

Trabajo Fin de Máster

Análisis comparativo del diseño de palas
cargadoras para tractor en función del material
de fabricación

English title: Comparative analysis of the design
of front-end loaders for tractor depending on
the manufacturing material

Autor

Enrique Garcés Usán

Director

Hugo Malón Litago

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Universidad de Zaragoza

Año 2020



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe entregarse en la Secretaría de la EINA, dentro del plazo de depósito del TFG/TFM para su evaluación).

TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER

D./D^a. ENRIQUE GARCES USAN ,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)
Master de Ingeniería Industrial (Título del Trabajo)

Análisis comparativo del diseño de palas cargadoras para tractor en función del material de fabricación.

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

Zaragoza, 1 de Noviembre de 2020

Fdo:

Máster en Ingeniería Industrial

RESUMEN

Título: "Análisis comparativo del diseño de palas cargadoras para tractor en función del material de fabricación".

Title: "Comparative análisis of the design of front loaders for tractors depending on the manufacturing material"

En este documento se presenta el Trabajo de Fin de Máster realizado por el alumno, en cuanto al análisis comparativo del diseño de palas cargadoras para tractor en función del material de fabricación. Se han utilizado los diseños y planos de los elementos que forman la pala cargadora, que fabrica Maquinaria Agrícola El León, para realizar el modelado 3D. Se realiza el ensamblaje de todos los componentes de la pala cargadora, y un estudio de cargas para analizar las tensiones y deformaciones que se generan en ella.

El trabajo realizado se ha llevado a cabo en Maquinaria Agrícola El León. Se realizó un listado de los componentes que forman la pala cargadora. Lo siguiente es el modelado 3D de los elementos para realizar el ensamblaje de la pala cargadora. Finalmente se realizará un estudio sobre las tensiones que se generan en la pala cargadora según el material de fabricación.

INDICE

1.INTRODUCCIÓN	10
2.OBJETIVO	11
3. DESCRIPCIÓN DE LA PALA CARGADORA.....	12
4. ANÁLISIS NUMÉRICO	15
4.1 MODELO 3D DE LA PALA CARGADORA	15
4.2 MODELO NUMÉRICO.....	16
4.3 MATERIALES	18
4.4 CONDICIONES DE CONTORNO	19
4.5 CASOS DE CARGA	20
4.6 CRITERIO ADOPTADOS EN EL ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA PALA CARGADORA ..	22
4.6.1 CRITERIO DE RESISTENCIA.....	22
4.6.2 CRITERIO DE RIGIDEZ.....	24
5. RESULTADOS	26
5.1 SIMULACIÓN 1.....	26
5.1.1 PALA CARGADA ABAJO	26
5.1.2 PALA EMPUJE FRONTAL	27
5.1.3 PALA CARGADA ARRIBA	28
5.2 SIMULACIÓN 2.....	29
5.2.1 PALA CARGADA ABAJO	29
5.2.2 PALA EMPUJE FRONTAL	30
5.2.3 PALA CARGADA ARRIBA	31
5.3 SIMULACIÓN 3.....	32
5.3.1 PALA CARGADA ABAJO	32
5.3.2 PALA EMPUJE FRONTAL	33
5.3.3 PALA CARGADA ARRIBA	34
6. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS SEGÚN CRITERIOS DE RIGÍDEZ Y RESISTENCIA ...	36
6.1 TENSIONES CON LA PALA CARGADA ABAJO	37
6.2 TENSIONES CON LA PALA EMPUJE FRONTAL.....	38
6.3 TENSIONES CON LA PALA CARGADA ARRIBA.....	39
6.4 ANALISIS DESPLAZAMIENTOS.....	40
7.CONCLUSIONES	42
8.REFERENCIAS.....	43
ANEXOS	44
Anexo: Software de diseño 3D y simulación de estudios de carga.....	45
Anexo: Diseño 3D de los componentes de la pala cargadora	45

Máster en Ingeniería Industrial

PIEZAS.....	46
SUBENSAMBLAJE.....	47
CHAPA	49
CILINDROS	53
CASQUILLOS	54
BULONES	55
Anexo: Resultados de las 3 Simulaciones analizadas.....	56
SIMULACIÓN 1.....	56
SIMULACIÓN 2.....	69
SIMULACIÓN 3.....	79
ANEXO: Tabla de equivalencias de los aceros.....	89
ANEXO: Propiedades mecánicas aceros.....	90
ANEXO: Folleto Pala cargadoraMaquinaria Agrícola El Leon	91
ANEXO: Características de aceros especiales Ipargama S.L.	92

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1:Partes pala cargadora.....	12
Ilustración 2:Amarre de tractor.....	13
Ilustración 3:Pala cargadora ensamblada.	16
Ilustración 4:Malla de la pala general.	17
Ilustración 5:Malla en detalle de la pala.	17
Ilustración 6:Restricciones y conectores de la pala cargadora.	20
Ilustración 7: Pala abajo cargada.	21
Ilustración 8:Pala abajo y empuje frontal.	21
Ilustración 9:Pala arriba cargada.....	22
Ilustración 10:Detalle punta delantera del brazo	24
Ilustración 11:S1, Pala cargada abajo tensiones.	27
Ilustración 12: S1, Pala empuje frontal tensiones.....	28
Ilustración 13:S1, Pala cargada arriba tensiones.	29
Ilustración 14:S2, Pala cargada arriba tensiones.	30
Ilustración 15: S2, Pala empuje frontal tensiones.....	31
Ilustración 16:S2, Pala cargada arriba tensiones.	32
Ilustración 17:S3, Pala cargada abajo tensiones.	33
Ilustración 18:S3, Pala empuje frontal tensiones.....	34
Ilustración 19:S3, Pala cargada arriba tensiones.	35
Ilustración 20:Buje	46
Ilustración 21:Barra de enganche inferior	46
Ilustración 22:Paralelogramo	47
Ilustración 23:Cuchara de áridos.....	48
Ilustración 24:Enganche	48
Ilustración 25:Pilarete	49
Ilustración 26:Plegado de brazo trasero	50
Ilustración 27:Plegado de brazo delantero	50
Ilustración 28:Crucero	51
Ilustración 29:Chapa lateral de brazo	51
Ilustración 30:Biela.....	52
Ilustración 31:Barra paralelográfica	52
Ilustración 32:Cilindro de elevación.....	53
Ilustración 33:Cilindro de volteo	54
Ilustración 34:Casquillo	54
Ilustración 35:Bulón	55
Ilustración 36: S1, Pala abajo cargada 10000N general.	56
Ilustración 37:S1, Pala cargada abajo 10000N detalle tensiones.	57
Ilustración 38:S1, Pala cargada abajo 10000N detalle movimiento.	57
Ilustración 39:S1, Pala cargada abajo 20000N general	58
Ilustración 40:S1, Pala cargada abajo 20000N detalle tensiones	58
Ilustración 41:S1, Pala cargada abajo 20000N detalle movimiento	59
Ilustración 42:S1, Pala cargada abajo 30000N general	59
Ilustración 43:S1, Pala cargado abajo 30000N detalle tensiones	60
Ilustración 44:S1, Pala cargada abajo 30000N detalle movimiento	60
Ilustración 45:S1, Pala empuje frontal 10000N general	61
Ilustración 46:S1, Pala empuje frontal 10000N detalle tensiones	61

Ilustración 47:S1, Pala empuje frontal 10000N detalle movimiento	61
Ilustración 48:S1, Pala empuje frontal 20000N general	62
Ilustración 49:S1, Pala empuje frontal 20000N detalle tensiones	62
Ilustración 50:S1, Pala empuje frontal 20000N detalle movimiento	63
Ilustración 51:S1, Pala empuje frontal 30000N general	63
Ilustración 52:S1, Pala empuje frontal 30000N detalle tensiones	64
Ilustración 53:S1, Pala empuje frontal 30000N detalle movimiento	64
Ilustración 54:S1, Pala cargada arriba 10000N general	65
Ilustración 55:S1, Pala cargada arriba 10000N detalle tensiones.....	65
Ilustración 56:S1, Pala cargada arriba 10000N detalle movimiento.....	65
Ilustración 57:S1, Pala cargada arriba 20000N general	66
Ilustración 58:S1, Pala cargada arriba 20000N detalle tensiones.....	66
Ilustración 59:S1, Pala cargada arriba 20000N detalle movimiento.....	67
Ilustración 60:S1, Pala cargada arriba 30000N general	67
Ilustración 61:S1, Pala cargada arriba 30000N detalle tensiones.....	68
Ilustración 62:S1, Pala cargada arriba 30000N detalle movimiento.....	68
Ilustración 63:S2, Pala cargada abajo 20000N general	70
Ilustración 64:S2, Pala cargada abajo 20000N detalle tensiones	70
Ilustración 65:S2, Pala cargada abajo 20000N detalle movimiento	71
Ilustración 66:S2, Pala cargada abajo 30000N general	71
Ilustración 67:S2, Pala cargada abajo 30000N detalle tensiones	72
Ilustración 68S2, Pala cargada abajo 30000N detalle movimiento.....	72
Ilustración 69:S2, Pala empuje frontal 20000N general	73
Ilustración 70:S2, Pala empuje frontal 20000N detalle tensiones	73
Ilustración 71:S2, Pala empuje frontal 20000N detalle movimiento.....	74
Ilustración 72:S2, Pala empuje frontal 30000N general	74
Ilustración 73:S2, Pala empuje frontal 30000N detalle tensiones	75
Ilustración 74 :S2, Pala empuje frontal 30000N detalle movimiento.....	75
Ilustración 75:S2, Pala cargada arriba 20000N general	76
Ilustración 76:S2, Pala cargada arriba 20000N detalle tensiones.....	76
Ilustración 77:S2, Pala cargada arriba 20000N detalle movimiento.....	77
Ilustración 78:S2, Pala cargada arriba 30000N general	77
Ilustración 79:S2, Pala cargada arriba 30000N detalle tensiones.....	78
Ilustración 80:S2, Pala cargada arriba 30000N detalle movimiento.....	78
Ilustración 81:S3, Pala cargada abajo 20000N general	80
Ilustración 82:S3, Pala cargada abajo 20000N detalle tensiones	80
Ilustración 83:S3, Pala cargada abajo 30000N detalle movimiento	81
Ilustración 84:S3, Pala cargada abajo 30000N general	81
Ilustración 85:S3, Pala cargada abajo 30000N detalle tensiones	82
Ilustración 86:S3, Pala cargada abajo 30000N detalle movimiento	82
Ilustración 87:S3, Pala empuje frontal 20000N general	83
Ilustración 88:S3, Pala empuje frontal 20000N detalle tensiones.....	83
Ilustración 89:S3, Pala empuje frontal 20000N detalle movimiento.....	84
Ilustración 90:S3, Pala empuje frontal 30000N general	84
Ilustración 91:S3, Pala empuje frontal 30000N detalle tensiones	85
Ilustración 92:S3, Pala empuje frontal 30000N detalle movimiento.....	85
Ilustración 93:S3, Pala cargada arriba 20000N general	86
Ilustración 94:S3, Pala cargada arriba 20000N detalle tensiones.....	86

Ilustración 95:S3, Pala cargada arriba 20000N detalle movimiento.....	87
Ilustración 96:S3, Pala cargada arriba 30000N general	87
Ilustración 97:S3, Pala cargada arriba 30000N detalle tensiones.....	88
Ilustración 98:S3, Pala cargada arriba 30000N detalle movimiento.....	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Mallado con Pala cargada abajo.....	18
Tabla 2: Mallado con Pala empuje frontal.....	18
Tabla 3: Mallado con Pala cargada arriba.....	18
Tabla 4: Coeficientes N_y , método Pugsley.....	23
Tabla 5: Coeficientes N_x , método Pugsley.....	23
Tabla 6: Coeficientes de seguridad en cálculos estáticos.....	24
Tabla 7: S1, Pala cargada abajo tensiones.....	26
Tabla 8: S1, Pala cargada abajo desplazamientos.....	26
Tabla 9: S1, Pala empuje frontal tensiones.....	27
Tabla 10: S1, Pala empuje frontal desplazamientos.....	27
Tabla 11: S1, Pala cargada arriba tensiones.....	28
Tabla 12: S1, Pala cargada arriba desplazamientos.....	28
Tabla 13: S2, Pala cargada abajo tensiones.....	29
Tabla 14: S2, Pala cargada abajo desplazamientos.....	29
Tabla 15: S2, Pala empuje frontal tensiones.....	30
Tabla 16: S2, Pala empuje frontal desplazamientos.....	30
Tabla 17: S2, Pala cargada arriba tensiones.....	31
Tabla 18: S2, Pala cargada arriba desplazamientos.....	31
Tabla 19: S3, Pala cargada abajo tensiones.....	32
Tabla 20: S3, Pala cargada abajo desplazamientos.....	32
Tabla 21: S3, Pala empuje frontal tensiones.....	33
Tabla 22: S3, Pala empuje frontal desplazamientos.....	33
Tabla 23: S3, Pala cargada arriba tensiones.....	34
Tabla 24: S3, Pala cargada arriba desplazamientos.....	34
Tabla 25: Materiales de fabricación de la pala cargadora en cada simulación.....	36
Tabla 26: Límites elásticos de los materiales de fabricación.....	36
Tabla 27: Tensiones de S1 a 10000N y pala cargada abajo.....	37
Tabla 28: Tensiones S1 a 10000N y pala empuje frontal.....	37
Tabla 29: Tensiones S1 a 10000N y pala cargada arriba.....	37
Tabla 30: Comparación tensiones a 20000N con pala cargada abajo.....	37
Tabla 31: Comparación tensiones a 30000N con pala cargada abajo.....	38
Tabla 32: Comparación tensiones a 20000N con pala empuje frontal.....	38
Tabla 33: Comparación tensiones a 30000N con pala empuje frontal.....	38
Tabla 34: Comparación tensiones a 20000N con pala cargada arriba.....	39
Tabla 35: Comparación tensiones a 30000N con pala cargada arriba.....	39
Tabla 36: Comparación desplazamientos en simulaciones con pala cargada abajo.....	40
Tabla 37: Comparación desplazamientos en simulaciones con pala empuje frontal.....	40
Tabla 38: Comparación desplazamientos en simulaciones con pala cargada arriba.....	41

1.INTRODUCCIÓN

Este Trabajo Fin de Máster se va a realizar tomando diseños y planos de la pala cargadora que fabrica Maquinaria Agrícola El León, para el análisis de las tensiones y deformaciones que se generan según diferentes estudios de cargas.

Maquinaria Agrícola El León SA es una empresa con muchos años de experiencia en el sector de la fabricación de maquinaria agrícola. Desde su comienzo se convirtió en una empresa referente en el sector agrícola. El producto estrella de la compañía es la pala cargadora para tractores. Se dedica a la fabricación de maquinaria agrícola desde palas cargadoras para tractores hasta los implementos a colocar en la pala ya sea una cuchara de cereal, áridos, horquilla de palets, horquilla de pacas, ... También se fabrican brazos de retroexcavadora, bulldozer, aplicadores de estiércol, grúas traseras, ...

En este TFM se va a dibujar en un software de diseño 3D la estructura completa de una pala cargadora junto a una cuchara de áridos. La pala cargadora se acopla a un amarre que se monta sobre el chasis del tractor. En este caso se dibujará la pala cargadora sin el amarre del tractor.

Se dibujarán los componentes y el conjunto de la pala cargadora a partir de los planos de diseño facilitados por Maquinaria Agrícola El León.

El diseño inicial de la pala cargadora con el que se va a trabajar tendrá el material de fabricación que se utiliza actualmente en la mayoría de los componentes de la pala cargadora.

Con el diseño original de una pala de Maquinaria Agrícola El León se estudiarán escenarios habituales de trabajo con sus posiciones y cargas, y se analizarán las tensiones y deformaciones que se generan.

2.OBJETIVO

El objetivo del proyecto es analizar mediante criterios de rigidez y resistencia las tensiones que se generan en una pala cargadora según el material de fabricación.

El proyecto se dividirá en varias fases: las fases iniciales girarán en torno al modelado 3D de la pala cargadora, y en las fases finales se estudiarán diferentes escenarios de cargas y las tensiones generadas en los elementos de la pala cargadora.

La fase inicial del proyecto es realizar un listado de los componentes que forman la pala cargadora: chapas, piezas, subensamblajes, bulones, casquillos, cilindros. Se toman los planos 2D de cada uno de los elementos de la pala, y se realiza el modelado 3D de todos ellos. Posteriormente, se ensamblan los elementos para formar la pala cargadora creando las restricciones respecto a los grados de libertad que existen entre los componentes de la pala.

Lo siguiente, es realizar simulaciones de las cargas que sufre habitualmente la pala cargadora en 3 posiciones habituales de trabajo mediante el método de elementos finitos:

- Pala levantada con carga arriba.
- Pala abajo con empuje frontal.
- Pala abajo cargada.

Se evaluará para varios niveles de carga la tensión y deformación que se genera en los componentes que conforman la pala con el material de fabricación que se emplea en la actualidad en la mayoría de ellos.

En la siguiente fase se realizará un análisis de los escenarios simulados cambiando el material de fabricación de elementos de la pala que más tensión sufren. Se comprobarán los niveles de tensión que se producen en esos mismos escenarios, pero verificando que no se superan los límites elásticos y de rotura de los materiales de fabricación.

Finalmente, se hará un análisis comparativo de los resultados obtenidos en los diferentes escenarios, según criterios de rigidez y resistencia, del modelo de la pala cargadora en función del material empleado en su fabricación.

3. DESCRIPCIÓN DE LA PALA CARGADORA

Maquinaria Agrícola El León fabrica palas cargadoras desde hace 50 años. El diseño actual de pala cargadora salió al mercado hace 2 años, a este modelo se le conoce como Serie E2. La Serie E2 es la evolución en cuanto a diseño moderno y funcional de los modelos precedentes fabricados. Mantiene gran parte del diseño de la anterior Serie E, la mayor diferencia es el pilarete. El pilarete es el elemento por el que la pala se acopla al amarre que se atornilla al chasis del tractor. El pilarete de la Serie E2 tiene la mitad de tamaño del de la Serie E, este diseño se debe a que los tractores actuales son más grandes y cuentan con más filtros, depósitos más grandes, con lo que se reduce el espacio disponible para acoplar la pala cargadora, y sin un pilarete de este tamaño no sería posible el acople en los tractores actuales.

Las palas cargadoras se fabrican un utillaje por lo que se colocan las chapas y piezas que conforman la pala y se sueldan sobre el utillaje. Así se puede asegurar que todas las palas fabricadas sean prácticamente iguales salvo pequeñas variaciones producidas por el enfriamiento de la soldadura.

Hay diferentes tipos de palas cargadoras según el tamaño del tractor, la cilindrada, la potencia del motor. El nombre de la pala indica la altura máxima (en cm) desde la punta de la pala al suelo:

- 320
- 340
- 370
- 385
- 410
- 430
- 470

La pala cargadora 410 E2 es la pala más vendida ya que es la que mejor encaja en la mayoría de los modelos de tractores [1]. Por lo tanto, es la que se va a dibujar en el software de diseño 3D.



Ilustración 1:Partes pala cargadora



Ilustración 2: Amarre de tractor.

En esta fase inicial del Trabajo Fin de Máster se va a dibujar la pala cargadora en Solid Edge. Lo primero es descomponer la pala cargadora en todos los elementos que lo conforman. Para ello se realiza un listado de las piezas que conforman una pala modelo 410 E2:

- Pieza
 - Buje
 - Barra de enganche inferior
- Chapa
 - Plegado delantero de brazo
 - Plegado trasero de brazo
 - Chapa lateral brazo
 - Barra paralelográmica
 - Crucero
- Bulones
 - 2385E.600.01
 - 2385E.600.02
 - 2385E.600.03
 - 2385E.600.04
 - 2385E.600.06
 - 2385E.600.08
 - 2385E.600.10
 - 2385E.600.11
 - 2385E.600.14
- Casquillos
 - 02.160.05
 - 370.600.01
 - 370.600.09
 - 370.730.01
 - 430E.200.06
 - 2410E.900.06

- Casquillo unión bielas
- Casquillo brazo paralelogramo
- Subensamblajes
 - Pilarete
 - Paralelogramo
 - Enganche europeo
 - Cuchara áridos
- Cilindros
 - Cilindro de volteo
 - Cilindro de elevación

Los planos de todos los componentes están dibujados en 2D, por lo que el proceso es importar los archivos de Autocad en Solid Edge y a partir de ahí dibujar los componentes en 3D.

Los componentes del listado que son piezas se van a dibujar en el entorno part de Solid Edge. Los componentes correspondientes al listado de chapa se van a dibujar en el entorno de chapa para aprovechar las funciones de plegado y pestaña de Solid Edge.

Los componentes del listado de bulones se van a diseñar en el entorno de pieza junto a la chapa que va soldada con el bulón. Los tornillos que unen los bulones a las piezas o chapas de la pala no se van a dibujar ya que las referencias y restricciones del entorno de ensamblaje de Solid Edge permiten fijar los bulones en el ensamblaje y que actúen como una fijación atornillada.

Los casquillos se dibujarán en el entorno pieza respetando el diseño de su fabricación real.

La tornillería que se utiliza en la fabricación y montaje de la pala no se va a colocar en el diseño del ensamblaje en Solid Edge. Ya que las propias restricciones del ensamblaje hacen la función de tornillería.

4. ANÁLISIS NUMÉRICO

Se van a estudiar 3 posiciones habituales de trabajo de la pala cargadora. En estas situaciones las condiciones de restricciones, definición de geometría, conexiones entre pares de cara y mallado serán las mismas. La definición del sentido de la carga y su módulo, además de la posición de la pala cargadora, es lo que cambia en cada uno de los escenarios.

- Definición de la geometría: Se define la geometría completa de la pala cargadora, ya que se van a estudiar las tensiones que se generan en toda la pala.
- Restricciones: La parte que se mantiene fija de la pala cargadora son los pilaretes, que van unidos al amarre del chasis de tractor por lo que no tienen ningún grado de libertad. Se impone a las caras del pilarete restricciones fijas con 0 grados de libertad. Las demás restricciones de movimiento de la pala cargadora se generan automáticamente con las que se aplicaron durante el ensamblaje de la pala cargadora.
- Conexiones: Este comando genera automáticamente conexiones de unión entre pares de cara, de manera que se genera un ensamblaje unido.
- Mallado: Se genera el mallado automático con el tamaño que recomienda el software de simulación.

En la simulación de los escenarios de carga de la pala cargadora se va a utilizar el estudio estático lineal.

El modelo se somete a una carga uniforme que se aplica, sobre la cuchara de áridos, de forma gradual hasta alcanzar el valor requerido.

Se simulan las tensiones, desplazamientos, fuerzas de reacción y la deformación que se generan en los elementos que conforman el ensamblaje.

El cambio de valor de la carga que se aplica es proporcional a la forma en la que responde el modelo, en cuanto a desplazamientos, deformaciones, y tensiones que se generan a lo largo de la pala cargadora.

En el trabajo se ha realizado un proceso de optimización en el que se ha analizado el modelo inicial, además de dos iteraciones adicionales.

4.1 MODELO 3D DE LA PALA CARGADORA

Lo primero es obtener los planos en Autocad de todos los elementos que forman la pala cargadora. Lo siguiente es clasificar dichos elementos en grupos que compartirán el entorno de diseño de Solid Edge (pieza, chapa o ensamblaje) o que físicamente pertenecen al mismo grupo de elementos por uso. El proceso de diseño general será el mismo para todos los elementos de la pala cargadora, se abrirá el plano del componente en el entorno plano de Solid Edge y seguidamente se copiará el plano en el entorno de trabajo correspondiente.

Hay ciertos elementos de la pala que están formados por subelementos de chapa y pieza que se juntarán en subensamblajes.

El diseño individual de cada uno de los componentes de la pala cargadora está en el apartado de Anexos: Diseño 3D de los componentes de la pala cargadora.

En el entorno de ensamblaje se insertan uno a uno todos los elementos de la pala cargadora. Utilizando los comandos que permiten aplicar restricciones al posicionamiento entre componentes e imitando los grados de libertad reales. Se colocan todos los componentes físicamente en el espacio y recreando la interacción que tienen entre ellos, además de conseguir el movimiento real de elevación y volteo de la pala. También se observa como la cuchara, debido al paralelogramo, sube totalmente plana cuando solo están funcionando los cilindros de elevación.



Ilustración 3: Pala cargadora ensamblada.

4.2 MODELO NUMÉRICO

En el mallado el elemento escogido es el tetraédrico para todos los elementos de la pala cargadora. Aunque se podría utilizar elementos de malla de superficie ya que muchos elementos son de chapa de poco espesor.

El tamaño de los elementos de la malla depende el tamaño del componente. En general, la cantidad de elementos de malla por componente está bien distribuido.

En los pilaretes, en la chapa paralelográmica y el paralelogramo se podría haber ajustado el tamaño de elemento de malla para disminuir la cantidad de triángulos de mallado, no hace falta una malla tan fina y se conseguiría realizar las simulaciones de forma más rápida.

El tamaño de malla y el elemento tetraédrico se utiliza en todas las simulaciones realizadas.

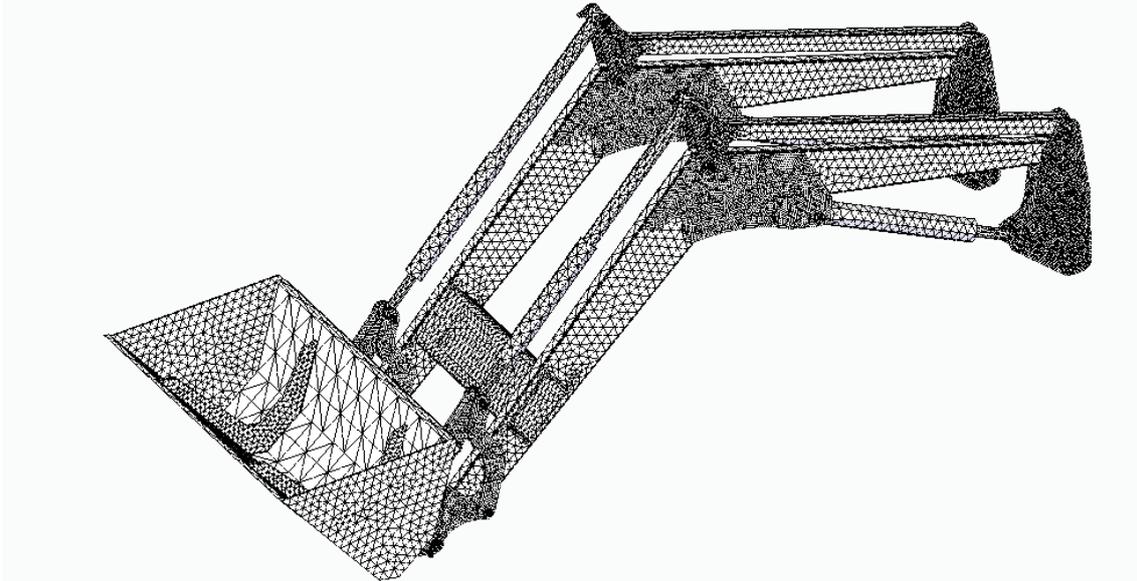


Ilustración 4: Malla de la pala general.

La zona del enganche de la pala cargadora con la cuchara de áridos es la más conflictiva ya que se alcanzan las máximas tensiones, se observa que la densidad de elementos de malla es correcta para el análisis del modelo.

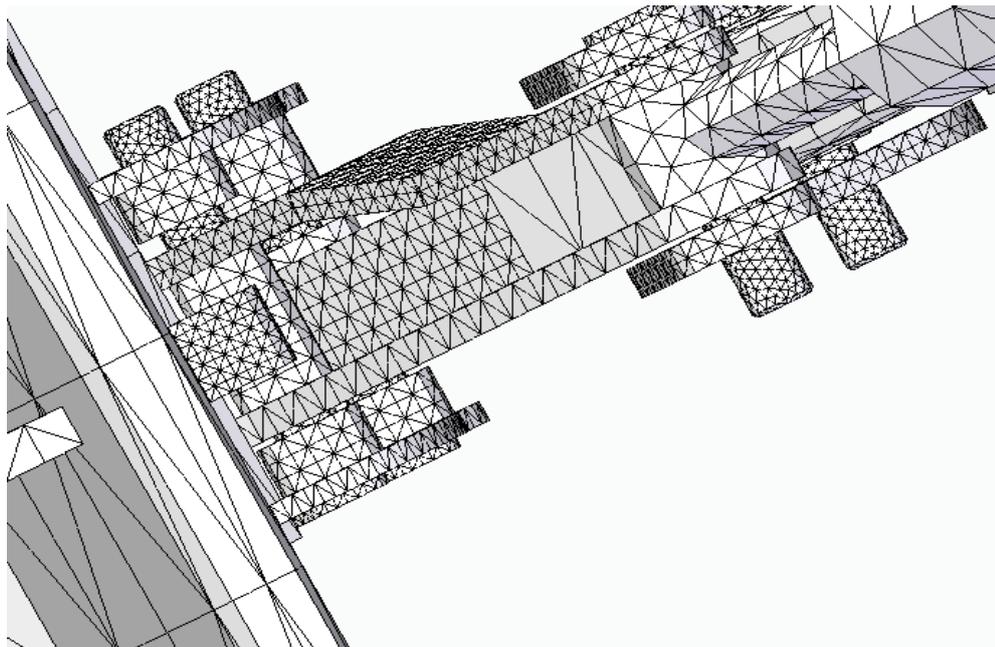


Ilustración 5: Malla en detalle de la pala.

El resultado del mallado de las 3 posiciones de simulaciones analizadas queda:

PALA CARGADA ABAJO	
Tipo de mallado	Tetraédrico
Número total de cuerpos mallados	130
Número total de elementos	634.848
Número total de nodos	1.127.243
Tamaño subjetivo de malla	3

Tabla 1: Mallado con Pala cargada abajo.

PALA EMPUJE FRONTAL	
Tipo de mallado	Tetraédrico
Número total de cuerpos mallados	130
Número total de elementos	632.551
Número total de nodos	1.123.556
Tamaño subjetivo de malla	3

Tabla 2: Mallado con Pala empuje frontal.

PALA CARGADA ARRIBA	
Tipo de mallado	Tetraédrico
Número total de cuerpos mallados	130
Número total de elementos	631.376
Número total de nodos	1.121.921
Tamaño subjetivo de malla	3

Tabla 3: Mallado con Pala cargada arriba.

El cambio de posición entre los escenarios provoca que el número total de elementos varíe, pero es una variación mínima que se debe al estirado y recogido de los cilindros de volteo y elevación. El tamaño subjetivo de la malla respecto al ensamblaje de la pala cargadora es el mismo en las 3 situaciones analizadas, es de un valor de 3.

4.3 MATERIALES

El material de fabricación de la pala cargadora cambia en cada una de las tres simulaciones analizadas. Se cambiará el material de fabricación de los elementos entre simulaciones por materiales con mayor límite elástico, según la tensión máxima sufrida en dicho elemento de la pala cargadora.

El diseño y geometría se mantiene en la simulación 1 y 2 pero en la simulación 3 se cambia el diámetro de un bulón lo que implica cambiar el diámetro de las piezas por las que pasa.

Simulación 1

En el primer escenario de simulación el material de fabricación de la mayoría de los elementos de la pala cargadora es el que se utiliza en su fabricación real.

El material de fabricación en todos los elementos de la pala cargadora es [2]:

- Acero 275N
 - Límite elástico: 275 MPa
 - Límite de rotura: 358 MPa

Simulación 2

En el segundo escenario de simulación casi todos los elementos de la pala cargadora mantienen el material de fabricación de la simulación 1. Los elementos que cambian de material de fabricación son:

- Bulón inferior: 2385E.600.10 → Acero F1272
- Bulón superior: 2385E.600.10 → Acero F114
- Bulón buje: 2385E.600.04 → Acero F114
- Bulón cilindro de volteo: 2385E.600.04 → Acero F114

Las propiedades de estos dos aceros son [3]:

- Acero F1272 (diámetro entre 16-40 mm):
 - Límite elástico: 880 MPa.
 - Tensión de rotura: 1150 MPa.
- Acero F114 (diámetro entre 16-40 mm):
 - Límite elástico: 430 MPa.
 - Tensión de rotura: 750 MPa.

Simulación 3

En el tercer escenario de simulación se mantienen los materiales de fabricación en todos los elementos de la pala cargadora salvo en un elemento:

- Bulón inferior del enganche: 2385E.600.10 → TNC-EXTRA/1.6582

La propiedad de este acero es:

- TNC-EXTRA/1.6582 (Para diámetros entre 16 mm-40 mm)[3]
 - Límite elástico: 900 MPa.
 - Tensión de rotura: 1200 MPa.

Además, en este escenario se cambia el diámetro del bulón y de los elementos por donde pasa:

- Cambio de diámetro del bulón de 30.5 mm → 32.5 mm
- Cambio de diámetro de los casquillos y piezas donde pasa el bulón de 31 mm → 33 mm.

4.4 CONDICIONES DE CONTORNO

Las condiciones de contorno indican los movimientos restringidos y permitidos en el movimiento de la pala cargadora.

Los pilaretes de la pala es el elemento que se ancla al amarre que está en el chasis del tractor, por lo que tienen restricción fija con 0 grados de libertad.

El resto de los elementos de la pala cargadora no tienen impuesta ninguna restricción. Utilizando el comando de Crear conectores por par de caras, se crean conectores de pegado entre pares de cara lo que simula que la pala cargadora esté fija en la situación analizada.

- Restricción Fija: 0 Grados de libertad.
 - Pilarete
- Conectores de pegado por par de caras.
 - Todos los elementos de la pala cargadora

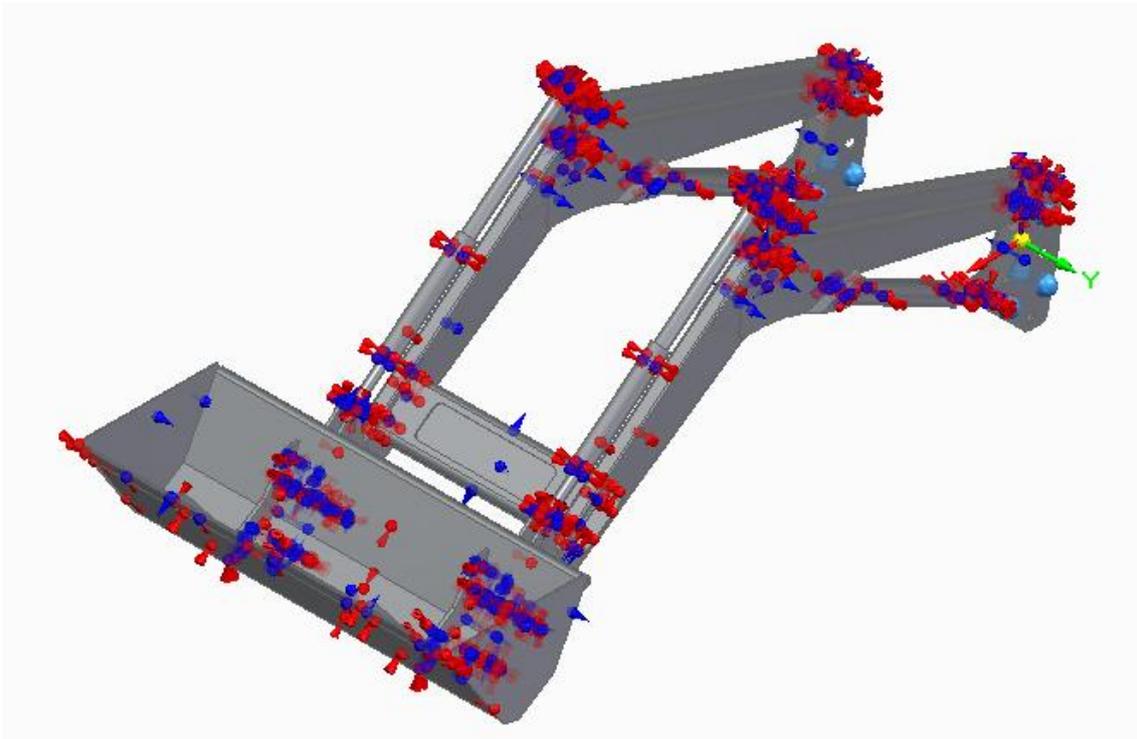


Ilustración 6: Restricciones y conectores de la pala cargadora.

4.5 CASOS DE CARGA

La pala cargadora se va a colocar en 3 posiciones en las que se trabaja habitualmente y en cada una de ellas se simularán 3 escenarios de carga.

En los 3 escenarios las cargas a estudiar son 10000N, 20000N y 30000N. La carga máxima que suele levantar la pala cargadora está alrededor de los 2000 Kg. Por lo que se van a dimensionar los elementos de la pala cargadora para que soporten la carga de trabajo de 20000N aplicando el factor de seguridad. El estudio de la carga de 30000N sirve para analizar la respuesta de estos mismo materiales y diseño utilizados a una carga mayor.

Las 3 cargas que se analizan:

- 10000 N: Carga habitual de trabajo.
- 20000 N: Carga máxima según especificaciones.
- 30000 N: Carga superior a la máxima y a la que no se debería llegar en ningún escenario de trabajo.

Las situaciones en las que se va a estudiar la pala cargadora son:

- Pala abajo y cuchara cargada.

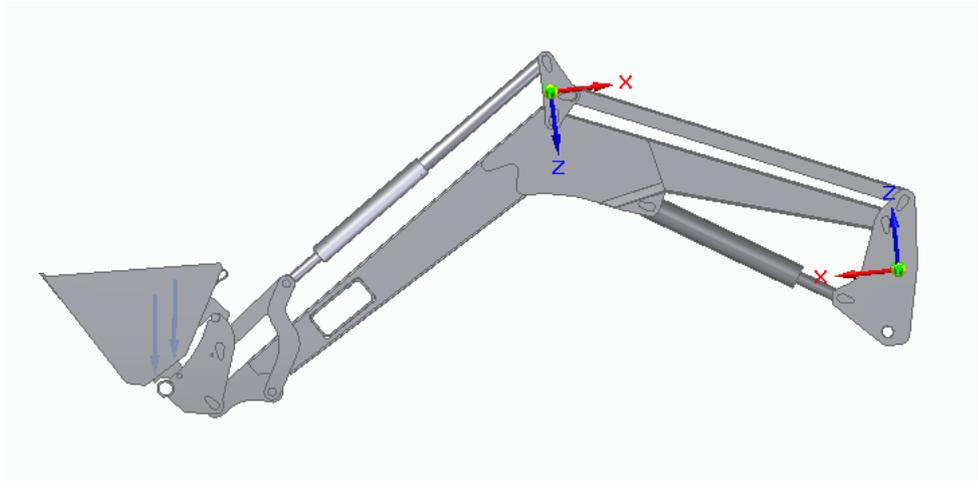


Ilustración 7: Pala abajo cargada.

- Pala abajo y cuchara frontal.

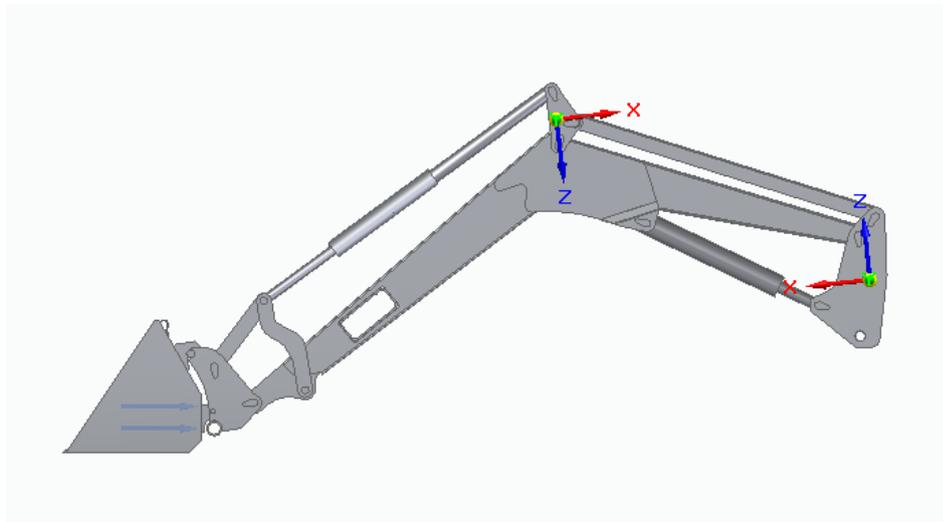


Ilustración 8: Pala abajo y empuje frontal.

- Pala arriba y cuchara cargada.

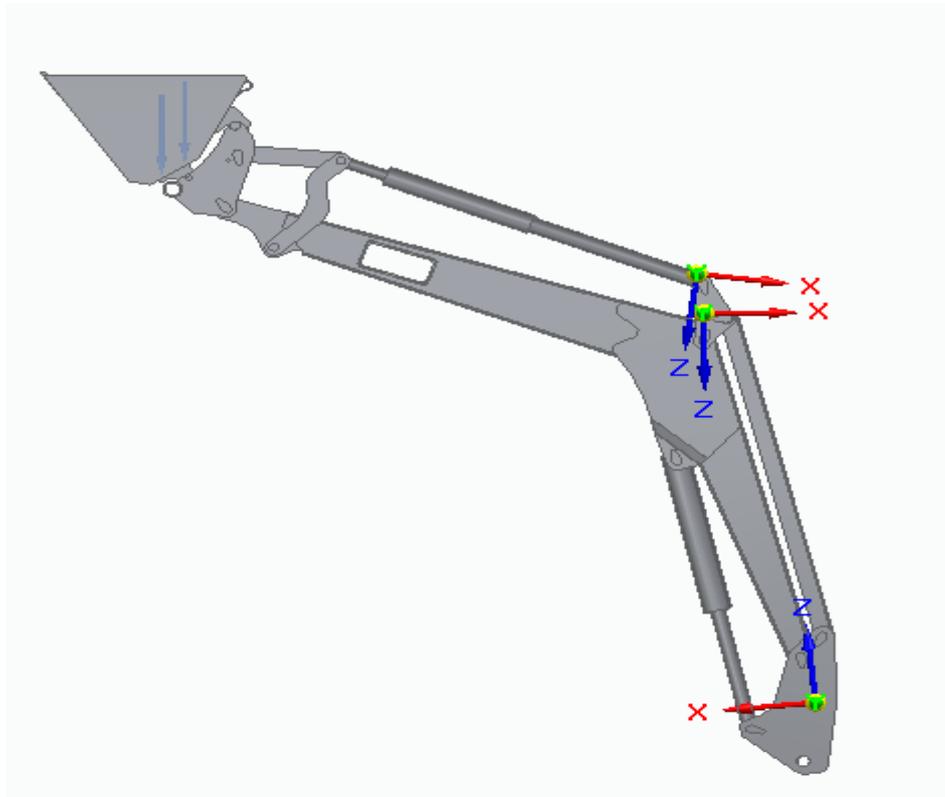


Ilustración 9:Pala arriba cargada.

4.6 CRITERIO ADOPTADOS EN EL ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA PALA CARGADORA

4.6.1 CRITERIO DE RESISTENCIA

En toda maquinaria y elementos en los que se mueven grandes cargas hay que aplicar un factor de seguridad para dar margen a que se pueda sobrepasar las cargas máximas sin riesgo de rotura.

El factor de seguridad a utilizar se calcula mediante el método Pugsley[4]. Este método propuesto por A. G. Pugsley a través de las incertidumbres más frecuentes permite evaluar el coeficiente de seguridad admisible como producto de los factores de valoración.

$$N=N_x * N_y$$

N_x =Factor de seguridad que involucra aspectos de control y calidad

N_y =Factor de seguridad que involucra aspectos de seguridad y economía

NY	Peligro para el personal		
Impacto económico	NS	S	MS
NS	1	1.2	1.4
S	1	1.3	1.5
MS	1.2	1.4	1.6

Tabla 4: Coeficientes Ny, método Pugsley.

De la tabla 1 se toma que el peligro para el personal es Serio y que el impacto económico es Serio.

$$NY=1.3$$

NX	Control sobre la carga aplicada				
Calidad de los materiales, mano de obra mantenimiento e inspección	Exactitud del análisis de esfuerzos, de la información experimental o experiencias en diseños similares	MB	B	R	M
MB	MB	1.1	1.3	1.5	1.7
	B	1.2	1.45	1.7	1.95
	R	1.3	1.6	1.9	2.2
	M	1.4	1.75	2.1	2.45
B	MB	1.3	1.55	1.8	2.05
	B	1.45	1.75	2.05	2.35
	R	1.6	1.95	2.3	2.65
	M	1.75	2.15	2.55	2.95
R	MB	1.5	1.8	2.1	2.4
	B	1.7	2.15	2.4	2.75
	R	1.9	2.3	2.7	3.1
	M	2.1	2.55	3	3.45
MB	MB	1.7	2.15	2.4	2.75
	B	1.95	2.35	2.75	3.15
	R	2.2	2.65	3.1	3.55
	M	2.45	2.95	3.45	3.95

Tabla 5: Coeficientes Nx, método Pugsley.

De la tabla 2 se toma que la calidad de los materiales es Muy Buena, que la exactitud del análisis de los esfuerzos es Bueno, y que el control de la carga aplicada es Bueno.

$$NX=1.45$$

$$N=NX*NY=1.885$$

El coeficiente de seguridad que se va a utilizar es 2 sabiendo que este método tiene su propia incertidumbre se pone un coeficiente entero mayor.

Para justificar la elección del factor de seguridad 2, se compara con coeficientes que se dan en las tablas de métodos de cálculo de fatiga para ingeniería [5][6]:

COEFICIENTE DE SEGURIDAD EN CÁLCULOS ESTÁTICOS			
Tipo de carga	Acero Materiales dúctiles		Fundición gris Materiales frágiles
	Criterio de rotura	Criterio de fluencia	Criterio de rotura
Carga permanente	De 3 a 4	De 1.5 a 2	De 5 a 6
Carga repetida, en una dirección, gradual	6	3	De 7 a 8
Carga repetida, invertida, gradual o con choque suave	8	4	De 10 a 12
Carga con choque más violento	De 10 a 15	De 5 a 7	De 15 a 20

Tabla 6: Coeficientes de seguridad en cálculos estáticos

En un estudio de carga permanente y con el criterio de fluencia para aceros el coeficiente seguridad debe ser de 1'5 a 2.

Teniendo en cuenta el valor obtenido por el método de Pugsley y comparándolo con los coeficientes de seguridad tabulados para cálculos estáticos se va a utilizar como criterio un factor de seguridad 2.

- FACTOR DE SEGURIDAD = 2

4.6.2 CRITERIO DE RIGIDEZ

Además, se va a analizar los desplazamientos que sufre la pala cargadora en cada una de las situaciones que se va a simular. Cuando se está trabajando con una pala cargadora para cargar remolques o camiones, o cuando se empujando frontalmente cargas de tierra, ... la pala cargadora no debe deformarse ya que esto podría repercutir en la propia estructura de la pala cargadora con el uso y limitar el movimiento de cargas para los que está prevista.

Para el análisis de la deformación de la pala cargadora se va a tener en cuenta el desplazamiento que sufre el bulón 2385E.600.10 que se coloca en el buje en la punta del brazo de la pala cargadora.

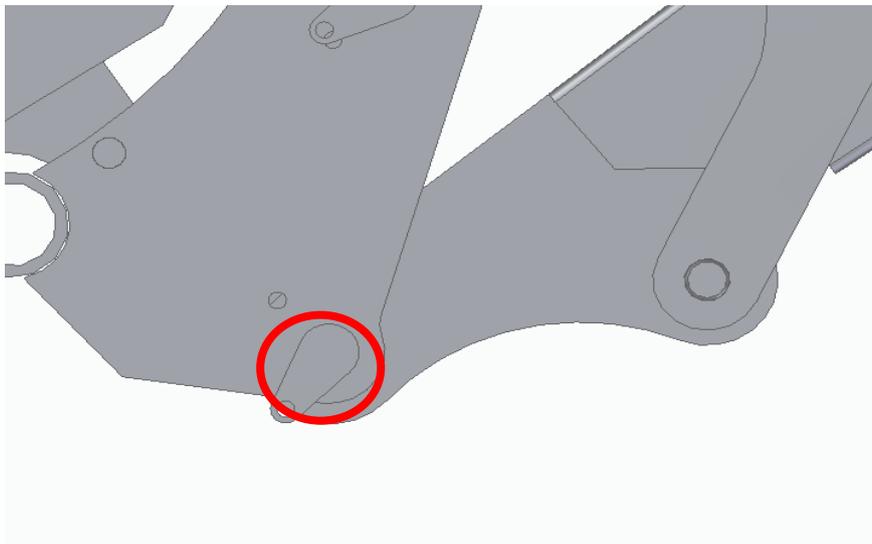


Ilustración 10: Detalle punta delantera del brazo

El criterio a tener en cuenta según el escenario estudiado:

- Pala cargada abajo → Desplazamiento en Z
- Pala empuje frontal → Desplazamiento en X
- Pala cargada arriba → Desplazamiento en Z

El desplazamiento máximo en los 3 escenarios que se van a analizar no puede ser mayor de 20 mm en su dirección de estudio.

- MÁXIMO DESPLAZAMIENTO EN LA DIRECCIÓN ANALIZADA: 20 MM.

5. RESULTADOS

El desarrollo completo de los resultados analizados en las 3 Simulaciones y sus escenarios está en el Anexo: Resultados de las 3 Simulaciones analizadas.

Los resultados que se van a obtener en cada simulación son los desplazamientos y las tensiones de Von Mises en todas las zonas de la pala cargadora.

En el estudio de tensiones se va a analizar los elementos más desfavorables, los que más tensión sufren, no se va a realizar un análisis de tensiones de todos los elementos como los que sufren bajas tensiones y están lejos de superar el límite elástico del material.

Las celdas marcadas en rojo en las tablas indican que la tensión en ese elemento y simulación ha superado el límite elástico del material de fabricación utilizado.

5.1 SIMULACIÓN 1

En esta simulación todos los elementos de la pala cargadora están fabricados con Acero 275N.

Esta primera simulación sirve para conocer las tensiones que se alcanzan en los peores casos de carga y que elementos son los que más tensión sufren. A partir de esta simulación ya se podrá dimensionar el material con mayor precisión para cada elemento.

5.1.1 PALA CARGADA ABAJO

Los resultados de tensiones y desplazamientos para este escenario:

SIMULACIÓN 1	TENSIÓN		
	10000 N	20000 N	30000 N
PALA CARGADA ABAJO			
Estructura pala	15	35	50
Chapa paralelográfica	40	80	140
Bulón cilindro de volteo	35	70	150
Bulón buje	35	70	150
Bulón superior enganche	35	70	150
Bulón inferior enganche	212	420	630

Tabla 7:S1, Pala cargada abajo tensiones.

SIMULACIÓN 1	PALA CARGADA ABAJO (10000 N)	PALA CARGADA ABAJO (20000 N)	PALA CARGADA ABAJO (30000 N)
DESPLAZAMIENTO EN Z	2.55	5.1	7.66

Tabla 8:S1, Pala cargada abajo desplazamientos.

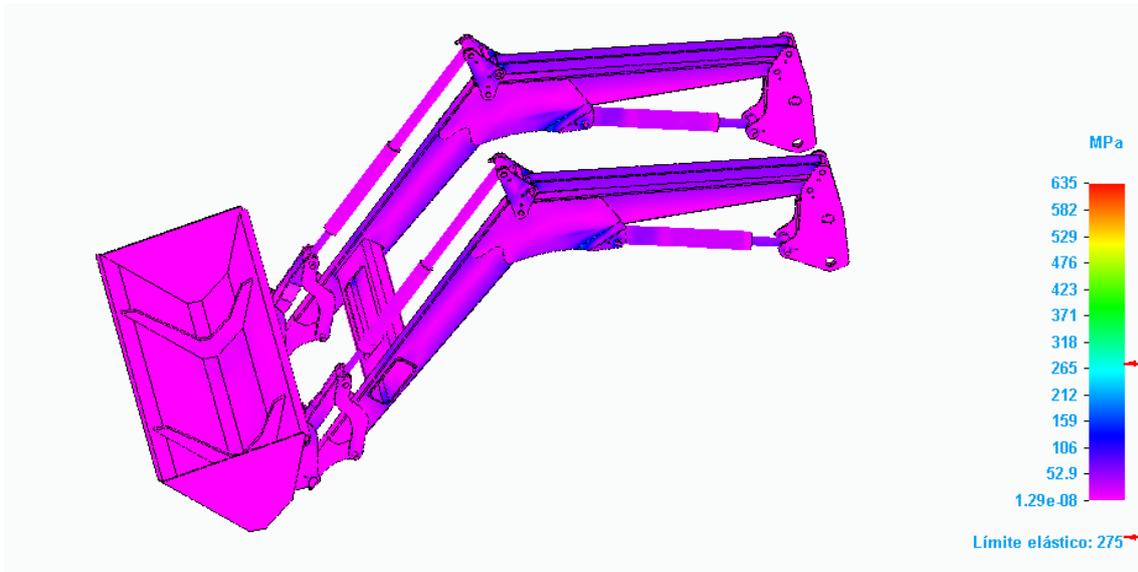


Ilustración 11:S1, Pala cargada abajo tensiones.

5.1.2 PALA EMPUJE FRONTAL

Los resultados de tensiones y desplazamientos para este escenario:

SIMULACIÓN 1	TENSIÓN		
	PALA EMPUJE FRONTAL 10000 N	20000 N	30000 N
Estructura pala	25	35	70
Chapa paralelográmica	25	35	70
Bulón cilindro de volteo	45	100	120
Bulón buje	45	100	120
Bulón superior enganche	45	100	120
Bulón inferior enganche	280	570	850

Tabla 9: S1, Pala empuje frontal tensiones.

SIMULACIÓN 1	PALA EMPUJE FRONTAL (10000 N)	PALA EMPUJE FRONTAL (20000 N)	PALA EMPUJE FRONTAL (30000 N)
DESPLAZAMIENTO EN X	1.42	2.83	4.24

Tabla 10: S1, Pala empuje frontal desplazamientos.

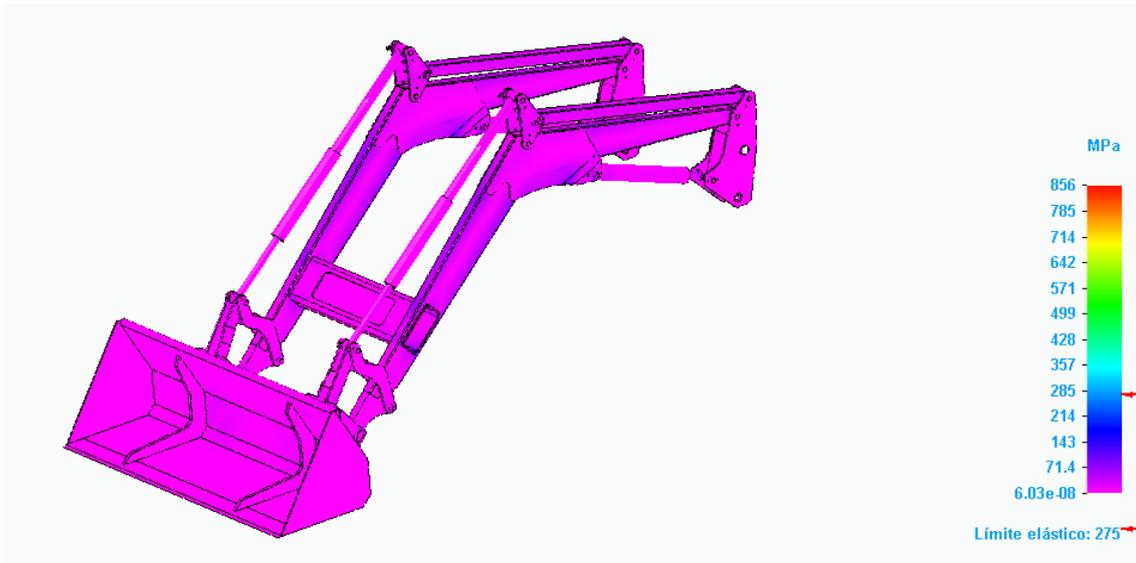


Ilustración 12: S1, Pala empuje frontal tensiones.

5.1.3 PALA CARGADA ARRIBA

Los resultados de tensiones y desplazamientos para este escenario:

SIMULACIÓN 1	TENSIÓN		
	10000 N	20000 N	30000 N
PALA CARGADA ARRIBA			
Estructura pala	20	40	60
Chapa paralelográmica	50	90	140
Bulón cilindro de volteo	45	75	240
Bulón buje	90	190	300
Bulón superior enganche	70	75	240
Bulón inferior enganche	260	530	800

Tabla 11:S1, Pala cargada arriba tensiones.

SIMULACIÓN 1	PALA CARGADA ARRIBA (10000 N)	PALA CARGADA ARRIBA (20000 N)	PALA CARGADA ARRIBA (30000 N)
DESPLAZAMIENTO EN Z	3.34	6.7	10

Tabla 12:S1, Pala cargada arriba desplazamientos.

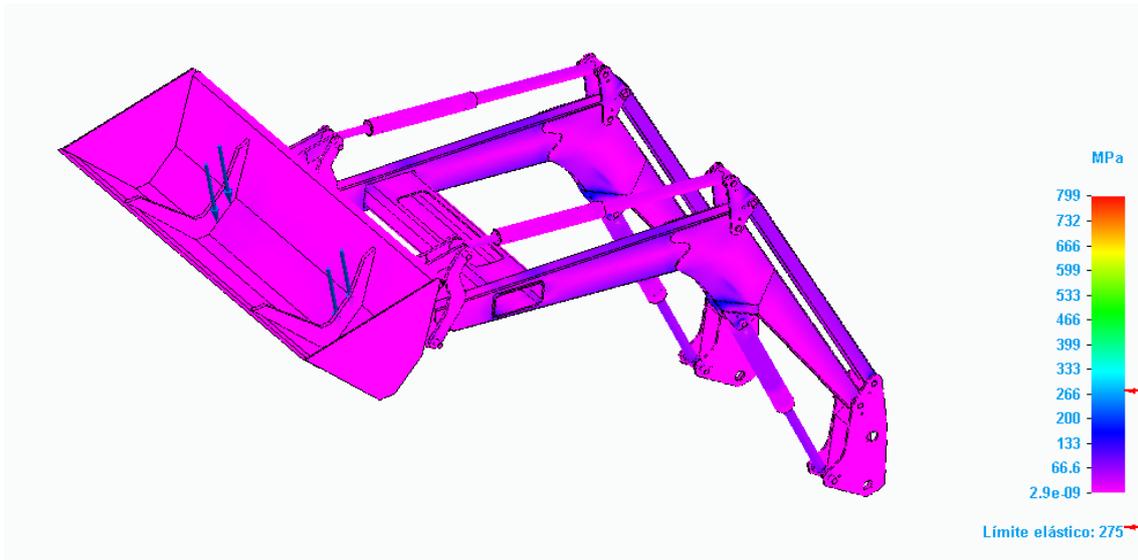


Ilustración 13:S1, Pala cargada arriba tensiones.

5.2 SIMULACIÓN 2

En esta simulación no se analiza el escenario con carga de 10000 N, ya que en la Simulación 1 no se supera el límite elástico del material en ese caso de carga.

La mayoría de los elementos de la pala cargadora mantienen el material de fabricación de la Simulación 1. Los elementos que cambian de material son el bulón de cilindro de volteo (Acero F114), bulón buje (Acero F114), bulón superior enganche (Acero F114), bulón inferior enganche (Acero F1272).

5.2.1 PALA CARGADA ABAJO

Los resultados de tensiones y desplazamientos para este escenario:

SIMULACIÓN 2	TENSIÓN	
	20000 N	30000 N
PALA CARGADA ABAJO		
Estructura pala	35	50
Chapa paralelográfica	80	140
Bulón cilindro de volteo	70	150
Bulón buje	70	150
Bulón superior enganche	70	150
Bulón inferior enganche	415	620

Tabla 13:S2, Pala cargada abajo tensiones.

SIMULACIÓN 2	PALA CARGADA ABAJO (10000 N)	PALA CARGADA ABAJO (20000 N)	PALA CARGADA ABAJO (30000 N)
DESPLAZAMIENTO EN Z		5.1	7.65

Tabla 14:S2, Pala cargada abajo desplazamientos.

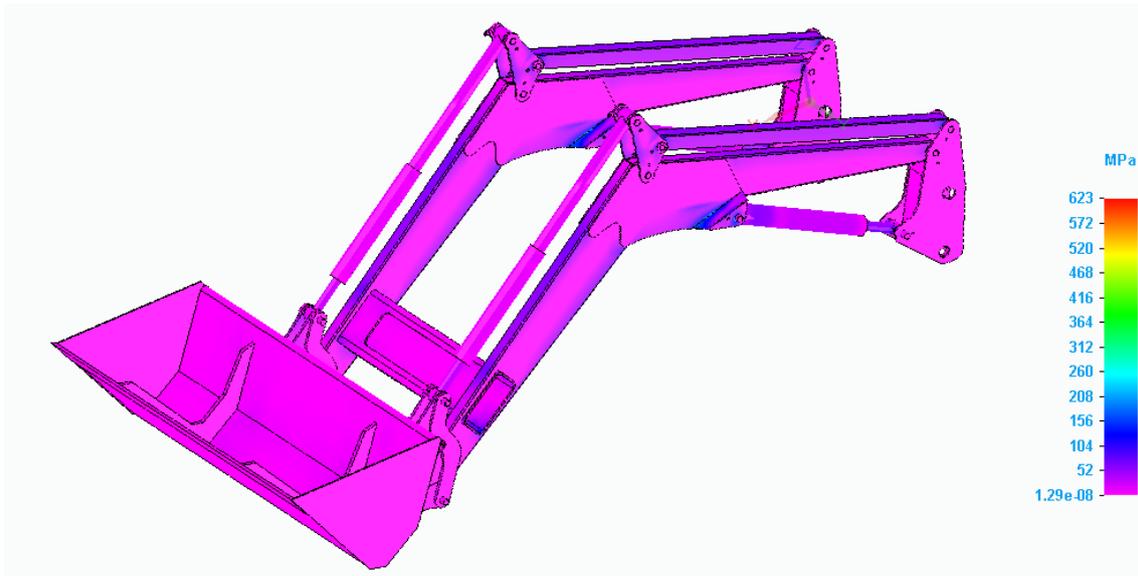


Ilustración 14:S2, Pala cargada arriba tensiones.

5.2.2 PALA EMPUJE FRONTAL

Los resultados de tensiones y desplazamientos para este escenario:

SIMULACIÓN 2	TENSIÓN	
	20000 N	30000 N
PALA EMPUJE FRONTAL	20000 N	30000 N
Estructura pala	50	70
Chapa paralelográmica	50	70
Bulón cilindro de volteo	90	130
Bulón buje	90	130
Bulón superior enganche	90	130
Bulón inferior enganche	560	840

Tabla 15: S2, Pala empuje frontal tensiones.

SIMULACIÓN 2	PALA EMPUJE FRONTAL (10000 N)	PALA EMPUJE FRONTAL (20000 N)	PALA EMPUJE FRONTAL (30000 N)
DESPLAZAMIENTO EN X		2.84	4.25

Tabla 16: S2, Pala empuje frontal desplazamientos.

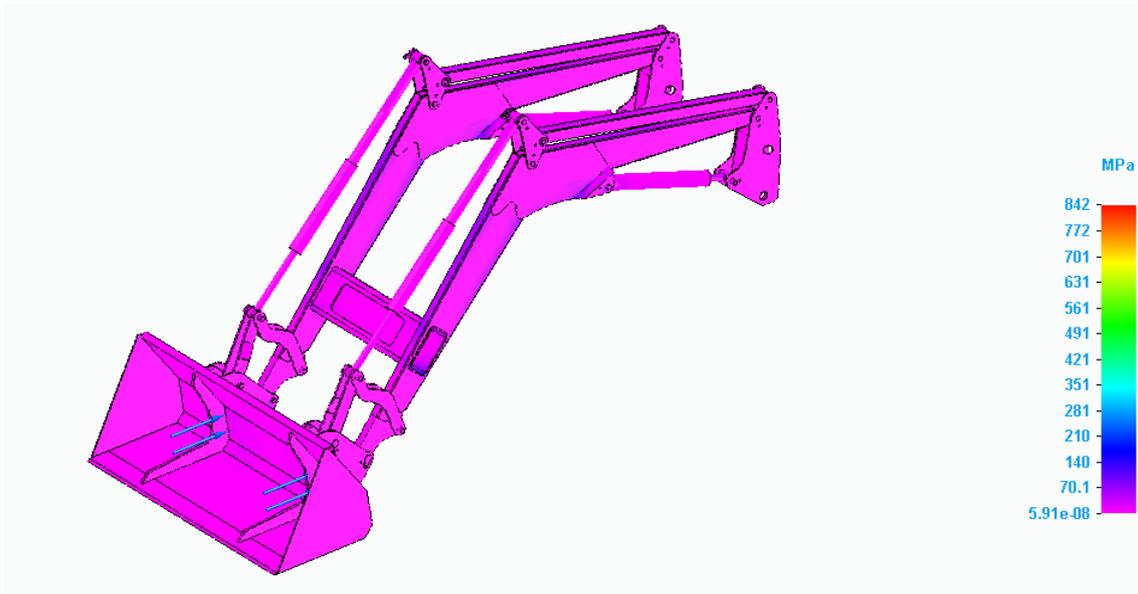


Ilustración 15: S2, Pala empuje frontal tensiones.

5.2.3 PALA CARGADA ARRIBA

Los resultados de tensiones y desplazamientos para este escenario:

SIMULACIÓN 2	TENSIÓN	
	20000 N	30000 N
PALA CARGADA ARRIBA	20000 N	30000 N
Estructura pala	40	60
Chapa paralelográmica	90	140
Bulón cilindro de volteo	100	250
Bulón buje	220	330
Bulón superior enganche	100	250
Bulón inferior enganche	520	780

Tabla 17:S2, Pala cargada arriba tensiones.

SIMULACIÓN 2	PALA CARGADA ARRIBA (10000 N)	PALA CARGADA ARRIBA (20000 N)	PALA CARGADA ARRIBA (30000 N)
DESPLAZAMIENTO EN Z		6.71	10.1

Tabla 18:S2, Pala cargada arriba desplazamientos.

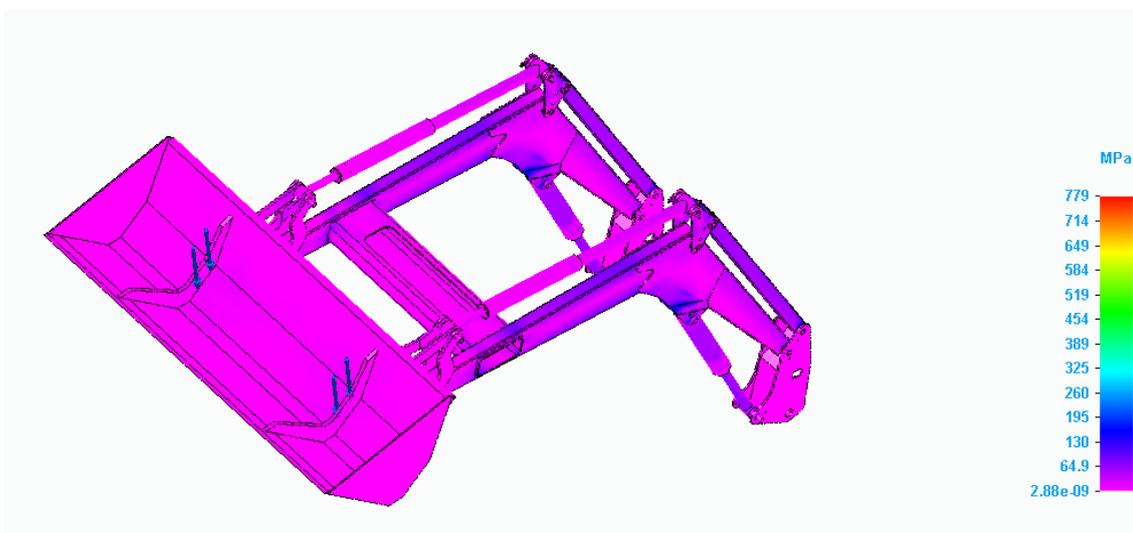


Ilustración 16:S2, Pala cargada arriba tensiones.

5.3 SIMULACIÓN 3

En esta simulación tampoco se analiza el caso de carga de 10000 N. El bulón del enganche inferior es el que cambia de material de fabricación (TNC-EXTRA), y además su diámetro(30.5→32.5mm) y el de los agujeros de los elementos por los que pasa(31→33mm).

5.3.1 PALA CARGADA ABAJO

Los resultados de tensiones y desplazamientos para este escenario:

SIMULACIÓN 3	TENSIÓN	
	20000 N	30000 N
PALA CARGADA ABAJO		
Estructura pala	25	40
Chapa paralelográmica	60	100
Bulón cilindro de volteo	125	280
Bulón buje	125	280
Bulón superior enganche	125	280
Bulón inferior enganche	300	460

Tabla 19:S3, Pala cargada abajo tensiones.

SIMULACIÓN 3	PALA CARGADA ABAJO (10000 N)	PALA CARGADA ABAJO (20000 N)	PALA CARGADA ABAJO (30000 N)
DESPLAZAMIENTO EN Z		5.1	7.65

Tabla 20:S3, Pala cargada abajo desplazamientos.

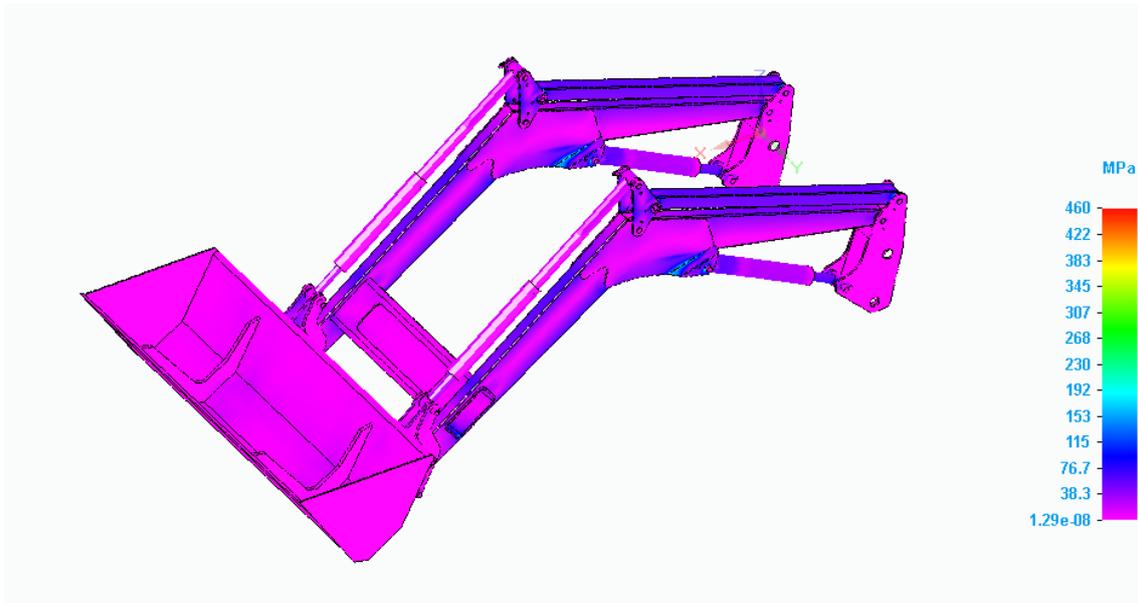


Ilustración 17:S3, Pala cargada abajo tensiones.

5.3.2 PALA EMPUJE FRONTAL

Los resultados de tensiones y desplazamientos para este escenario:

SIMULACIÓN 3	TENSIÓN	
	20000 N	30000 N
PALA EMPUJE FRONTAL	20000 N	30000 N
Estructura pala	35	45
Chapa paralelográmica	35	45
Bulón cilindro de volteo	145	220
Bulón buje	145	220
Bulón superior enganche	145	220
Bulón inferior enganche	360	545

Tabla 21:S3, Pala empuje frontal tensiones.

SIMULACIÓN 3	PALA EMPUJE FRONTAL (10000 N)	PALA EMPUJE FRONTAL (20000 N)	PALA EMPUJE FRONTAL (30000 N)
DESPLAZAMIENTO EN X		2.83	4.23

Tabla 22:S3, Pala empuje frontal desplazamientos.

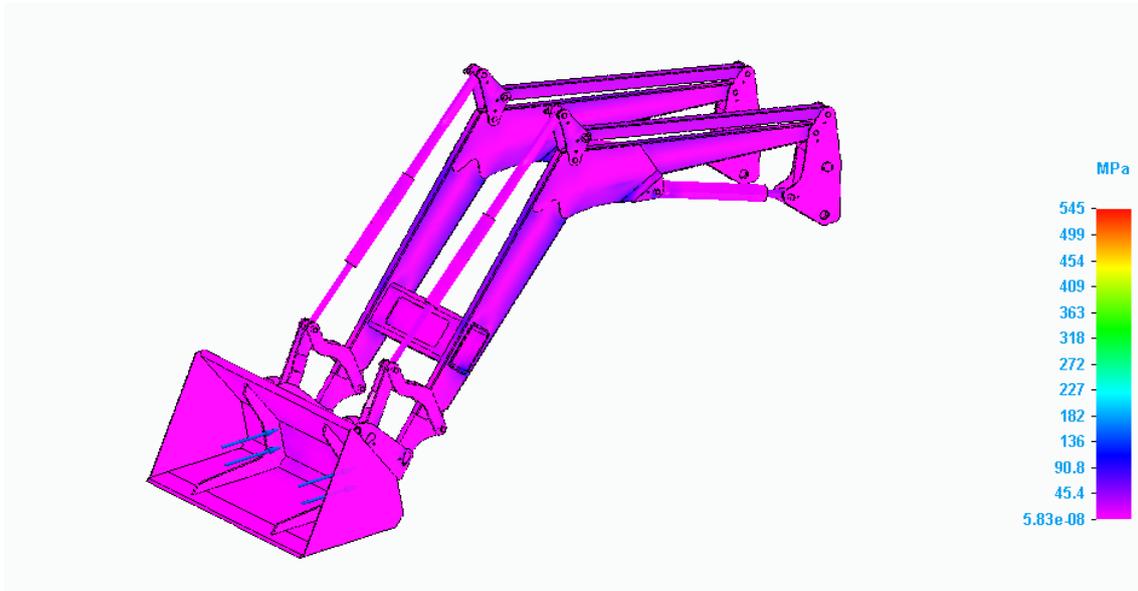


Ilustración 18:S3, Pala empuje frontal tensiones.

5.3.3 PALA CARGADA ARRIBA

Los resultados de tensiones y desplazamientos para este escenario:

SIMULACIÓN 3	TENSIÓN	
	20000 N	30000 N
PALA CARGADA ARRIBA		
Estructura pala	35	50
Chapa paralelográfica	80	110
Bulón cilindro de volteo	160	240
Bulón buje	190	280
Bulón superior enganche	160	240
Bulón inferior enganche	430	640

Tabla 23:S3, Pala cargada arriba tensiones.

SIMULACIÓN 3	PALA CARGADA ARRIBA (10000 N)	PALA CARGADA ARRIBA (20000 N)	PALA CARGADA ARRIBA (30000 N)
DESPLAZAMIENTO EN Z		6.69	10

Tabla 24:S3, Pala cargada arriba desplazamientos.

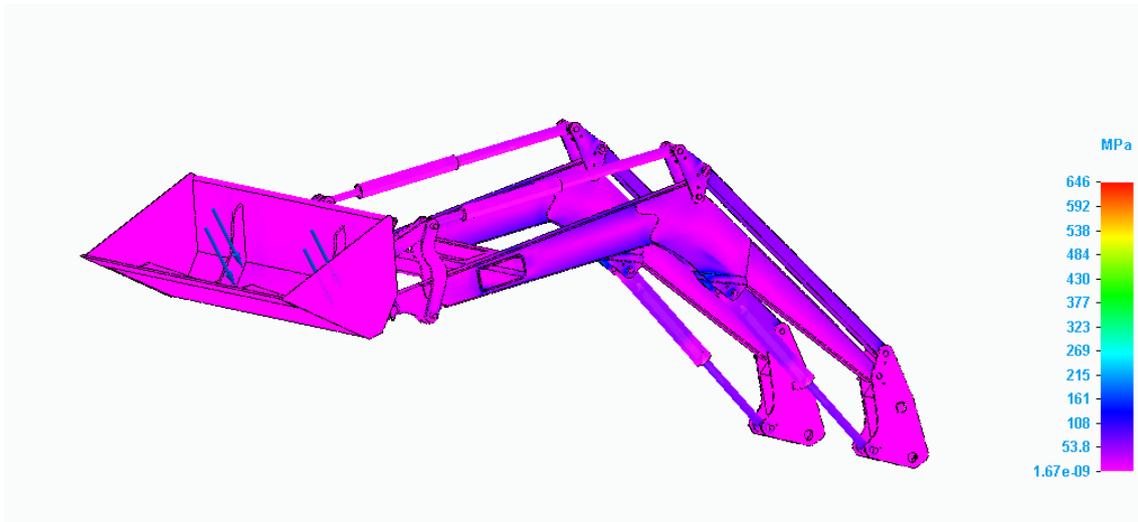


Ilustración 19:S3, Pala cargada arriba tensiones.

6. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS SEGÚN CRITERIOS DE RIGÍDEZ Y RESISTENCIA

Se han creado los escenarios de simulación en 3 posiciones habituales de trabajo de la pala cargadora, y en cada una de ellas se han simulado 3 cargas de trabajo.

Lo siguiente ha sido cambiar el material de fabricación de los elementos de la pala cargadora que más tensión sufren, además de realizar algún cambio en el diseño de dichos elementos.

Se realiza un análisis comparativo de las tensiones generadas y desplazamientos en la pala cargadora en cada uno de los escenarios y simulaciones para observar la evolución según los materiales y diseño utilizados.

Los materiales que se han utilizado en cada uno de los elementos en las simulaciones de la pala cargadora:

ELEMENTOS (Límite elástico)	SIMULACIÓN 1 (MPa)	SIMULACIÓN 2 (MPa)	SIMULACIÓN 3 (MPa)
Pala cargadora	275	275	275
2385.600.04(Cil. Volteo)	275	430	430
2385.600.04(Buje)	275	430	430
2385E.600.10(Sup. Enganche)	275	430	430
2385E.600.10(Inf. Enganche)	275	880	900

Tabla 25: Materiales de fabricación de la pala cargadora en cada simulación

Acero S275	275
Acero F114	430
Acero F1272	880
Acero TNC-EXTRA	900

Tabla 26: Límites elásticos de los materiales de fabricación

El escenario con carga de 10000 N se ha realizado únicamente en la simulación 1, ya que como se ve en los resultados las tensiones que se generan en la pala cargadora no superan el límite elástico del Acero S275 de esta simulación, y sin aplicar el factor de seguridad:

SIMULACIÓN 1	
PALA CARGADA ABAJO (10000 N)	TENSIÓN
Estructura pala	15
Chapa paralelográfica	40
Bulón cilindro de volteo	35
Bulón buje	35
Bulón superior enganche	35
Bulón inferior enganche	212

Tabla 27: Tensiones de S1 a 10000N y pala cargada abajo

SIMULACIÓN 1	
PALA EMPUJE FRONTAL (10000 N)	TENSIÓN
Estructura pala	25
Chapa paralelográfica	25
Bulón cilindro de volteo	45
Bulón buje	45
Bulón superior enganche	45
Bulón inferior enganche	280

Tabla 28: Tensiones S1 a 10000N y pala empuje frontal

SIMULACIÓN 1	
PALA CARGADA ARRIBA (10000 N)	TENSIÓN
Estructura pala	20
Chapa paralelográfica	50
Bulón cilindro de volteo	45
Bulón buje	90
Bulón superior enganche	70
Bulón inferior enganche	260

Tabla 29: Tensiones S1 a 10000N y pala cargada arriba

Como se explica en el apartado 5. Resultados se ha ido eligiendo el material a utilizar según la máxima tensión sufrida por el elemento en cualquiera de los escenarios de simulación sin haber aplicado el factor de seguridad. Con estos cambios de material y diseño en los elementos que más tensión sufren, se comparan las tensiones generadas en la pala cargadora según dichos cambios.

6.1 TENSIONES CON LA PALA CARGADA ABAJO

Las tensiones para los 3 escenarios de simulación para el caso de la pala cargada abajo:

PALA CARGADA ABAJO (20000 N)	TENSIÓN(MPA)			FACTOR DE SEG.
	SIMULACIÓN 1	SIMULACIÓN 2	SIMULACIÓN 3	
Estructura pala	35	35	25	11
Chapa paralelográfica	80	80	60	4.583333333
Bulón cilindro de volteo	70	70	125	3.44
Bulón buje	70	70	125	3.44
Bulón superior enganche	70	70	125	3.44
Bulón inferior enganche	420	415	300	3

Tabla 30: Comparación tensiones a 20000N con pala cargada abajo

En este caso de 20000N solo se supera el límite elástico del material utilizado en el caso de la simulación 1 en el bulón inferior de enganche. Con los materiales y diseño utilizados en la simulación 3 las tensiones generadas son de un factor de seguridad mínimo de 3.

	TENSIÓN(MPA)			
PALA CARGADA ABAJO (30000 N)	SIMULACIÓN 1	SIMULACIÓN 2	SIMULACIÓN 3	FACTOR DE SEG.
Estructura pala	50	50	40	6.875
Chapa paralelográfica	140	140	100	2.75
Bulón cilindro de volteo	150	150	280	1.535714286
Bulón buje	150	150	280	1.535714286
Bulón superior enganche	150	150	280	1.535714286
Bulón inferior enganche	630	620	460	1.956521739

Tabla 31: Comparación tensiones a 30000N con pala cargada abajo

En el caso de carga de 30000N no se supera el límite elástico de los materiales utilizados en la simulación 3 pero el factor de seguridad está por debajo del requerido.

6.2 TENSIONES CON LA PALA EMPUJE FRONTAL

Las tensiones para los 3 escenarios de simulación para el caso de la pala empuje frontal:

	TENSIÓN(MPA)			
PALA EMPUJE FRONTAL (20000 N)	SIMULACIÓN 1	SIMULACIÓN 2	SIMULACIÓN 3	FACTOR DE SEG.
Estructura pala	35	50	35	7.857142857
Chapa paralelográfica	35	50	35	7.857142857
Bulón cilindro de volteo	100	90	145	2.965517241
Bulón buje	100	90	145	2.965517241
Bulón superior enganche	100	90	145	2.965517241
Bulón inferior enganche	570	560	360	2.5

Tabla 32: Comparación tensiones a 20000N con pala empuje frontal

En este caso de 20000N, al igual que en el caso de la pala cargada abajo, solo se supera el límite elástico del material utilizado en el caso de la simulación 1 en el bulón inferior de enganche. Con los materiales y diseño utilizados en la simulación 3 el factor de seguridad está por encima de 2,5.

	TENSIÓN(MPA)			
PALA EMPUJE FRONTAL (30000 N)	SIMULACIÓN 1	SIMULACIÓN 2	SIMULACIÓN 3	FACTOR DE SEG.
Estructura pala	70	70	45	6.111111111
Chapa paralelográfica	70	70	45	6.111111111
Bulón cilindro de volteo	120	130	220	1.954545455
Bulón buje	120	130	220	1.954545455
Bulón superior enganche	120	130	220	1.954545455
Bulón inferior enganche	850	840	545	1.651376147

Tabla 33: Comparación tensiones a 30000N con pala empuje frontal

En el caso de carga de 30000N al igual que en el caso anterior se supera el límite en la simulación 1. Las tensiones en la simulación 3 no superan el límite elástico, pero en el caso de los bulones el factor de seguridad no es el mínimo requerido de 2.

6.3 TENSIONES CON LA PALA CARGADA ARRIBA

Las tensiones para los 3 escenarios de simulación para el caso de la pala cargada arriba:

PALA CARGADA ARRIBA (20000 N)	TENSIÓN(MPA)			FACTOR DE SEG.
	SIMULACIÓN 1	SIMULACIÓN 2	SIMULACIÓN 3	
Estructura pala	40	40	35	7.857142857
Chapa paralelográfica	90	90	80	3.4375
Bulón cilindro de volteo	75	100	160	2.6875
Bulón buje	190	220	190	2.263157895
Bulón superior enganche	75	100	160	2.6875
Bulón inferior enganche	530	520	430	2.093023256

Tabla 34:Comparación tensiones a 20000N con pala cargada arriba

En este caso de 20000N, al igual que en el caso de la pala cargada abajo y de empuje frontal, solo se supera el límite elástico del material utilizado en el caso de la simulación 1 en el bulón inferior de enganche. Con los materiales y diseño utilizados en la simulación 3 el factor de seguridad esta por encima del mínimo de 2.

PALA CARGADA ARRIBA(30000 N)	TENSIÓN(MPA)			FACTOR DE SEG.
	SIMULACIÓN 1	SIMULACIÓN 2	SIMULACIÓN 3	
Estructura pala	60	60	50	5.5
Chapa paralelográfica	140	140	110	2.5
Bulón cilindro de volteo	240	250	240	1.791666667
Bulón buje	300	330	280	1.535714286
Bulón superior enganche	240	250	240	1.791666667
Bulón inferior enganche	800	780	640	1.40625

Tabla 35:Comparación tensiones a 30000N con pala cargada arriba

En el caso de carga de 30000N de pala cargada arriba en las condiciones de la simulación 1 el bulón del buje y el bulón inferior del enganche superan el límite elástico del material, sin haber aplicado aún el factor de seguridad.

En el escenario de la simulación 3 las tensiones generadas en la pala cargadora no superan los límites elásticos de los materiales utilizados pero el factor de seguridad no es el mínimo requerido de 2.

6.4 ANALISIS DESPLAZAMIENTOS

Se ha analizado el desplazamiento que sufre un punto del bulón que está en la punta del brazo de la pala cargadora como referencia para dar por válido las deformaciones que se producen.

En el escenario de la pala cargada abajo los desplazamientos producidos en las 3 simulaciones son:

SIMULACIÓN 1	PALA CARGADA ABAJO (10000 N)	PALA CARGADA ABAJO (20000 N)	PALA CARGADA ABAJO (30000 N)	FACTOR DE SEGURIDAD
DESPLAZAMIENTO EN Z	2.55	5.1	7.66	2.61096606
SIMULACIÓN 2	PALA CARGADA ABAJO (10000 N)	PALA CARGADA ABAJO (20000 N)	PALA CARGADA ABAJO (30000 N)	FACTOR DE SEGURIDAD
DESPLAZAMIENTO EN Z		5.1	7.65	2.61437908
SIMULACIÓN 3	PALA CARGADA ABAJO (10000 N)	PALA CARGADA ABAJO (20000 N)	PALA CARGADA ABAJO (30000 N)	FACTOR DE SEGURIDAD
DESPLAZAMIENTO EN Z		5.1	7.65	2.61437908

Tabla 36: Comparación desplazamientos en simulaciones con pala cargada abajo

En las 3 simulaciones con la pala cargada abajo se observa que aun habiendo cambiado el material y diseño de varios elementos de la pala el desplazamiento se mantiene constante en todas ellas. En ningún caso se superan los 20 mm.

El factor de seguridad de los desplazamientos sobre los 20 mm es mayor de 2.

En el escenario de la pala empuje frontal los desplazamientos producidos en las 3 simulaciones son:

SIMULACIÓN 1	PALA EMPUJE FRONTAL (10000 N)	PALA EMPUJE FRONTAL (20000 N)	PALA EMPUJE FRONTAL (30000 N)	FACTOR DE SEGURIDAD
DESPLAZAMIENTO EN X	1.42	2.83	4.24	4.71698113
SIMULACIÓN 2	PALA EMPUJE FRONTAL (10000 N)	PALA EMPUJE FRONTAL (20000 N)	PALA EMPUJE FRONTAL (30000 N)	FACTOR DE SEGURIDAD
DESPLAZAMIENTO EN X		2.84	4.25	4.70588235
SIMULACIÓN 3	PALA EMPUJE FRONTAL (10000 N)	PALA EMPUJE FRONTAL (20000 N)	PALA EMPUJE FRONTAL (30000 N)	FACTOR DE SEGURIDAD
DESPLAZAMIENTO EN X		2.83	4.23	4.72813239

Tabla 37: Comparación desplazamientos en simulaciones con pala empuje frontal

En las 3 simulaciones con la pala empuje frontal se observa que aun habiendo cambiado el material y diseño de varios elementos de la pala el desplazamiento se mantiene constante en todas ellas. En ningún caso se superan los 20 mm, no se llega ni a 5 mm.

El factor de seguridad sobre los 20 mm es 4,7.

En el escenario de la pala cargada arriba los desplazamientos producidos en las 3 simulaciones son:

Máster en Ingeniería Industrial

SIMULACIÓN 1	PALA CARGADA ARRIBA (10000 N)	PALA CARGADA ARRIBA (20000 N)	PALA CARGADA ARRIBA (30000 N)	FACTOR DE SEGURIDAD
DESPLAZAMIENTO EN Z	3.34	6.7	10	2
SIMULACIÓN 2	PALA CARGADA ARRIBA (10000 N)	PALA CARGADA ARRIBA (20000 N)	PALA CARGADA ARRIBA (30000 N)	FACTOR DE SEGURIDAD
DESPLAZAMIENTO EN Z		6.71	10.1	1.98019802
SIMULACIÓN 3	PALA CARGADA ARRIBA (10000 N)	PALA CARGADA ARRIBA (20000 N)	PALA CARGADA ARRIBA (30000 N)	FACTOR DE SEGURIDAD
DESPLAZAMIENTO EN Z		6.69	10	2

Tabla 38: Comparación desplazamientos en simulaciones con pala cargada arriba

En las 3 simulaciones con la pala cargada arriba se observa que aun habiendo cambiado el material y diseño de varios elementos de la pala el desplazamiento se mantiene constante en todas ellas. En ningún caso se superan los 20 mm, llegando a 10 mm.

El factor de seguridad sobre los 20 mm es 2.

Se observa que el cambio del material de fabricación no influye en los desplazamientos de la punta del brazo de la pala cargadora. El cambio del material de fabricación aumenta la resistencia y rigidez de los bulones, pero el resto de la pala cargadora mantiene el material de fabricación inicial, el acero 275N. Por lo que la rigidez del brazo de la pala cargadora desde el punto de apoyo (pilarete) hasta la punta del brazo (buje) es la misma, esto explica que la deformación del brazo sea la misma en todas las simulaciones aun habiendo cambiado el material de fabricación de los bulones.

7.CONCLUSIONES

El proyecto consistía en el modelado 3D de una pala cargadora y en el estudio de las tensiones y deformaciones producidas según el material de fabricación.

El trabajo se ha dividido en varias fases de diseño y simulación de cargas. Las fases de diseño han consistido en hacer un listado de los componentes de la pala cargadora y el modelado 3D de cada uno de ellos a partir de los planos reales de fabricación. La pala cargadora que se ha utilizado para el estudio es el modelo 410 E2 que fabrica Maquinaria Agrícola El León.

En el modelado 3D se ensamblan los componentes de la pala aplicando las restricciones que existen entre ellos, y recreando los movimientos de elevación y volteo de la carga que se realizan en la realidad.

Lo siguiente ha sido realizar el estudio de simulación definiendo la geometría que se va a analizar, los conectores de pegado entre los componentes, la carga que se va a simular, los componentes inmóviles del estudio, y el mallado de la geometría.

En los escenarios de simulación se han analizado la pala cargada abajo, la pala en empuje frontal, y la pala cargada arriba, en cada posición se estudia con carga de 10000N, 20000N (que es la carga máxima recomendada) y 30000N. Las combinaciones de posición y carga se simulan cambiando el material de fabricación y diseño de algunos elementos.

Se realiza un estudio de las tensiones y deformaciones generadas en la pala cargadora, y se cambia el diseño y material de fabricación en busca de que se cumplan los requisitos para el criterio de resistencia y rigidez.

Se observa que en la simulación final con los materiales y diseño empleados para la carga máxima de trabajo de 20000N se cumplen los requisitos de resistencia, el factor de seguridad está por encima de 2, y rigidez de la pala cargadora. Para la carga simulada de 30000N se cumplen los requisitos de rigidez en todos los escenarios. Los requisitos de resistencia no se cumplen en los bulones inferiores del enganche en ninguna de las 3 posiciones, la tensión que sufren no supera el límite elástico del material, pero el factor de seguridad resulta por debajo del requerido.

El desplazamiento analizado de la punta del brazo de la pala cargadora se mantiene constante en las 3 simulaciones realizadas. El cambio del material de fabricación de los bulones no influye en los desplazamientos que se dan en la punta del brazo. Esto se debe a que el desplazamiento en la punta se debe a la deformación que sufre la estructura principal de la pala cargadora desde el pilarete hasta la punta, y toda esa estructura se ha mantenido el material en la simulación 1, 2 y 3.

Utilizando como material de fabricación en los bulones del enganche, del buje y del cilindro de volteo aceros de alto límite elástico, y aumentando 2 mm el diámetro del bulón inferior del enganche se consigue cumplir los requisitos de resistencia y rigidez. Se ha conseguido sin tener que sobredimensionar elementos de la pala cargadora o cambiar el material de fabricación en componentes que sufren tensiones muy bajas.

8.REFERENCIAS

1. **S.A., Maquinaria Agrícola El León.** *Folleto de palas cargadoras.* Zaragoza : s.n., 2020.
2. **Real Decreto 751/2011 de 27 de mayo, por el que se aprueba la Instrucción de Acero Estructural (EAE), Capítulo IV.Materiales y geometría.**
3. **S.L., Ipargama.** *Aceros Especiales Cuadro de Calidades*
4. **BEER, Ferdinand P. & JOHNSTON, E. Russell Jr.** *Mecánica de Materiales. Segunda Edición.* Colombia : Mc Graw Hill, 1998.
5. **R., Aviles.** *Métodos de cálculo de fatiga para ingeniería.* Madrid : Ediciones Paraninfo, 2015.
6. **Hong Young, J.** *Instrumented Self-Propelled Sprayer to Determine Dynamic Boom Effects on Droplet Application Uniformity.* Master's Thesis, University of Tennessee, USA, 2003.

ANEXOS

Anexo: Software de diseño 3D y simulación de estudios de carga

El software de diseño 3D que se va a utilizar es SolidEdge. Actualmente en la empresa se trabaja con Autocad 2D por lo que todos los dibujos que se realizan a ordenador son planos en los que hay que trabajar con las 3 vistas principales: alzado, planta y perfil. Esta forma de trabajo ralentiza la velocidad a la que se dibujan los tractores, palas cargadoras o cualquier elemento de los que se realizan planos, ya que se dibuja 1 solo elemento en 3 vistas lo que prácticamente es triplicar el trabajo de dibujo y diseño.

Con la utilización del software de modelado 3D se conseguirá disminuir los tiempos de dibujo de planos, además de que dibujar en 3D es más intuitivo y fácil que dibujar varias vistas en 2D.

En Solid Edge una vez dibujados todas las piezas, chapas, cilindros y demás elementos que componen la pala, se realizará el ensamblaje para formar la pala. En el entorno de ensamblaje mediante los comandos que permiten aplicar restricciones entre componentes y situarlos en el espacio de manera que mantengan los grados de libertad reales y sus restricciones físicas y espaciales con los demás componentes de la pala.

Con la pala ya formada, lo siguiente es utilizar el módulo de simulación de fuerzas de Solid Edge. En este módulo hay que realizar 4 acciones principales de definir la geometría, definir las cargas, definir las restricciones adicionales, realizar las conexiones automáticas y realizar el mallado:

- Definir la geometría permite seleccionar las caras, operaciones, o elementos que se van a estudiar en la simulación.
- En el módulo de cargas se fija el tipo de carga, dirección, módulo y sobre qué cara del ensamblaje se ejerce dicha carga.
- En las restricciones hay que definir las caras u operaciones que se van a quedar fijadas en el espacio, además se pueden añadir restricciones adicionales que no se hayan considerado en el modelo de diseño.
- El comando de conexiones automáticas genera conexiones entre pares de caras como si dichas caras de diferentes piezas estuvieran unidas.
- El último módulo es el de mallado, en el que se indica el tamaño de la malla que se va a generar sobre el ensamblaje, pudiendo especificar diferentes tamaños de malla para diferentes elementos del ensamblaje.

Con todas las condiciones y módulos especificados, el software resuelve la simulación y da como resultado los desplazamientos y tensiones generadas en todo el ensamblaje.

Anexo: Diseño 3D de los componentes de la pala cargadora

PIEZAS

BUJE

El buje es el elemento que se coloca en la punta del brazo de la pala cargadora. Da rigidez a la parte final de la pala cargadora, una zona donde se concentran tensiones.



Ilustración 20: Bujes

BARRA DE ENGANCHE INFERIOR

Esta pieza es una simulación de la barra que en el diseño real actúa de enganche automático del implemento de la pala con el enganche.

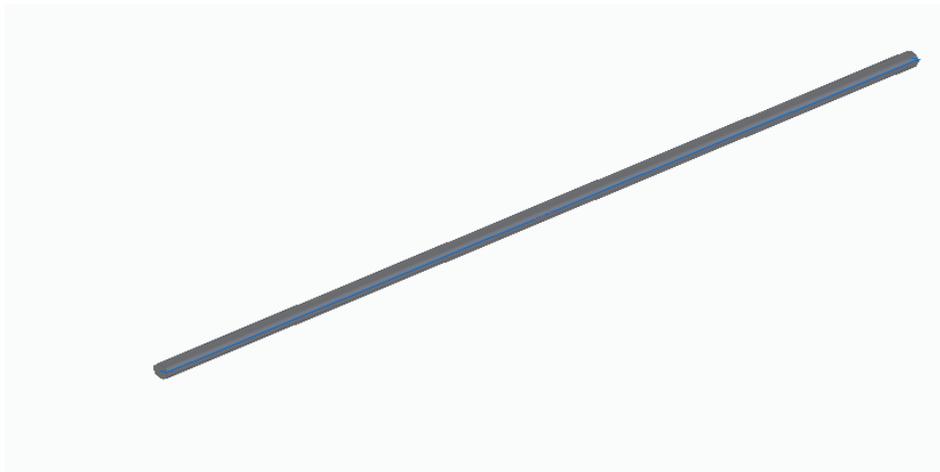


Ilustración 21: Barra de enganche inferior

SUBENSAMBLAJE

PARALELOGRAMO

Es uno de los elementos más importantes de la pala cargadora ya que permite que el cazo siga plano mientras la pala cargadora se eleva para que la carga no se desprenda. Un mal diseño del paralelogramo en cuanto al triángulo que forman sus agujeros podría provocar que el cazo no se mantuviera plano durante la elevación de la pala y por lo tanto que la carga se desprendiera.



Ilustración 22:Paralelogramo

CUCHARA DE ÁRIDOS

Es uno de los implementos más vendidos de la empresa debido a su versatilidad. Este subensamblaje está construido principalmente a partir de chapas que conforman el fondo y los laterales de la cuchara. Las orejas de la cuchara con las que se acopla al enganche se dibujan en el entorno pieza. También está formado por dos refuerzos interiores que dan rigidez a toda la cuchara.

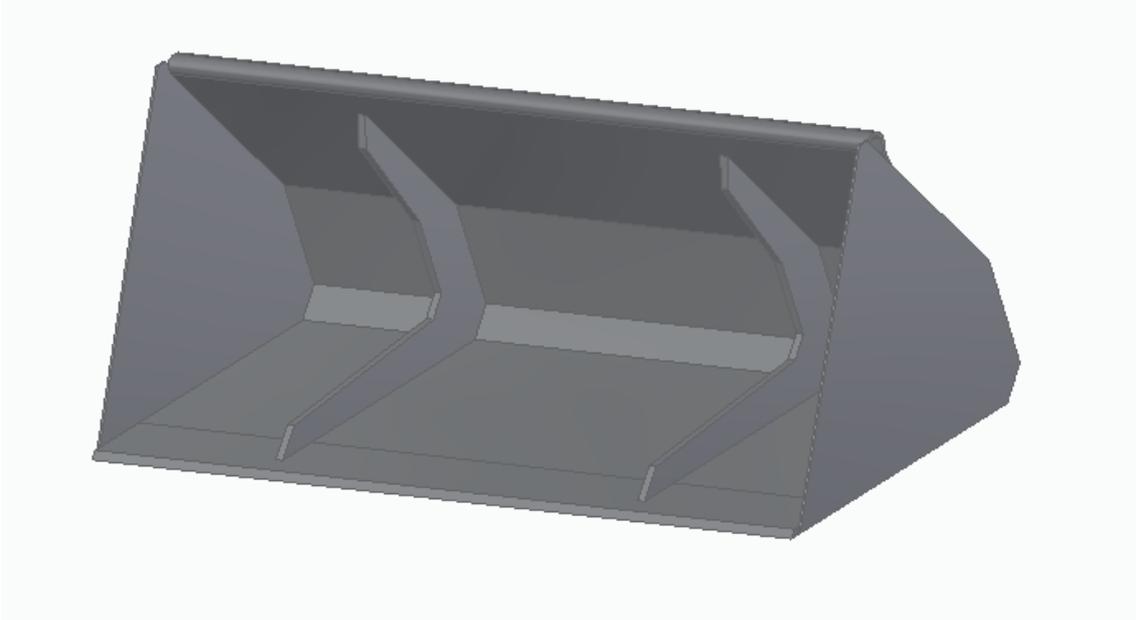


Ilustración 23:Cuchara de áridos

ENGANCHE EUROPEO

Este componente es la unión de la pala cargadora con el implemento. Los puntos donde se engancha el implemento están diseñados para que valgan para implementos de diferentes marcas que también utilizan las dimensiones europeas de enganche. Lo que permite intercambiar implementos de diferentes marcas.



Ilustración 24:Enganche

PILARETE

Es el subensamblaje que hace de unión de la pala cargadora con el portapilarete del amarre del tractor. Tiene un mecanismo para enganchar y desenganchar la pala cargadora con el amarre.



Ilustración 25: Pilarete

CHAPA

PLEGADO BRAZO TRASERO

Este componente es uno de los elementos que forman la estructura principal de la pala cargadora.

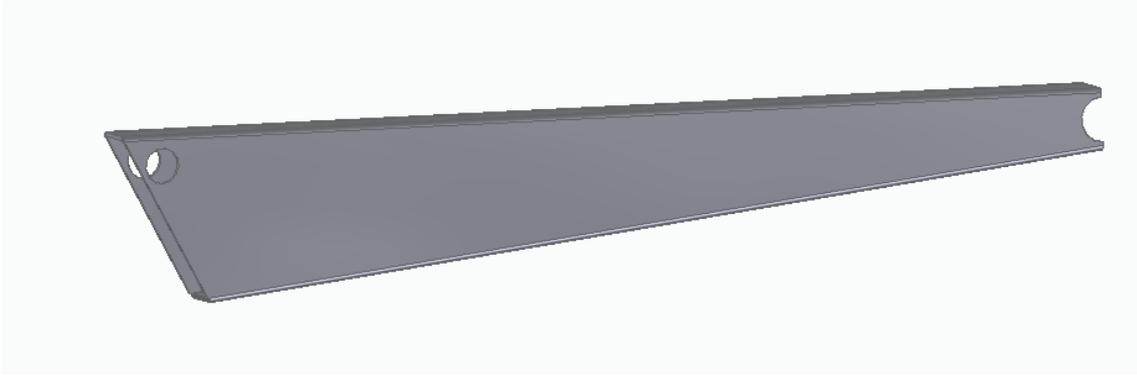


Ilustración 26: Plegado de brazo trasero

PLEGADO BRAZO DELANTERO

Es junto al plegado trasero uno de los elementos que conforman la estructura principal de la pala cargadora.

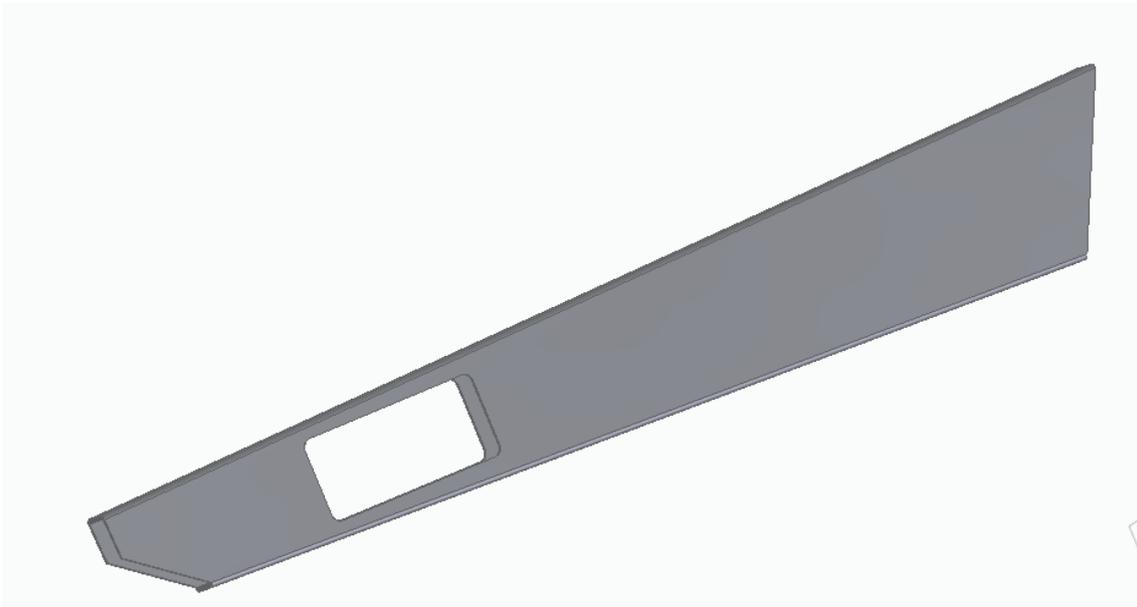


Ilustración 27: Plegado de brazo delantero

CRUCERO

Está formado por dos chapas plegadas que se sueldan. Este elemento une los plegados de brazo delanteros, con lo que la estructura principal de la pala queda formando una estructura única. Además, en su interior se coloca el desviador, latiguillos y amortiguador que llevan las palas cargadoras.

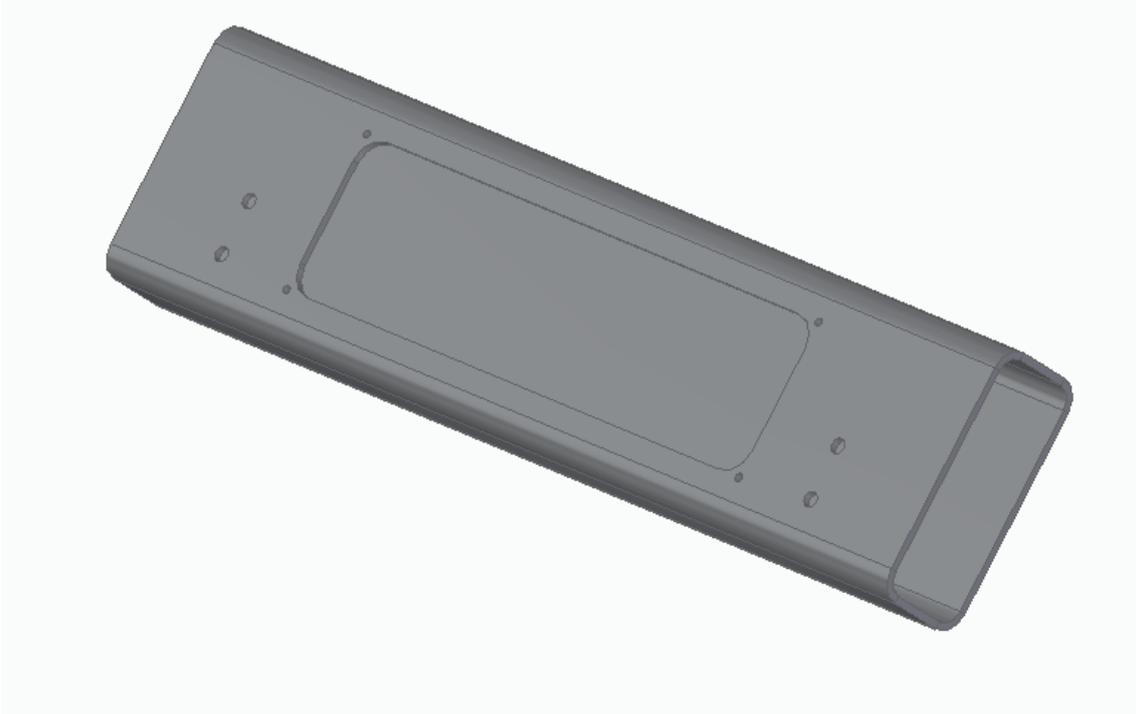


Ilustración 28:Crucero

CHAPA LATERAL BRAZO

Es una chapa plegada que se coloca a ambos lados de los plegados de brazo, y sirve para dar rigidez en esa zona de unión entre los plegados delanteros y traseros. Tiene un agujero donde se une con un bulón al cilindro de elevación de la pala.

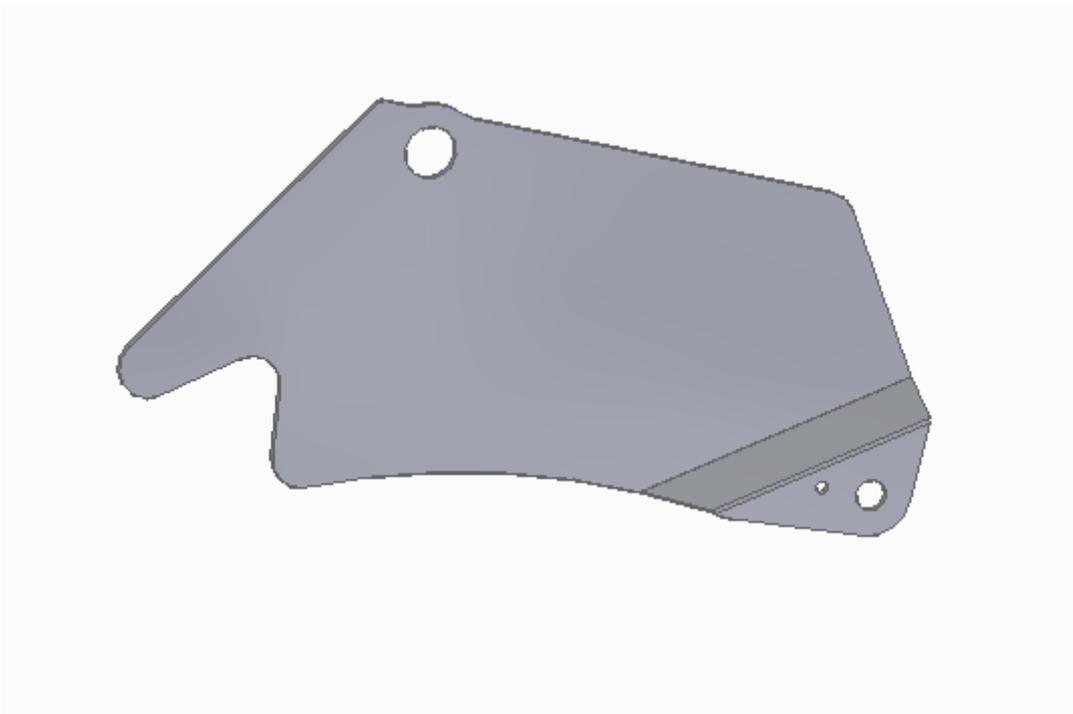


Ilustración 29:Chapa lateral de brazo

BIELAS

Hay 3 tipos de bielas en la pala que se diferencian según su forma. Sirven de unión entre el buje que está en la punta del brazo de la pala y el cilindro de volteo. Es uno de los elementos donde mayores tensiones se concentran.

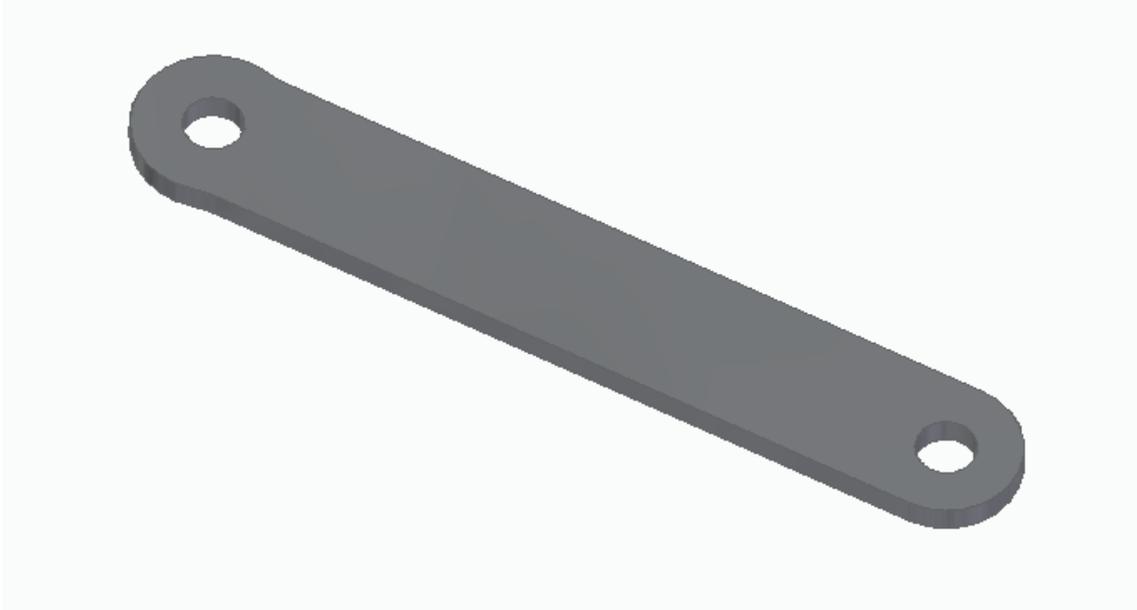


Ilustración 30: Biela

BARRA PARALELOGRÁMICA

Es una chapa plegada en U con un agujero en cada extremo por los que al pasar un bulón queda unida al pilarete y al paralelogramo.

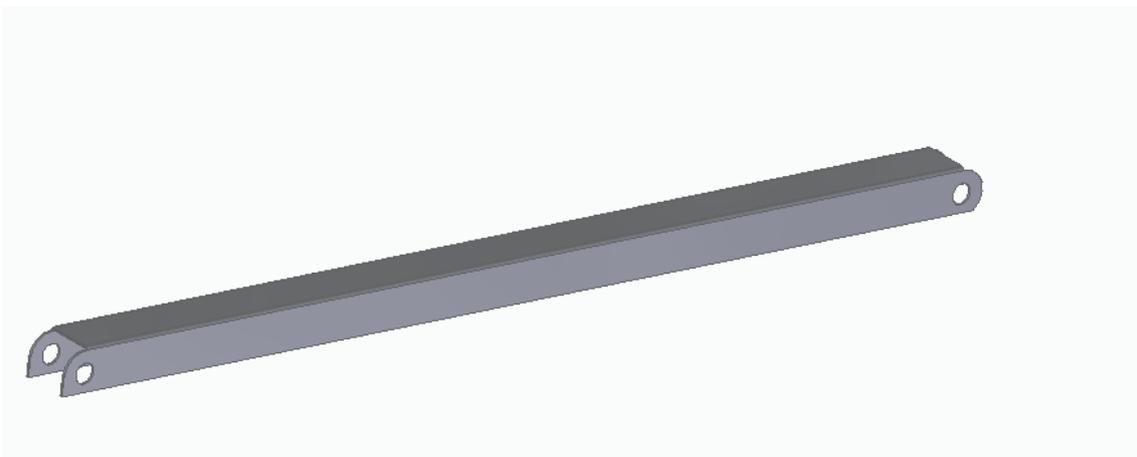


Ilustración 31: Barra paralelográmica

CILINDROS

Se dibuja una simplificación de los cilindros. Dibujando el vástago y la culata del cilindro con las dimensiones reales, pero sin imitar los detalles que estos elementos tienen su fabricación. Se mantienen los parámetros de recogido, estirado y carrera que tienen los cilindros.

CILINDRO DE ELEVACIÓN

El cilindro de elevación tiene de dimensiones:

- Diámetro vástago: 48 mm
- Diámetro exterior camisa: 100 mm
- Recogido: 750 mm
- Carrera: 525 mm
- Estirado: 1275 mm



Ilustración 32: Cilindro de elevación

CILINDRO DE VOLTEO

El cilindro de volteo tiene de dimensiones:

- Diámetro vástago: 40 mm
- Diámetro exterior camisa: 82 mm
- Recogido: 1495 mm
- Carrera: 450 mm
- Estirado: 1945 mm

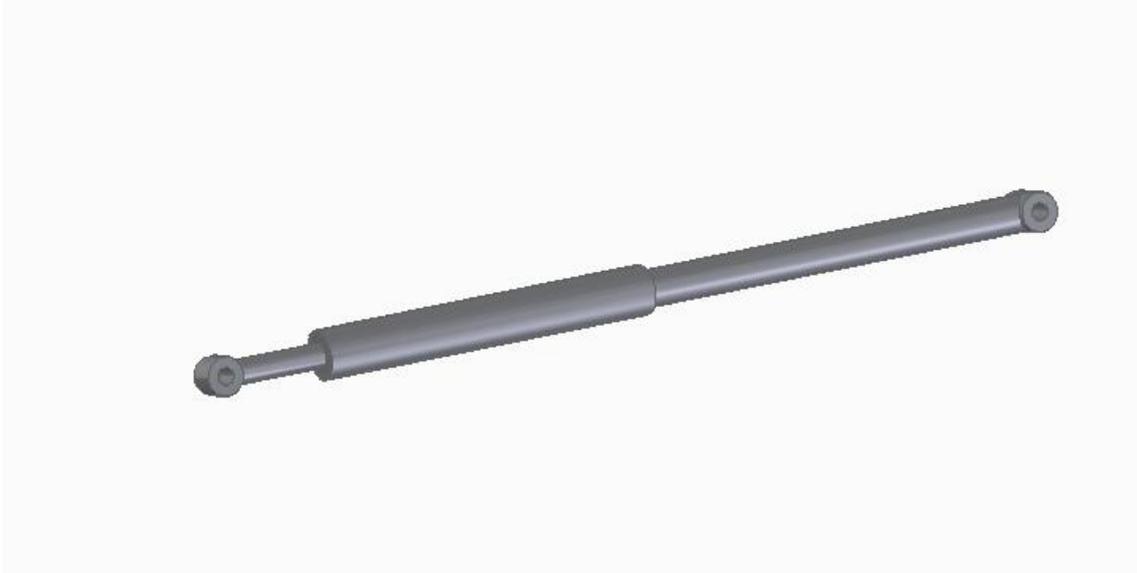


Ilustración 33: Cilindro de volteo

CASQUILLOS

En determinadas articulaciones de la pala cargadora se añaden casquillos para dar solidez y consistencia en esos lugares. Estos elementos trabajan de manera que la tensión y los esfuerzos generados en esas articulaciones se dividen y rebajan la tensión máxima. Hay casquillos en el paralelogramo, uniendo las bielas del vástago de volteo, en el buje del brazo y en varios puntos más. Todos los casquillos tienen 30'5 mm de diámetro.

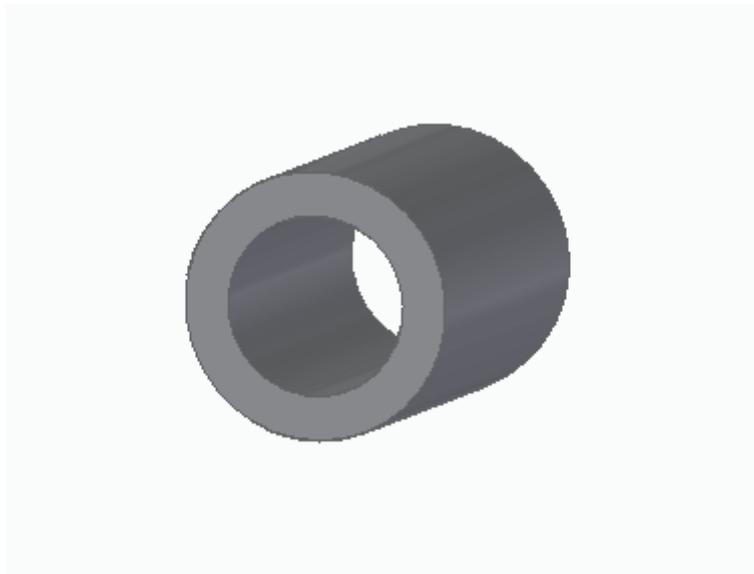


Ilustración 34: Casquillo

BULONES

Todos los elementos que forman las articulaciones de la pala cargadora están unidos por bulones. Hacen de eje de rotación de los elementos de la articulación, y es sobre los que se genera la mayor tensión de la pala cargadora. Es uno de los elementos más importantes en cuanto a la elección del material de fabricación. Todos los bulones tienen 30 mm de diámetro.

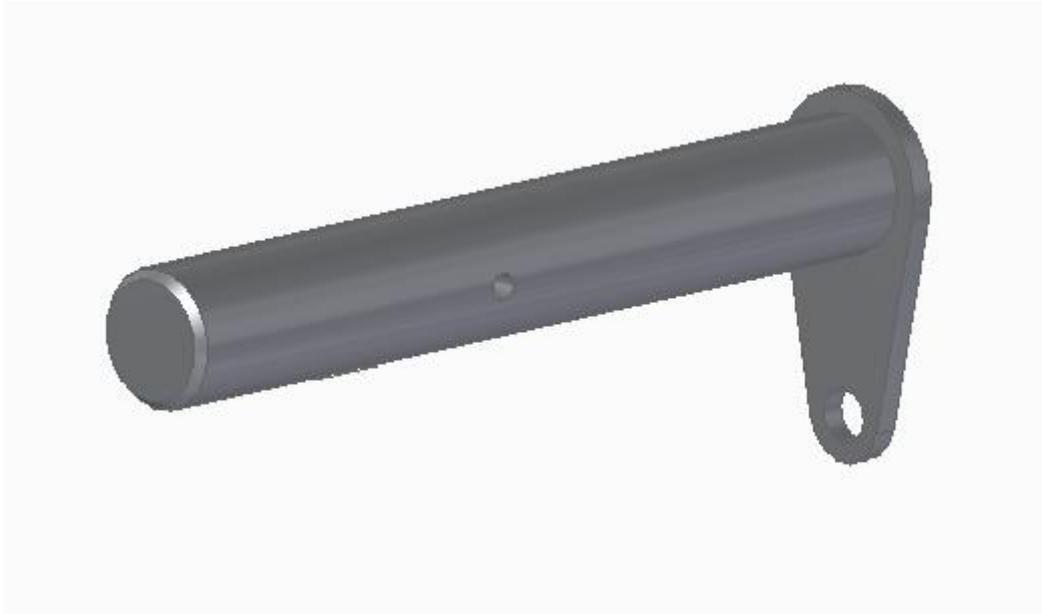


Ilustración 35: Bulón

Anexo: Resultados de las 3 Simulaciones analizadas.

SIMULACIÓN 1

PALA CARGADA ABAJO

En esta situación las piezas que más tensión soportan son los bulones de las bielas, la barra paralelográfica y zonas aisladas de la pala sufren una menor tensión.

- 10000 N

La tensión en general en la pala no supera los 15 MPa, en algunas zonas de la pala la tensión llega a 40 MPa.

En los bulones superiores del enganche la tensión es de 35 MPa.

En los bulones inferiores del enganche la tensión general es de 90 MPa, en una zona concreta llega a 210 MPa.

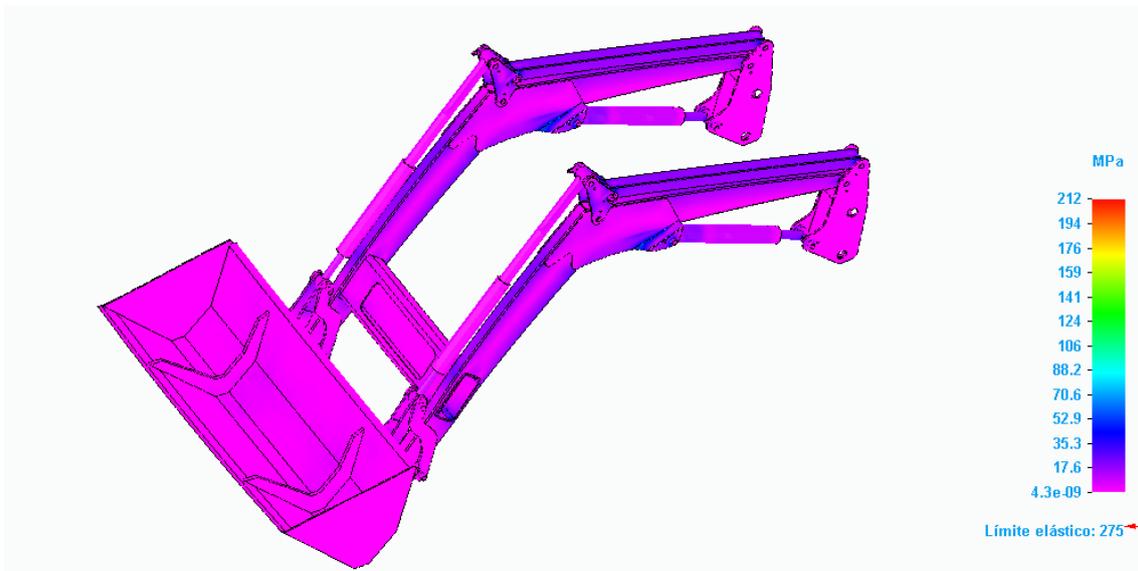


Ilustración 36: S1, Pala abajo cargada 10000N general.

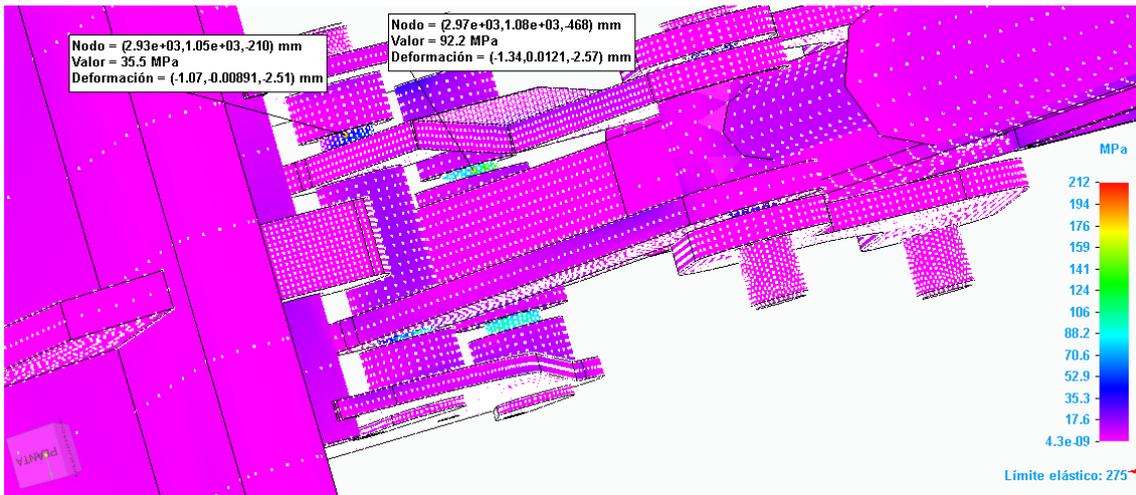


Ilustración 37:S1, Pala cargada abajo 10000N detalle tensiones.

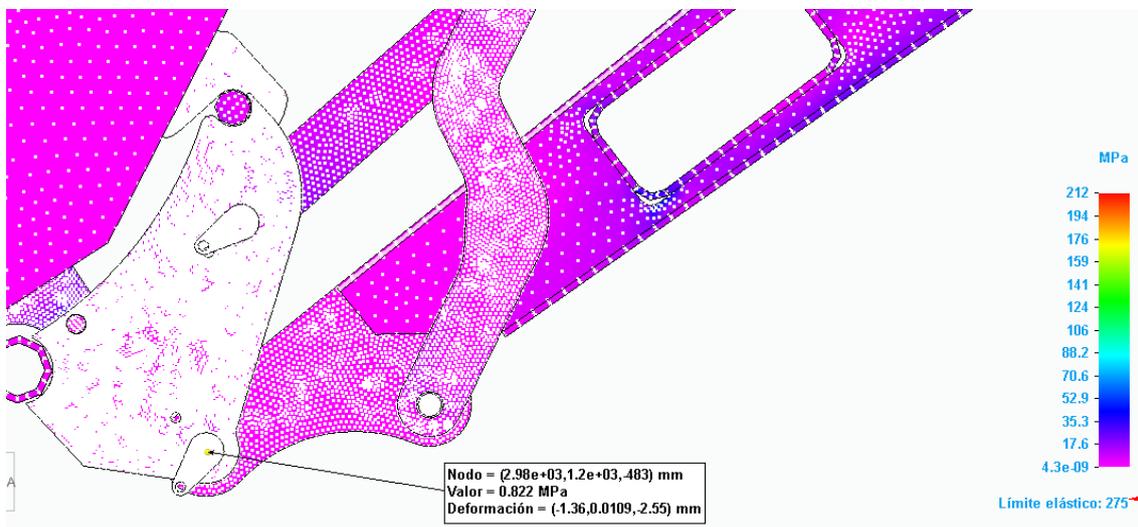


Ilustración 38:S1, Pala cargada abajo 10000N detalle movimiento.

- 20000 N

La tensión general en la estructura de la pala cargadora es baja, salvo en las chaspas paralelogramáticas que llega a ser 80 MPa.

En los bulones superiores del enganche la tensión es de 70 MPa.

En los bulones inferiores del enganche la tensión general es de 170-190 MPa, en una zona se alcanzan los 420 MPa.

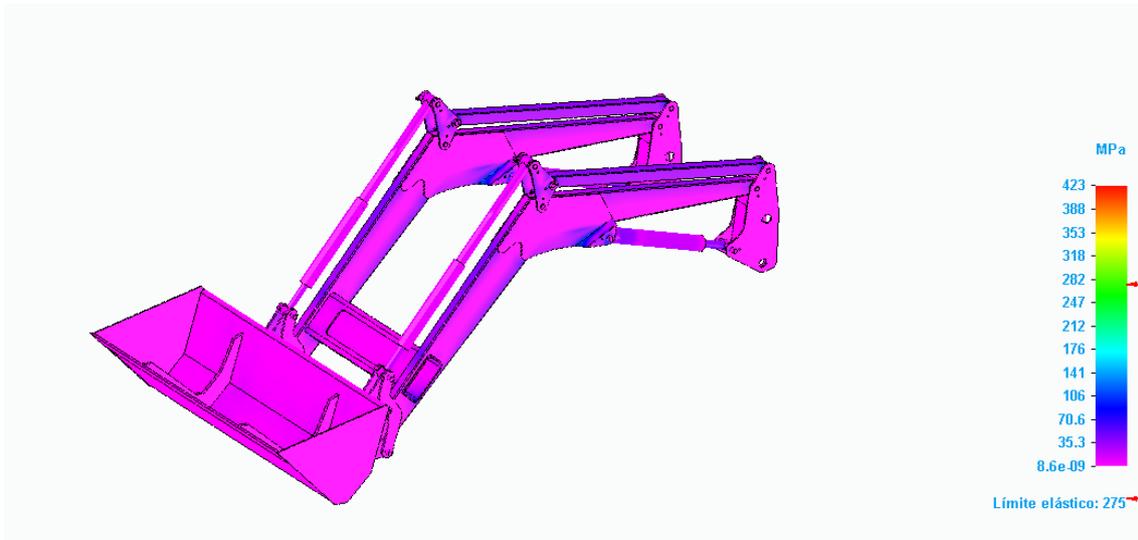


Ilustración 39:S1, Pala cargada abajo 20000N general

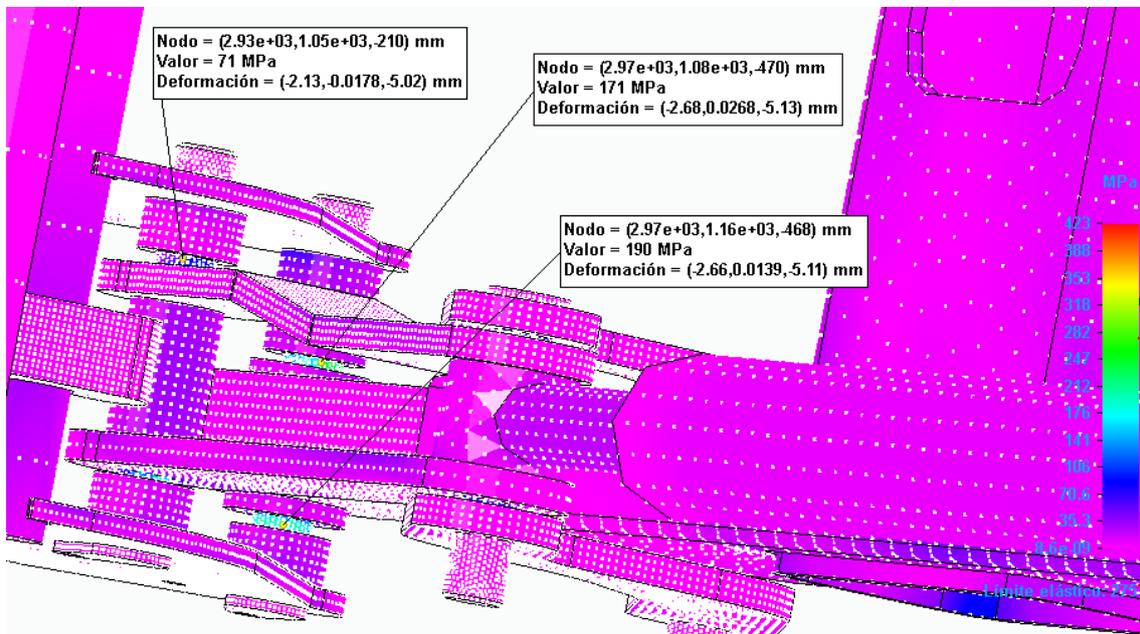


Ilustración 40:S1, Pala cargada abajo 20000N detalle tensiones

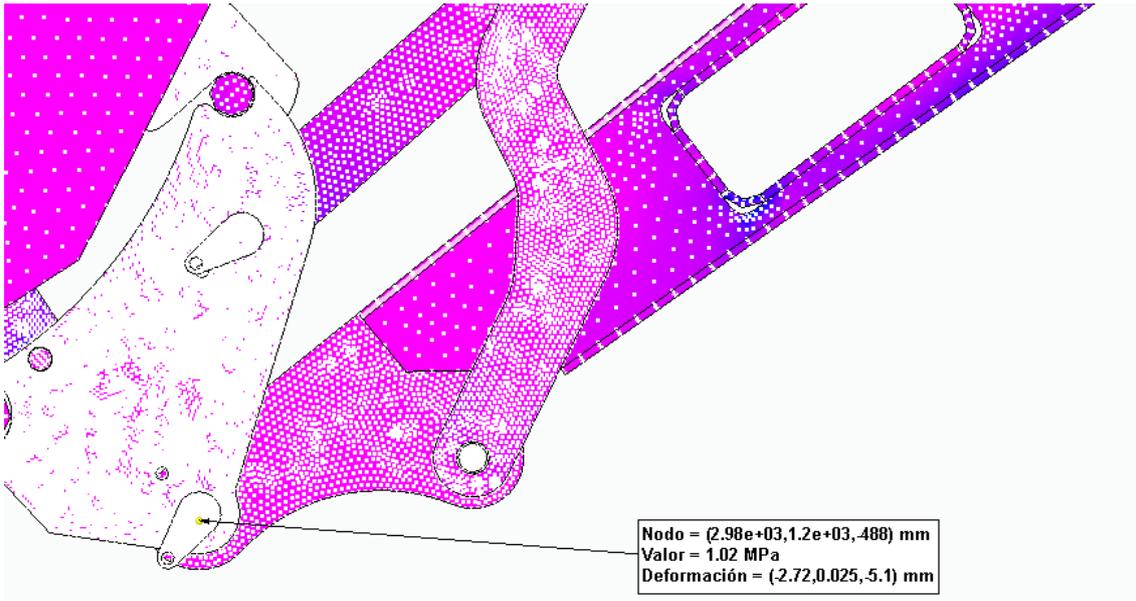


Ilustración 41:S1, Pala cargada abajo 20000N detalle movimiento

- 30000 N

En la chapa paralelográfica que une el brazo delantero y trasero, y en zonas de la barra paralelográfica se llega a una tensión de 140 MPa.

En los bulones superiores del enganche sufren una tensión de 150 MPa.

En los bulones inferiores del enganche la tensión general esta entre 290 y 410 MPa, además en una zona concreta la tensión llega a 630 MPa.

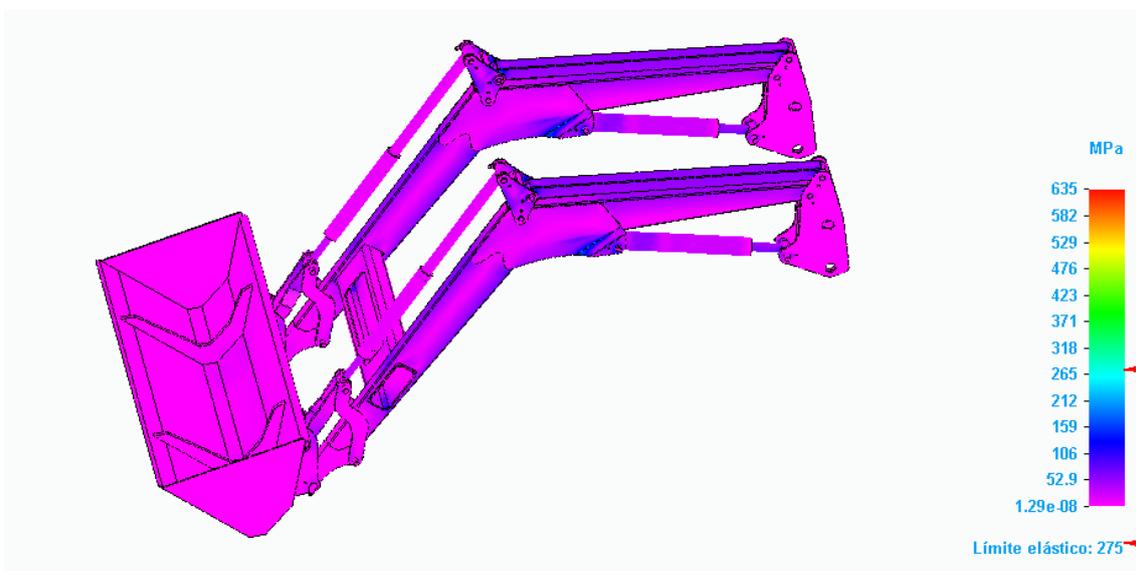


Ilustración 42:S1, Pala cargada abajo 30000N general

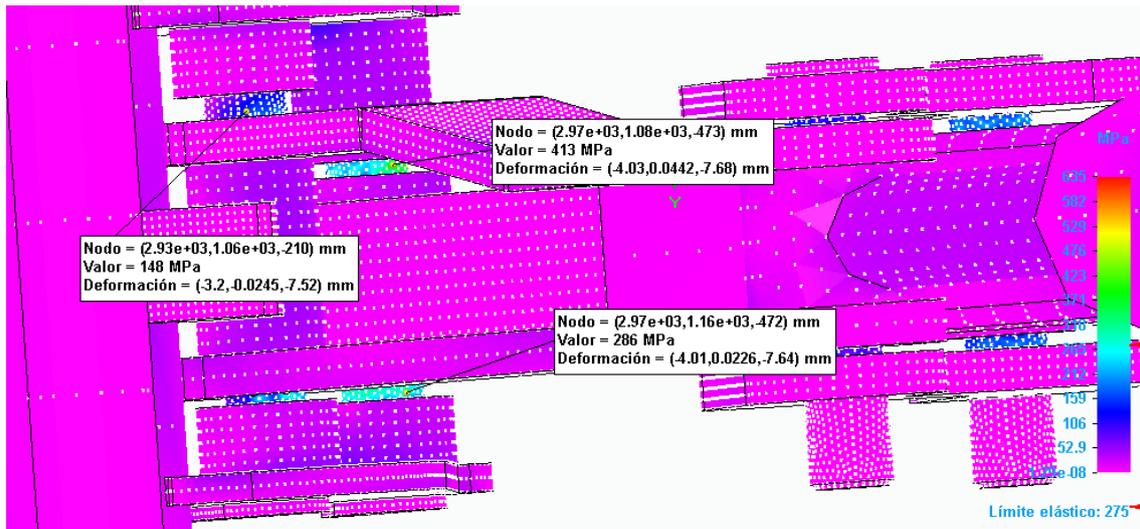


Ilustración 43:S1, Pala cargado abajo 30000N detalle tensiones

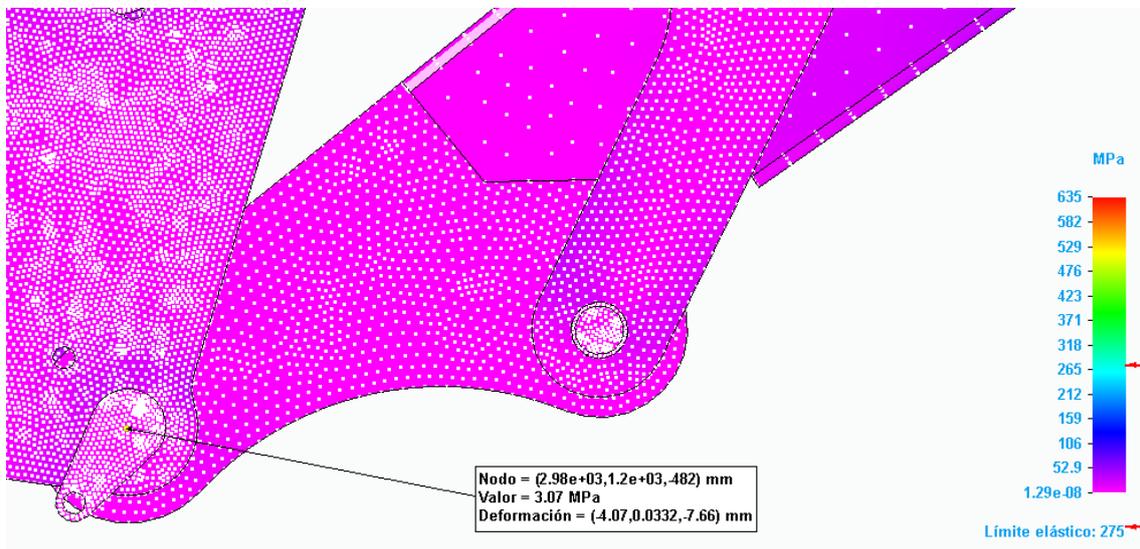


Ilustración 44:S1, Pala cargada abajo 30000N detalle movimiento

PALA ABAJO EMPUJE FRONTAL

En esta situación la pala cargadora en general no sufre tensión y toda la tensión se concentra en los bulones de las bielas.

- 10000 N

En los bulones la tensión general es de entre 50 y 120 MPa, en una pequeña zona se alcanza una tensión de 280 MPa. La tensión general en la pala cargadora es muy baja.

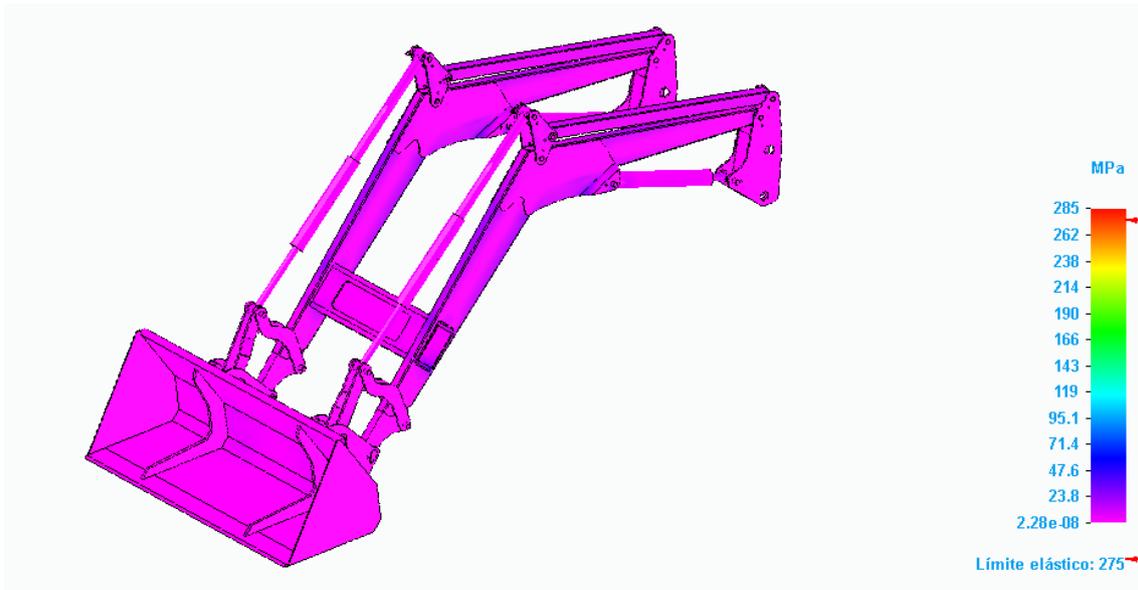


Ilustración 45:S1, Pala empuje frontal 10000N general

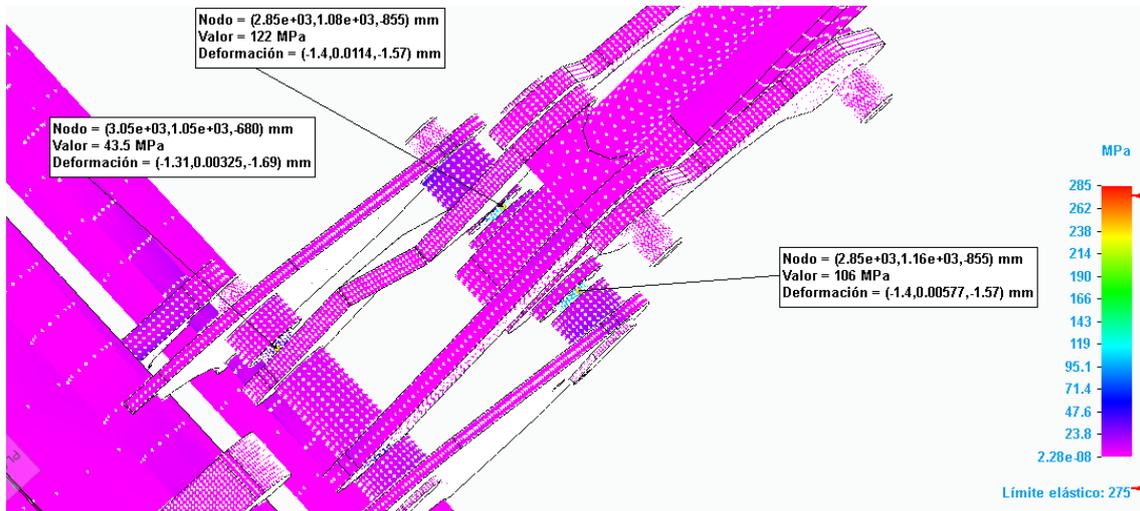


Ilustración 46:S1, Pala empuje frontal 10000N detalle tensiones

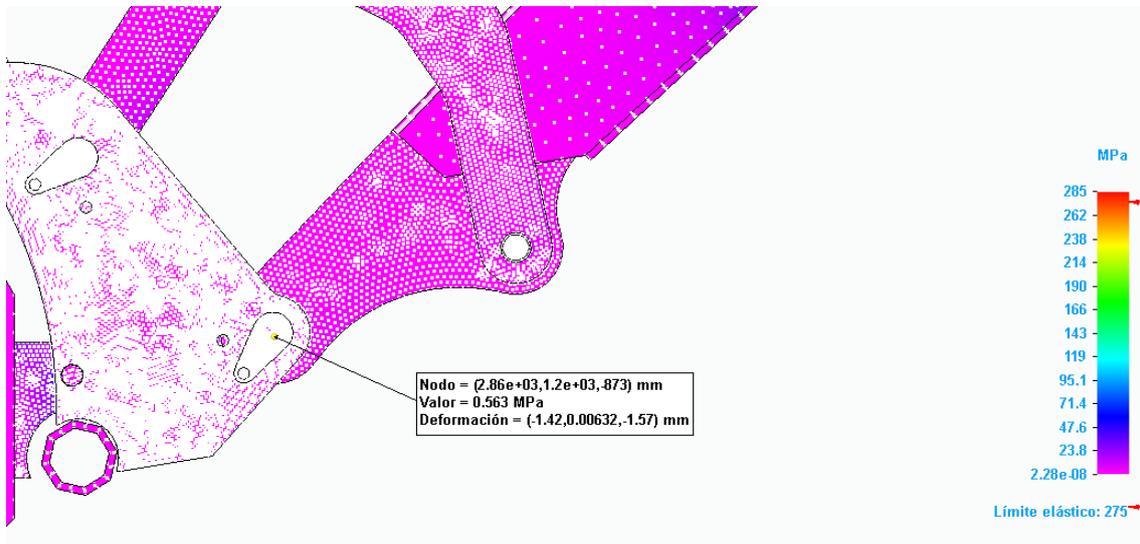


Ilustración 47:S1, Pala empuje frontal 10000N detalle movimiento

- 20000 N

La tensión en la estructura general de la pala cargadora es muy baja.

En los bulones superiores del enganche la tensión es de 100 MPa.

La tensión general en los bulones inferiores del enganche es de entre 180-240 MPa, en una pequeña zona se alcanzan 570 MPa.

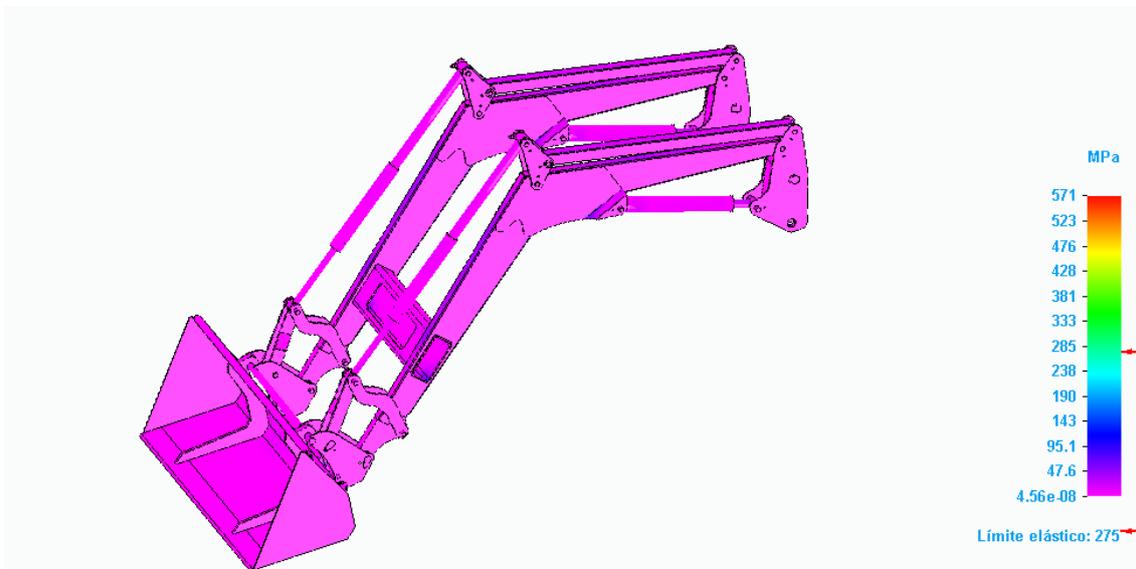


Ilustración 48:S1, Pala empuje frontal 20000N general

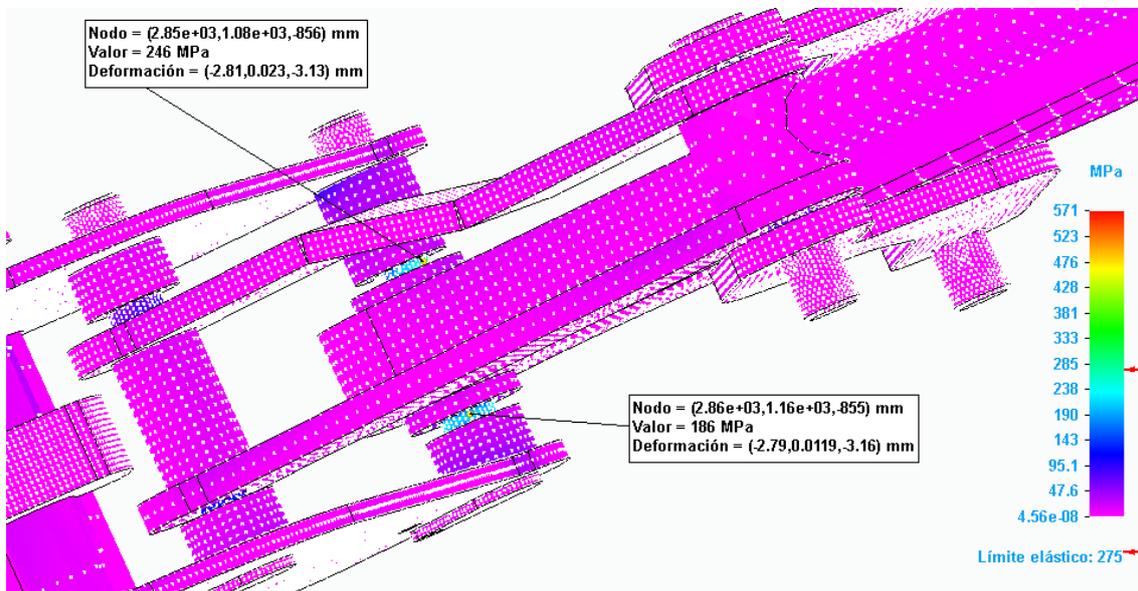


Ilustración 49:S1, Pala empuje frontal 20000N detalle tensiones

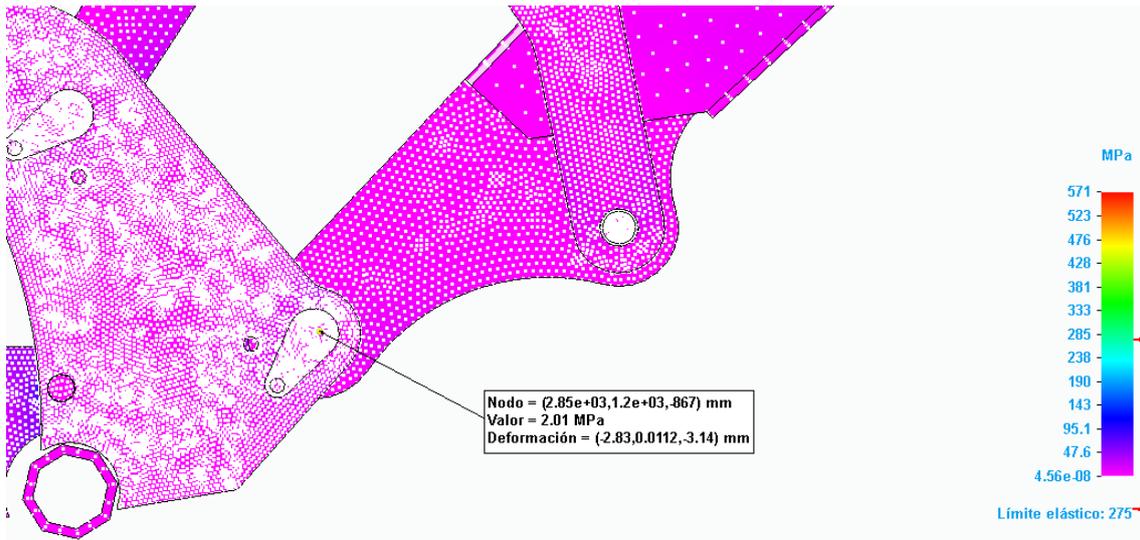


Ilustración 50:S1, Pala empuje frontal 20000N detalle movimiento

- 30000 N

En los bulones superiores de las bielas la tensión general es de 120 MPa.

En los bulones inferiores de las bielas la tensión general esta entre 320 y 460 MPa pero en una pequeña zona es de unos 850 MPa.

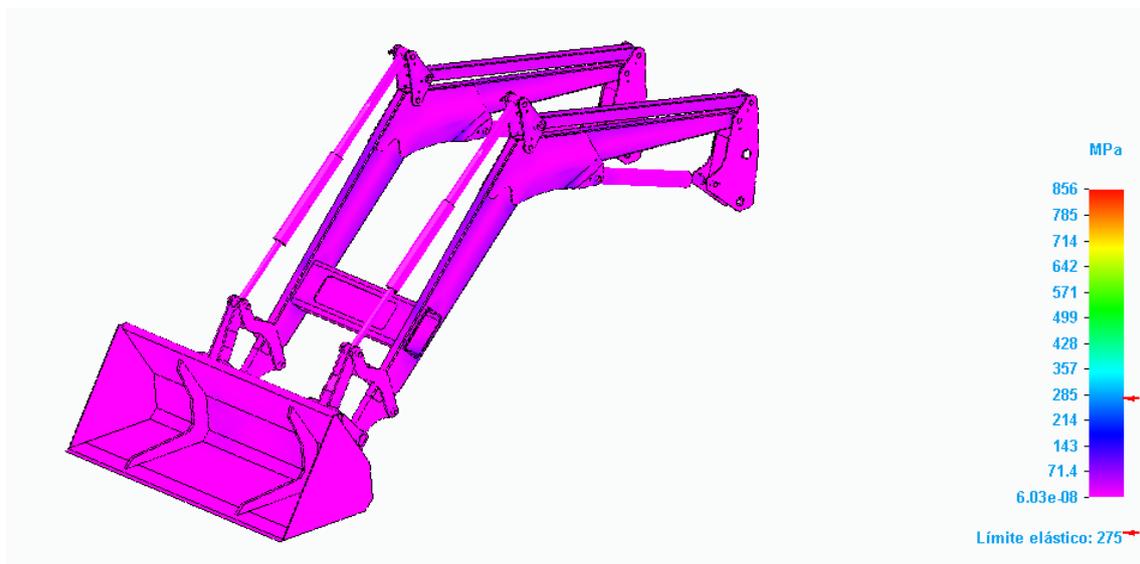


Ilustración 51:S1, Pala empuje frontal 30000N general

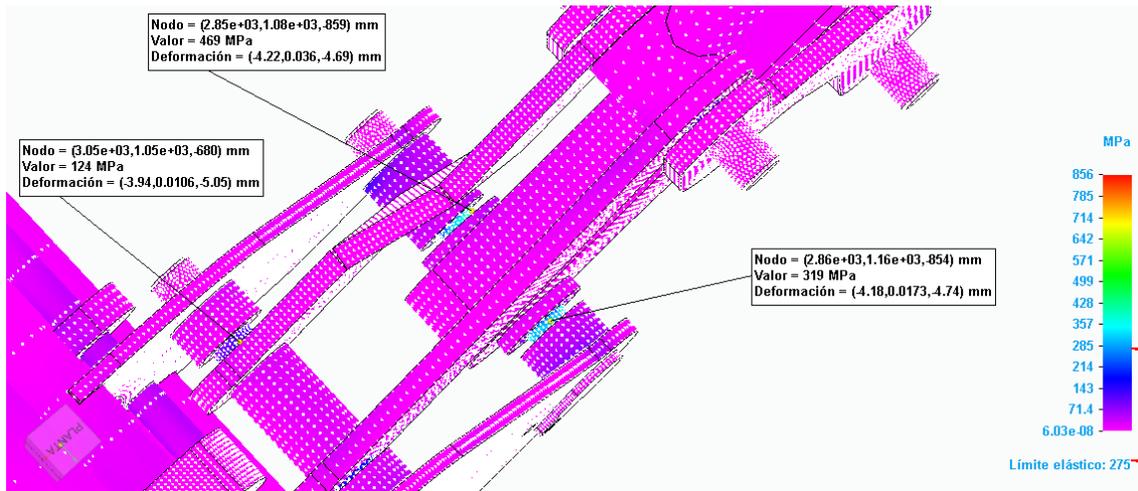


Ilustración 52:S1, Pala empuje frontal 30000N detalle tensiones

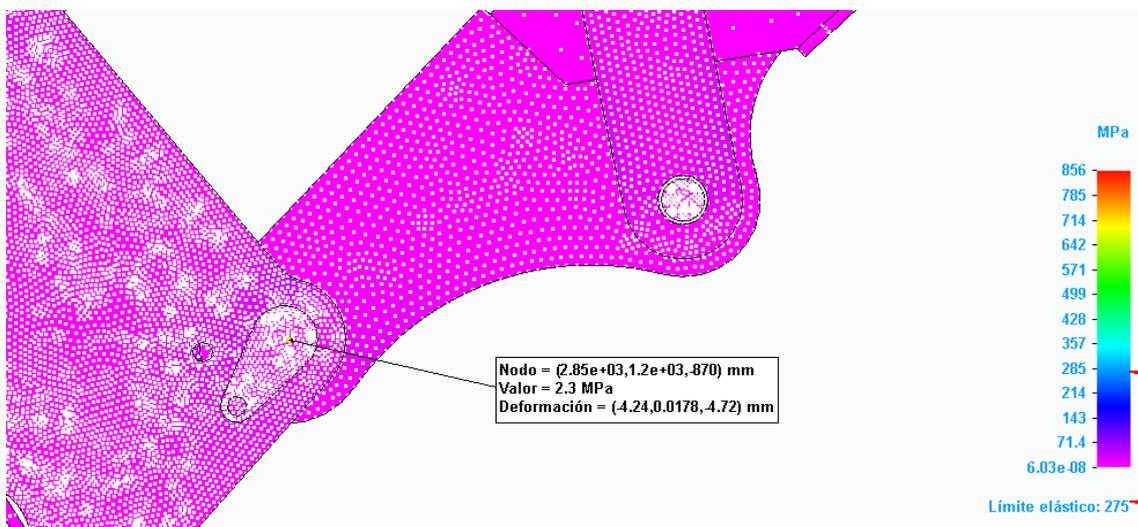


Ilustración 53:S1, Pala empuje frontal 30000N detalle movimiento

PALA ARRIBA CARGADA

En esta situación las piezas que más tensión soportan son los bulones superiores e inferiores de las bielas del enganche, los bulones del buje y del cilindro de volteo. En determinadas zonas de la estructura de la pala cargadora también se concentran tensiones.

- 10000 N

En los bulones superiores la tensión es de 45 MPa, la misma tensión que se alcanza en zonas de la estructura de la pala cargadora.

En los bulones inferiores de las bielas del enganche la tensión general es de 150 MPa, en una zona concreta llega a 260 MPa.

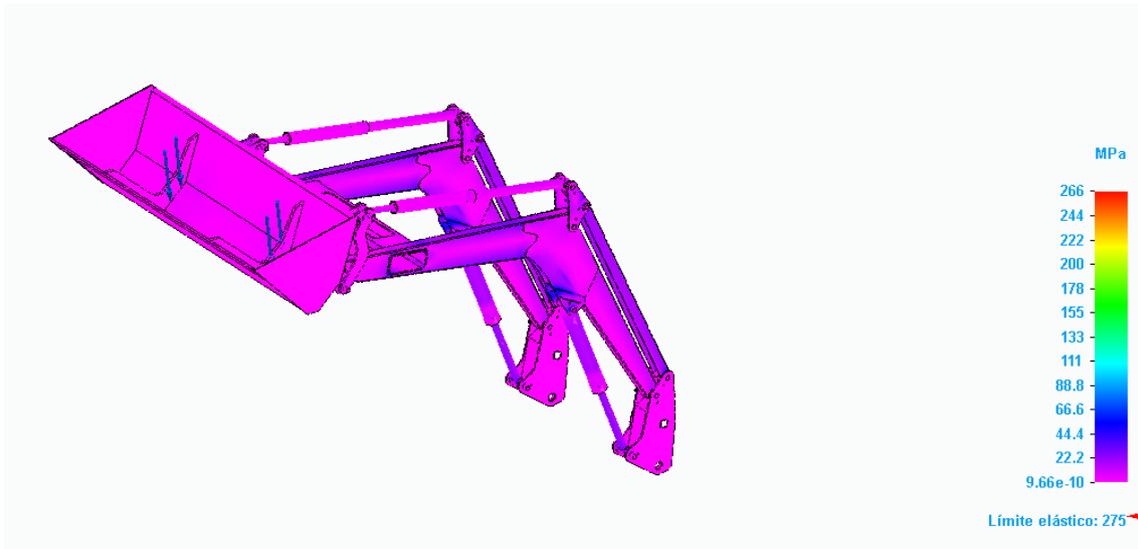


Ilustración 54:S1, Pala cargada arriba 10000N general

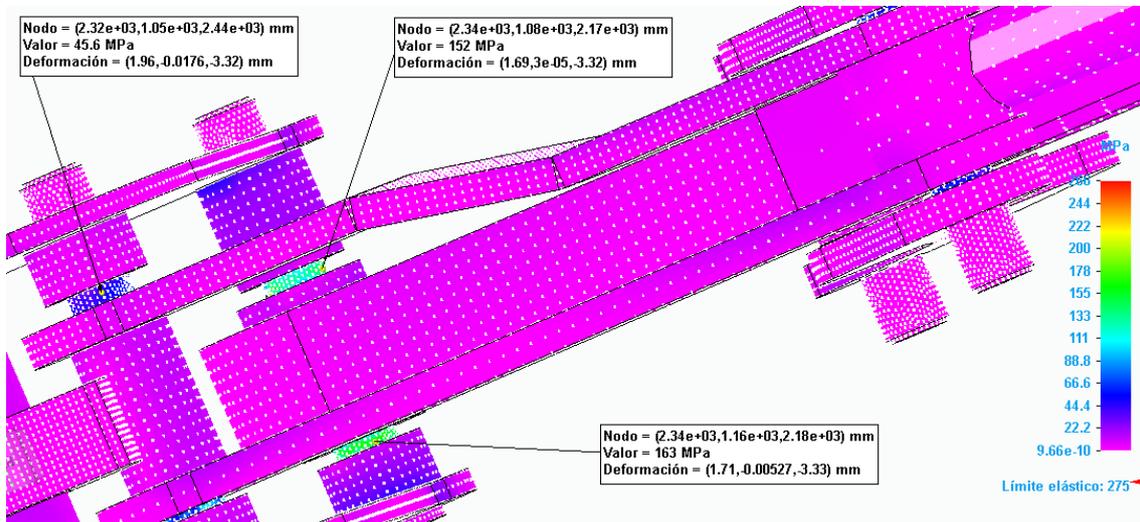


Ilustración 55:S1, Pala cargada arriba 10000N detalle tensiones

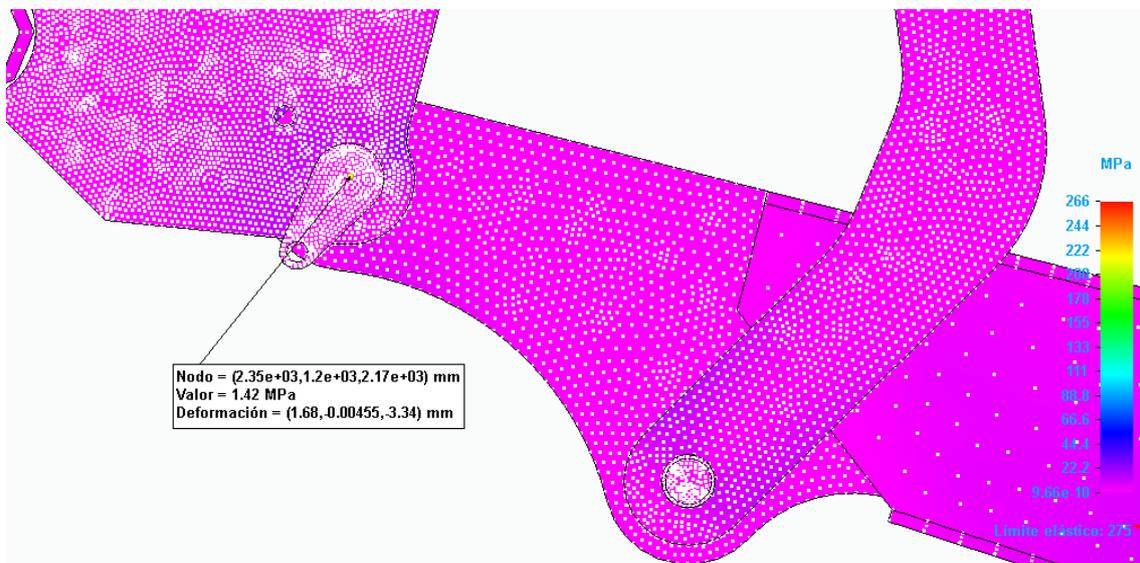


Ilustración 56:S1, Pala cargada arriba 10000N detalle movimiento

- 20000 N

En los bulones inferiores la tensión general es de 75 MPa, es la misma tensión en ciertas zonas de la estructura general de la pala cargadora.

En los bulones superiores de las bielas del enganche la tensión esta entre 260 y 330 MPa, en una zona concreta llega a 530 MPa.

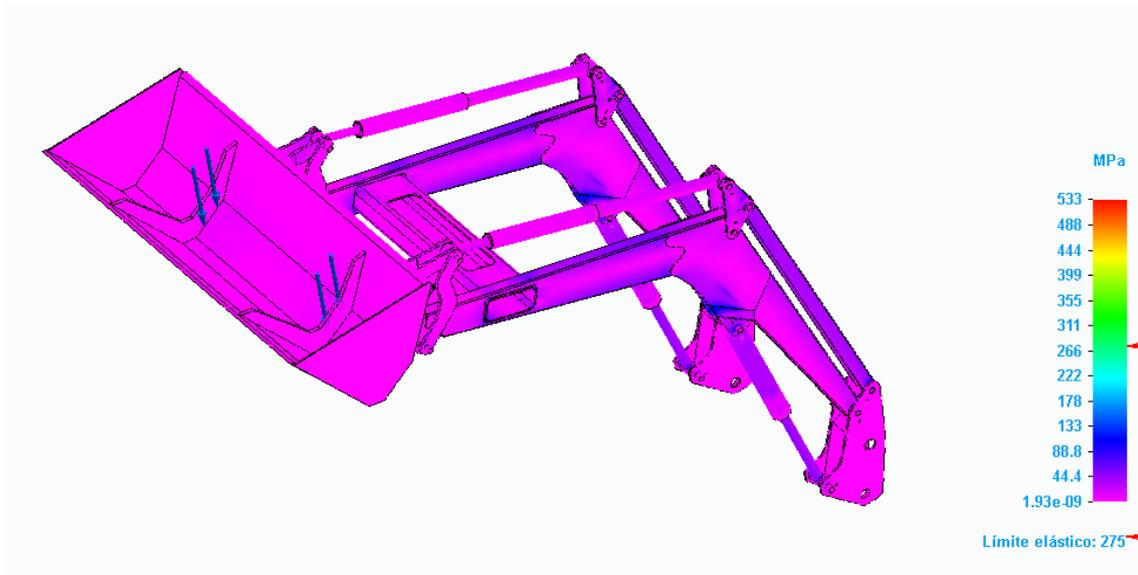


Ilustración 57:S1, Pala cargada arriba 20000N general

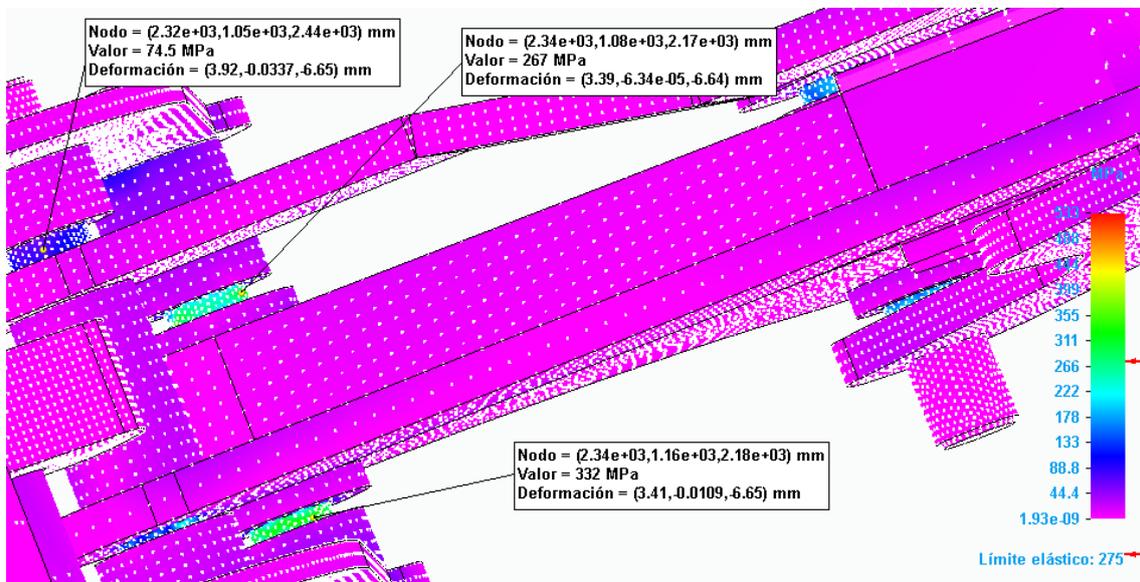


Ilustración 58:S1, Pala cargada arriba 20000N detalle tensiones

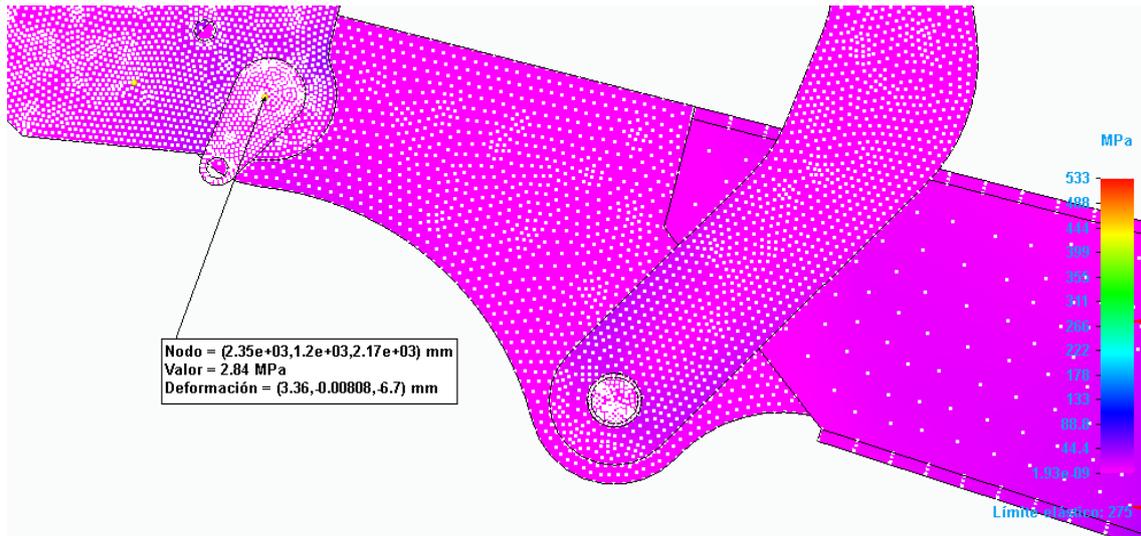


Ilustración 59:S1, Pala cargada arriba 20000N detalle movimiento

- 30000 N

En los bulones superiores la tensión general es de 240 MPa.

En la pala cargadora la tensión es baja salvo en la chapa paralelográfica que la tensión es de 150 MPa.

En los bulones inferiores de las bielas del enganche la tensión esta entre 420 y 500 MPa, en una zona concreta se llega a 800 MPa.

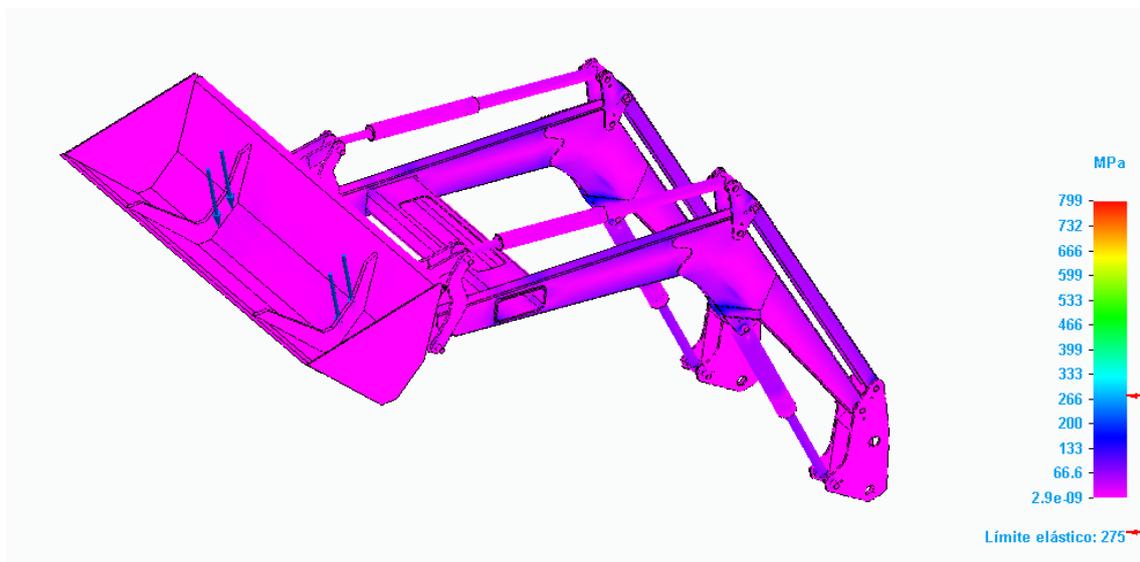


Ilustración 60:S1, Pala cargada arriba 30000N general

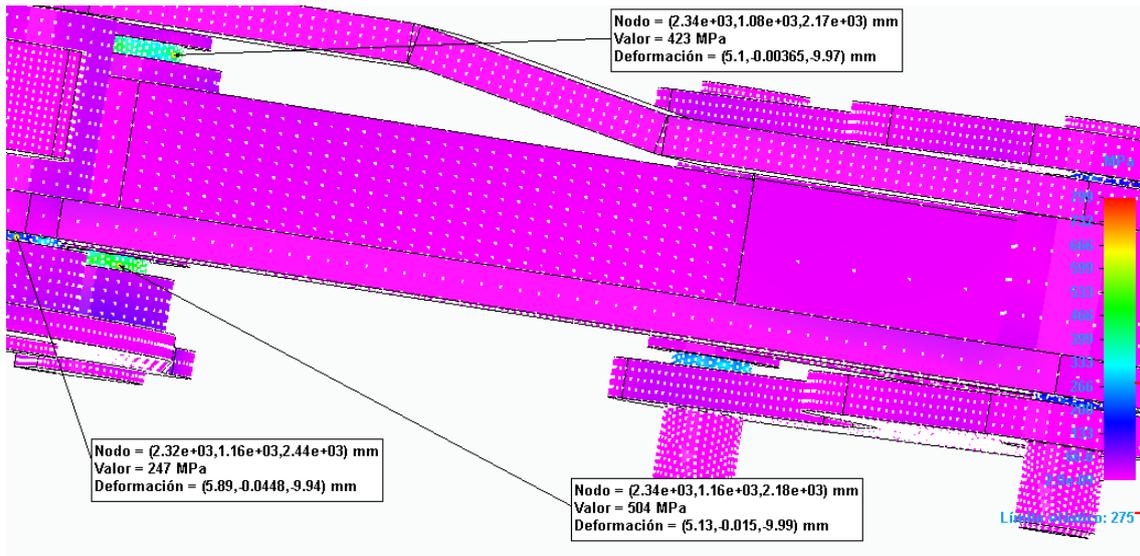


Ilustración 61:S1, Pala cargada arriba 30000N detalle tensiones

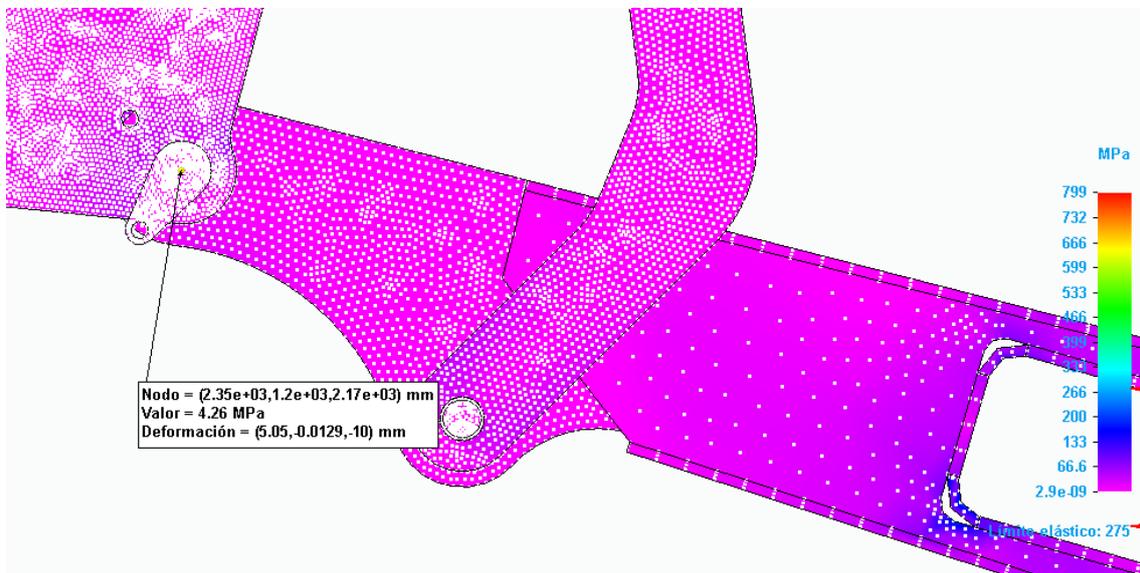


Ilustración 62:S1, Pala cargada arriba 30000N detalle movimiento

En esta primera simulación las mayores tensiones se dan en el escenario en el que la pala cargadora esta levantada y cargada, y en el que la pala esta abajo y empujando.

En el escenario de la pala levantada y cargada es la peor situación de los bulones superiores de las bielas del enganche que alcanzan una tensión de 330 MPa.

En el escenario de la pala abajo y empujando es la situación más desfavorable para los bulones inferiores de las bielas del enganche la tensión alcanza 850 MPa.

SIMULACIÓN 2

Las propiedades de estos dos aceros son[4]:

- Acero F1272 (diámetro entre 16-40 mm):
 - Límite elástico: 880 MPa.
 - Tensión de rotura: 1150 MPa.
- Acero F114 (diámetro entre 16-40 mm):
 - Límite elástico: 430 MPa.
 - Tensión de rotura: 750 MPa.

Los elementos que van a cambiar el material respecto a la Simulación 1:

- Bulón inferior: 2385E.600.10 → Acero F1272
- Bulón superior: 2385E.600.10 → Acero F114
- Bulón buje: 2385E.600.04 → Acero F114
- Bulón cilindro de volteo: 2385E.600.04 → Acero F114

PALA CARGADA ABAJO

- 20000 N

En los bulones superiores del enganche la tensión es de 70 MPa.

En la pala cargadora la tensión general es muy baja salvo en determinadas zonas la tensión llega a 90 MPa.

En los bulones inferiores del enganche la tensión general esta entre 140 y 240 MPa, en una zona concreta la tensión llega a 400 MPa.

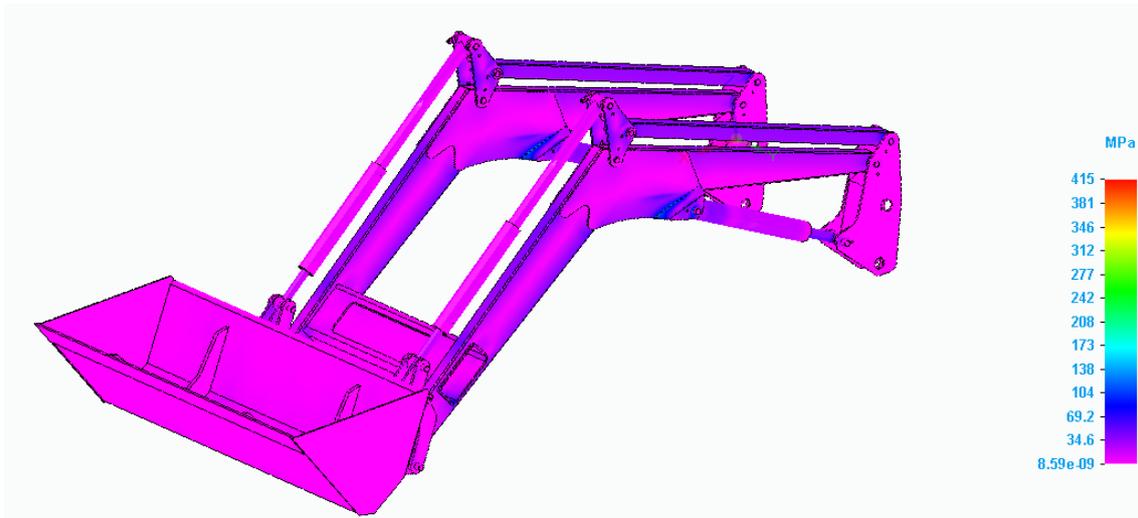


Ilustración 63:S2, Pala cargada abajo 20000N general

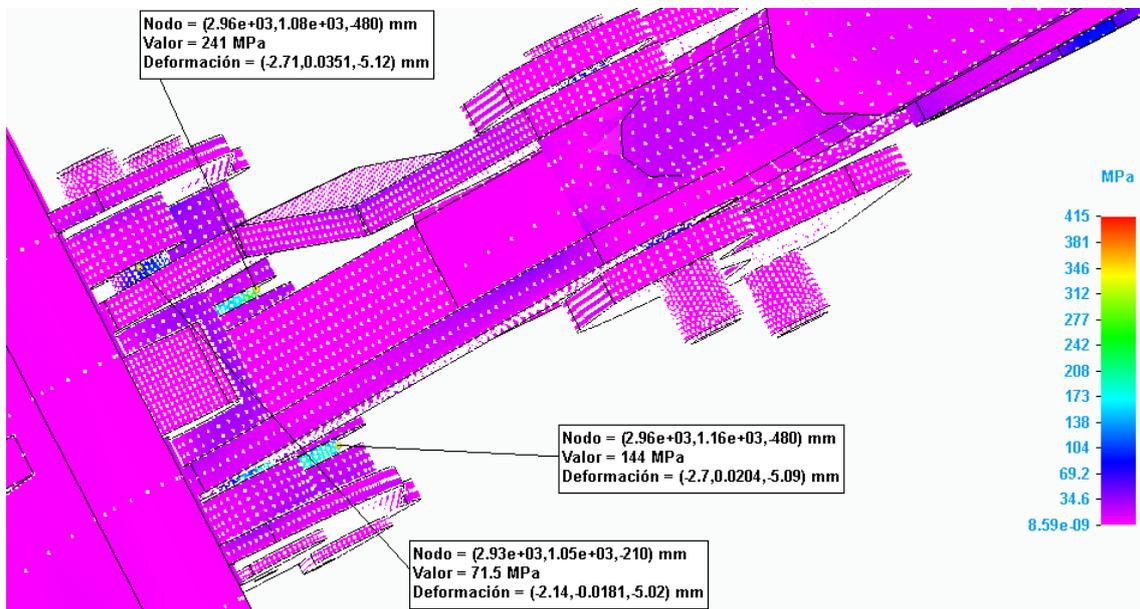


Ilustración 64:S2, Pala cargada abajo 20000N detalle tensiones

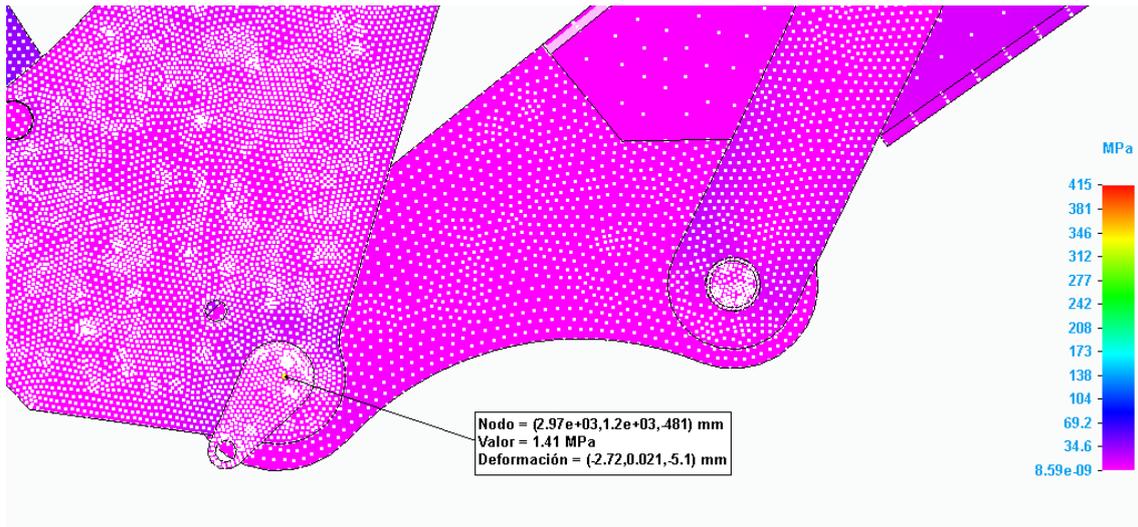


Ilustración 65:S2, Pala cargada abajo 20000N detalle movimiento

- 30000 N

La tensión en la estructura general de la pala cargadora es muy baja, en una zona de la chapa paralelográfica y del crucero la tensión es de 110 MPa.

En los bulones superiores del enganche, los bulones de los cilindros de volteo con las bielas y los bulones del buje la tensión es de 150 MPa.

La tensión en los bulones inferiores del enganche esta entre 270 y 310 MPa, en una zona concreta la tensión alcanza los 620 MPa.

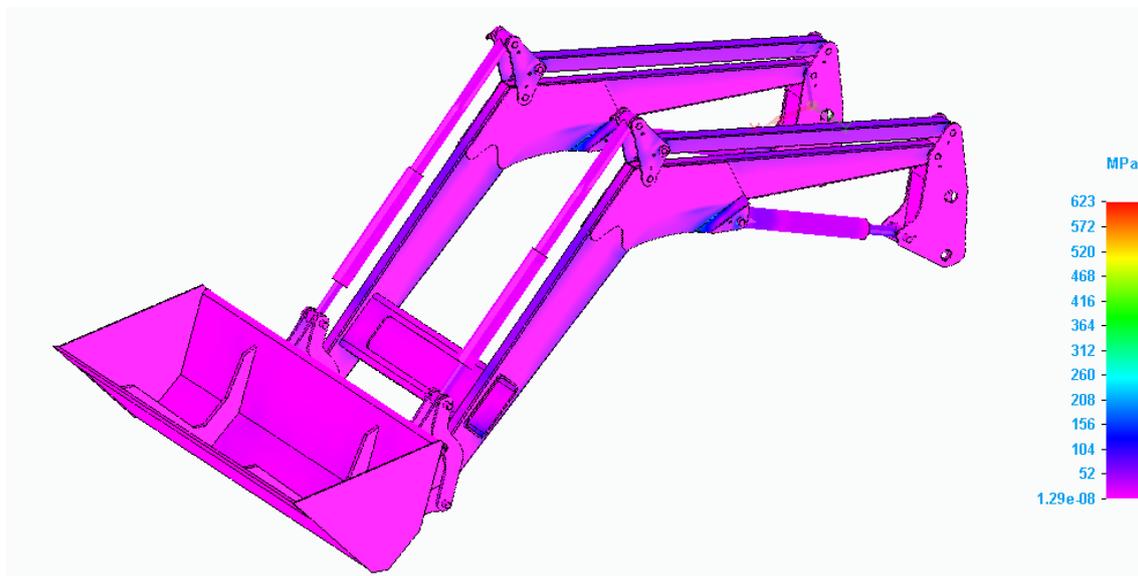


Ilustración 66:S2, Pala cargada abajo 30000N general

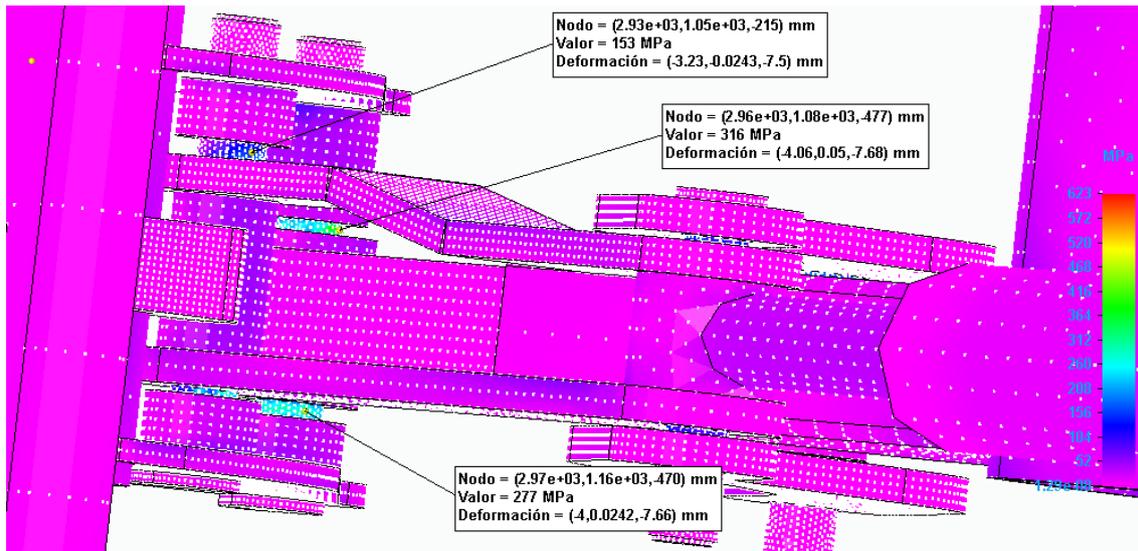


Ilustración 67:S2, Pala cargada abajo 30000N detalle tensiones

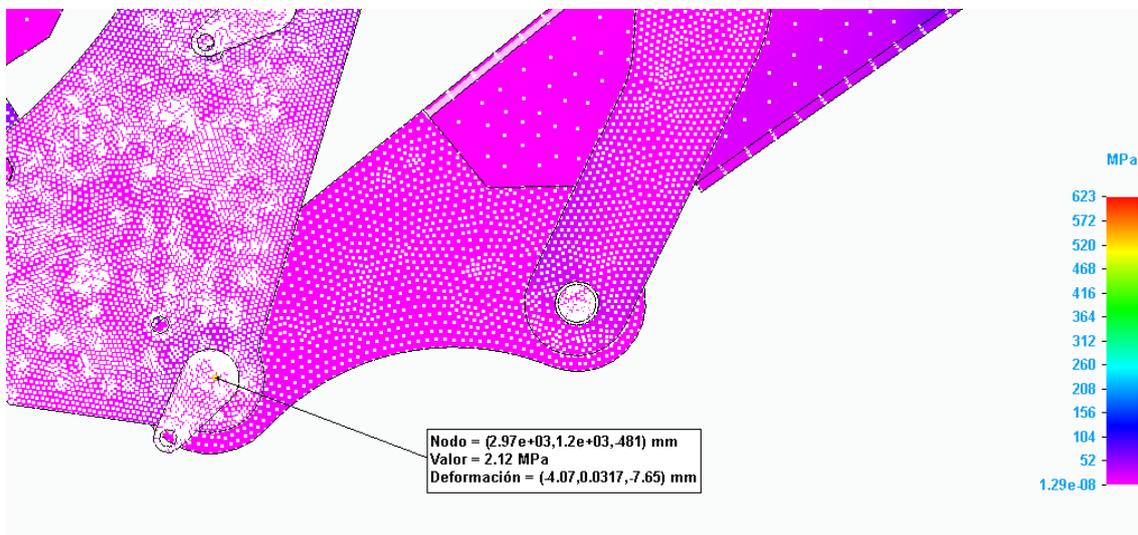


Ilustración 68S2, Pala cargada abajo 30000N detalle movimiento

PALA EMPUJE FRONTAL

- 20000 N

En toda la estructura general de la pala cargadora la tensión no supera los 50 MPa.

En los bulones superiores del enganche, y los bulones del cilindro de volteo y del buje la tensión es de 90 MPa.

La tensión general en los bulones inferiores del enganche esta entre 200 y 310 MPa, en una zona concreta la tensión es de 560 MPa.

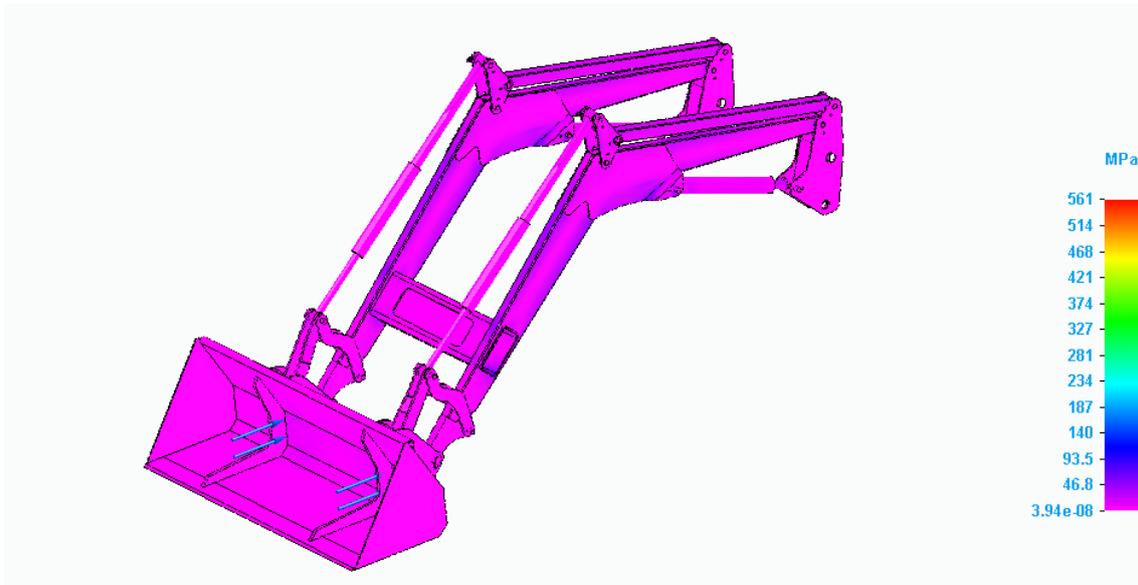


Ilustración 69:S2, Pala empuje frontal 20000N general

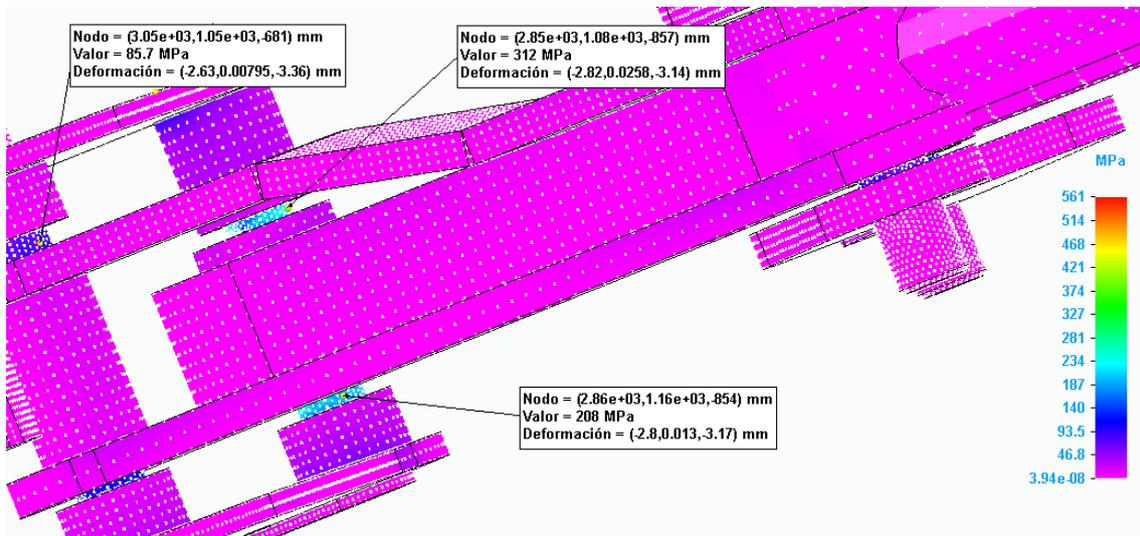


Ilustración 70:S2, Pala empuje frontal 20000N detalle tensiones

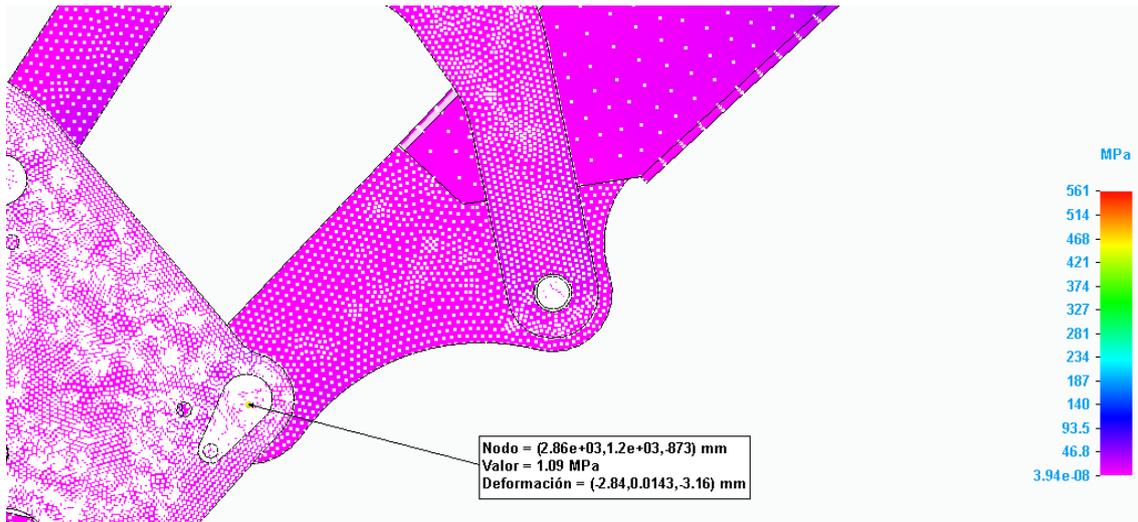


Ilustración 71:S2, Pala empuje frontal 20000N detalle movimiento

- 30000 N

En toda la estructura general de la pala cargadora la tensión no supera los 70 MPa.

En los bulones superiores del enganche, y los bulones del cilindro de volteo y del buje la tensión es de 130 MPa.

La tensión general en los bulones inferiores del enganche esta entre 380 y 480 MPa, en una zona concreta la tensión es de 840 MPa.

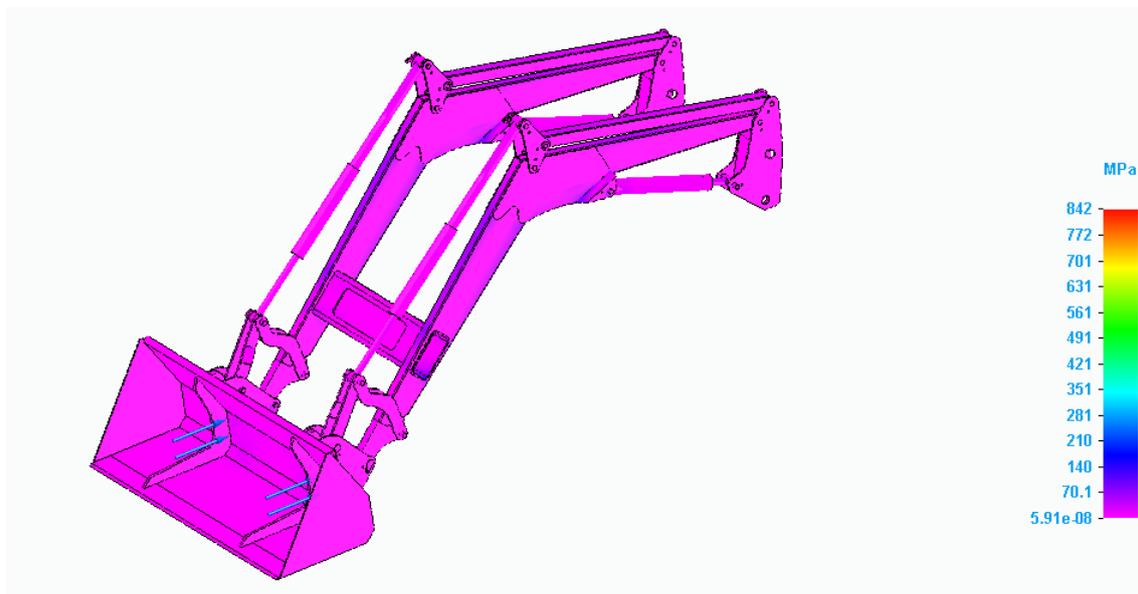


Ilustración 72:S2, Pala empuje frontal 30000N general

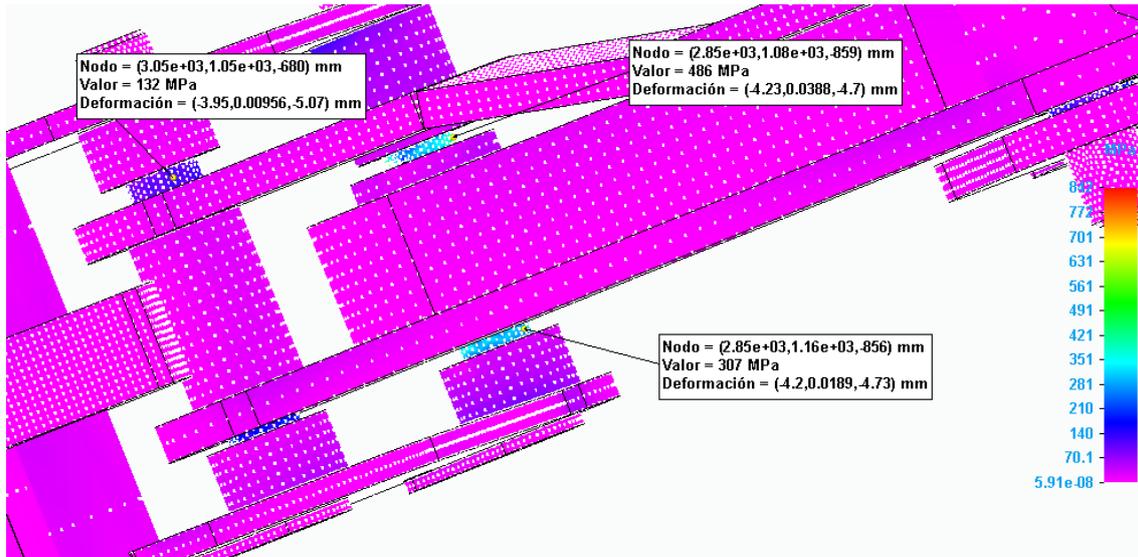


Ilustración 73:S2, Pala empuje frontal 30000N detalle tensiones

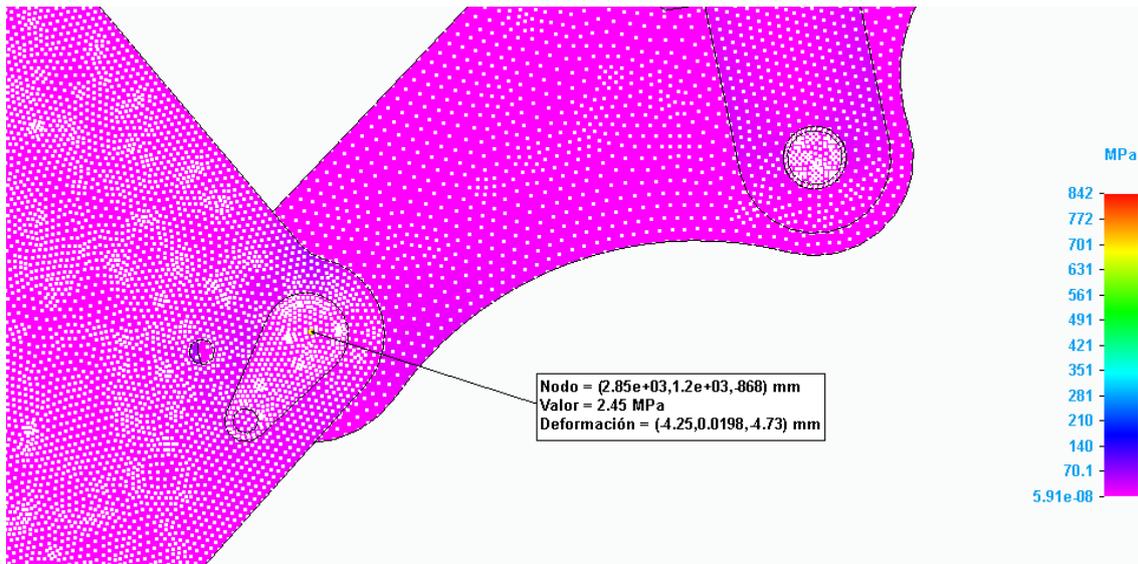


Ilustración 74 :S2, Pala empuje frontal 30000N detalle movimiento

PALA CARGADA ARRIBA

- 20000 N

En la estructura de la pala cargadora la tensión es muy baja salvo en una zona de la chapa paralelográfica que es de 90 MPa.

En los bulones superiores del enganche la tensión es de 100 MPa.

En los bulones inferiores del buje la tensión es de 220 MPa.

En los bulones inferiores del enganche la tensión general es de 200-300 MPa, en una zona concreta la tensión llega a ser de 520 MPa.

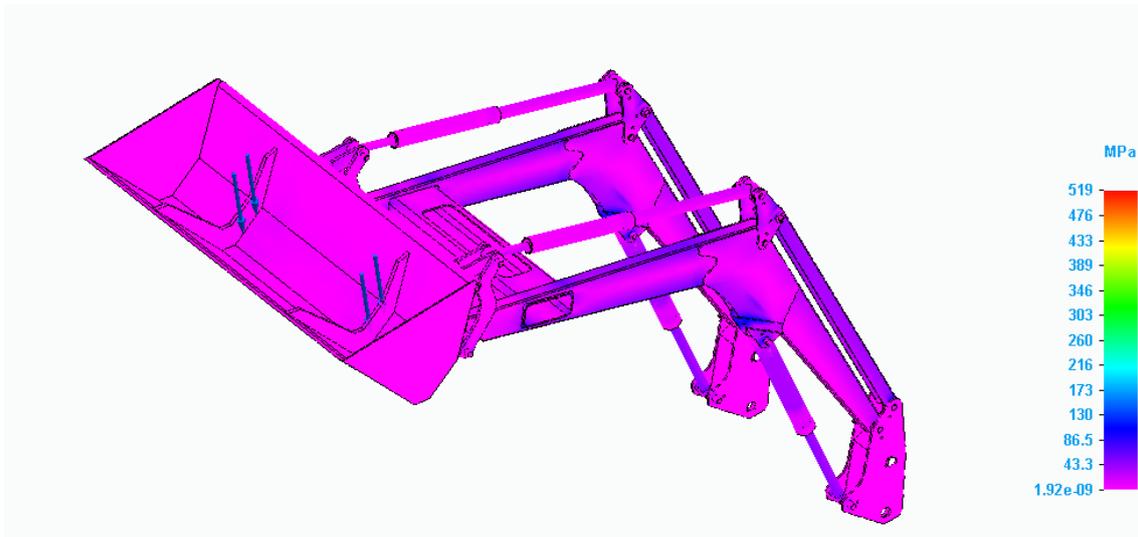


Ilustración 75:S2, Pala cargada arriba 20000N general

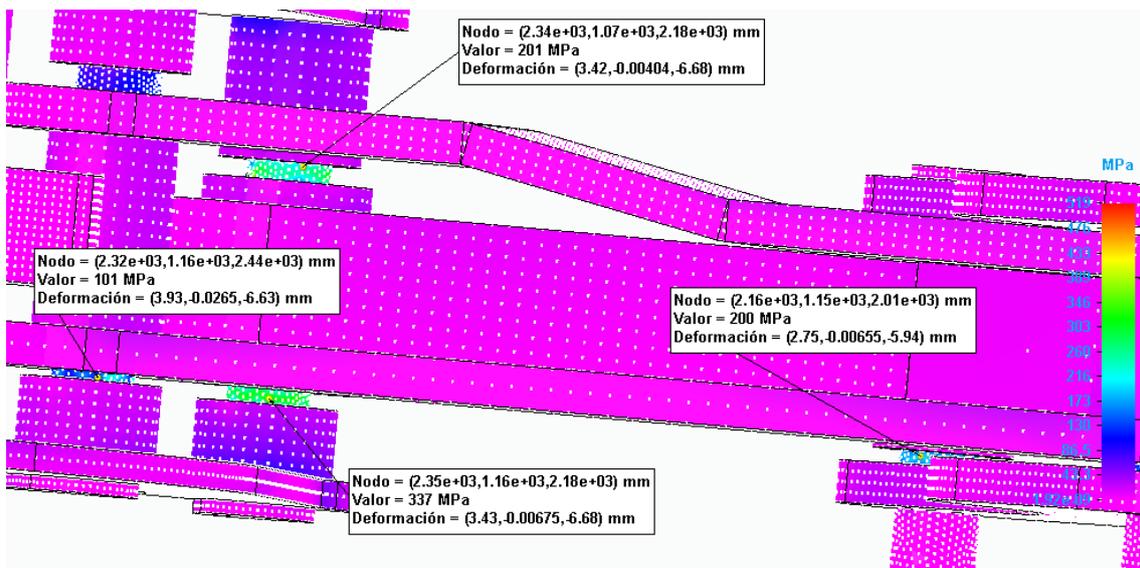


Ilustración 76:S2, Pala cargada arriba 20000N detalle tensiones

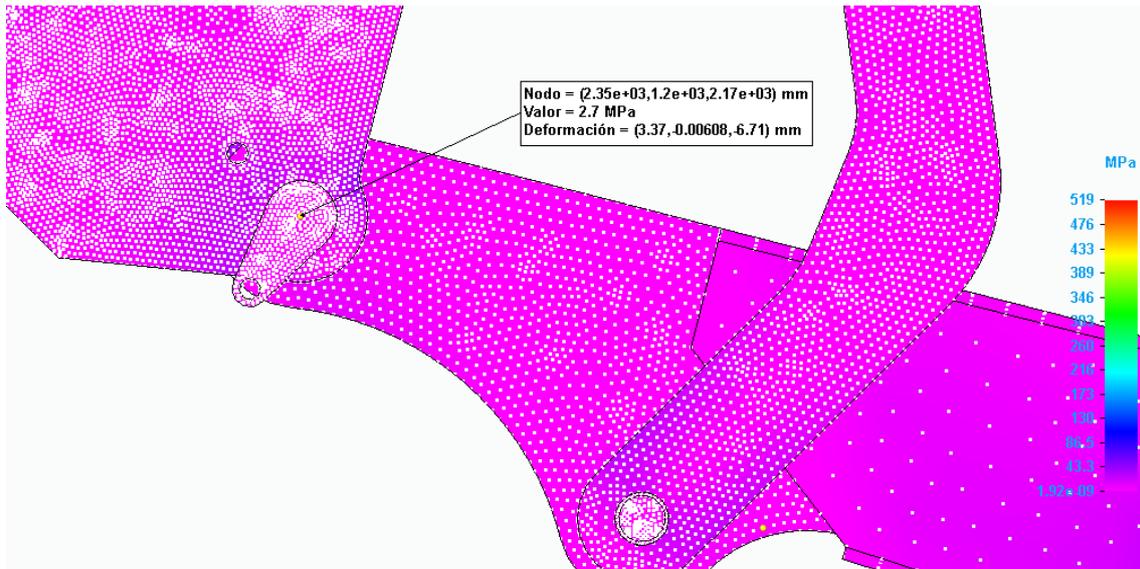


Ilustración 77:S2, Pala cargada arriba 20000N detalle movimiento

- 30000 N

En la estructura de la pala cargadora la tensión es muy baja salvo en una zona de la chapa paralelográfica que es de 140 MPa.

En los bulones superiores del enganche la tensión es de 250 MPa.

En los bulones inferiores del buje la tensión es de 330 MPa.

En los bulones inferiores del enganche la tensión general es de 400-500 MPa, en una zona concreta la tensión llega a ser de 780 MPa.

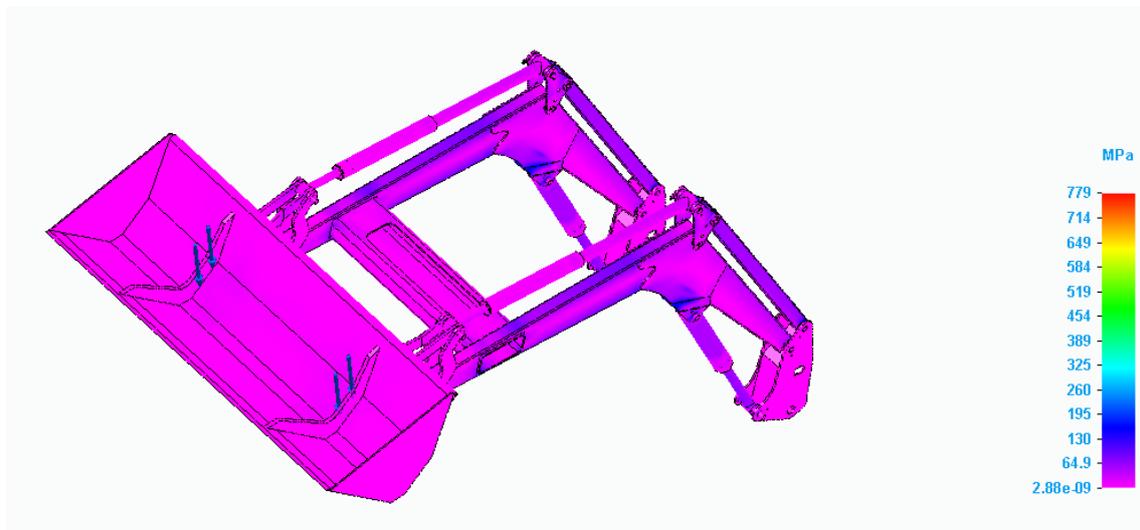


Ilustración 78:S2, Pala cargada arriba 30000N general

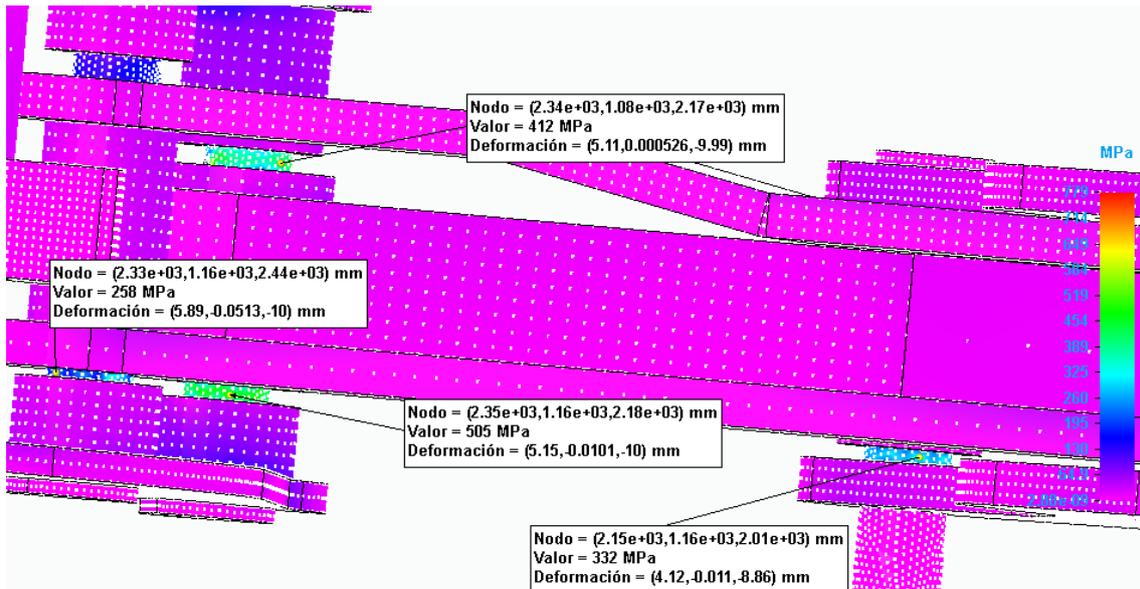


Ilustración 79:S2, Pala cargada arriba 30000N detalle tensiones

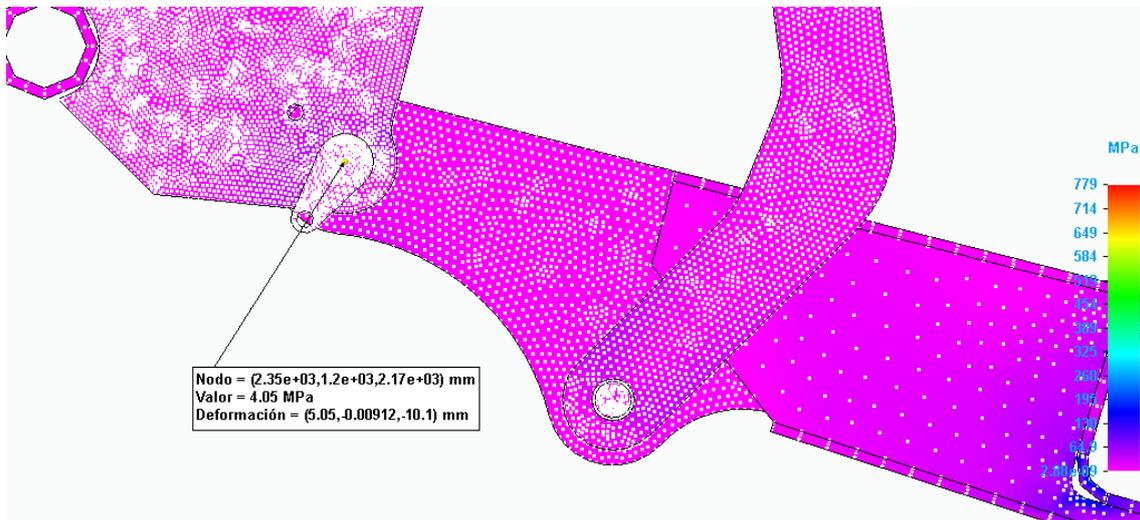


Ilustración 80:S2, Pala cargada arriba 30000N detalle movimiento

En esta simulación 2 las mayores tensiones se dan en los escenarios de la pala cargada arriba y de la pala empujando frontalmente.

Los bulones del buje sufren la mayor tensión cuando la pala esta arriba cargada, la tensión es de 320 MPa.

Los bulones inferiores del enganche alcanzan la mayor tensión de 840 MPa cuando la pala esta empujando frontalmente.

SIMULACIÓN 3

En esta simulación se va a cambiar el material de fabricación de alguno de los bulones por aceros de alto límite elástico. Además, se aumentará el diámetro de los bulones inferiores del enganche ya que son los que más tensión sufren y es cercana a los límites elásticos más altos.

Se van a mantener los cambios realizados en la simulación 2, y se va a cambiar el material y el diseño del bulón inferior del enganche 2385E.600.10, lo que implicará modificaciones de diseño en otros elementos de la pala.

El acero que se va a utilizar en los bulones inferiores del enganche es:

- TNC-EXTRA/1.6582 (Para diámetros entre 16 mm-40 mm)] (1)
 - Límite elástico: 900 MPa.
 - Tensión de rotura: 1200 MPa.

El bulón 2385E.600.10 se va a fabricar con diámetro 32'5, por lo que las chapas del enganche, los casquillos del enganche y el agujero del buje por el que pasa este bulón habrá que aumentar su diámetro a 33 mm.

PALA CARGADO ABAJO

En esta simulación la estructura general de la pala cargadora sufre una tensión mínima, pero hay varios elementos de la pala cargadora que tienen mayor tensión respecto a las simulaciones anteriores.

- 20000 N

En la estructura general de la pala no se superan los 25 MPa, pero en la chapa paralelográfica, en la barra paralelográfica, y en los plegados de brazo delanteros la tensión llega a ser de 60 MPa.

En los bulones superiores del enganche la tensión es de 125 MPa.

En los bulones inferiores del enganche la tensión es de 120-200 MPa, en una zona se llega a 300 MPa.

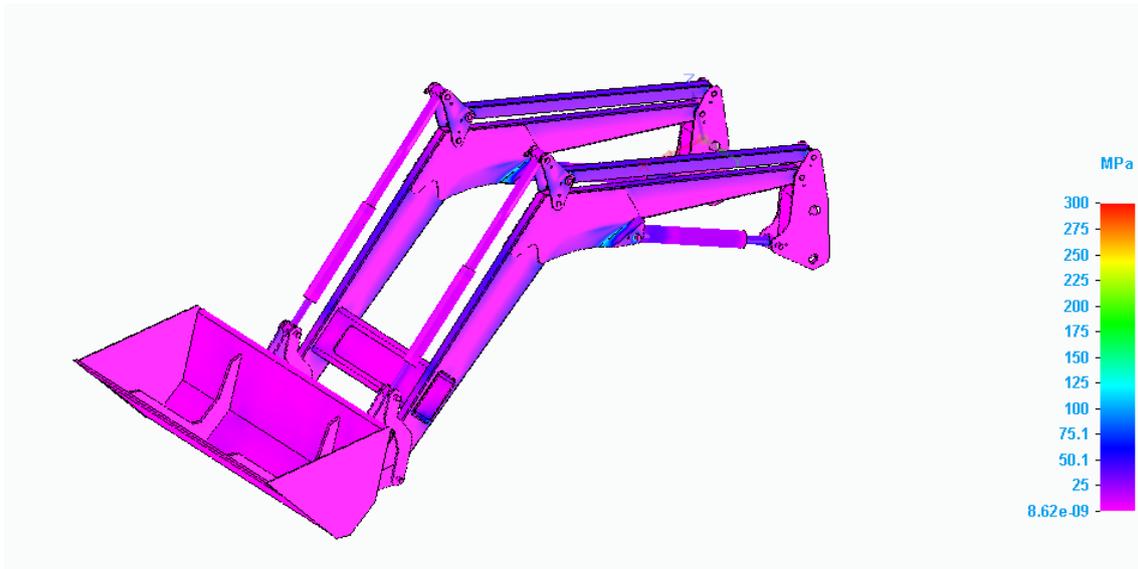


Ilustración 81:S3, Pala cargada abajo 20000N general

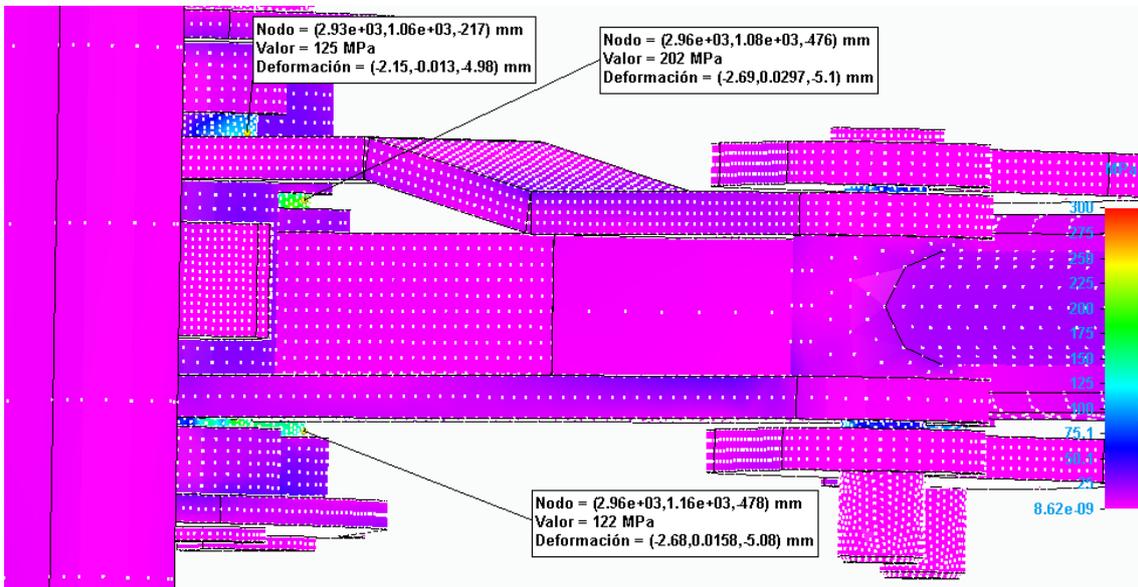


Ilustración 82:S3, Pala cargada abajo 20000N detalle tensiones

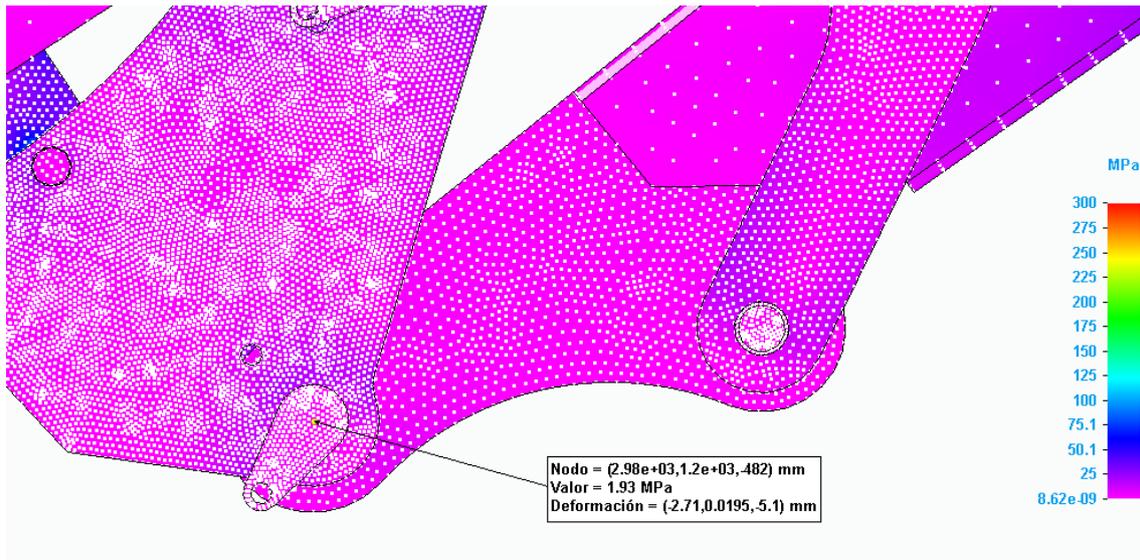


Ilustración 83:S3, Pala cargada abajo 30000N detalle movimiento

- 30000 N

La tensión en la estructura general de la pala cargadora no supera 40 MPa.

En las chapas paralelogramáticas, barras paralelogramáticas, y en los brazos delanteros la tensión es de 85 MPa.

En los bulones superiores del enganche la tensión es de 280 MPa.

En los bulones del buje y del cilindro de volteo la tensión también es de 280 MPa.

En los bulones inferiores del enganche la tensión esta entre 235-300 MPa, en una zona llega a 460 MPa.

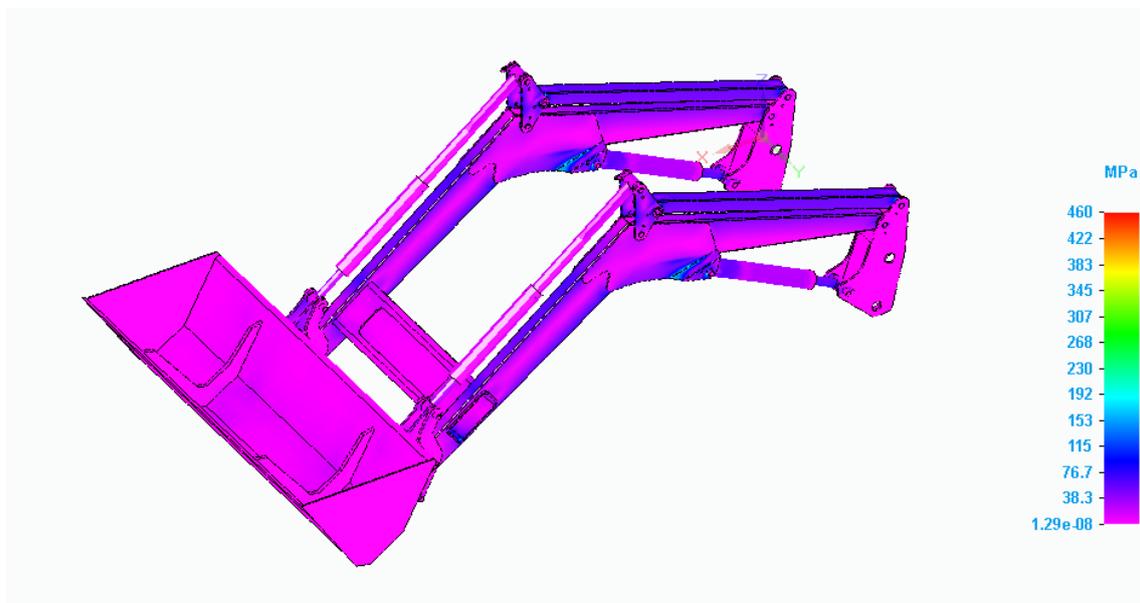


Ilustración 84:S3, Pala cargada abajo 30000N general

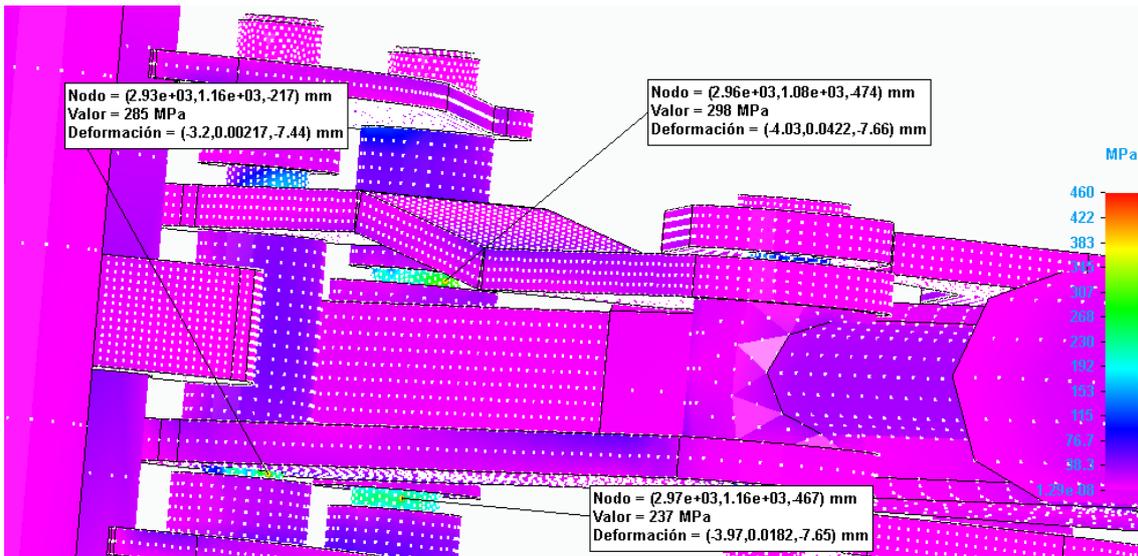


Ilustración 85:S3, Pala cargada abajo 30000N detalle tensiones

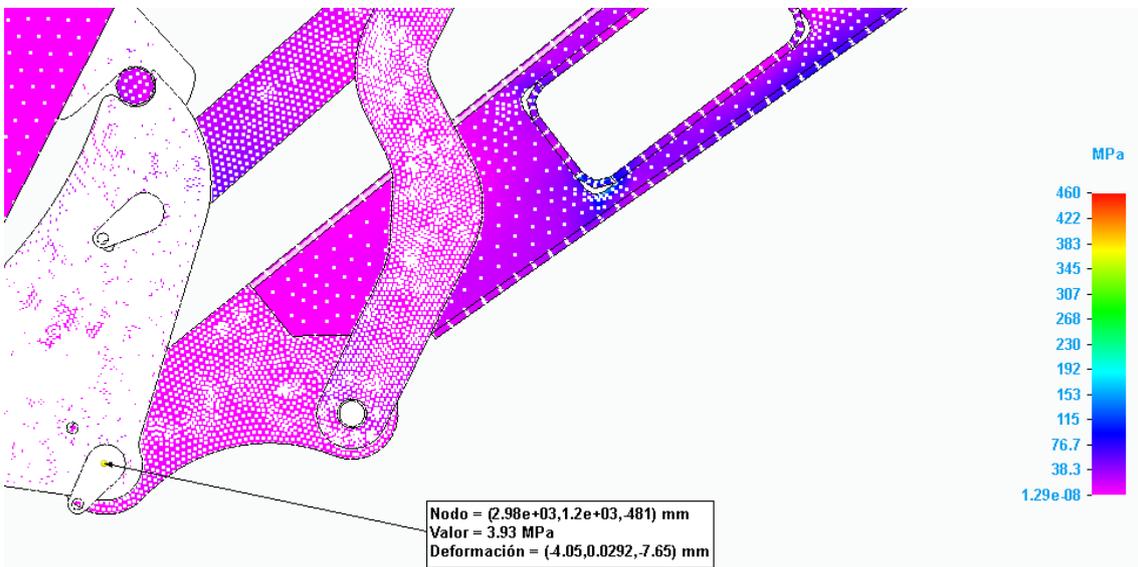


Ilustración 86:S3, Pala cargada abajo 30000N detalle movimiento

PALA EMPUJE FRONTAL

- 20000 N

En la estructura general de la pala cargadora la tensión no supera los 35 MPa.

En los bulones superiores del enganche la tensión es de 145 MPa.

En los bulones inferiores del enganche la tensión es de 260 MPa, en una pequeña zona la tensión llega a 360 MPa.

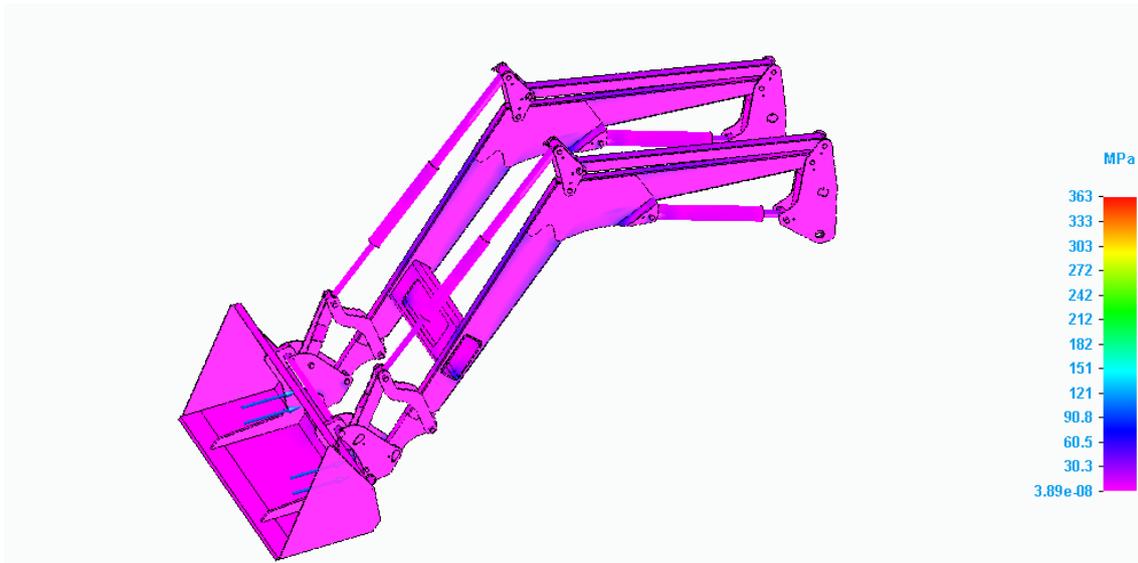


Ilustración 87:S3, Pala empuje frontal 20000N general

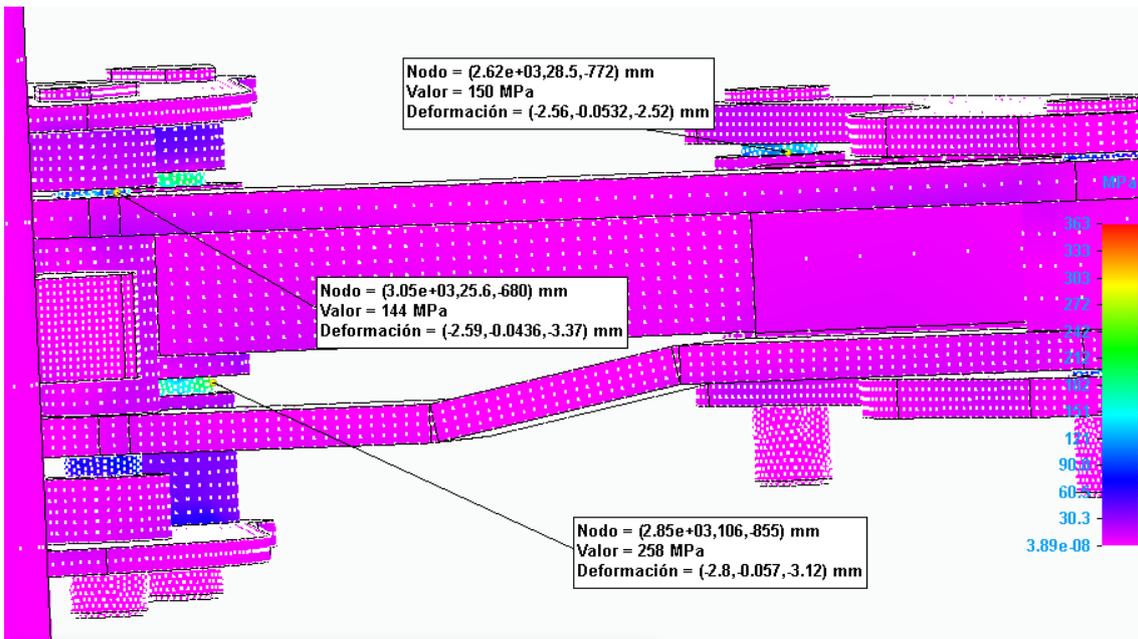


Ilustración 88:S3, Pala empuje frontal 20000N detalle tensiones

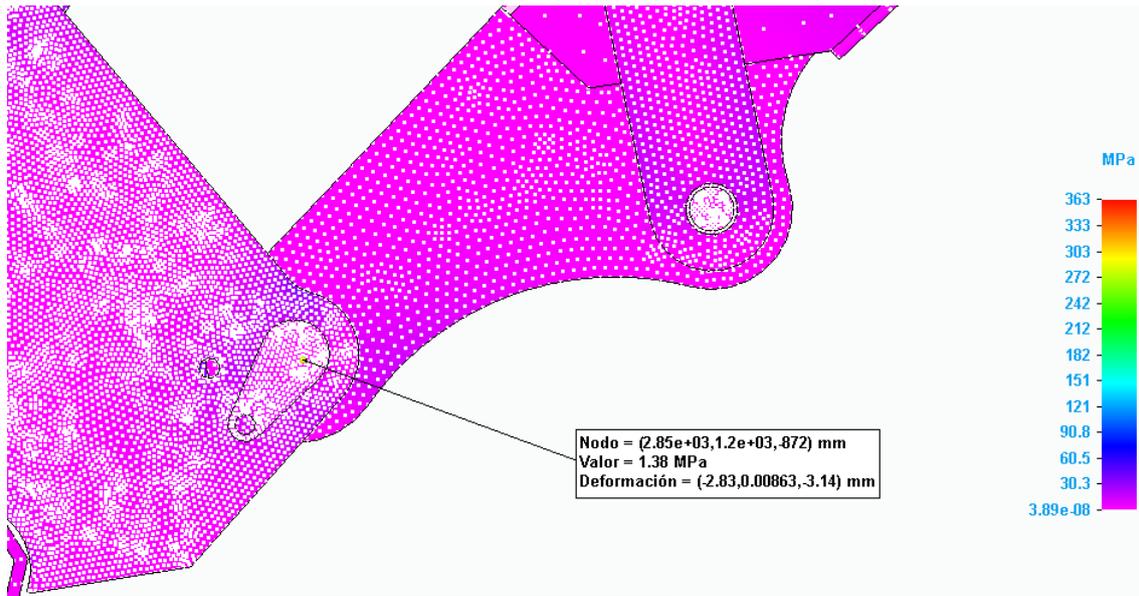


Ilustración 89:S3, Pala empuje frontal 20000N detalle movimiento

- 30000 N

La tensión en la estructura general de la pala cargadora no supera los 45 MPa.

En los bulones superiores del enganche y los del cilindro de volteo la tensión es de 220 MPa.

En los bulones del buje la tensión es de 220 MPa.

En los bulones inferiores del enganche la tensión es de 230-280 MPa, en una zona concreta la tensión llega a 550 MPa.

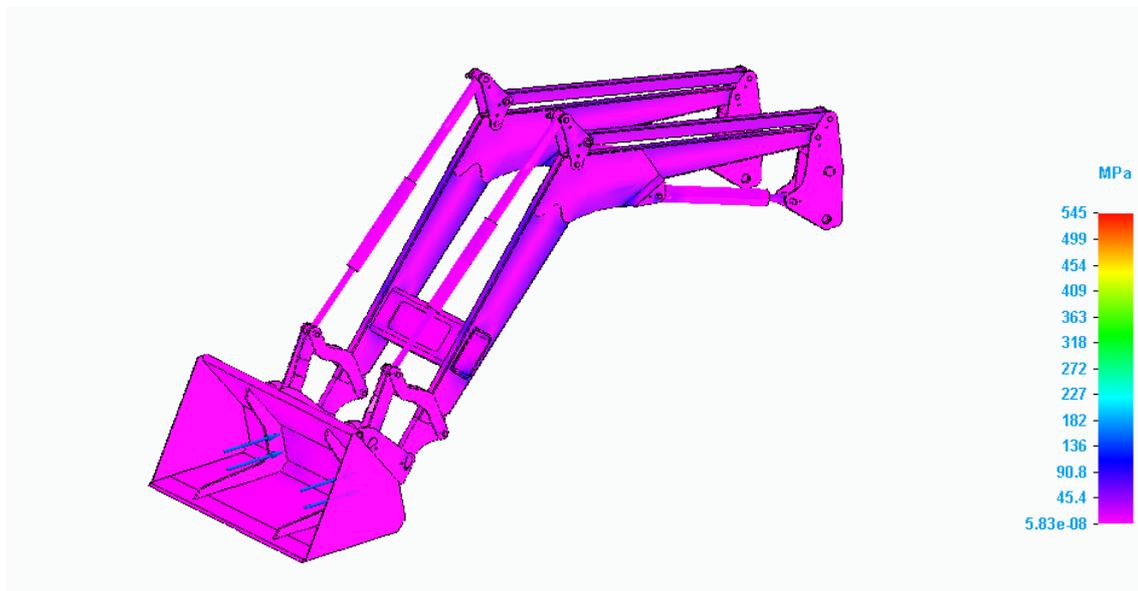


Ilustración 90:S3, Pala empuje frontal 30000N general

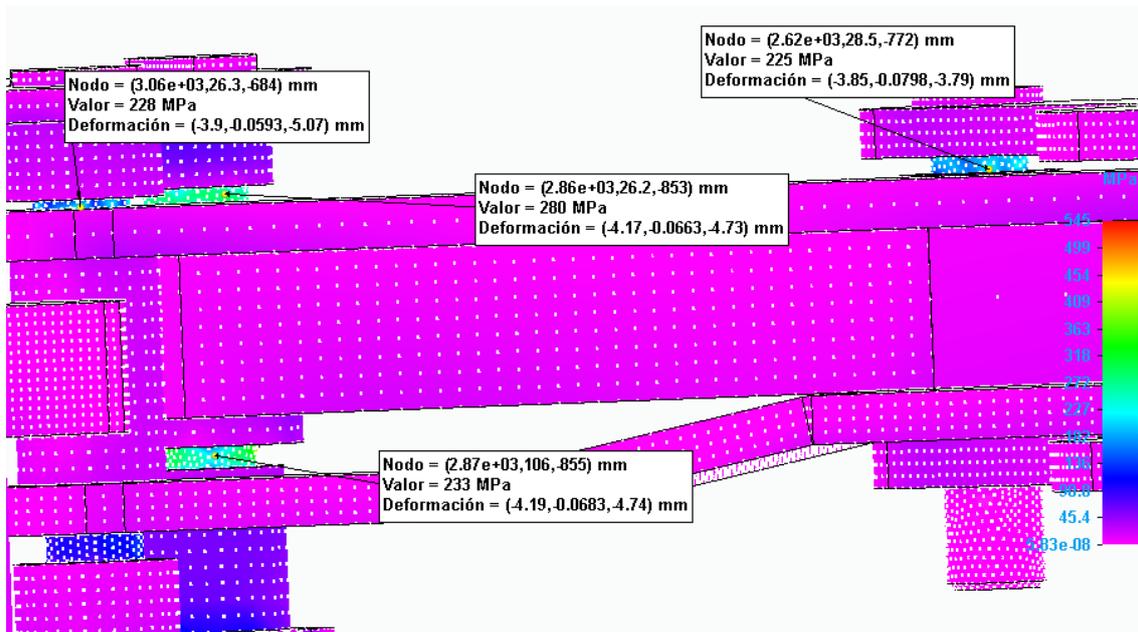


Ilustración 91:S3, Pala empuje frontal 30000N detalle tensiones

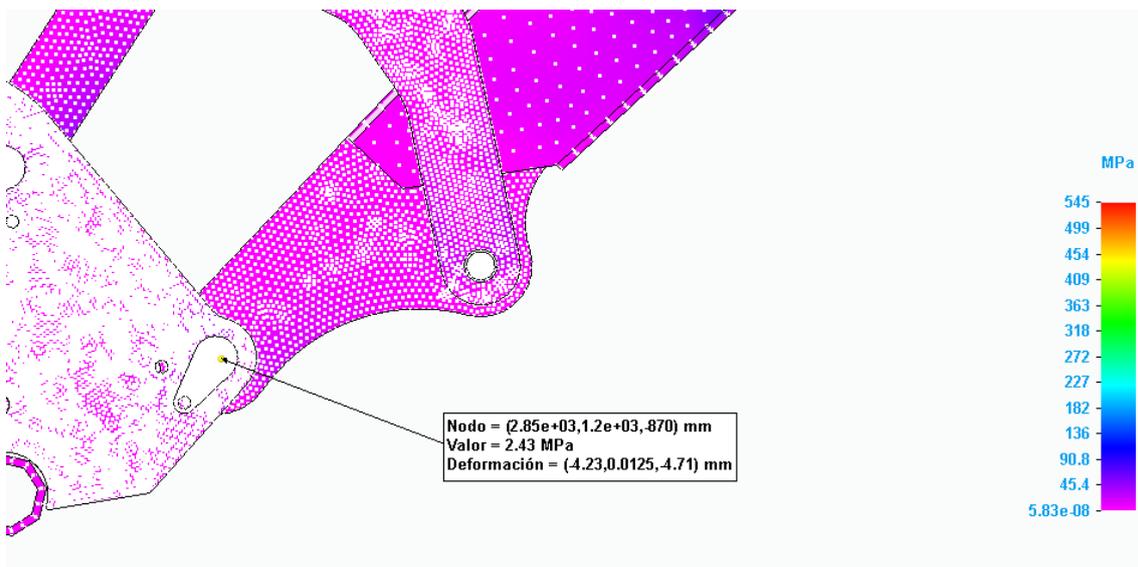


Ilustración 92:S3, Pala empuje frontal 30000N detalle movimiento

PALA CARGADA ARRIBA

- 20000 N

Hay varias zonas de la pala cargadora como la barra la paralelográmica, la chapa paralelográmica y parte de los brazos delanteros donde la tensión es de 80 MPa.

En los bulones superiores del enganche la tensión es de 160 MPa.

En los bulones inferiores del enganche la tensión general es de 200-280 MPa, en una zona la tensión alcanza 430 MPa.

En los bulones del buje la tensión es de 190 MPa.

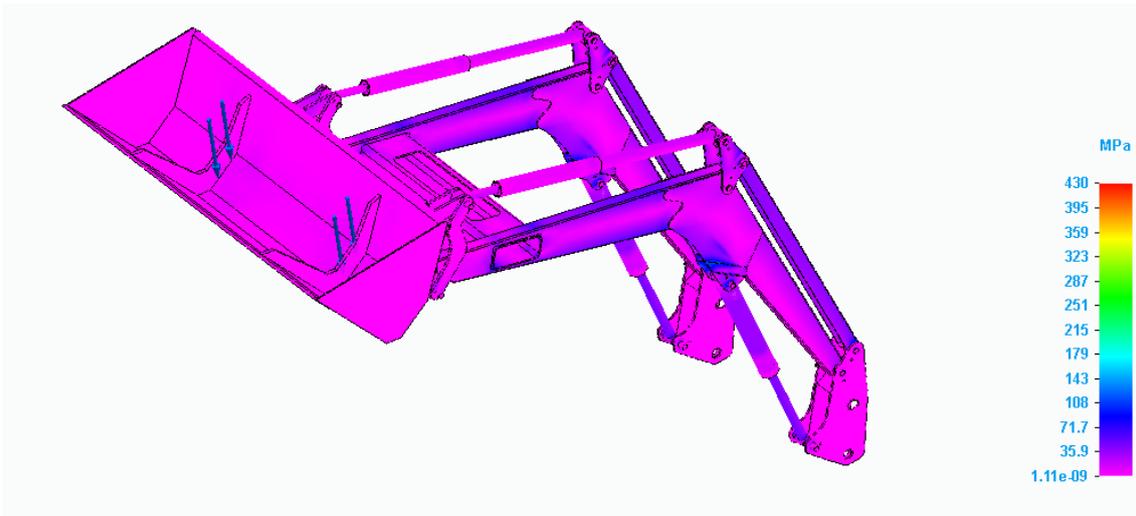


Ilustración 93:S3, Pala cargada arriba 20000N general

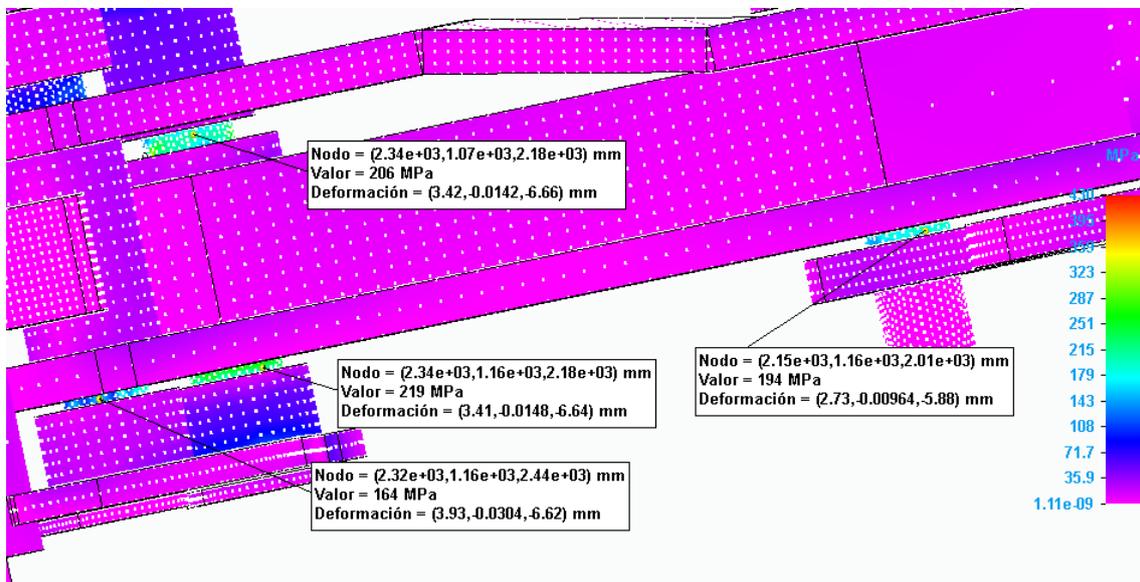


Ilustración 94:S3, Pala cargada arriba 20000N detalle tensiones

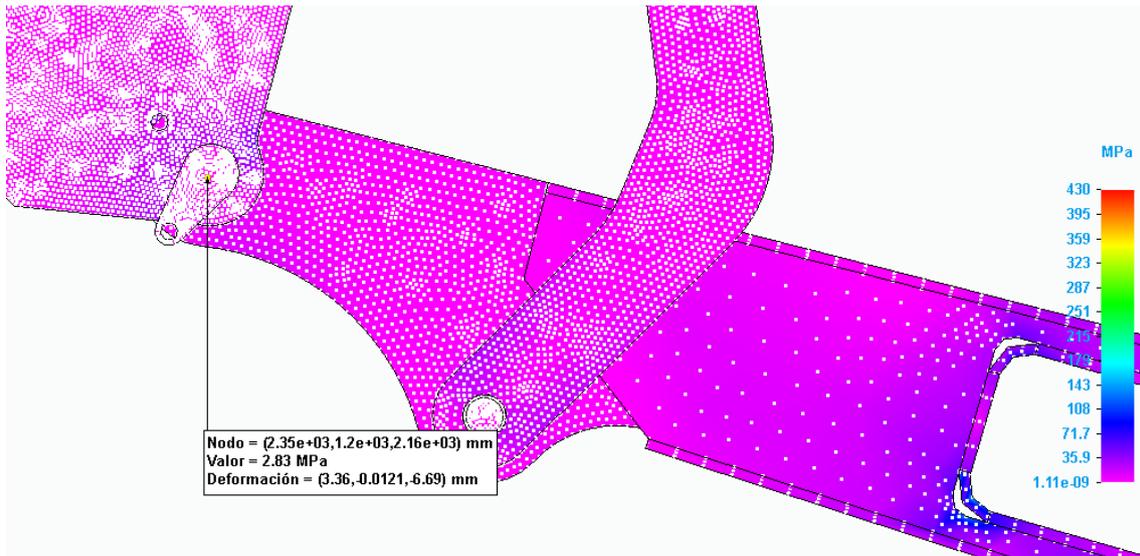


Ilustración 95:S3, Pala cargada arriba 20000N detalle movimiento

- 30000 N

En la estructura de la pala cargadora la tensión es baja. En parte de la chapa paralelográfica, en los brazos delanteros la tensión es de 110 MPa.

En los bulones superiores del enganche la tensión es de 240 MPa.

En los bulones del buje y del cilindro de volteo la tensión es de 280 MPa.

En los bulones inferiores del enganche la tensión general esta entre 300 MPa, en una zona concreta la tensión llega a 650 MPa.

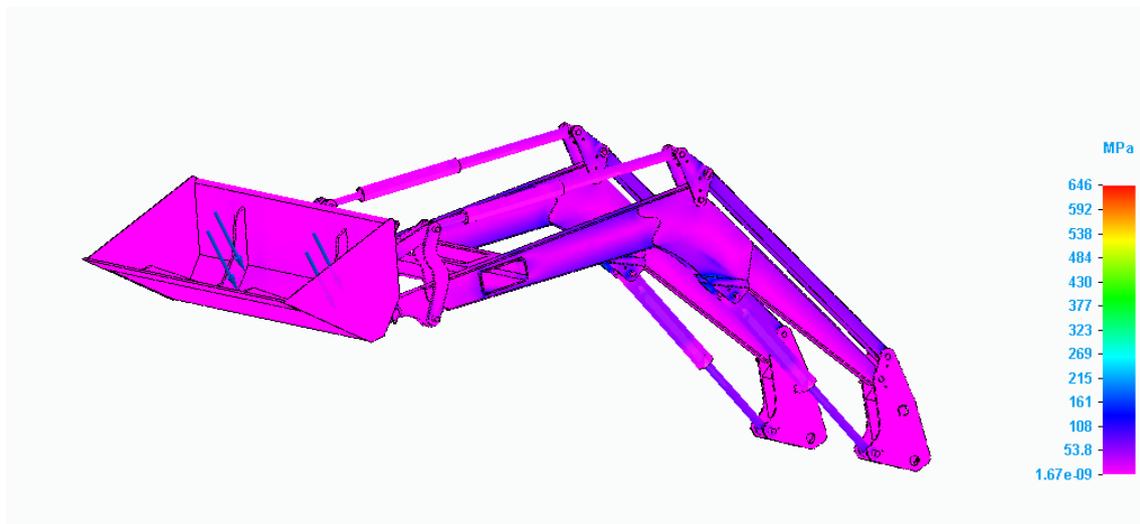


Ilustración 96:S3, Pala cargada arriba 30000N general

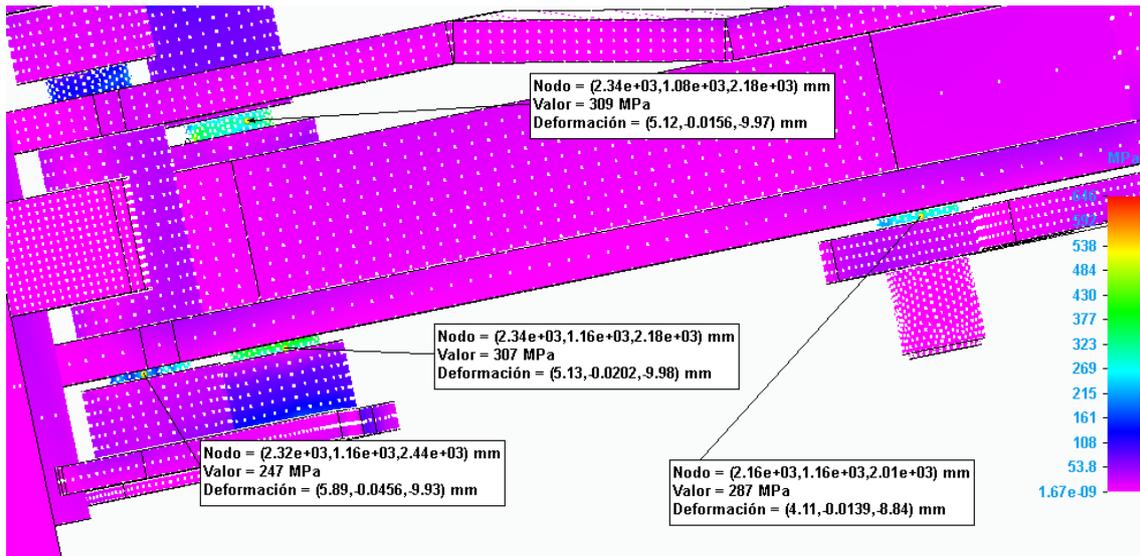


Ilustración 97:S3, Pala cargada arriba 30000N detalle tensiones

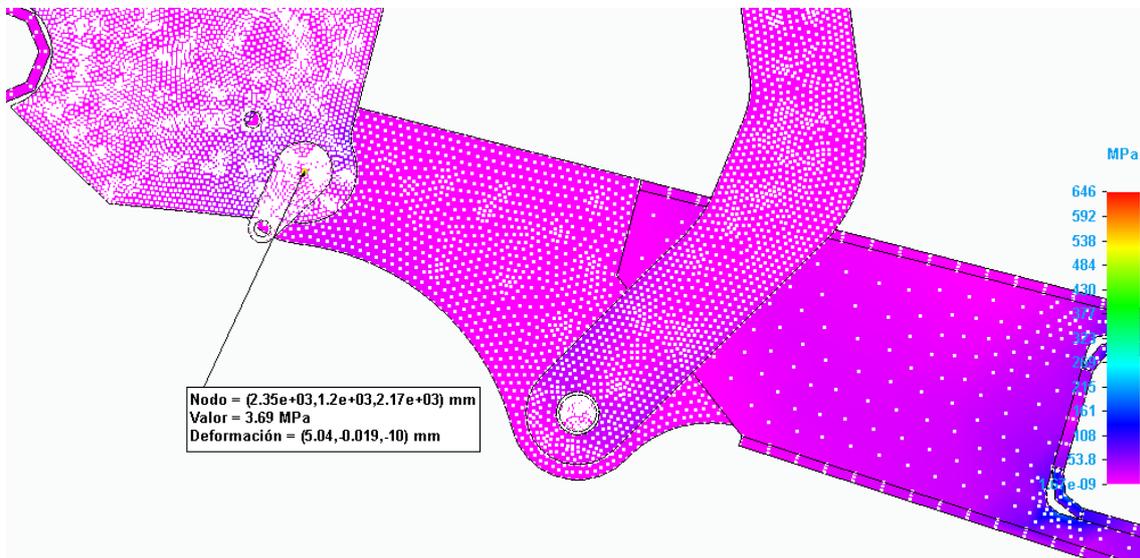


Ilustración 98:S3, Pala cargada arriba 30000N detalle movimiento

ANEXO: Tabla de equivalencias de los aceros

Tabla de equivalencias internacionales de aceros

Steel international equivalence chart / Tableau d'équivalences internationales des aciers

CICROSA	España <i>Spain</i> <i>Espagne</i>	Europa <i>Europe</i> <i>Europe</i>	Alemania <i>Germany</i> <i>Allemagne</i>	EEUU <i>USA</i> <i>États Unis</i>	Japón <i>Japan</i> <i>Japon</i>	
	UNE	EN	W. NR. STANDAR	DIN	AISI / SAE / ASTM	JIS
F114	F1140	C45E	1.1191	CK45	1045	S45C
F125	F1252	42CrMo4	1.7225	42CrMo4	4140	SCM440
Ni-Cr		19MnVS6	1.5217	20MnV6		
INOX420		1.4021	1.4021	X20Cr13	420	SUS420F
INOX431		1.4057	1.4057	X19CrNi172	431	SUS431
INOX304	F3504	1.4301	1.4301	X5CrNi1810	304	
INOX316	F3534	1.4401	1.4401	X5CrNiMo17122	316	
		E235			1010	STKM11A-S-C
ST52	A590	E355	1.0580	E355	1024	STKM19
35MF6Pb	F2132	36SMnPb14			11L37	
C35R			1.1180	Cm35	1035	

ANEXO: Propiedades mecánicas aceros

Tipo	Espesor nominal t(mm)			
	t ≤ 40		40 < t ≤ 80	
	f _y	f _u	f _y	f _u
S 275 N/NL	275	370 < f _u < 510	255	370 < f _u < 510
S 355 N/NL	355	470 < f _u < 630	335	470 < f _u < 630
S 420 N/NL	420	520 < f _u < 680	390	520 < f _u < 680
S 460 N/NL	460	540 < f _u < 720	430	540 < f _u < 720

ANEXO: Folleto Pala cargadora Maquinaria Agrícola El Leon

EURO 2.0

(mm)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
320F Euro 2.0	3.200	2.990	2.325	3.735	130	380	60°	50°	1.450	68°
340EF Euro 2.0	3.400	3.190	2.530	3.970	140	450	57°	52°	1.450	71°
370E Euro 2.0	3.700	3.480	2.740	4.300	150	575	53°	50°	1.500	72°
385E Euro 2.0	3.850	3.640	2.930	4.450	160	500	56°	51°	1.750	68°
410E Euro 2.0	4.100	3.850	3.180	4.750	160	500	56°	50°	1.900	70°
430E Euro 2.0	4.350	4.150	3.350	5.050	160	450	63°	50°	1.950	58°
470E Euro 2.0	4.700	4.500	3.750	5.350	165	700	62°	50°	2.050	60°

	kg		
	1	2	3
320F Euro 2.0	1.350	1.000	900
340EF Euro 2.0	1.600	1.200	1.050
370E Euro 2.0	2.130	1.500	1.250
385E Euro 2.0	2.800	2.100	1.700
410E Euro 2.0	2.300	2.000	1.600
430E Euro 2.0	2.500	1.900	1.700
470E Euro 2.0	2.800	2.090	1.950

segundos

320F Euro 2.0	3,7	2,0	1,6	2,7
340EF Euro 2.0	4,4	2,5	2,0	3,0
370E Euro 2.0	4,5	3,0	1,5	2,5
385E Euro 2.0	6,0	4,0	2,5	3,0
410E Euro 2.0	6,0	4,0	2,5	3,0
430E Euro 2.0	7,0	4,0	2,3	3,5
470E Euro 2.0	6,2	4,1	2,3	3,4

Mod. 320F y 340EF Euro 2.0 Características establecidas a 180 bares y caudal de 50 litros/min.
 Mod. 370E - 430E Euro 2.0 Características establecidas a 190 bares y caudal de 60 litros/min.
 Mod. 470E Euro 2.0 Características establecidas a 200 bares y caudal de 80 litros/min.

EL LEON

Polígono Vallefermín 104. Apdo. 23
 50600 Ejea de los Caballeros, Zaragoza
 Tel. +34 976 660 259 - +34 976 660 262
 Fax +34 976 660 170
 info@el-leon.es
www.facebook.com/palasalleon
www.el-leon.es

DELEGACIÓN ZARAGOZA
 Via Universitat, 6, 8ª 3ª
 Tel. +34 976 558 457
 50009 Zaragoza
palas@el-leon.es

ANEXO: Características de aceros especiales Ipargama S.L.

Ipargama	Simbólica	EH-10083: 2008	UNE 36012	AISI/SAE	IHA	Composición química										Otros elementos					Caracter					
						C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%	d≤16			16<d<40			Z%	KV J	Re (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A%	Z%	KV J
														Re (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A%	Re (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A%							
	C22	1.1161	F-1120			0.17/0.24	0.40 max	0.40/0.70	0.030	0.035	0.40 max	0.10 max	0.40 max	0.63 max	340	500/650	20	50	290	470/620	22	50	50			
	C35	1.1181	F-1130			0.32/0.39	0.40 max	0.50/0.80	0.035	0.035	0.40 max	0.10 max	0.40 max	0.63 max	430	630/780	17	40	380	600/750	19	45	35			
	C45*	1.1191*	F-1140*			0.42/0.50	0.40 max	0.50/0.80	0.035	0.035	0.40 max	0.10 max	0.40 max	0.63 max	490	700/850	14	35	430	650/800	16	40	25			
	C55*	1.1203*	F-1150*			0.52/0.60	0.40 max	0.60/0.90	0.035	0.035	0.40 max	0.10 max	0.40 max	0.63 max	550	800/950	12	30	490	750/900	14	35				
	C80*	1.1221*				0.57/0.65	0.035	0.60/0.90	0.030	0.035	0.40 max	0.10 max	0.40 max	0.63 max	580	850/1000	11	25	520	800/960	13	30				
			F-1250	4138		0.32/0.38	0.15/0.40	0.60/0.90	0.035	0.035	0.85/1.15	0.15/0.25			784	980/1176	11	24	670	880/1080	12	29				
	F-1252*	1.7225*		4142		0.38/0.45	0.40 max	0.60/0.90	0.025	0.035	0.90/1.20	0.15/0.30			900	1100/1300	10	40	750	1000/1200	11	45	35			
			F-128	9840		0.30/0.40	0.10/0.35	0.55/0.85	0.040	0.040	0.80/1.20	0.20/0.40	0.80/1.20													
			F-1280	9835		0.32/0.38	0.15/0.40	0.50/0.80	0.035	0.035	0.60/0.90	0.15/0.30	0.70/1.00		780	980/1180	11	29	670	880/1080	12	29				
			F-1282	9840		0.37/0.43	0.15/0.40	0.50/0.80	0.035	0.035	0.60/0.90	0.15/0.30	0.70/1.00		830	1030/1220	10	29	780	980/1180	11	29				
			F-127	4340		0.25/0.35	0.10/0.35	0.40/0.70	0.040	0.040	0.50/0.80	0.20/0.60	2.25/2.75													
			F-1270	4335		0.32/0.38	0.15/0.40	0.55/0.85	0.035	0.035	0.65/0.95	0.20/0.30	1.60/2.00		930	1130/1320	11	29	830	1030/1220	11	29				
			F-1272	4340		0.37/0.43	0.15/0.40	0.55/0.85	0.035	0.035	0.65/0.95	0.30/0.30	1.60/2.00		980	1180/1370	9	20	880	1080/1270	10	24				
	TMC-EXTRA* 34CrNiMo6*	1.6582*		4340		0.30/0.38	0.40 max	0.50/0.80	0.025	0.035	1.30/1.70	0.15/0.30	1.30/1.70		1000	1200/1400	9	40	900	1100/1300	10	45	45			
			F-126			0.25/0.35	0.10/0.35	0.40/0.70	0.040	0.040	1.00/1.50	0.20/0.60	4.00/4.50													
			F-1260			0.30/0.37	0.15/0.40	0.30/0.60	0.035	0.035	1.10/1.40	0.25/0.40	3.70/4.20		980	1130/1320	9	20	980	1130/1320	9	20				
			F-1262			0.30/0.36	0.15/0.40	0.60/0.80	0.035	0.035	0.70/0.90	0.30/0.40	2.75/3.25		930	1080/1270	9	20	880	1080/1270	10	24				
			30CrNiMo8*	1.6580*		0.26/0.34	0.40 max	0.50/0.80	0.035	0.035	1.80/2.20	0.30/0.50	1.80/2.20		1050	1250/1450	9	40	1050	1250/1450	9	40	30			
			35NiCrMo16	1.6773		0.32/0.39	0.40 max	0.50/0.80	0.030	0.025	1.60/2.00	0.25/0.45	3.60/4.10		1050	1250/1450	9	40	1050	1250/1450	9	40	30			
			51CrV4	1.8159		0.47/0.55	0.40 max	0.70/1.10	0.025	0.025	0.90/1.20				900	1100/1300	9	40	800	1000/1200	10	45	30			