En los resultados del modelo para los tres casos hay componentes cuyo coeficiente de seguridad es menor al mínimo establecido para trabajar en condiciones de seguridad, por lo que las barras del pulverizador empezarán a fallar a través de estos componentes críticos. Para que esto no ocurra se realiza un proceso de optimización, en el que se mejoraran propiedades de los componentes críticos, como el material con el que se fabrican y/o el espesor.

Como se puede ver en el anexo E, si se comparan los resultados del caso estático con los dinámicos, realizados anteriormente, se observa que en los casos dinámicos los resultados son más desfavorables, por lo que se procederá a realizar la optimización partiendo de los resultados obtenidos en el segundo y tercer caso de estudio.

7.1. OPTIMIZACION MODELO 5G

Para este modelo se han llevado a cabo dos procesos de optimización, el primero de ellos consiste en cambiar el material de los componentes que presentaban un coeficiente de seguridad menor que 3 por el acero S355, que presenta un mayor límite elástico que el anterior, en la tabla 5, se pueden ver las propiedades de este nuevo material y compararse con el que se había usado anteriormente. En la figura 25 aparece la curva que describe el acero S355, y en la figura 15 se puede ver la del acero S275JR.

Propiedades	MATERIALES EMPLEADOS	
	S275JR	S355
Módulo de Young (MPa)	210000	210000
Coefficiente de Poisson	0,3	0,3
Densidad (Kg/m^3)	7800	7800
Límite de tracción (MPa)	410	500
Límite elástico (MPa)	275	355

Tabla 5: propiedades del acero S355 en comparación con el acero S275JR

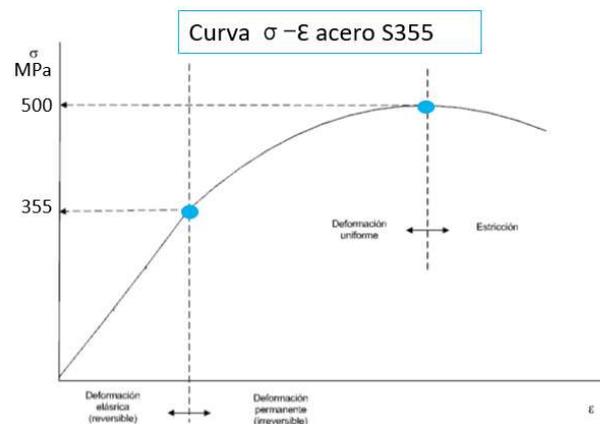


Figura 25: curva de comportamiento del acero S355

Además, en el caso de los componentes que tenían un coeficiente de seguridad menor que 2.3, se les ha modificado el espesor por otro más grueso, de unos 2 mm más en todos los casos, con el fin de que las piezas sean lo suficientemente gruesas como para soportar las tensiones que aparecen, pero sin que sean muy grandes para que no pesen demasiado ya que podría perjudicar a otras zonas de las barras del pulverizador.

La segunda optimización del caso de 5g es una pequeña modificación a partir de la optimización anterior que consiste en cambiar el tiempo en el que empieza a actuar la carga dinámica, de 1s a 0.6 s (para disminuir el tiempo de cálculo computacional). De esta forma tarda menos en calcularse y el momento en el que se da la acción de la gravedad y la de la carga dinámica están más próximos que en modelos anteriores.

(También se usa esta modificación en los modelos de 2g, tanto el original como en los optimizados). Este cambio de la segunda optimización puede apreciarse muy bien en las gráficas de los desplazamientos de los nodos.

En el anexo E se explica de forma más detallada este proceso de optimización. Y en el anexo F y en el G los resultados obtenidos para los diferentes componentes

7.1.1. PRIMERA OPTIMIZACIÓN. RESULTADOS MODELO 5g

Para obtener los resultados se procede de la misma forma que en los casos de antes de realizar la optimización. Aparecen de forma extendida en el anexo F.

7.1.1.1. DESPLAZAMIENTOS

Como se aprecia en la figura 26, las trayectorias de los nodos son muy parecidas a las del modelo inicial, sin embargo la gráfica cambia en torno al punto en el que empieza a actuar la gravedad (en el intervalo de 0.5 a 1 aproximadamente), y es que en este caso la onda que aparece en ese intervalo es menor que en el caso anterior, ya que al poner algunos componentes con un material de mayor límite elástico y aumentar el espesor, se rigidiza más la estructura y el impacto inicial que sufre por la gravedad se atenúa. El resto de la gráfica que describe un movimiento sinusoidal después del primer rebote es similar al primer caso en todo el pulverizador, se observa gran similitud en esa parte de las gráficas entre este caso de optimización y el original.

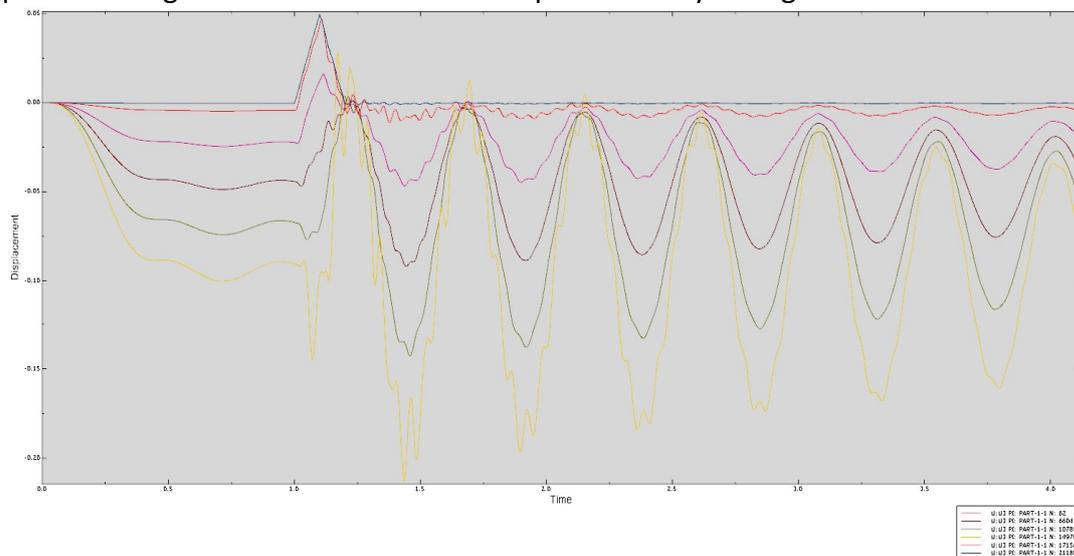


Figura 26: Distribución del desplazamiento en función del tiempo de los nodos seleccionados. Primera optimización.4

7.1.1.2. TENSIONES

Pese a haberse realizado una optimización, sigue habiendo componentes que no cumplen con el coeficiente de seguridad mínimo permitido, aunque hayan aumentado algo (aparecen las imágenes del mapa de tensiones y su tensión máxima en el anexo F) por lo que se deberán estudiar nuevos casos hasta obtener uno que sea óptimo.

Sin embargo, en el anexo G donde aparece la tabla G.1, se puede destacar que en muchos componentes que antes ya cumplían con el requisito de $CS < 3$, ha aumentado la

tensión a la que se someten sin sobrepasar este límite establecido, por ello se deduce que en estas piezas también se ha optimizado el material ya que ahora cada pieza está más cerca del necesario para no sobrepasar el $CS=3$ sin tener coeficientes de seguridad muy grandes que indican cierto grado de derroche de material, al usar más del que se necesita.

En el anexo F aparecen las imágenes de cada uno de los componentes que soportan mayores tensiones. También se exponen en la tabla F.1 a modo resumen los datos de estas piezas. Y en el anexo G, aparece en la tabla G.1 la misma información que en la F.1 pero para todas las piezas del modelo. En total hay 31 componentes con un $CS < 3$.

7.1.2. SEGUNDA OPTIMIZACIÓN. RESULTADOS MODELO 5G

7.1.2.1. DESPLAZAMIENTOS

En esta optimización puede percibir el efecto de adelantar el instante en el que actúa la carga dinámica, estando ahora más cerca de la gravedad. Las gráficas de los nodos seleccionados presentan su curva desplazada más a la izquierda que en casos anteriores, aunque siguen teniendo una forma similar al de la primera optimización ya que las condiciones geométricas y de materiales son las mismas. También sigue describiendo un movimiento sinusoidal que se va amortiguando poco a poco después del primer rebote, pero la carga dinámica ahora se da en torno al instante de 0.6s en vez de en 1s. Se pueden ver estos resultados en la figura 27 y de forma extendida en el anexo E.

Se ha realizado esta modificación con el fin de optimizar el tiempo de cálculo computacional, ya que, en el primer modelo y en la primera optimización, desde que actuaba la gravedad hasta que aparecía la acción de la carga dinámica, había un intervalo de tiempo en el que no se daban tensiones significativas, por lo que era innecesario. De esta forma eliminando ese intervalo aparece la carga dinámica más cerca de la de la gravedad y se ahorra tiempo de cálculo, que era el principal objetivo. Esta mejora se usa también para todos los modelos de 2g, tanto el original como los optimizados.

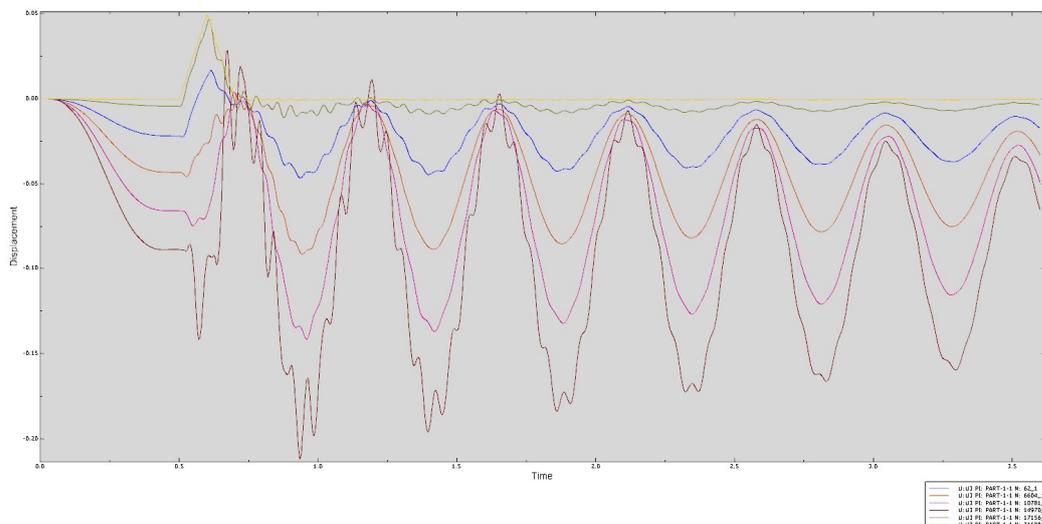


Figura 27: Distribución del desplazamiento en función del tiempo de los nodos seleccionados. Segunda optimización5

7.1.2.2. TENSIONES

En este caso la influencia de la gravedad es mayor ya que es en torno al punto donde empieza a actuar donde aparecen las tensiones más altas a diferencia de los otros casos que se daba en el momento en el que el modelo empezaba a oscilar.

Cabe destacar que este hecho hace que muchos componentes que antes cumplían la condición de que el coeficiente de seguridad fuera mayor que tres ya no la cumplen, pasando a ser partes desfavorables de la estructura.

En el anexo F aparecen las imágenes de cada uno de los componentes que soportan mayores tensiones. También se exponen en la tabla F.2 a modo resumen los datos de estas piezas. Y en el anexo G, aparece en la tabla G.2 la misma información que en la F.2 pero para todas las piezas del modelo para este caso de estudio.

7.2. OPTIMIZACIÓN MODELO 2G

En este caso también se han realizado dos procesos de optimización. En el primero se ha llevado a cabo el mismo procedimiento que en la primera optimización de 5g, con los mismos materiales y dimensiones de las piezas para todos los componentes, con la salvedad de que la carga dinámica aplicada en ese caso tiene una aceleración=2g en vez de 5g como era antes, pero en cuanto a materiales y espesores, como ya se ha dicho son iguales. Se puede ver la descripción en el apartado 7.1. OPTIMIZACIÓN MODELO 5G, y también los datos de materiales y espesores que se han utilizado en el anexo E de forma más detallada.

Además, para este caso, a diferencia con la primera optimización de 5g se ha modificado el tiempo en el que empieza a actuar la carga dinámica, de 1s a 0.6 s (para disminuir el tiempo de cálculo computacional).

La segunda optimización del caso de 2g se ha partido del modelo de la optimización de 2g anterior (tercera optimización de este trabajo), se ha hecho una mejora ya que el de antes seguía sin cumplir los requerimientos exigidos.

Para ello, se ha cambiado el material de los componentes que presentaban un coeficiente de seguridad menor que 3 por el acero STREX700MC que presenta un mayor límite elástico que los anteriores. Además, para elevar el límite elástico de algunos componentes que cumplían con el requisito, pero era muy cercano a 3, se ha puesto como material el S355 por si aumentaba en estos las tensiones al hacer el nuevo cálculo y se quedaba con un $CS < 3$. Para el resto que presentaban tensiones menores se ha dejado el S275JR, ya que se considera que es más que suficiente con este material para determinadas piezas.

En la tabla 6 se puede ver el nuevo material, STREX700MC, junto con las propiedades de los materiales ya definidos previamente. Y en la figura 28 aparece su curva σ - ϵ .

Por otro lado, el espesor de las piezas es el mismo que en el resto de los procesos de optimización anteriores, rigidizándose respecto del primer modelo añadiendo 2mm a los componentes más críticos del modelo inicial.

	MATERIALES OPTIMIZACIÓN 2		
Propiedades	S275JR	S355	STRENX700MC
Módulo de Young (MPa)	210000	210000	210000
Coefficiente de Poisson	0,3	0,3	0,3
Densidad (Kg/m^3)	7800	7800	7800
Límite de tracción (MPa)	410	500	700
Límite elástico (MPa)	275	355	750

Tabla 6: propiedades de los aceros empleados

En la tabla E5 del anexo E se presenta un resumen de las mejoras citadas en este apartado, donde aparece para cada componente el material utilizado y su límite elástico y el espesor. La elección de los distintos materiales para cada componente depende del coeficiente de seguridad obtenido en la optimización anterior de 2g, es decir, se ha partido de este modelo para cambiar los nuevos materiales.

En los anexos F y G aparecen los resultados obtenidos de este proceso de optimización, tanto tensiones como desplazamientos.

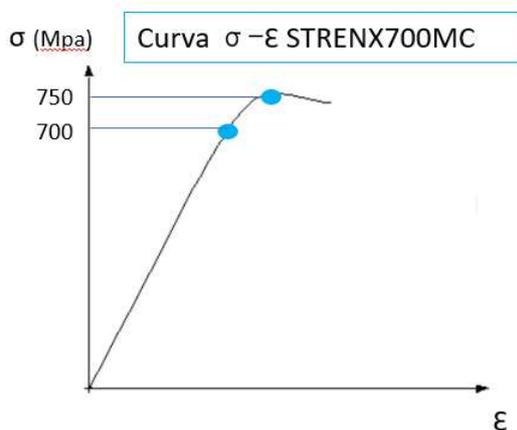


Figura 28: curva de comportamiento del acero STRENX700MC

7.2.1. TERCERA OPTIMIZACIÓN. RESULTADOS MODELO 2G

7.2.1.1. DESPLAZAMIENTOS

En la figura 29 se observa una gráfica de los seis nodos representativos para este tercer caso de optimización (que corresponde al primer caso para el modelo de 2g).

Si se comparan estos desplazamientos con los de los modelos de 5g optimizados y con el original de 2g, se ve claramente que las gráficas siguen teniendo una forma sinusoidal amortiguada similar ya que las condiciones geométricas y de materiales son las mismas, pero los desplazamientos son mucho menores (en el apartado de *DESPLAZAMIENTOS* de la *TERCERA OPTIMIZACIÓN* del anexo F se expresa estas diferencias en los desplazamientos con valores numéricos). Por lo que tanto cambiar el espesor de algunas piezas e introducir una carga menor hace que los desplazamientos sean más pequeños. Se puede percibir también el efecto de cambiar el instante en el que actúa la gravedad, ya que todas las gráficas presentan su curva desplazada más a la izquierda que en casos anteriores, tal y como se ha explicado en el apartado 7.1.2. *SEGUNDA OPTIMIZACIÓN, RESULTADOS 5G*.

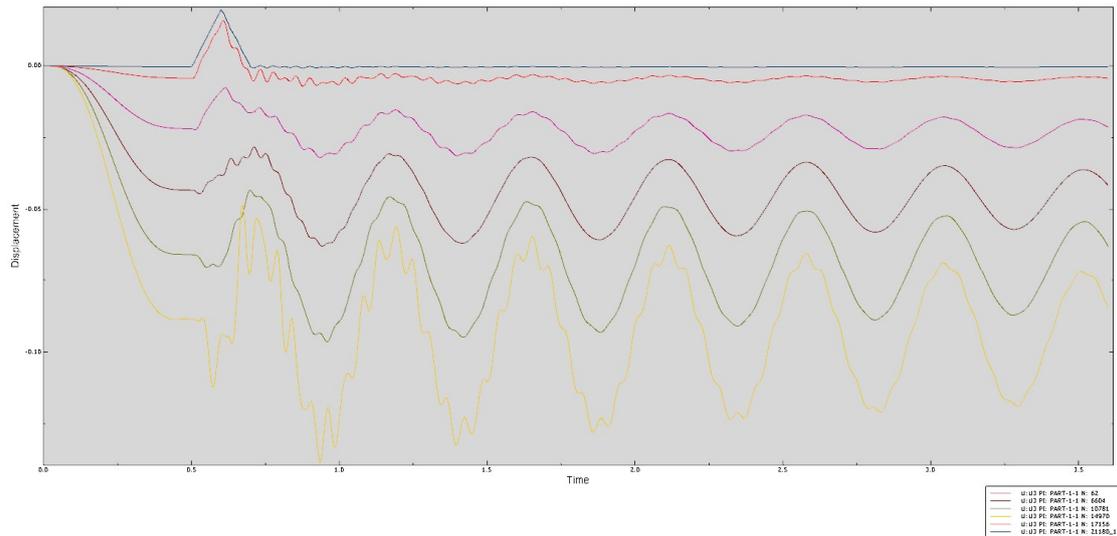


Figura 29: Distribución del desplazamiento en función del tiempo de los nodos seleccionados. Tercera optimización

7.2.1.2. TENSIONES

Después de este proceso sigue habiendo componentes que no cumplen con el coeficiente de seguridad establecido, ha disminuido bastante el número con respecto a los casos anteriores, aparecen 16 componentes. Muchos de los que antes no cumplían este requisito han mejorado notablemente. Además, en otros que antes ya tenían un coeficiente de seguridad mayor que 3 ha aumentado la tensión a la que se someten sin sobrepasar este límite establecido, por ello se deduce que en estas piezas también se ha optimizado el material ya que ahora no sobrepasa el $CS=3$ y sin tener coeficientes de seguridad excesivamente grandes.

Por consiguiente, habrá que seguir mejorando las propiedades de los componentes que todavía son desfavorables para obtener un modelo en el que todas sus partes tengan un $CS>3$.

En el anexo F, se presentan las imágenes de los componentes más críticos del modelo. También se exponen en la tabla F.3, para cada uno de ellos, los datos representativos que poseen. En el anexo G aparece una tabla similar a la F.3 (la tabla G.3) pero con la información de todos los sólidos que forman la estructura para este caso de estudio.

7.2.2. CUARTA OPTIMIZACIÓN. RESULTADOS MODELO 2G

7.2.2.1. DESPLAZAMIENTOS

En la figura 30 se observa una representación de los 6 nodos elegidos juntos en la que se aprecia el movimiento sinusoidal que se va amortiguando para cada uno de ellos. Si se comparan estos desplazamientos con los de la optimización anterior de 2g, se ve que las gráficas siguen teniendo una forma similar, además los desplazamientos de cada nodo son prácticamente los mismos en cada punto (en el apartado *DESPLAZAMIENTOS*, de la *CUARTA OPTIMIZACIÓN* del anexo F se puede ver un ejemplo numérico en el que se ve que el desplazamiento en un instante para el mismo nodo es similar en ambos modelos).

Esto se debe a que, aunque se hayan cambiado los materiales, las cargas que soporta siguen siendo parecidas y los espesores permanecen también igual entonces la estructura se mueve lo mismo. Pero a la hora de obtener el coeficiente de seguridad sí que se verá mejora, ya que, aunque los resultados de tensiones vayan a ser parecidos, como se han usado materiales con límite elástico mayor, será más fácil que los componentes cumplan con el CS mínimo.

Se puede percibir también el efecto de cambiar el instante en el que actúa la gravedad, (quitando los instantes de tiempo iniciales en los que no ocurría nada) ya que las curvas de todos los nodos están desplazadas a la izquierda.

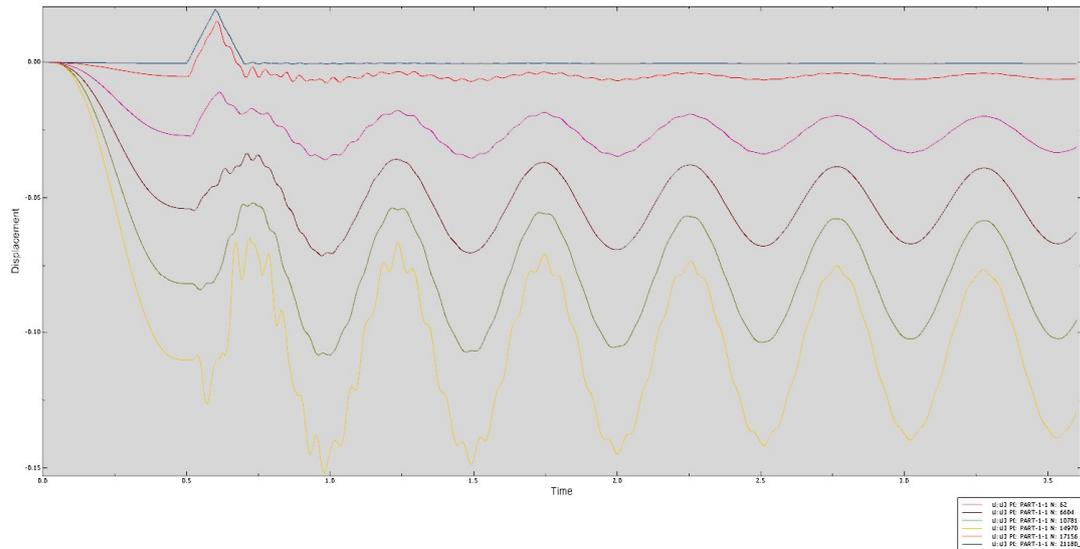


Figura 30: Distribución del desplazamiento en función del tiempo de los nodos seleccionados. Cuarta optimización.7

7.2.2.2. TENSIONES

Después de esta optimización ya no aparecen componentes con el $CS < 3$, es decir, todos ellos cumplen con la condición de tener un coeficiente de seguridad superior al mínimo permitido que era el objetivo que se estaba buscando.

Por lo tanto, se considera que en esta situación, el pulverizador de barras podrá trabajar en condiciones de seguridad sin que se produzcan fallos en el mismo. Se podrían seguir haciendo más mejoras hasta encontrar el material y medida idóneos para cada uno de los componentes, pero como se puede ver en la tabla G.4 del anexo G, la mayoría de ellos no tiene coeficientes de seguridad excesivamente grandes (que indicarían que se podría usar otro material de menor límite elástico o menor grosor de la pieza).

De acuerdo con los resultados obtenidos, se cree conveniente elegir los datos de características de cada componente, tanto material como espesor, de esta última optimización (ver tabla E.5, anexo E) ya que cumple con los requisitos establecidos de partida en este trabajo.

En la tabla G.4 del anexo G se recogen los los datos de material con el que se ha fabricado, el espesor que posee, el límite elástico, la tensión equivalente de Von Mises, el coeficiente de seguridad y el instante de tiempo en el que se da la máxima tensión de todos los sólidos que forman la estructura para este caso de estudio.

8. CONCLUSIONES

El presente Trabajo de Fin de Grado *Análisis y optimización del diseño inicial de un pulverizador de barras de 26 metros de pluma* ha sido realizado para analizar y optimizar el diseño de las barras de un pulverizador agrícola existente destinado a realizar tratamientos en explotaciones agropecuarias, del fabricante *Industrias Sanz*, el cual no ha sido analizado en detalle con las solicitaciones a las que se expone en el trabajo diario en campo.

Por ello a partir de un modelo 3D de la geometría inicial del pulverizador proporcionado por el fabricante, se ha realizado la discretización del mismo mediante Patran. Una vez discretizado se ha analizado numéricamente el apero por el Método de los Elementos Finitos, mediante el software Abaqus para obtener las tensiones y los desplazamientos de cada componente del modelo. Con la condición de que todos los componentes tengan un coeficiente de seguridad menor que 3.

Para ello se han establecido tres casos. En primer lugar, se han calculado los esfuerzos de las barras del pulverizador en caso estático, trabajando bajo la acción de la gravedad, es decir, con el apero enganchado en la parte central y suspendido en el aire soportando su propio peso.

En segundo lugar, se ha realizado un cálculo con el apero sometido a esfuerzos dinámicos que se producen en función del tiempo bajo una carga cuya aceleración es de magnitud 5-g, (condición extrema de trabajo utilizando el apero) es decir, el peor de los casos de uso al que podría someterse, sobrepasando la carga de su uso cotidiano.

El tercer análisis se basa en un cálculo con el apero sometido también a esfuerzos dinámicos, pero en este caso la aceleración es de magnitud 2 veces la aceleración de la gravedad, que sería la condición habitual de trabajo en la realidad, además se hará un cambio en el tiempo en el que va a actuar la carga dinámica.

En los tres casos analizados se han obtenido componentes con un $CS < 3$, por lo que se ha procedido a optimizar el modelo a partir de los datos de los dos casos dinámicos (el de 5g y el de 2g), ya que sus resultados son peores que el caso en el que solo actúa la gravedad, además de que esta carga también va incluida en los dos casos dinámicos. Se han realizado cuatro optimizaciones, dos para el caso de 5g y otras dos para el de 2g, en las que se han cambiado materiales, espesores y tiempos de cálculo computacional.

Finalmente, en la cuarta optimización (la segunda que se ha hecho para el caso de 2g), todos los componentes que forman el modelo han tenido resultados de tensiones tales que ninguno de ellos sobrepasa el coeficiente de seguridad establecido, pero en alguno se ha usado el material STREX7000MC cuyo límite elástico es muy alto, aunque es menos dúctil que el S275JR o el S355. Por lo que de esta forma se podría trabajar en condiciones de seguridad.

Se podría seguir optimizando hasta encontrar un material y espesor que fuera idóneo para cada componente, pero con estos resultados para el modelo de 2g se cumple el objetivo del trabajo. Sin embargo, para el caso de 5g no se ha llegado a optimizar ya que al ser un caso en el que las cargas son muy altas (condiciones extremas de trabajo), por lo que se recomienda no dar lugar a que aparezcan estas cargas dándole al apero un uso normal y cotidiano de trabajo y no forzarlo en exceso.

9. BIBLIOGRAFÍA

Para la realización de este trabajo de fin de grado se ha consultado la siguiente documentación.

1. Esta página fue utilizada para obtener la definición de pulverizador agrícola:

Ministerio del medio ambiente, medio rural y marino 2008. *Plataforma de conocimiento para el medio rural y pesquero.*

http://www.mapama.gob.es/es/ministerio/servicios/informacion/pulv-hidr-barras_tcm7-342315.pdf

2. Para las imágenes reales del pulverizador se ha consultado el catálogo online del fabricante:

Industrias Sanz. <http://www.isanz.com/>

Industrias Sanz. *Catálogo pulverizador suspendido SU.*

http://www.sanzagricola.com/wp-content/uploads/2014/12/catalogo_sanz_SU.pdf

3. Para la realización del modelo en Patran primero se consultó el manual de Patran, además de varios tutoriales de ejemplos de ejercicios.

MSC Software. *Patran Docs.*

https://simcompanion.mscsoftware.com/infocenter/index?page=content&channel=DOCUMENTATION&cat=PATRAN_DOCUMENTATION