

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO FIN DE GRADO

2016 / 2017

**PROYECTO DE DISEÑO Y CÁLCULO DEL BRAZO
ARTICULADO DE UNA PALA EXCAVADORA**

4. ANEXO

DATOS DE LA ALUMNA O DEL ALUMNO

NOMBRE: ASIER
APELLIDOS: LÓPEZ GUINEA

Fdo.:
FECHA: 01/09/2017

DATOS DEL DIRECTOR O DE LA DIRECTORA

NOMBRE: ITZIAR
APELLIDOS: MARTIJA LÓPEZ
DEPARTAMENTO: INGENIERÍA MECÁNICA

Fdo.:
FECHA: 01/09/2017

Índice

| | |
|---|----|
| 2.1. Objeto del documento anexo | 5 |
| 2.2. Diagramas cinemáticos de los actuadores hidráulicos | 5 |
| 2.2.1. Primera secuencia del movimiento | 5 |
| 2.2.1.1. Actuador hidráulico de la pluma | 6 |
| 2.2.1.2. Actuador hidráulico del brazo | 7 |
| 2.2.1.2. Actuador hidráulico de la cuchara | 8 |
| 2.2.2. Segunda secuencia del movimiento | 9 |
| 2.2.2.1. Actuador hidráulico de la pluma | 10 |
| 2.2.2.2. Actuador hidráulico del brazo | 11 |
| 2.2.2.3. Actuador hidráulico de la cuchara | 12 |
| 2.2.3. Tercera secuencia del movimiento | 13 |
| 2.2.3.1. Actuador hidráulico de la pluma | 14 |
| 2.2.3.2. Actuador hidráulico del brazo | 15 |
| 2.2.3.3. Actuador hidráulico de la cuchara | 16 |
| 2.3. Datos de diseño proporcionados por CATIA | 17 |
| 2.3.1. Elementos principales diseñados | 17 |
| 2.3.1.1. Pluma | 17 |
| 2.3.1.2. Brazo | 18 |
| 2.3.1.3. Eslabón 1 | 19 |
| 2.3.1.4. Eslabón 2 | 20 |
| 2.3.1.5. Cuchara | 21 |
| 2.3.2. Ensamblaje de los elementos principales diseñados | 22 |
| 2.3.2.1. Ensamblaje posición mayor alcance a nivel del suelo | 22 |
| 2.3.2.2. Ensamblaje posición máxima profundidad de excavación | 23 |
| 2.3.2.3. Ensamblaje posición máxima altura de carga | 24 |
| 2.4. Análisis MEF | 25 |
| 2.4.1. Informe de los análisis realizados | 27 |
| 2.4.1.1. Posición de mayor alcance a nivel del suelo | 27 |
| 2.4.1.2. Posición de máxima profundidad de excavación | 37 |
| 2.4.1.3. Posición de máxima altura de carga | 47 |

| | |
|--|----|
| 2.5. Propiedades de los materiales empleados | 57 |
| 2.5.1. Elementos principales | 57 |
| 2.5.2. Bulones..... | 58 |
| 2.5.3. Casquillos autolubricados | 59 |
| 2.5.4. Elementos de unión..... | 61 |
| 2.6. Dimensiones de los elementos normalizados utilizados | 62 |
| 2.6.1. Casquillos autolubricados serie SB (fabricante Sanmetal S.A)..... | 62 |
| 2.6.3. Tornillo cabeza hexagonal, rosca parcial DIN 931 (fabricante Andalinox S.L) | 63 |
| 2.6.4. Tuerca autoblocante con inserción no metálica DIN 985 (fabricante Andalinox S.L) | 64 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Posición inicial de la 1ª secuencia del movimiento..... | 5 |
| Figura 2. Posición final de la 1ª secuencia del movimiento | 5 |
| Figura 3. Diagrama velocidad-tiempo del cilindro de la pluma en la 1ª secuencia del movimiento | 6 |
| Figura 4. Diagrama aceleración-tiempo del cilindro de la pluma en la 1ª secuencia del movimiento | 6 |
| Figura 5. Diagrama velocidad-tiempo del cilindro del brazo en la 1ª secuencia del movimiento | 7 |
| Figura 6. Diagrama aceleración-tiempo del cilindro del brazo en la 1ª secuencia del movimiento | 7 |
| Figura 7. Diagrama velocidad-tiempo del cilindro de la cuchara en la 1ª secuencia del movimiento | 8 |
| Figura 8. Diagrama aceleración-tiempo del cilindro de la cuchara en la 1ª secuencia del movimiento | 8 |
| Figura 9. Posición inicial de la 2ª secuencia del movimiento..... | 9 |
| Figura 10. Posición final de la 2ª secuencia del movimiento | 9 |
| Figura 11. Diagrama velocidad-tiempo del cilindro de la pluma en la 2ª secuencia del movimiento | 10 |
| Figura 12. Diagrama aceleración-tiempo del cilindro de la pluma en la 2ª secuencia del movimiento | 10 |
| Figura 13. Diagrama velocidad-tiempo del cilindro del brazo en la 2ª secuencia del movimiento | 11 |
| Figura 14. Diagrama aceleración-tiempo del cilindro del brazo en la 2ª secuencia del movimiento | 11 |
| Figura 15. Diagrama velocidad-tiempo del cilindro de la cuchara en la 2ª secuencia del movimiento | 12 |
| Figura 16. Diagrama aceleración-tiempo del cilindro de la cuchara en la 2ª secuencia del movimiento | 12 |
| Figura 17. Posición inicial de la 3ª secuencia del movimiento..... | 13 |
| Figura 18. Posición final de la 3ª secuencia del movimiento | 13 |
| Figura 19. Diagrama velocidad-tiempo del cilindro de la pluma en la 3ª secuencia del movimiento | 14 |
| Figura 20. Diagrama aceleración-tiempo del cilindro de la pluma en la 3ª secuencia del movimiento | 14 |
| Figura 21. Diagrama velocidad-tiempo del cilindro del brazo en la 3ª secuencia del movimiento | 15 |
| Figura 22. Diagrama aceleración-tiempo del cilindro del brazo en la 3ª secuencia del movimiento | 15 |
| Figura 23. Diagrama velocidad-tiempo del cilindro de la cuchara en la 3ª secuencia del movimiento | 16 |

| | |
|---|----|
| Figura 24. Diagrama aceleración-tiempo del cilindro de la cuchara en la 3ª secuencia del movimiento | 16 |
| Figura 25. Propiedades del material S235 empleadas por CATIA | 25 |
| Figura 26. Tetraedro parabólico (TE10) de 10 nodos..... | 25 |
| Figura 27. Mallado de la pluma..... | 26 |

2.1. Objeto del documento anexo

El objeto de este documento es añadir la información adicional necesaria para poder desarrollar correctamente el proyecto. En este documento quedaran reflejados los datos proporcionados por los programas de cálculos empleados y que tendrán gran importancia en el desarrollo del proyecto.

2.2. Diagramas cinemáticos de los actuadores hidráulicos

2.2.1. Primera secuencia del movimiento

El brazo articulado realiza un movimiento hasta alcanzar la posición de mayor alcance a nivel del suelo.

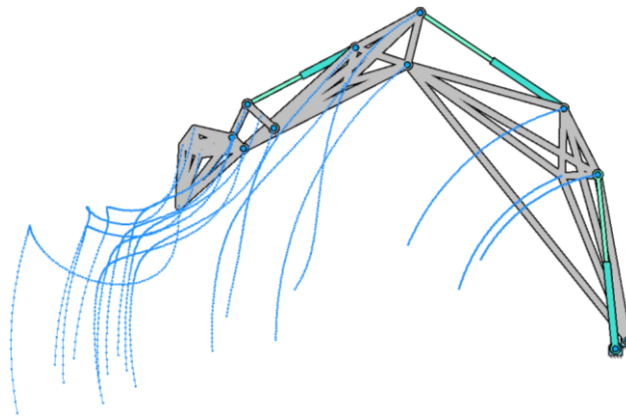


Figura 1. Posición inicial de la 1ª secuencia del movimiento

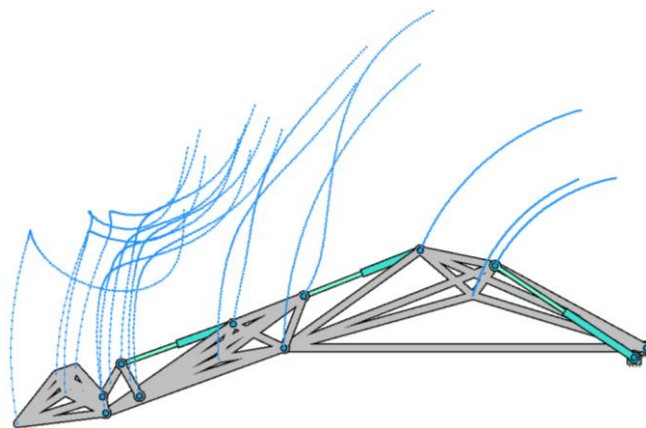


Figura 2. Posición final de la 1ª secuencia del movimiento

Para realizar la primera secuencia del movimiento el brazo articulado invierte un tiempo total de 8 segundos.

2.2.1.1. Actuador hidráulico de la pluma

| Position | |
|--|---------------|
| Initial | 2.86145 |
| <input type="radio"/> Final | 2.64637 |
| <input checked="" type="radio"/> Incr. | Turn -0.21508 |

Longitud total del cilindro en el inicio del movimiento $\approx 2.861,5$ mm

Longitud total del cilindro al final del movimiento $\approx 2.646,4$ mm

Desplazamiento del pistón $\approx -215,1$ mm

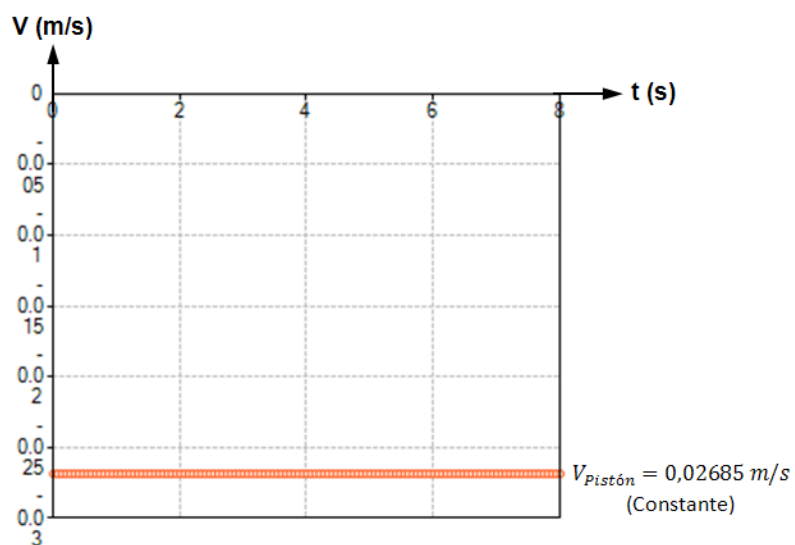


Figura 3. Diagrama velocidad-tiempo del cilindro de la pluma en la 1ª secuencia del movimiento

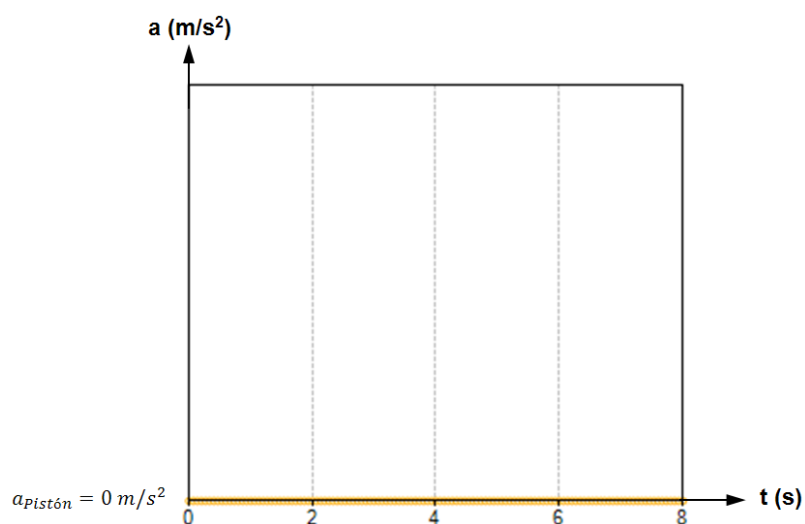


Figura 4. Diagrama aceleración-tiempo del cilindro de la pluma en la 1ª secuencia del movimiento

2.2.1.2. Actuador hidráulico del brazo

| Position | |
|--|---------------|
| Initial | 2.82809 |
| <input type="radio"/> Final | 1.98994 |
| <input checked="" type="radio"/> Incr. | Turn -0.83814 |

Longitud total del cilindro en el inicio del movimiento $\approx 2.828,1$ mm

Longitud total del cilindro al final del movimiento ≈ 1.990 mm

Desplazamiento del pistón $\approx -838,1$ mm

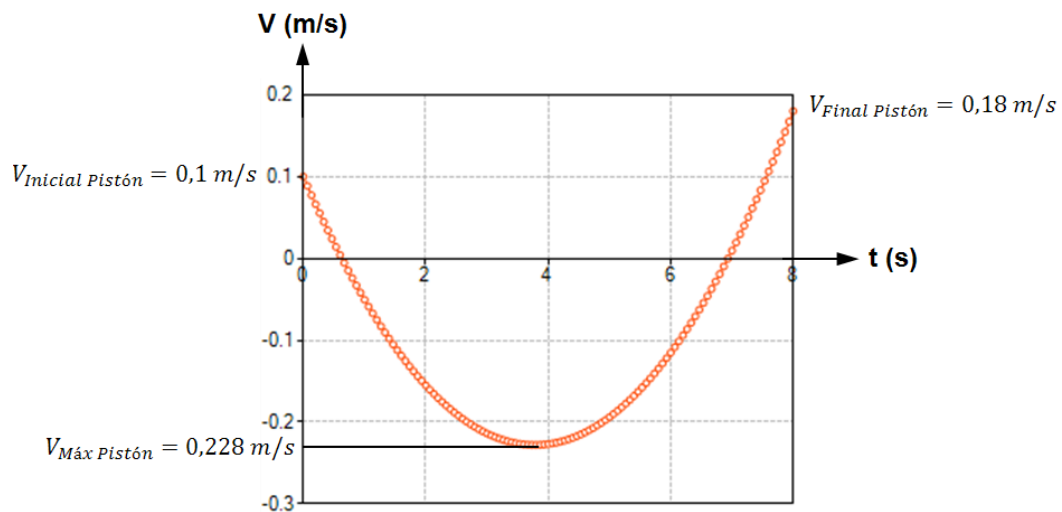


Figura 5. Diagrama velocidad-tiempo del cilindro del brazo en la 1ª secuencia del movimiento



Figura 6. Diagrama aceleración-tiempo del cilindro del brazo en la 1ª secuencia del movimiento

2.2.1.2. Actuador hidráulico de la cuchara

| Position | |
|--|---------------|
| Initial | 1.99761 |
| <input type="radio"/> Final | 1.88688 |
| <input checked="" type="radio"/> Incr. | Turn -0.11072 |

Longitud total del cilindro en el inicio del movimiento $\approx 1.997,6$ mm

Longitud total del cilindro al final del movimiento $\approx 1.886,9$ mm

Desplazamiento del pistón $\approx -110,7$ mm

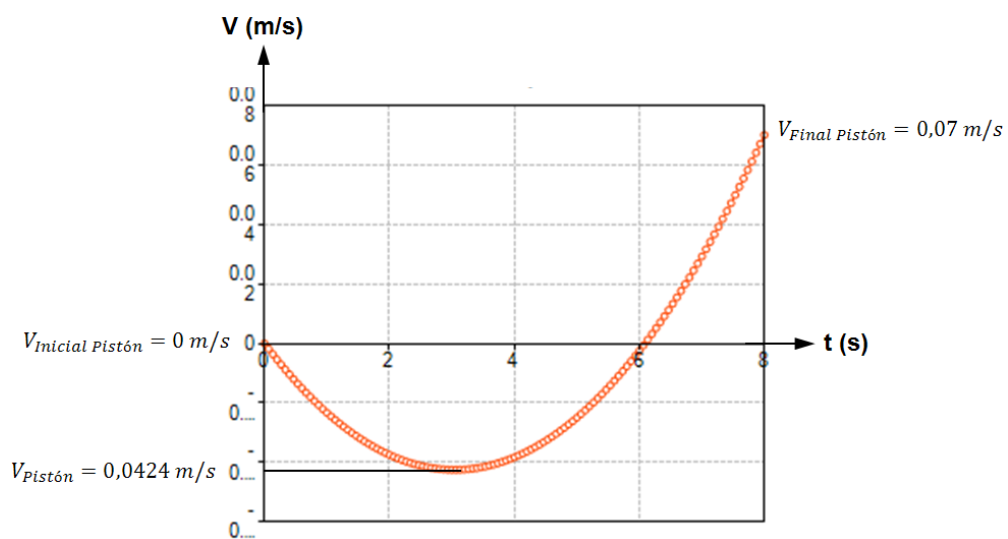


Figura 7. Diagrama velocidad-tiempo del cilindro de la cuchara en la 1ª secuencia del movimiento

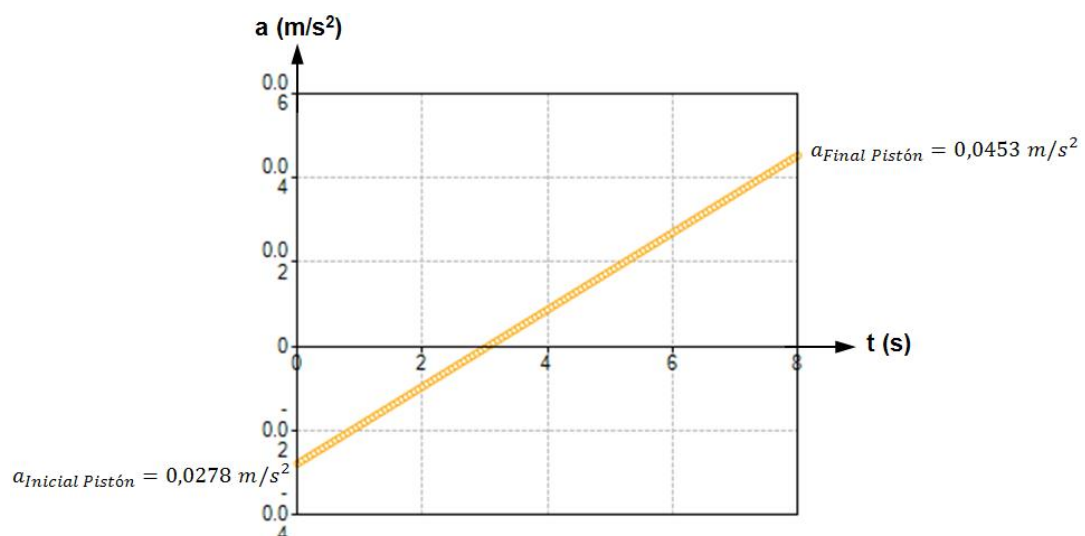


Figura 8. Diagrama aceleración-tiempo del cilindro de la cuchara en la 1ª secuencia del movimiento

2.2.2. Segunda secuencia del movimiento

El brazo articulado realiza un movimiento hasta alcanzar la posición de máxima profundidad de excavación.

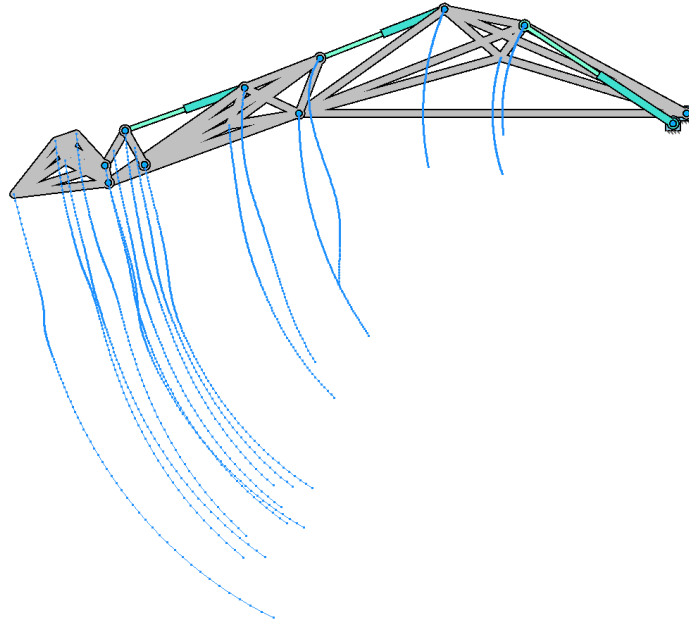


Figura 9. Posición inicial de la 2ª secuencia del movimiento

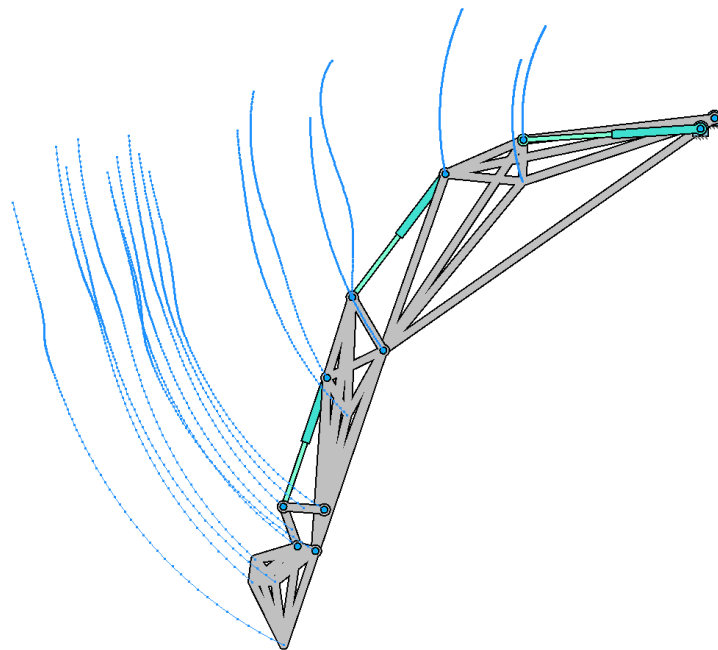


Figura 10. Posición final de la 2ª secuencia del movimiento

Para realizar la segunda secuencia del movimiento el brazo articulado invierte un tiempo total de 10 segundos.

2.2.2.1. Actuador hidráulico de la pluma

| Position | |
|--|---------------|
| Initial | 2.64637 |
| <input type="radio"/> Final | 2.52823 |
| <input checked="" type="radio"/> Incr. | Turn -0.11813 |

Longitud total del cilindro en el inicio del movimiento $\approx 2.646,4$ mm

Longitud total del cilindro al final del movimiento $\approx 2.528,2$ mm

Desplazamiento del pistón $\approx -118,2$ mm

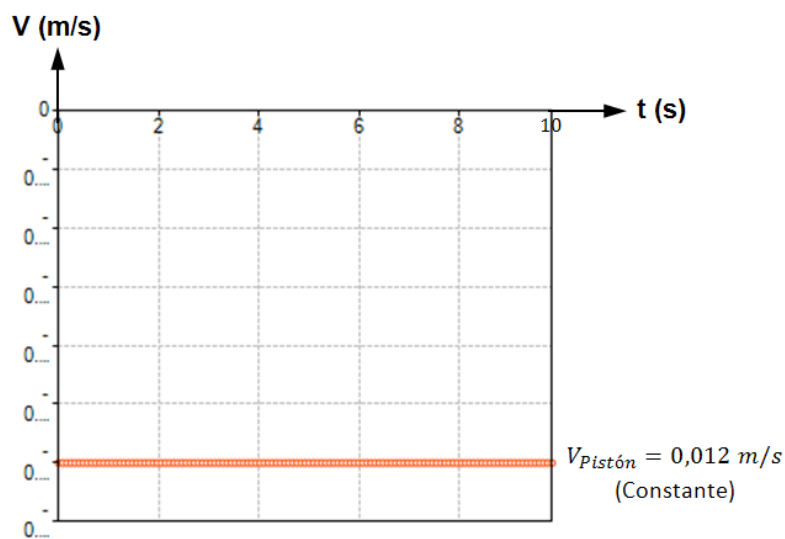


Figura 11. Diagrama velocidad-tiempo del cilindro de la pluma en la 2ª secuencia del movimiento

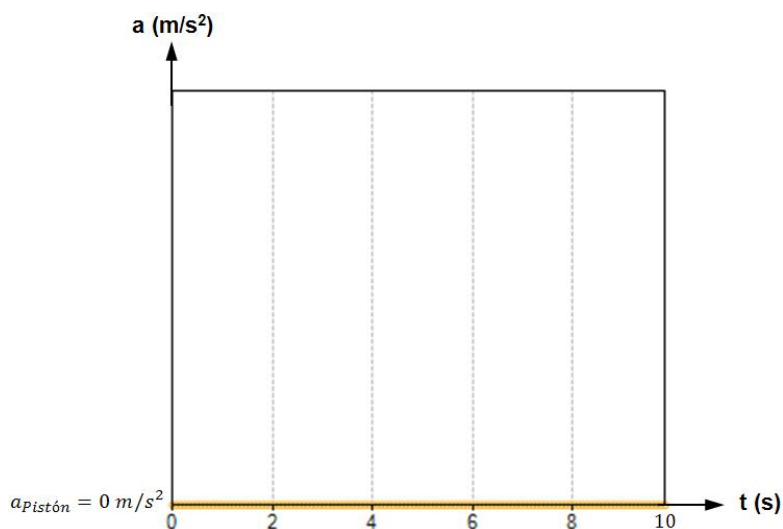


Figura 12. Diagrama aceleración-tiempo del cilindro de la pluma en la 2ª secuencia del movimiento

2.2.2.2. Actuador hidráulico del brazo

| | |
|--|--------------|
| Position | |
| Initial | 1.98994 |
| <input type="radio"/> Final | 2.19966 |
| <input checked="" type="radio"/> Incr. | Turn 0.20972 |

Longitud total del cilindro en el inicio del movimiento ≈ 1.990 mm

Longitud total del cilindro al final del movimiento $\approx 2.199,7$ mm

Desplazamiento del pistón $\approx 209,7$ mm

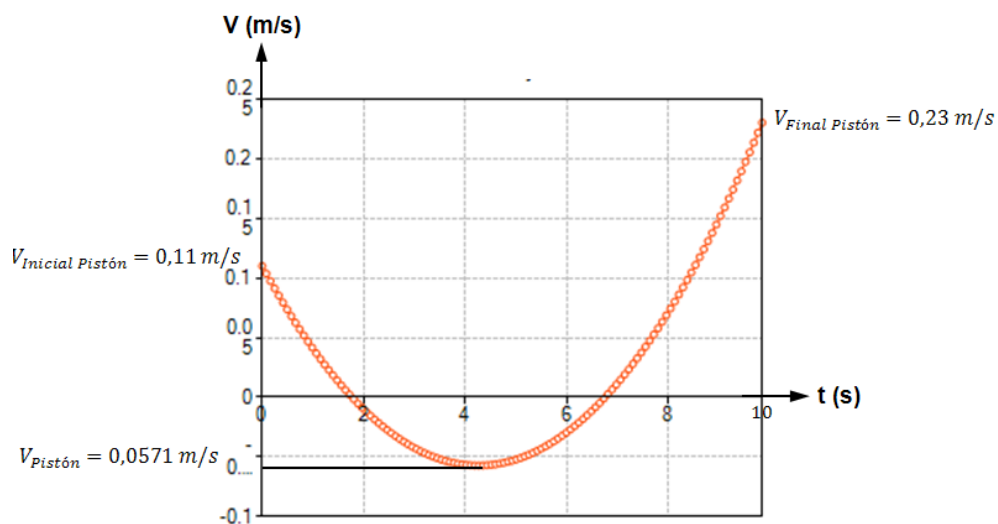


Figura 13. Diagrama velocidad-tiempo del cilindro del brazo en la 2ª secuencia del movimiento

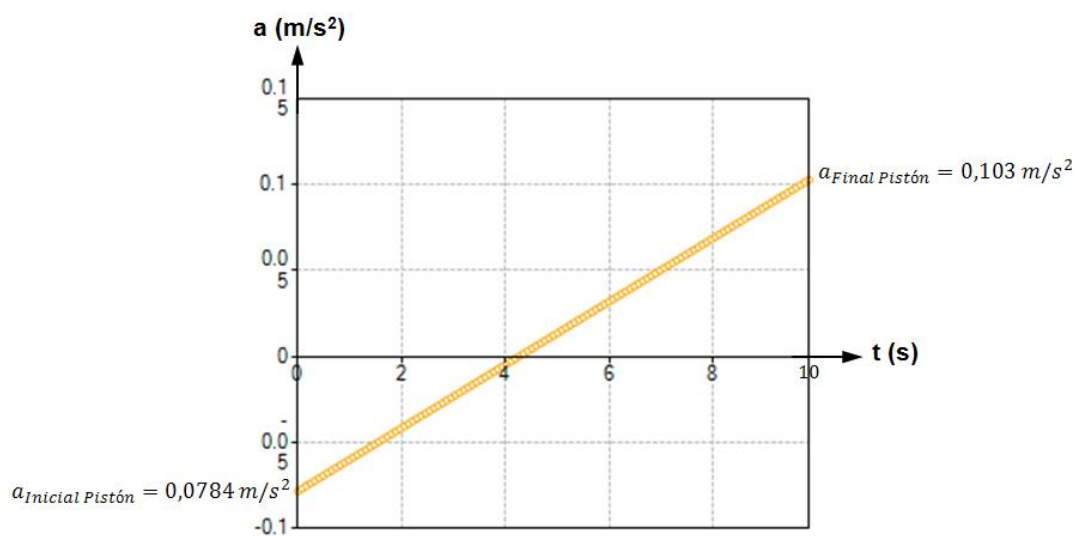


Figura 14. Diagrama aceleración-tiempo del cilindro del brazo en la 2ª secuencia del movimiento

2.2.2.3. Actuador hidráulico de la cuchara

| Position | |
|--|--------------|
| Initial | 1.88688 |
| <input type="radio"/> Final | 1.93666 |
| <input checked="" type="radio"/> Incr. | Turn 0.04977 |

Longitud total del cilindro en el inicio del movimiento $\approx 1.886,9$ mm

Longitud total del cilindro al final del movimiento $\approx 1.936,7$ mm

Desplazamiento del pistón $\approx 49,8$ mm

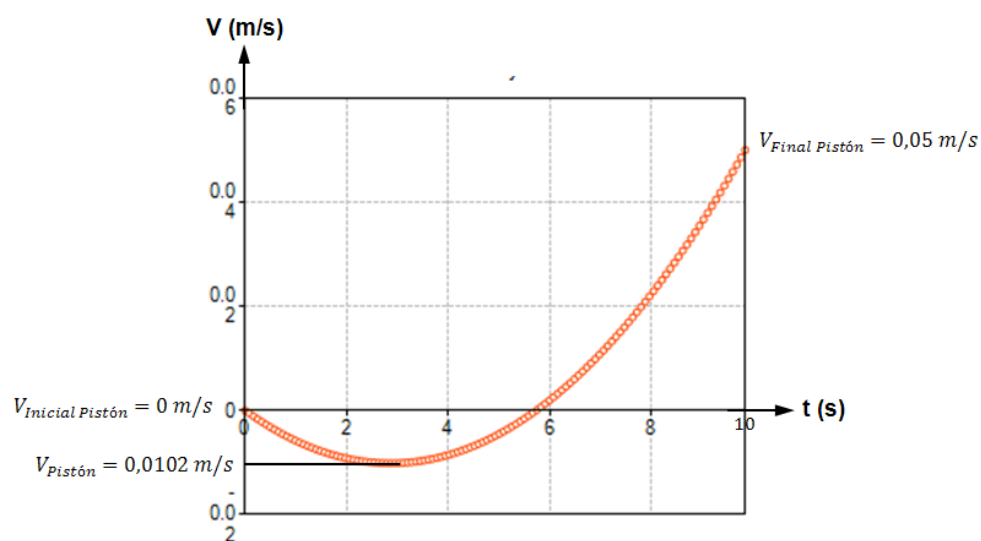


Figura 15. Diagrama velocidad-tiempo del cilindro de la cuchara en la 2ª secuencia del movimiento

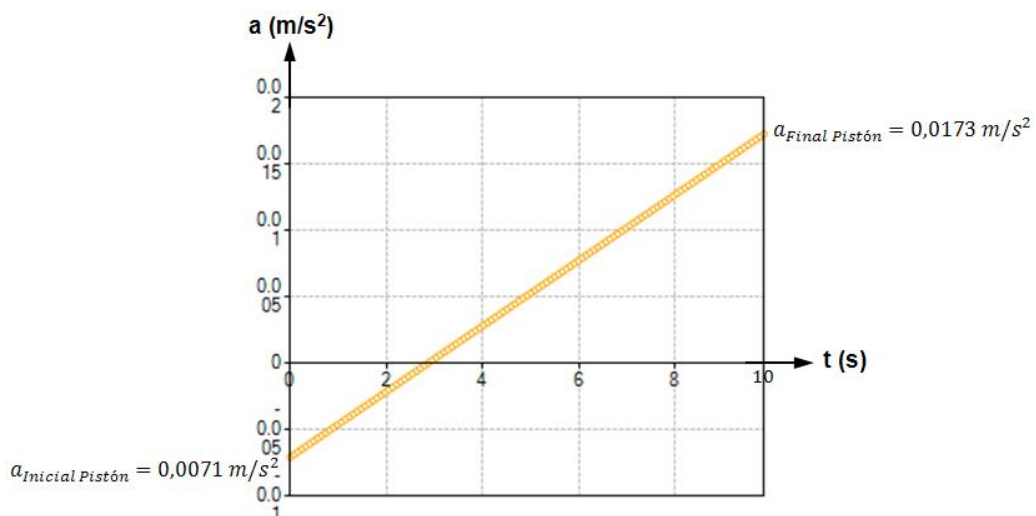


Figura 16. Diagrama aceleración-tiempo del cilindro de la cuchara en la 2ª secuencia del movimiento

2.2.3. Tercera secuencia del movimiento

El brazo articulado realiza un movimiento hasta alcanzar la posición de máxima altura de carga en cuchara.

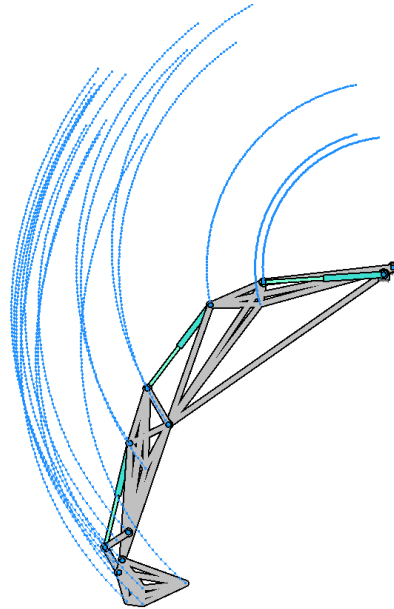


Figura 17. Posición inicial de la 3ª secuencia del movimiento

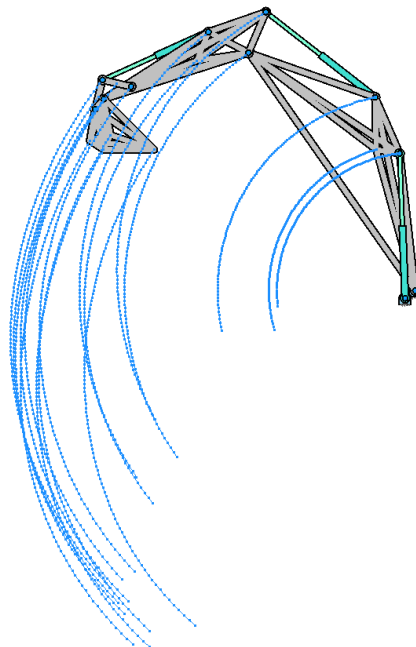


Figura 18. Posición final de la 3ª secuencia del movimiento

Para realizar la tercera secuencia del movimiento el brazo articulado invierte un tiempo total de 12 segundos.

2.2.3.1. Actuador hidráulico de la pluma

| Position | |
|--|--------------|
| Initial | 2.52823 |
| <input type="radio"/> Final | 2.87527 |
| <input checked="" type="radio"/> Incr. | Turn 0.34703 |

Longitud total del cilindro en el inicio del movimiento $\approx 2.528,3$ mm

Longitud total del cilindro al final del movimiento $\approx 2.875,3$ mm

Desplazamiento del pistón ≈ 347 mm

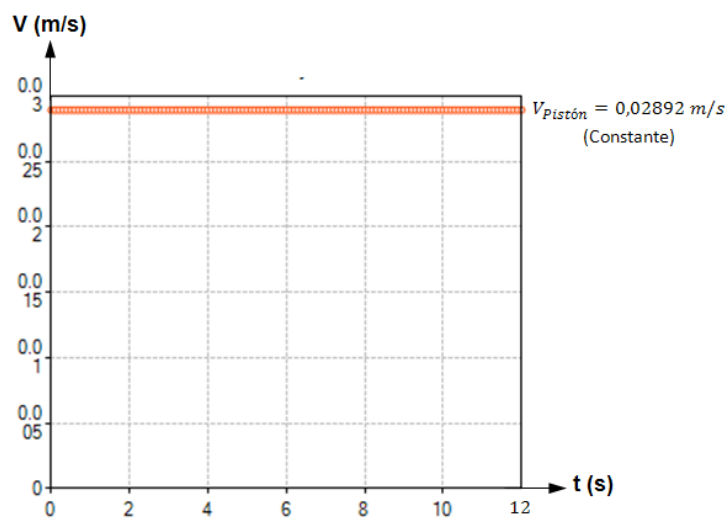


Figura 19. Diagrama velocidad-tiempo del cilindro de la pluma en la 3ª secuencia del movimiento

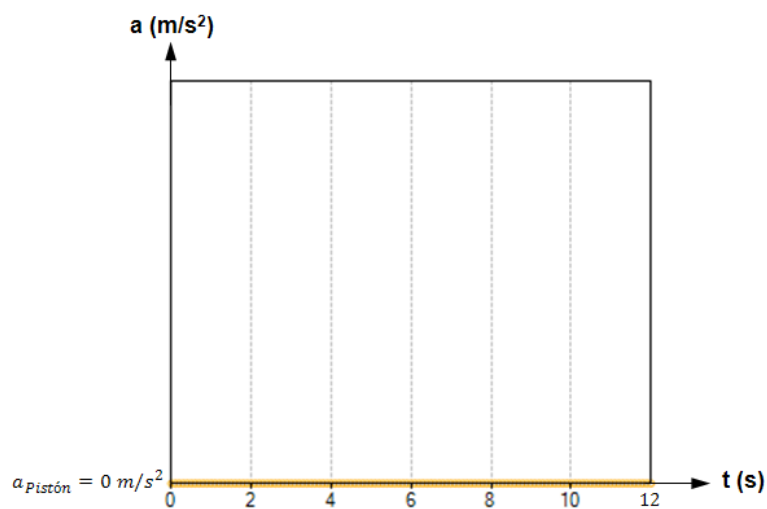


Figura 20. Diagrama aceleración-tiempo del cilindro de la pluma en la 3ª secuencia del movimiento

2.2.3.2. Actuador hidráulico del brazo

| Position | |
|--|--------------|
| Initial | 2.19966 |
| <input type="radio"/> Final | 2.74839 |
| <input checked="" type="radio"/> Incr. | Turn 0.54873 |

Longitud total del cilindro en el inicio del movimiento $\approx 2.199,7$ mm

Longitud total del cilindro al final del movimiento $\approx 2.748,4$ mm

Desplazamiento del pistón $\approx 548,7$ mm

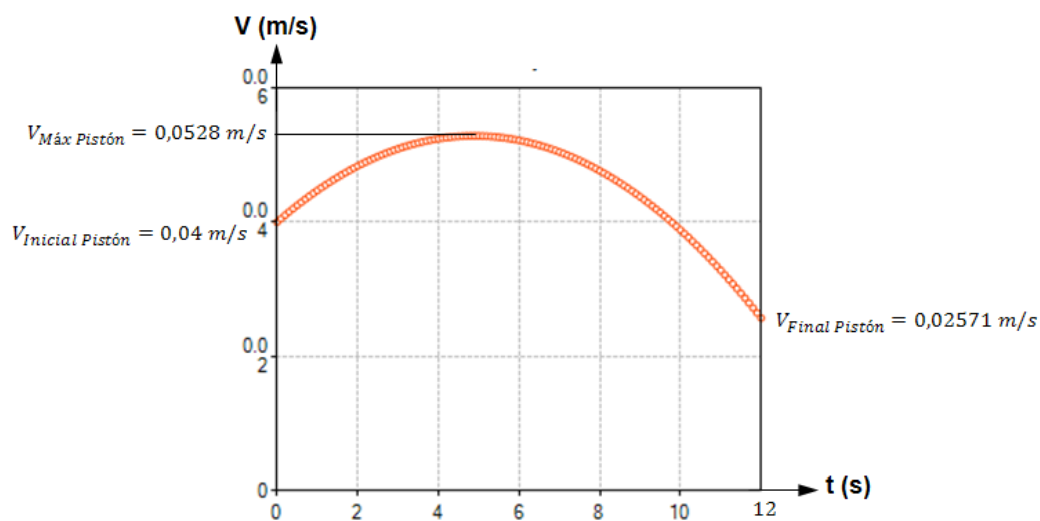


Figura 21. Diagrama velocidad-tiempo del cilindro del brazo en la 3ª secuencia del movimiento

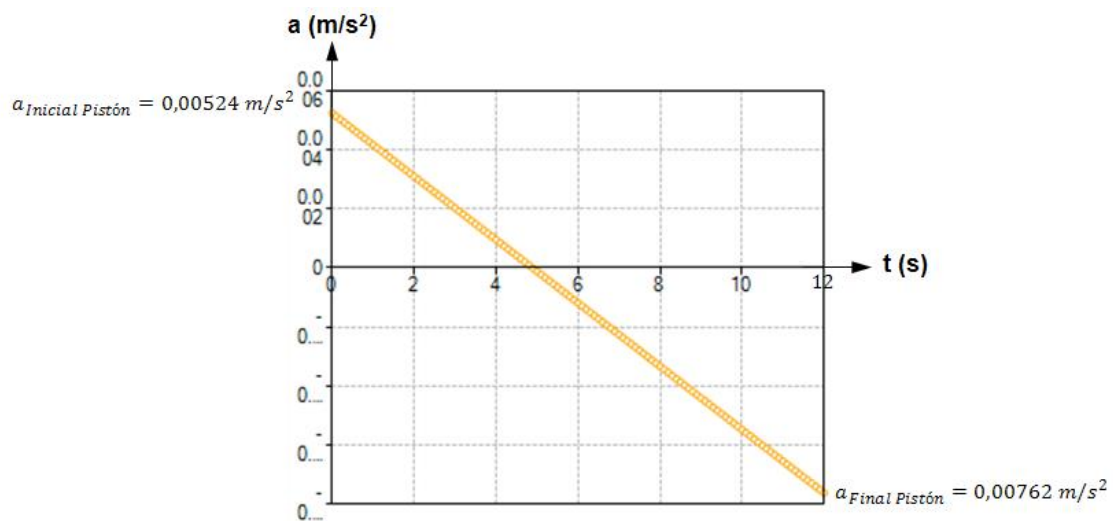


Figura 22. Diagrama aceleración-tiempo del cilindro del brazo en la 3ª secuencia del movimiento

2.2.3.3. Actuador hidráulico de la cuchara

| Position | |
|--|--------------|
| Initial | 2.25651 |
| <input type="radio"/> Final | 2.30515 |
| <input checked="" type="radio"/> Incr. | Turn 0.04863 |

Longitud total del cilindro en el inicio del movimiento $\approx 2.256,5$ mm

Longitud total del cilindro al final del movimiento $\approx 2.305,2$ mm

Desplazamiento del pistón $\approx 48,7$ mm

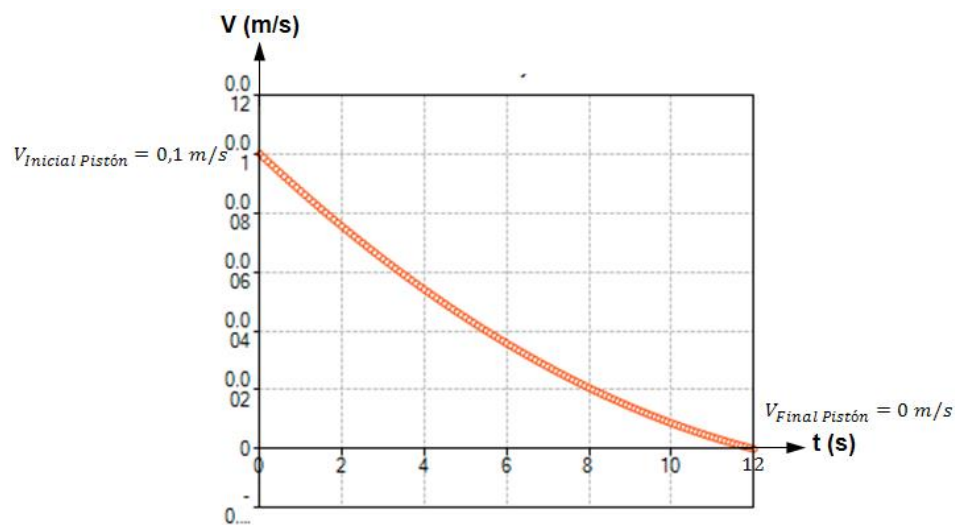


Figura 23. Diagrama velocidad-tiempo del cilindro de la cuchara en la 3ª secuencia del movimiento

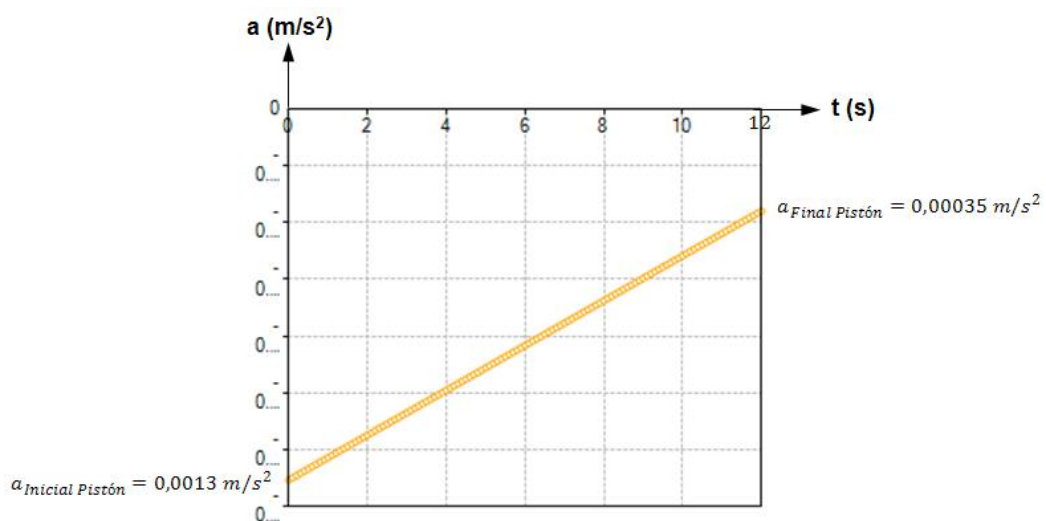
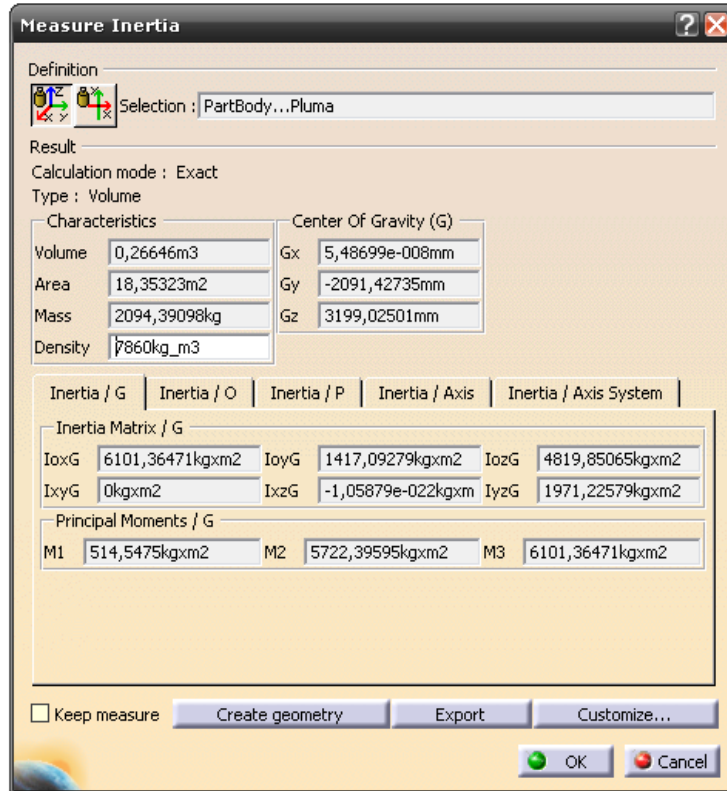
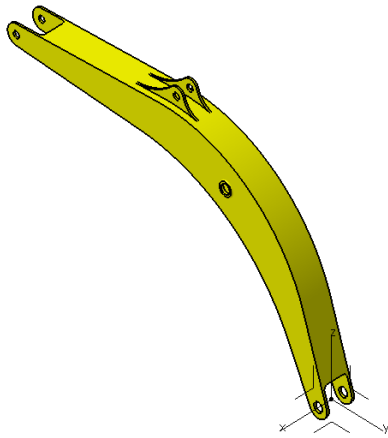


Figura 24. Diagrama aceleración-tiempo del cilindro de la cuchara en la 3ª secuencia del movimiento

2.3. Datos de diseño proporcionados por CATIA

2.3.1. Elementos principales diseñados

2.3.1.1. Pluma



Material empleado: Acero S235

Densidad del material empleado: 7.860 kg/m³

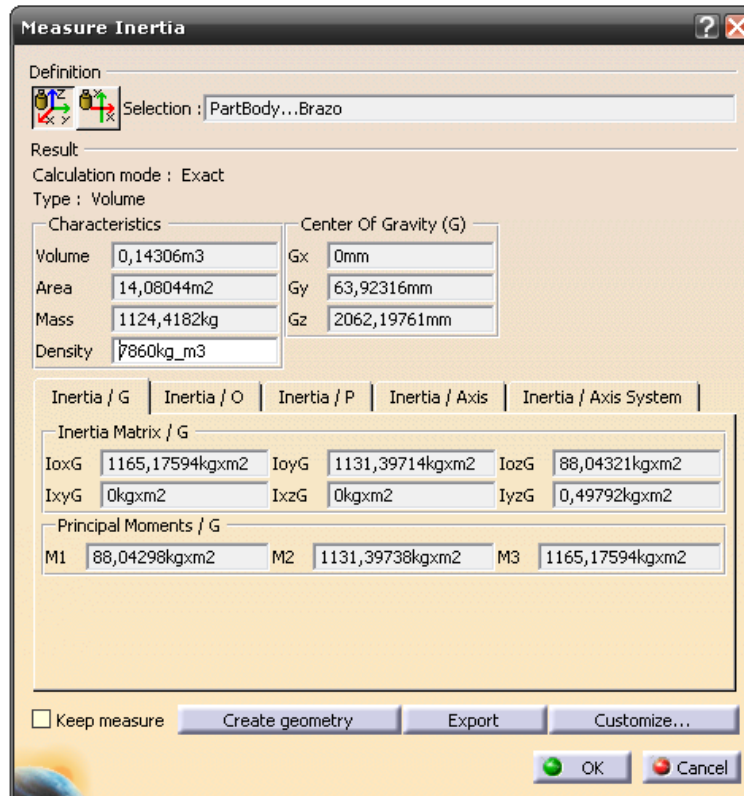
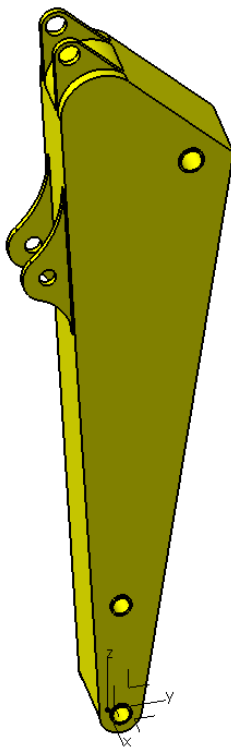
Masa: 2.094,4 kg

| Coordenadas CDG respecto a los ejes de representación indicados | | |
|---|----------------|----------------|
| X _G | Y _G | Z _G |
| 0 mm | -2.091,43 mm | 3.199,03 mm |

| Momentos de inercia en el CDG | | |
|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| I _{x G} | I _{y G} | I _{z G} |
| 6.101,4 kg · m ² | 1.417,1 kg · m ² | 4.819,9 kg · m ² |

| Productos de inercia en el CDG | | |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| I _{xy G} | I _{xz G} | I _{yz G} |
| 0 kg · m ² | 0 kg · m ² | 1.971,3 kg · m ² |

2.3.1.2. Brazo



Material empleado: Acero S235

Densidad del material empleado: 7.860 kg/m³

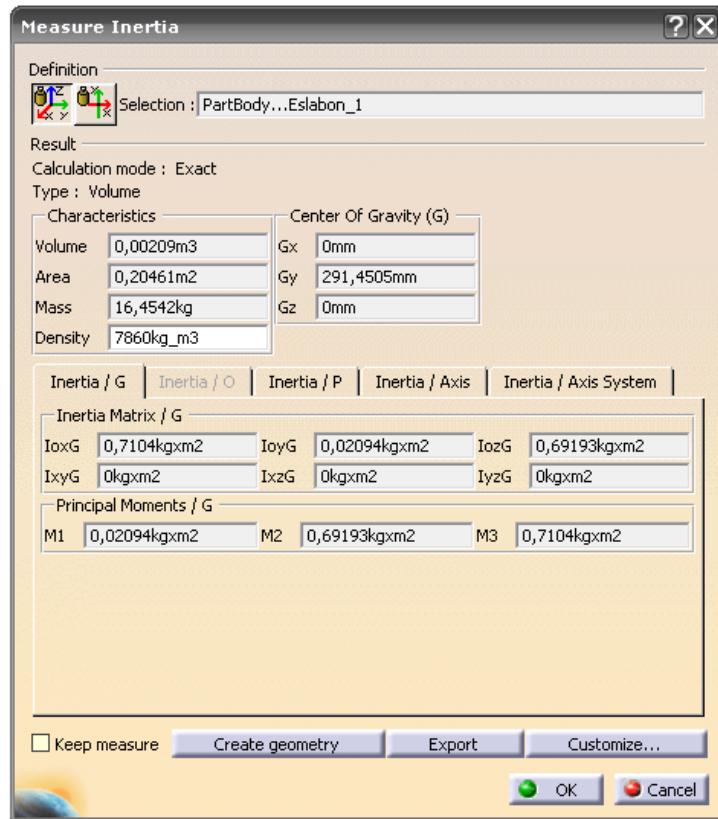
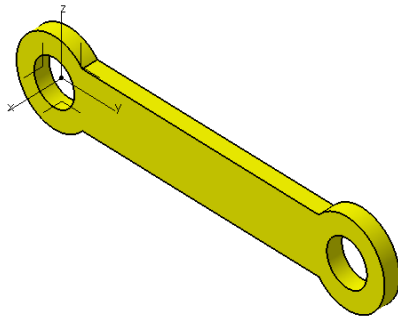
Masa: 1.124,42 kg

| Coordenadas CDG respecto a los ejes de representación indicados | | |
|---|----------------|----------------|
| X _G | Y _G | Z _G |
| 0 mm | 63,93 mm | 2.062,2 mm |

| Momentos de inercia en el CDG | | |
|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| I _{xG} | I _{yG} | I _{zG} |
| 1.165,2 kg · m ² | 1.131,4 kg · m ² | 88,05 kg · m ² |

| Productos de inercia en el CDG | | |
|--------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| I _{xyG} | I _{xzG} | I _{yzG} |
| 0 kg · m ² | 0 kg · m ² | 0,5 kg · m ² |

2.3.1.3. Eslabón 1



Material empleado: Acero S235

Densidad del material empleado: 7.860 kg/m³

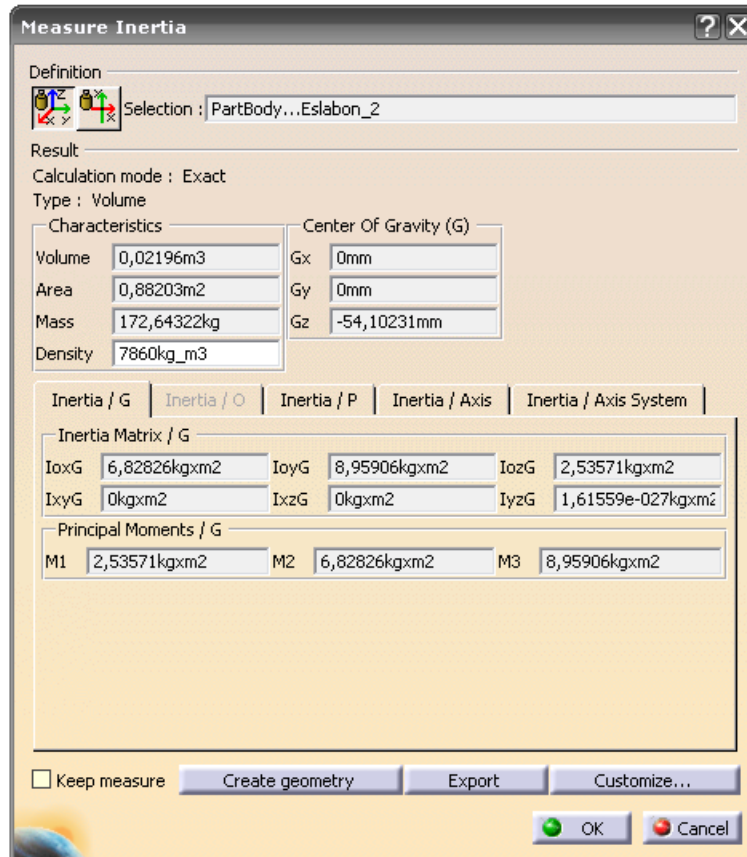
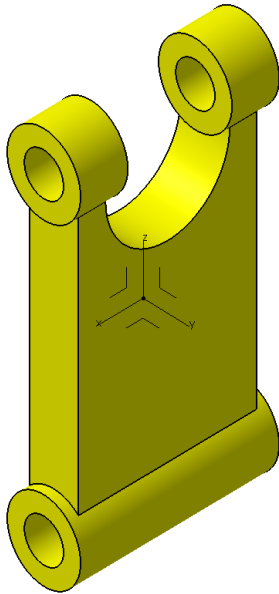
Masa: 16,46 kg

| Coordenadas CDG respecto a los ejes de representación indicados | | |
|---|----------------|----------------|
| X _G | Y _G | Z _G |
| 0 mm | 291,45 mm | 0 mm |

| Momentos de inercia en el CDG | | |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| I _{x G} | I _{y G} | I _{z G} |
| 0,711 kg · m ² | 0,021 kg · m ² | 0,692 kg · m ² |

| Productos de inercia en el CDG | | |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| I _{xy G} | I _{xz G} | I _{yz G} |
| 0 kg · m ² | 0 kg · m ² | 0 kg · m ² |

2.3.1.4. Eslabón 2



Material empleado: Acero S235

Densidad del material empleado: 7.860 kg/m³

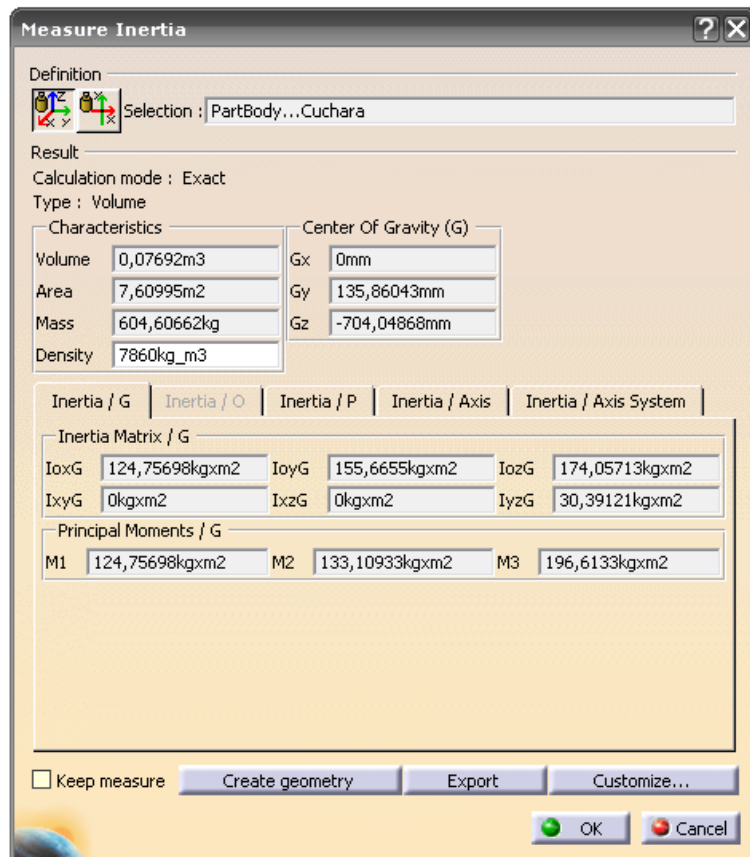
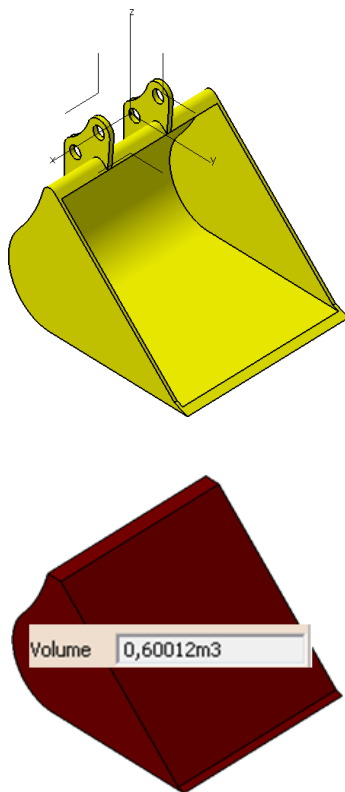
Masa: 172,65 kg

| Coordenadas CDG respecto a los ejes de representación indicados | | |
|---|----------------|----------------|
| X _G | Y _G | Z _G |
| 0 mm | 0 mm | -54,1 mm |

| Momentos de inercia en el CDG | | |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| I _{xG} | I _{yG} | I _{zG} |
| 6,83 kg · m ² | 8,96 kg · m ² | 2,54 kg · m ² |

| Productos de inercia en el CDG | | |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| I _{xyG} | I _{xzG} | I _{yzG} |
| 0 kg · m ² | 0 kg · m ² | 0 kg · m ² |

2.3.1.5. Cuchara



Material empleado: Acero S235

Densidad del material empleado: 7.860 kg/m³

Masa: 604,61 kg

Capacidad de la cuchara: 0,6 m³

| Coordenadas CDG respecto a los ejes de representación indicados | | |
|---|----------------|----------------|
| X _G | Y _G | Z _G |
| 0 mm | 135,86 mm | -704,05 mm |

| Momentos de inercia en el CDG | | |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| I _{x G} | I _{y G} | I _{z G} |
| 124,76 kg · m ² | 155,67 kg · m ² | 174,06 kg · m ² |

| Productos de inercia en el CDG | | |
|--------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| I _{xy G} | I _{xz G} | I _{yz G} |
| 0 kg · m ² | 0 kg · m ² | 30,4 kg · m ² |

2.3.2. Ensamblaje de los elementos principales diseñados

2.3.2.1. Ensamblaje posición mayor alcance a nivel del suelo

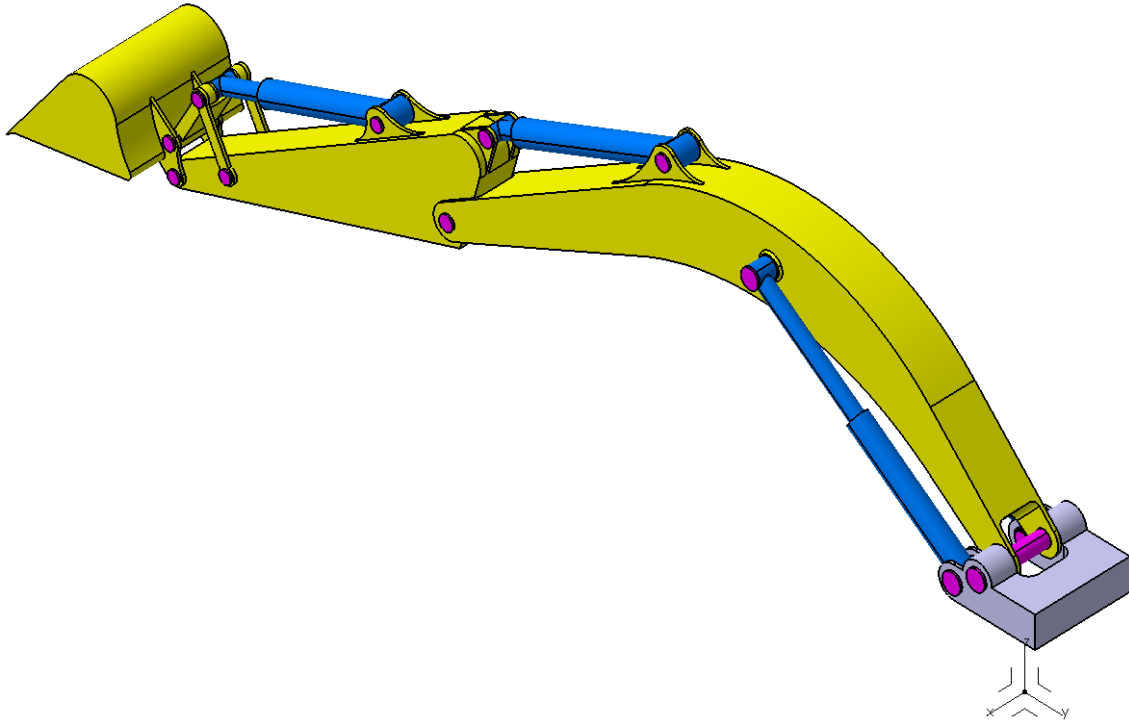


Tabla 1. Datos del ensamblaje en posición de mayor alcance a nivel del suelo

| | C.D.G (mm) | Momento de inercia ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) | Producto de inercia |
|------------------|-------------------|--|---------------------|
| Pluma | $X_G = 0$ | $I_{xG} = 6.101,4$ | $I_{xyG} = 0$ |
| | $Y_G = -2.766,2$ | $I_{yG} = 521,35$ | $I_{xzG} = 0$ |
| | $Z_G = 2.047,54$ | $I_{zG} = 5.715,6$ | $I_{yzG} = -188$ |
| Brazo | $X_G = 0$ | $I_{xG} = 1.165,2$ | $I_{xyG} = 0$ |
| | $Y_G = -6.827,13$ | $I_{yG} = 298,7$ | $I_{xzG} = 0$ |
| | $Z_G = 1.000,07$ | $I_{zG} = 920,78$ | $I_{yzG} = -418,8$ |
| Eslabón 1 | $X_G = 215$ | $I_{xG} = 0,711$ | $I_{xyG} = 0$ |
| | $Y_G = -8.203,6$ | $I_{yG} = 0,53$ | $I_{xzG} = 0$ |
| | $Z_G = 691,72$ | $I_{zG} = 0,184$ | $I_{yzG} = 0,29$ |
| Eslabón 2 | $X_G = 0$ | $I_{xG} = 6,83$ | $I_{xyG} = 0$ |
| | $Y_G = -8.524,91$ | $I_{yG} = 7,35$ | $I_{xzG} = 0$ |
| | $Z_G = 638,9$ | $I_{zG} = 4,151$ | $I_{yzG} = -2,79$ |
| Cuchara | $X_G = 0$ | $I_{xG} = 124,76$ | $I_{xyG} = 0$ |
| | $Y_G = -9.233,52$ | $I_{yG} = 137,51$ | $I_{xzG} = 0$ |
| | $Z_G = 497,06$ | $I_{zG} = 192,22$ | $I_{yzG} = -16,13$ |

2.3.2.2. Ensamblaje posición máxima profundidad de excavación

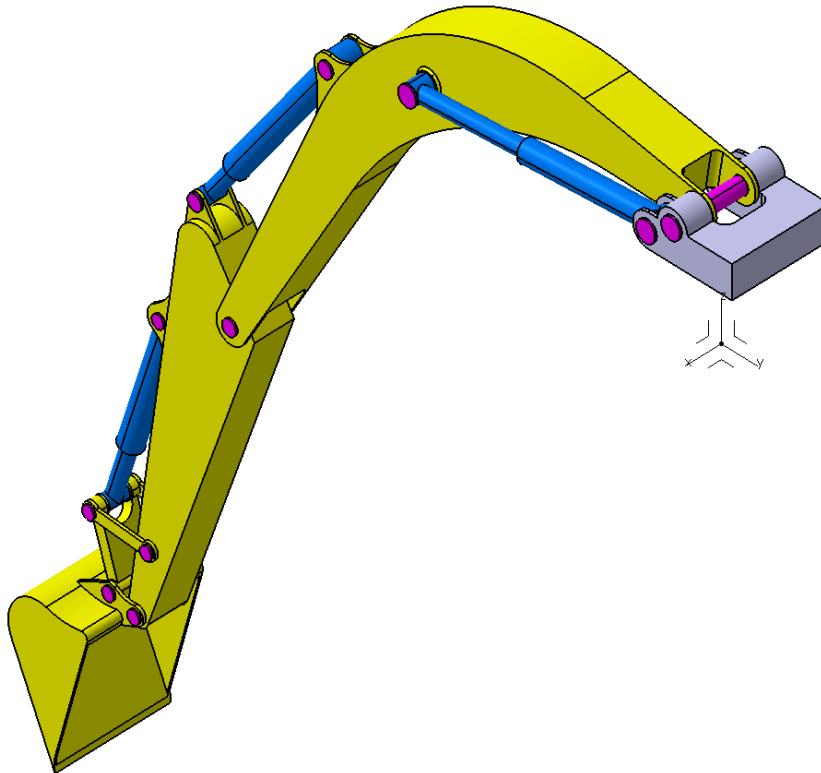


Tabla 2. Datos del ensamblaje en posición de máxima profundidad de excavación

| | C.D.G (mm) | Momento de inercia ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) | Producto de inercia |
|------------------|-------------------|--|----------------------|
| Pluma | $X_G = 0$ | $I_{xG} = 6.101,4$ | $I_{xyG} = 0$ |
| | $Y_G = -2.752,1$ | $I_{yG} = 2.406,9$ | $I_{xzG} = 0$ |
| | $Z_G = 307,64$ | $I_{zG} = 3.830,1$ | $I_{xzG} = -2.504,8$ |
| Brazo | $X_G = 0$ | $I_{xG} = 1.165,2$ | $I_{xyG} = 0$ |
| | $Y_G = -5.230,6$ | $I_{yG} = 1.086,07$ | $I_{xzG} = 0$ |
| | $Z_G = -3.060,75$ | $I_{zG} = 133,38$ | $I_{xzG} = -212,7$ |
| Eslabón 1 | $X_G = 215$ | $I_{xG} = 0,711$ | $I_{xyG} = 0$ |
| | $Y_G = -5.854,13$ | $I_{yG} = 0,025$ | $I_{xzG} = 0$ |
| | $Z_G = -4.352,4$ | $I_{zG} = 0,69$ | $I_{xzG} = 0,048$ |
| Eslabón 2 | $X_G = 0$ | $I_{xG} = 6,83$ | $I_{xyG} = 0$ |
| | $Y_G = -6.025,96$ | $I_{yG} = 8,24$ | $I_{xzG} = 0$ |
| | $Z_G = -4.665,13$ | $I_{zG} = 3,26$ | $I_{xzG} = 2,03$ |
| Cuchara | $X_G = 0$ | $I_{xG} = 124,76$ | $I_{xyG} = 0$ |
| | $Y_G = -6.260,02$ | $I_{yG} = 194,58$ | $I_{xzG} = 0$ |
| | $Z_G = -5.394,12$ | $I_{zG} = 135,15$ | $I_{xzG} = -11,19$ |

2.3.2.3. Ensamblaje posición máxima altura de carga

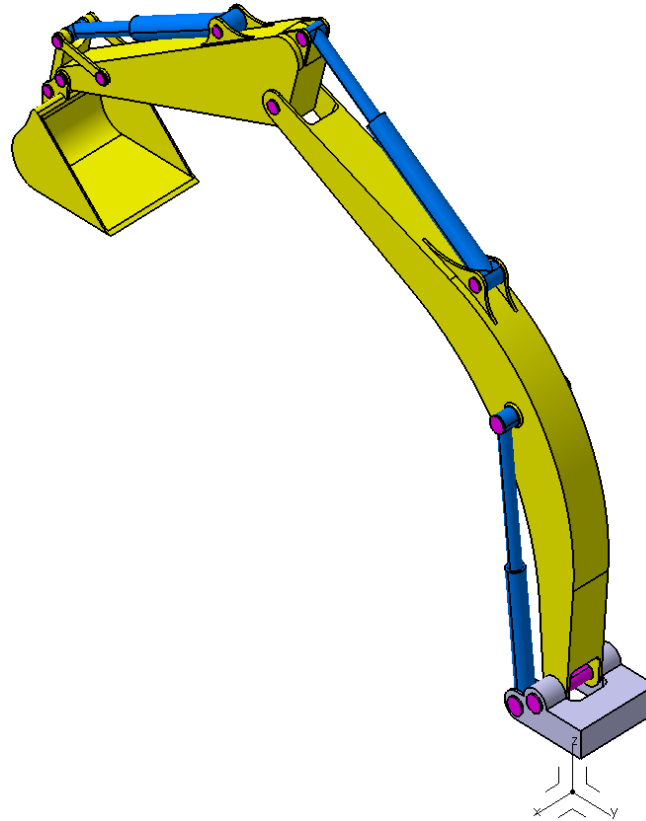


Tabla 3. Datos del ensamblaje en posición de máxima altura de carga

| | C.D.G (mm) | Momento de inercia ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) | Producto de inercia |
|------------------|-------------------|--|----------------------|
| Pluma | $X_G = 0$ | $I_{xG} = 6.101,4$ | $I_{xyG} = 0$ |
| | $Y_G = -1.128,83$ | $I_{yG} = 3.384,32$ | $I_{xzG} = 0$ |
| | $Z_G = 3.863,82$ | $I_{zG} = 2.852,63$ | $I_{xzG} = 2.590,32$ |
| Brazo | $X_G = 0$ | $I_{xG} = 1.165,2$ | $I_{xyG} = 0$ |
| | $Y_G = -4.762,12$ | $I_{yG} = 324,05$ | $I_{xzG} = 0$ |
| | $Z_G = 5.383,31$ | $I_{zG} = 895,4$ | $I_{xzG} = -436,51$ |
| Eslabón 1 | $X_G = 215$ | $I_{xG} = 0,711$ | $I_{xyG} = 0$ |
| | $Y_G = -6.264,56$ | $I_{yG} = 0,042$ | $I_{xzG} = 0$ |
| | $Z_G = 4.836,08$ | $I_{zG} = 0,672$ | $I_{xzG} = 0,116$ |
| Eslabón 2 | $X_G = 0$ | $I_{xG} = 6,83$ | $I_{xyG} = 0$ |
| | $Y_G = -6.624,71$ | $I_{yG} = 8,69$ | $I_{xzG} = 0$ |
| | $Z_G = 4.540,6$ | $I_{zG} = 2,81$ | $I_{xzG} = -1,3$ |
| Cuchara | $X_G = 0$ | $I_{xG} = 124,76$ | $I_{xyG} = 0$ |
| | $Y_G = -6.369,7$ | $I_{yG} = 155,67$ | $I_{xzG} = 0$ |
| | $Z_G = 3.795,95$ | $I_{zG} = 174,06$ | $I_{xzG} = 30,4$ |

2.4. Análisis MEF

Una vez realizado el diseño de la geometría que van a tener los diferentes elementos que componen el brazo articulado de la retroexcavadora, es necesario seguir una serie de pasos para realizar el análisis mediante elementos finitos con el fin de calcular tensiones, deformaciones y desplazamientos. De esta manera se verificará que la geometría diseñada es capaz de soportar correctamente las solicitaciones a las que va a estar sometida.

1- Asignar un material

En este caso el material empleado en el diseño de los elementos a analizar (pluma, brazo, eslabón 1, eslabón 2 y cuchara) es el mismo. Se trata del acero estructural S235 (F-1110), cuyas propiedades proporcionadas por CATIA son las siguientes:

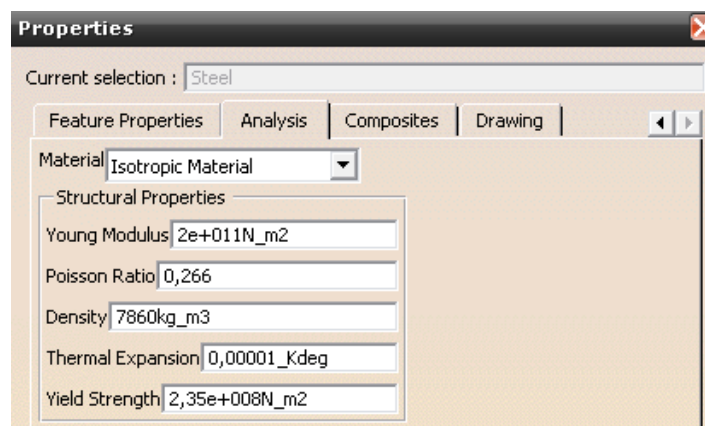


Figura 25. Propiedades del material S235 empleadas por CATIA

2- Generar un tipo de mallado

Para realizar el mallado se ha escogido elementos de tipo “tetraedros parabólicos” (de orden superior), debido a que poseen mayor número de nodos, lo que se traduce en una mayor precisión en el resultado final obtenido.



Figura 26. Tetraedro parabólico (TE10) de 10 nodos

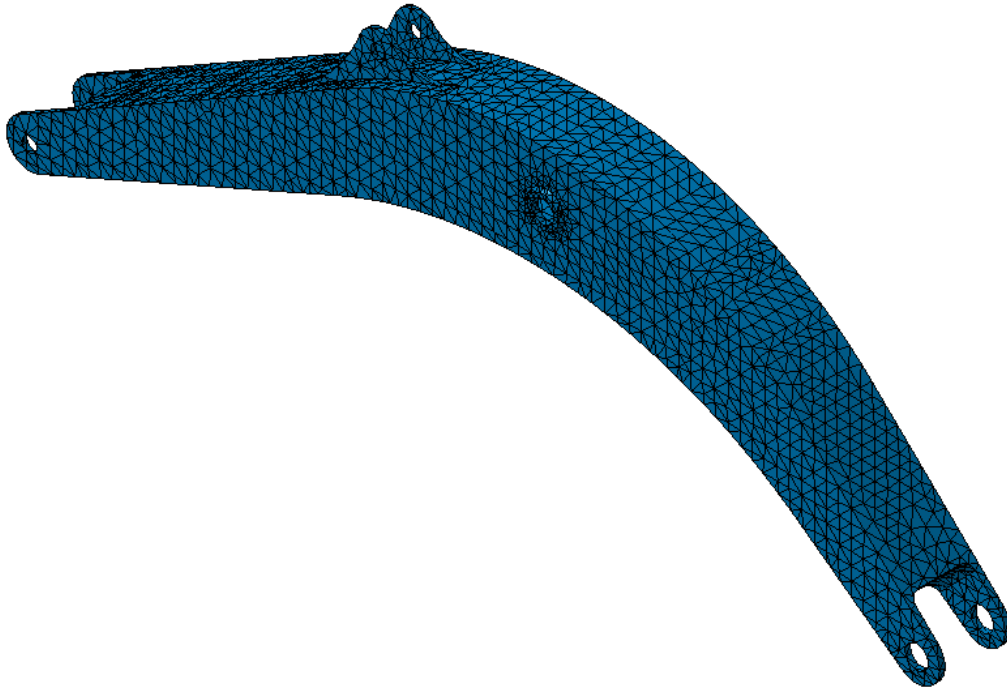


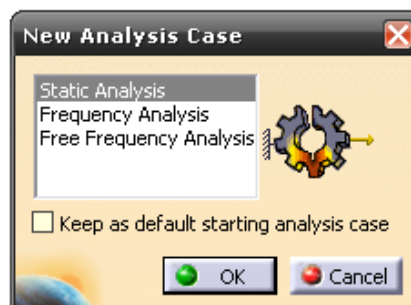
Figura 27. Mallado de la pluma

3- Definición de cargas y condiciones de contorno

Es necesario introducir las solicitaciones (cargas externas) a las que va a estar sometido cada elemento del brazo articulado. También es necesario aplicar las condiciones de contorno de manera que se restrinja el movimiento.

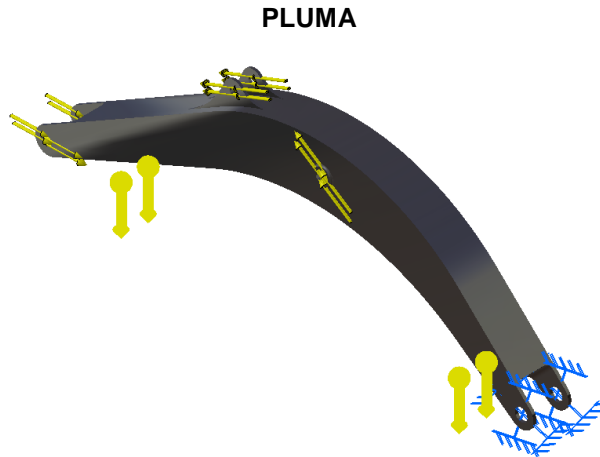
4- Elección del tipo de análisis

El último paso consiste en definir qué tipo de análisis se va a realizar. Como se ha comentado en la memoria, se va a realizar un análisis estático-lineal para cada elemento en las tres posiciones críticas a analizar.



2.4.1. Informe de los análisis realizados

2.4.1.1. Posición de mayor alcance a nivel del suelo



STRUCTURE Computation

Number of nodes : 584606
 Number of elements : 330401
 Number of D.O.F. : 1753818
 Number of Contact relations : 0
 Number of Kinematic relations : 0

Parabolic tetrahedron : 330401

ELEMENT QUALITY:

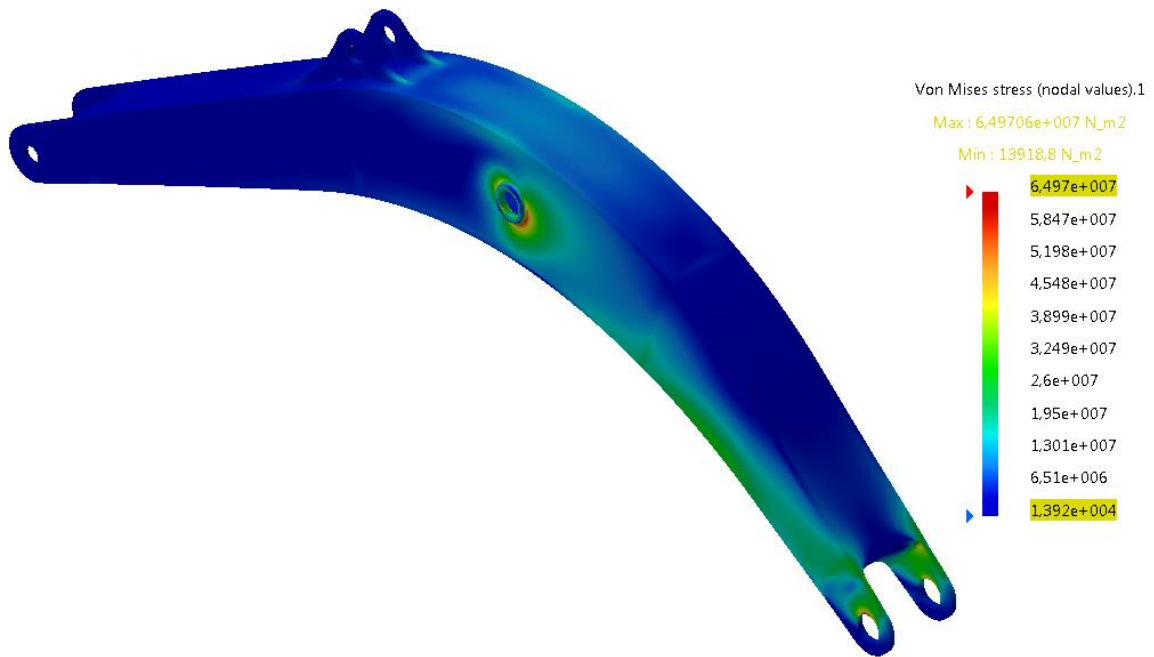
| Criterion | Good | Poor | Bad | Worst | Average |
|--------------|-------------------|------------|------------|-------|---------|
| Stretch | 330401 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 0,349 | 0,594 |
| Aspect Ratio | 330401 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 4,235 | 2,239 |

Strain Energy : 5.564e+001 J

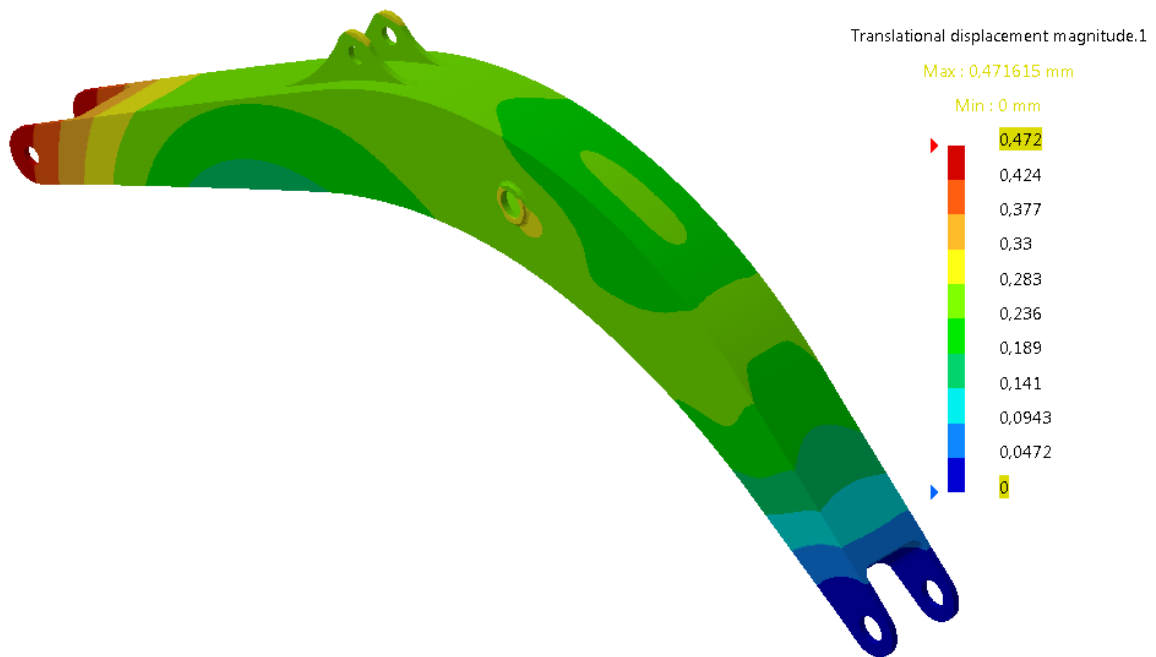
Equilibrium

| Components | Applied Forces | Reactions | Residual | Relative Magnitude Error |
|------------|----------------|--------------|--------------|--------------------------|
| Fx (N) | -8.0212e-007 | 7.7643e-007 | -2.5692e-008 | 6.4965e-012 |
| Fy (N) | -3.4436e+005 | 3.4436e+005 | 1.3958e-007 | 3.5295e-011 |
| Fz (N) | 1.9751e+005 | -1.9751e+005 | -1.1289e-007 | 2.8546e-011 |
| Mx (Nxm) | 4.4176e+005 | -4.4176e+005 | -2.1537e-008 | 9.2099e-013 |
| My (Nxm) | -1.5821e-003 | 1.5821e-003 | -9.2421e-008 | 3.9522e-012 |
| Mz (Nxm) | 1.0671e-004 | -1.0690e-004 | -1.9460e-007 | 8.3218e-012 |

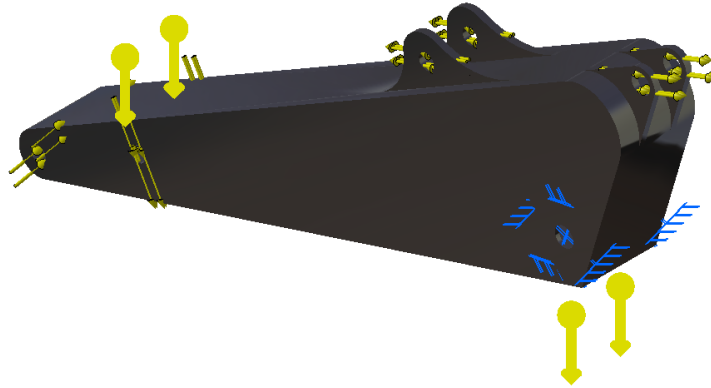
Análisis de tensiones



Análisis de desplazamientos



BRAZO



STRUCTURE Computation

Number of nodes : 275670
 Number of elements : 145646
 Number of D.O.F. : 827010
 Number of Contact relations : 0
 Number of Kinematic relations : 0

Parabolic tetrahedron : 145646

ELEMENT QUALITY:

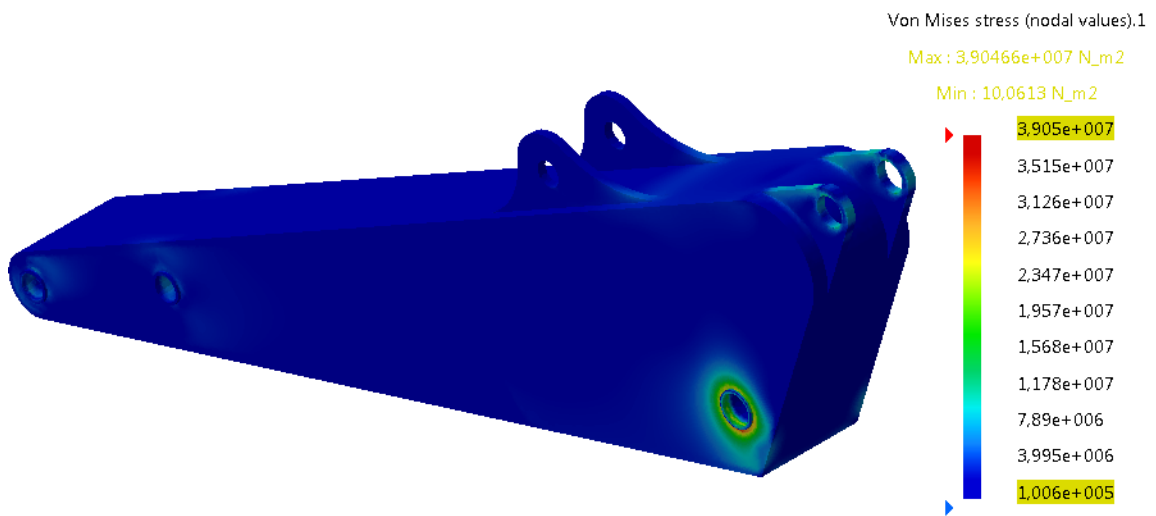
| Criterion | Good | Poor | Bad | Worst | Average |
|--------------|--------------------|-------------|-------------|-------|---------|
| Stretch | 145646 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 0,313 | 0,588 |
| Aspect Ratio | 145646 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 4,745 | 2,239 |

Strain Energy : 1.663e+000 J

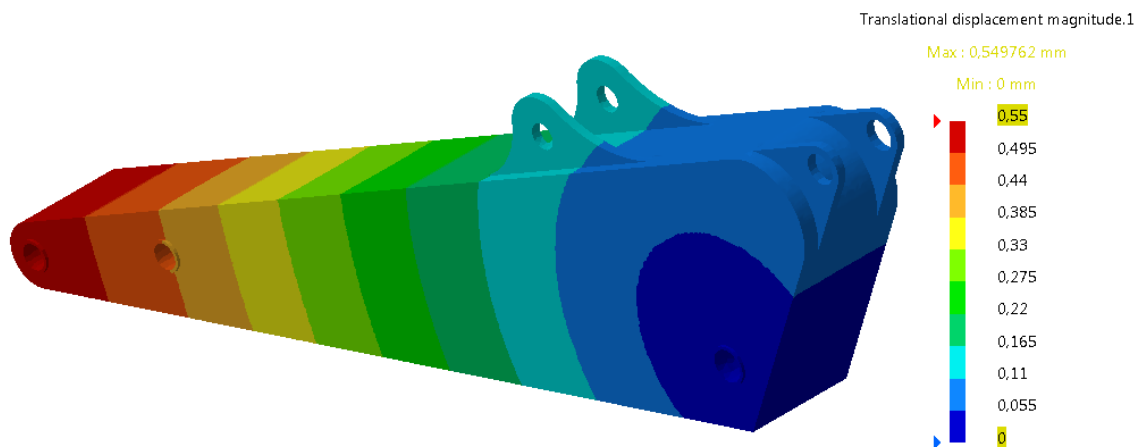
Equilibrium

| Components | Applied Forces | Reactions | Residual | Relative Magnitude Error |
|------------|----------------|--------------|--------------|--------------------------|
| Fx (N) | 3.1292e-008 | 2.4372e-008 | 5.5665e-008 | 3.8196e-011 |
| Fy (N) | 3.2681e+004 | -3.2681e+004 | 9.4617e-008 | 6.4923e-011 |
| Fz (N) | -2.6791e+003 | 2.6791e+003 | -1.7240e-007 | 1.1829e-010 |
| Mx (Nxm) | -9.3107e+004 | 9.3107e+004 | -3.6962e-009 | 6.3440e-013 |
| My (Nxm) | -2.9540e-004 | 2.9556e-004 | 1.6096e-007 | 2.7627e-011 |
| Mz (Nxm) | -1.4965e-006 | 1.6184e-006 | 1.2184e-007 | 2.0912e-011 |

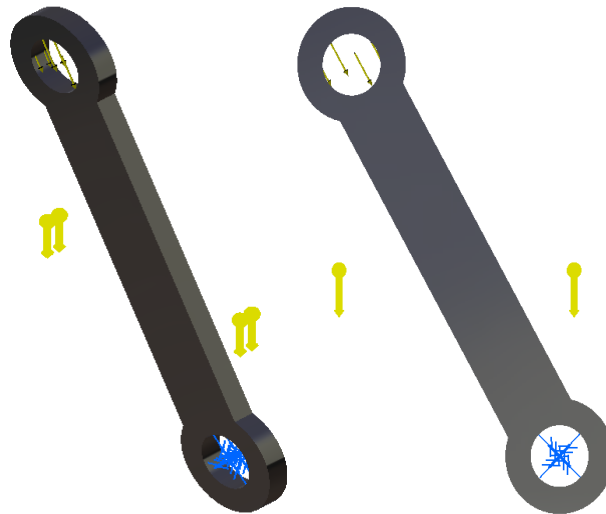
Análisis de tensiones



Análisis de desplazamientos



ESLABÓN 1



STRUCTURE Computation

Number of nodes : 28683
 Number of elements : 17292
 Number of D.O.F. : 86049
 Number of Contact relations : 0
 Number of Kinematic relations : 0

Parabolic tetrahedron : 17292

ELEMENT QUALITY:

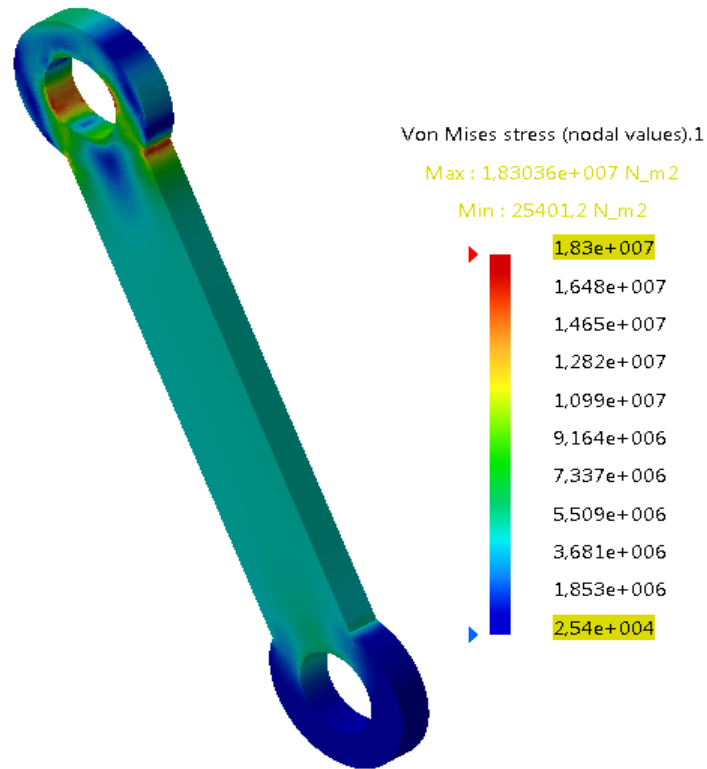
| Criterion | Good | Poor | Bad | Worst | Average |
|--------------|-------------------|-------------|-------------|-------|---------|
| Stretch | 17292 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 0,427 | 0,658 |
| Aspect Ratio | 17292 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 3,156 | 1,837 |

Strain Energy : 1.122e-001 J

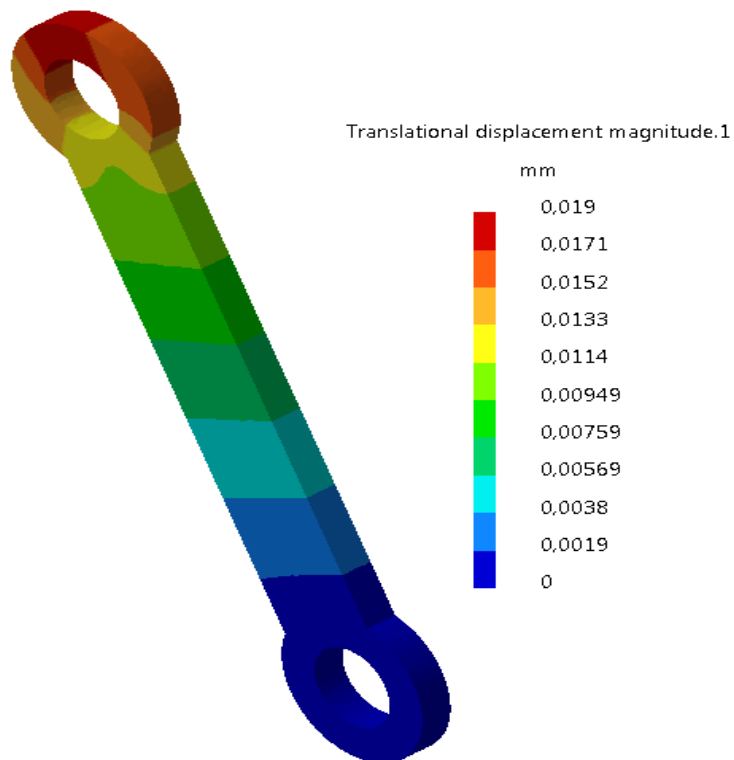
Equilibrium

| Components | Applied Forces | Reactions | Residual | Relative Magnitude Error |
|------------|----------------|--------------|--------------|--------------------------|
| Fx (N) | -4.1269e-008 | 4.1510e-008 | 2.4093e-010 | 1.4181e-012 |
| Fy (N) | 7.2447e+003 | -7.2447e+003 | 6.9667e-010 | 4.1006e-012 |
| Fz (N) | -1.2853e+004 | 1.2853e+004 | 1.0987e-009 | 6.4667e-012 |
| Mx (Nxm) | -9.3208e-001 | 9.3208e-001 | -6.6481e-010 | 6.7228e-012 |
| My (Nxm) | -9.5357e-008 | 9.5451e-008 | 9.4529e-011 | 9.5592e-013 |
| Mz (Nxm) | 8.6205e-009 | -8.5469e-009 | 7.3557e-011 | 7.4384e-013 |

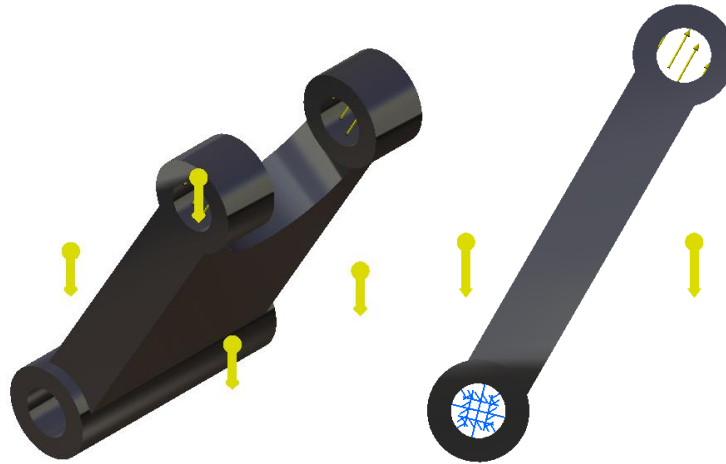
Análisis de tensiones



Análisis de desplazamientos



ESLABÓN 2



STRUCTURE Computation

Number of nodes : 62599
 Number of elements : 39353
 Number of D.O.F. : 187797
 Number of Contact relations : 0
 Number of Kinematic relations : 0

Parabolic tetrahedron : 39353

ELEMENT QUALITY:

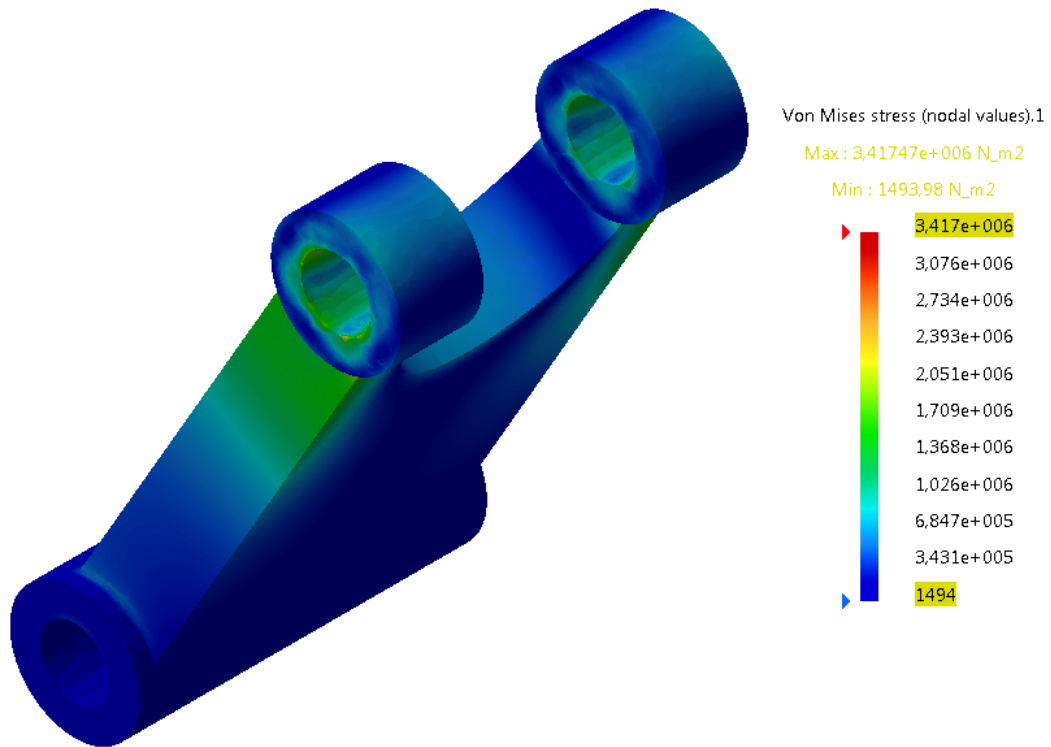
| Criterion | Good | Poor | Bad | Worst | Average |
|--------------|------------------|------------|------------|-------|---------|
| Stretch | 39353 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 0,343 | 0,644 |
| Aspect Ratio | 39353 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 3,991 | 1,827 |

Strain Energy : 9.971e-003 J

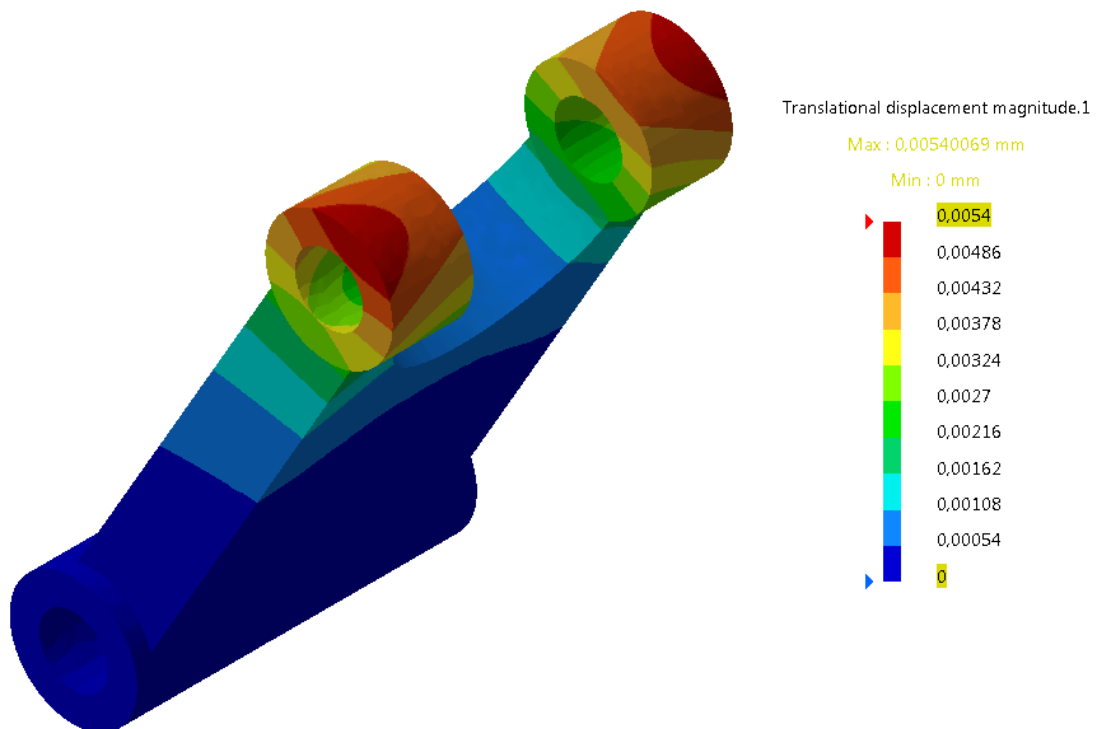
Equilibrium

| Components | Applied Forces | Reactions | Residual | Relative Magnitude Error |
|------------|----------------|--------------|--------------|--------------------------|
| Fx (N) | 4.1955e-009 | -3.8763e-009 | 3.1924e-010 | 1.5933e-011 |
| Fy (N) | 5.3683e+003 | -5.3683e+003 | 1.0368e-010 | 5.1748e-012 |
| Fz (N) | 7.8689e+003 | -7.8689e+003 | 2.6375e-010 | 1.3164e-011 |
| Mx (Nxm) | 1.4917e+003 | -1.4917e+003 | -1.1141e-011 | 1.4795e-012 |
| My (Nxm) | -4.7276e-007 | 4.7283e-007 | 6.1915e-011 | 8.2219e-012 |
| Mz (Nxm) | -3.5752e-007 | 3.5751e-007 | -8.5753e-012 | 1.1387e-012 |

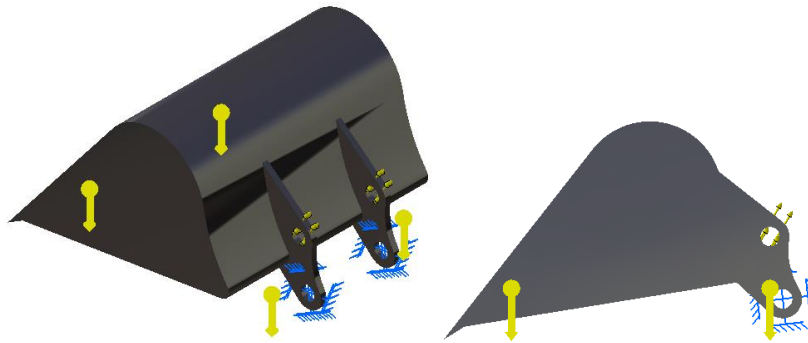
Análisis de tensiones



Análisis de desplazamientos



CUCHARA



STRUCTURE Computation

Number of nodes : 352610
 Number of elements : 202003
 Number of D.O.F. : 1057830
 Number of Contact relations : 0
 Number of Kinematic relations : 0

Parabolic tetrahedron : 202003

ELEMENT QUALITY:

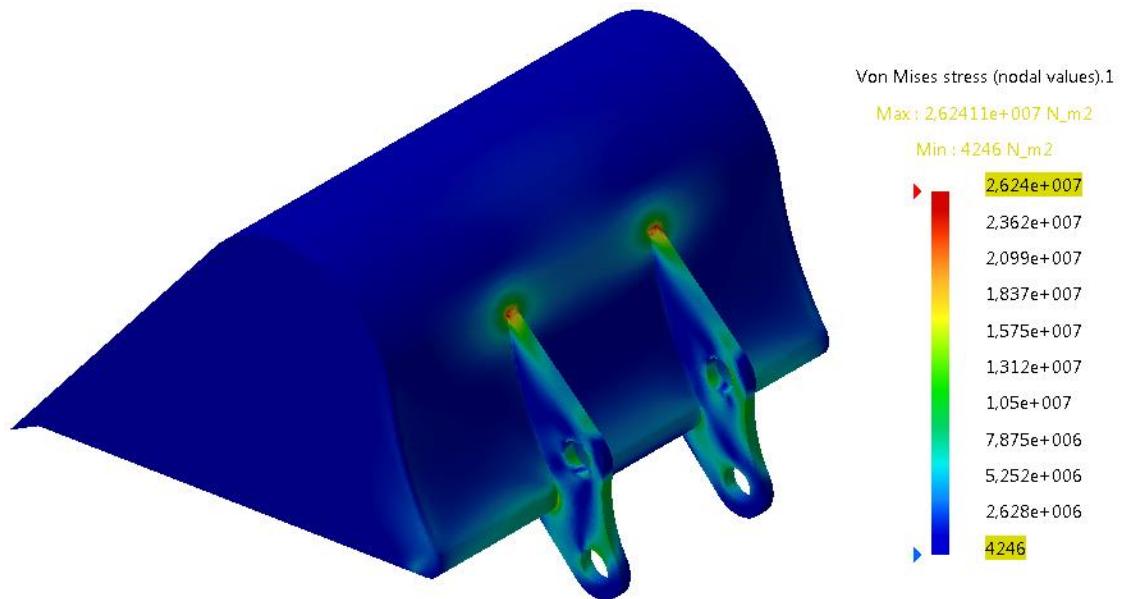
| Criterion | Good | Poor | Bad | Worst | Average |
|--------------|-------------------|------------|------------|-------|---------|
| Stretch | 202003 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 0,309 | 0,633 |
| Aspect Ratio | 202003 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 4,180 | 1,891 |

Strain Energy : 6.500e-001 J

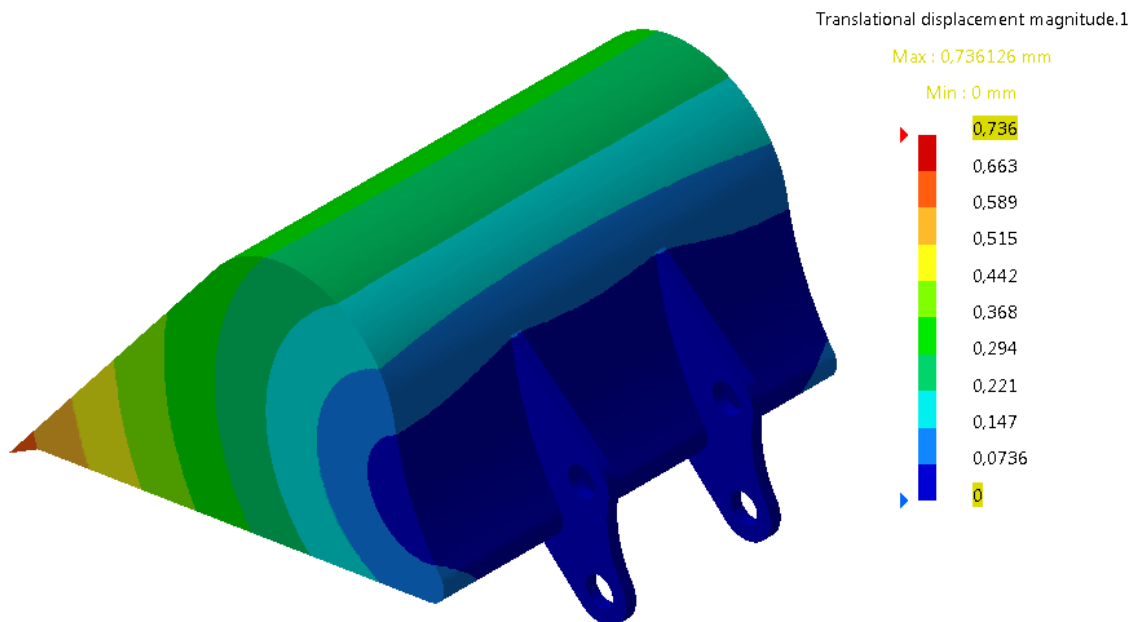
Equilibrium

| Components | Applied Forces | Reactions | Residual | Relative Magnitude Error |
|------------|----------------|--------------|--------------|--------------------------|
| Fx (N) | 8.1270e-010 | -3.0468e-008 | -2.9656e-008 | 6.9881e-011 |
| Fy (N) | 5.3158e+003 | -5.3158e+003 | 2.2184e-007 | 5.2274e-010 |
| Fz (N) | 2.8382e+003 | -2.8382e+003 | -4.2357e-007 | 9.9812e-010 |
| Mx (Nxm) | 1.9559e+003 | -1.9559e+003 | 5.2008e-007 | 8.7280e-010 |
| My (Nxm) | 1.5935e-005 | -1.6106e-005 | -1.7118e-007 | 2.8728e-010 |
| Mz (Nxm) | -3.8348e-007 | 3.2255e-007 | -6.0935e-008 | 1.0226e-010 |

Análisis de tensiones

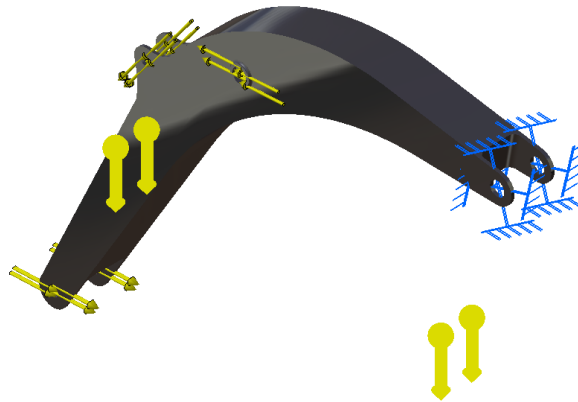


Análisis de desplazamientos



2.4.1.2. Posición de máxima profundidad de excavación

PLUMA



STRUCTURE Computation

Number of nodes : 590084
 Number of elements : 333453
 Number of D.O.F. : 1770252
 Number of Contact relations : 0
 Number of Kinematic relations : 0

Parabolic tetrahedron : 333453

ELEMENT QUALITY:

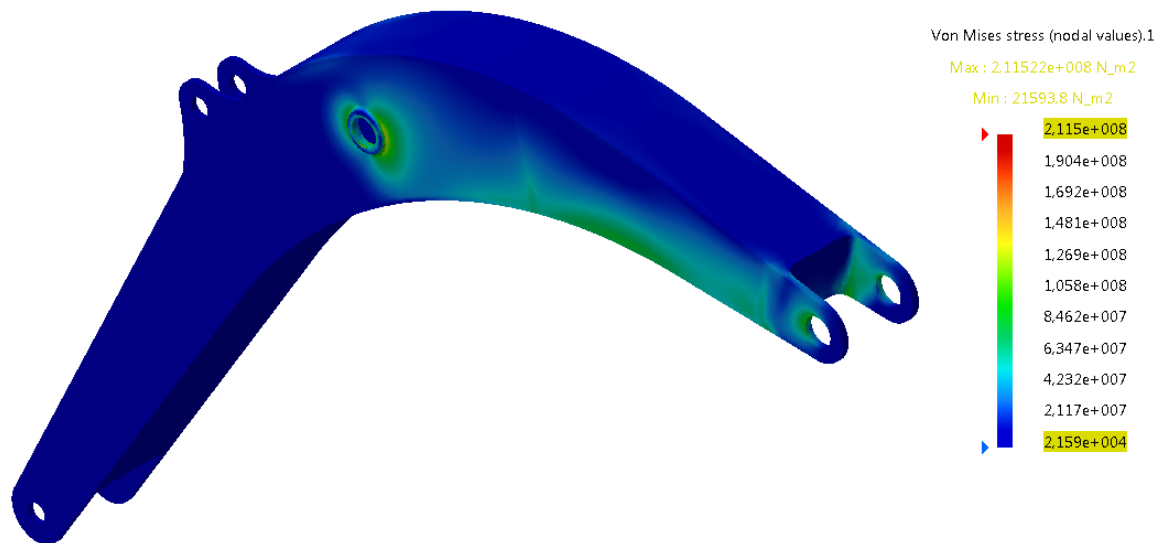
| Criterion | Good | Poor | Bad | Worst | Average |
|--------------|-------------------|------------|------------|-------|---------|
| Stretch | 333453 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 0,315 | 0,594 |
| Aspect Ratio | 333453 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 4,475 | 2,240 |

Strain Energy : 3.374e+002 J

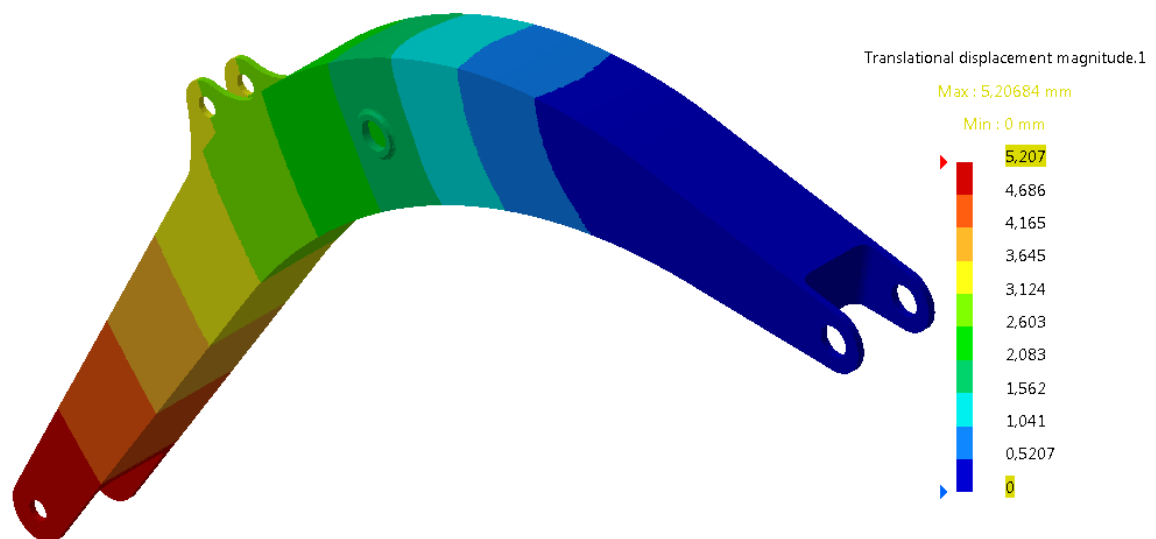
Equilibrium

| Components | Applied Forces | Reactions | Residual | Relative Magnitude Error |
|------------|----------------|--------------|--------------|--------------------------|
| Fx (N) | 1.3554e-006 | -9.1272e-007 | 4.4266e-007 | 6.6258e-011 |
| Fy (N) | -9.6196e+005 | 9.6196e+005 | -3.2223e-006 | 4.8231e-010 |
| Fz (N) | -1.0010e+005 | 1.0010e+005 | 4.1949e-006 | 6.2789e-010 |
| Mx (Nxm) | 1.1829e+006 | -1.1829e+006 | -1.5386e-005 | 4.7280e-010 |
| My (Nxm) | -4.9727e-003 | 4.9717e-003 | -9.6331e-007 | 2.9603e-011 |
| Mz (Nxm) | 1.1104e-004 | -1.0865e-004 | 2.3901e-006 | 7.3448e-011 |

Análisis de tensiones



Análisis de desplazamientos



BRAZO



STRUCTURE Computation

Number of nodes : 268134
 Number of elements : 141424
 Number of D.O.F. : 804402
 Number of Contact relations : 0
 Number of Kinematic relations : 0

Parabolic tetrahedron : 141424

ELEMENT QUALITY:

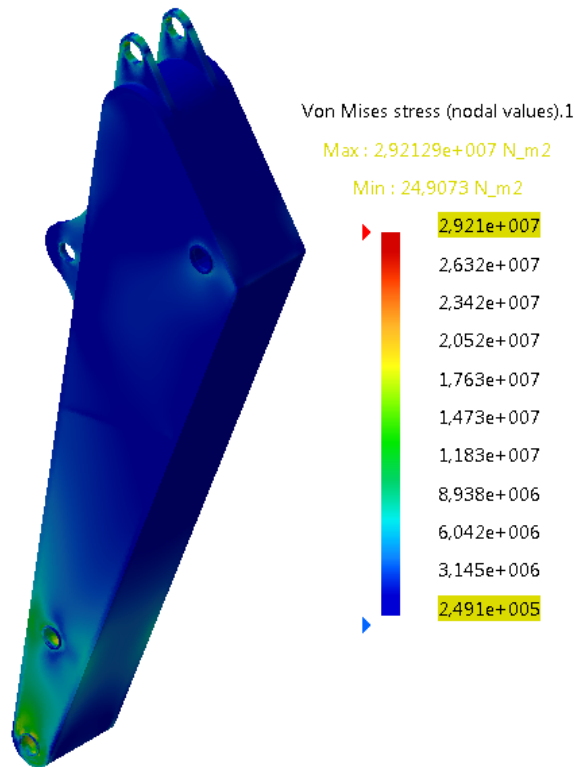
| Criterion | Good | Poor | Bad | Worst | Average |
|--------------|-------------------|------------|------------|-------|---------|
| Stretch | 141424 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 0,333 | 0,593 |
| Aspect Ratio | 141424 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 4,300 | 2,253 |

Strain Energy : 3.751e+000 J

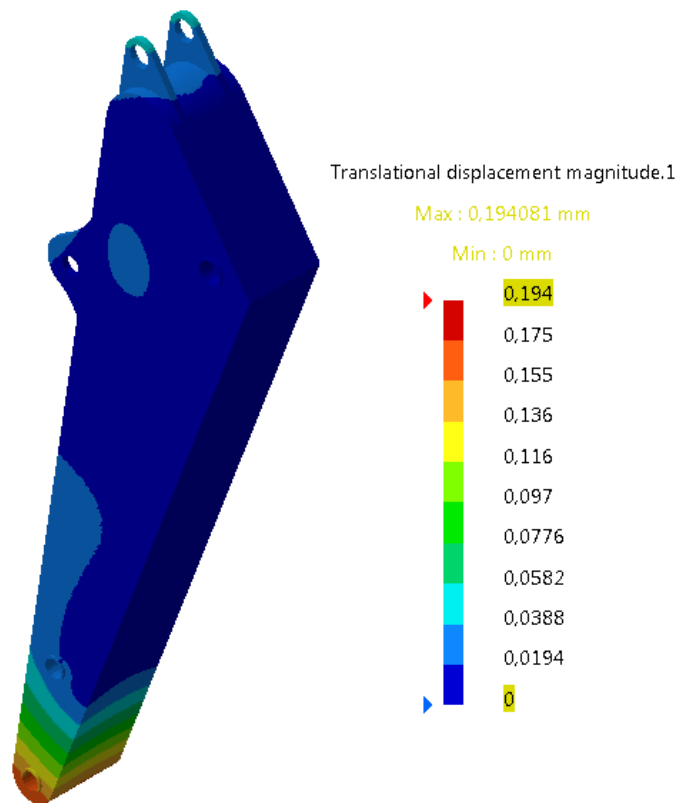
Equilibrium

| Components | Applied Forces | Reactions | Residual | Relative Magnitude Error |
|------------|----------------|--------------|--------------|--------------------------|
| Fx (N) | 4.1691e-009 | -1.5094e-008 | -1.0925e-008 | 3.6812e-011 |
| Fy (N) | 2.2101e+004 | -2.2101e+004 | -4.9848e-008 | 1.6796e-010 |
| Fz (N) | 1.2674e+004 | -1.2674e+004 | 1.9059e-008 | 6.4220e-011 |
| Mx (Nxm) | -6.4231e+004 | 6.4231e+004 | 1.0950e-008 | 9.3762e-012 |
| My (Nxm) | 5.0449e-004 | -5.0451e-004 | -1.9447e-008 | 1.6652e-011 |
| Mz (Nxm) | -3.0346e-006 | 3.0296e-006 | -5.0133e-009 | 4.2926e-012 |

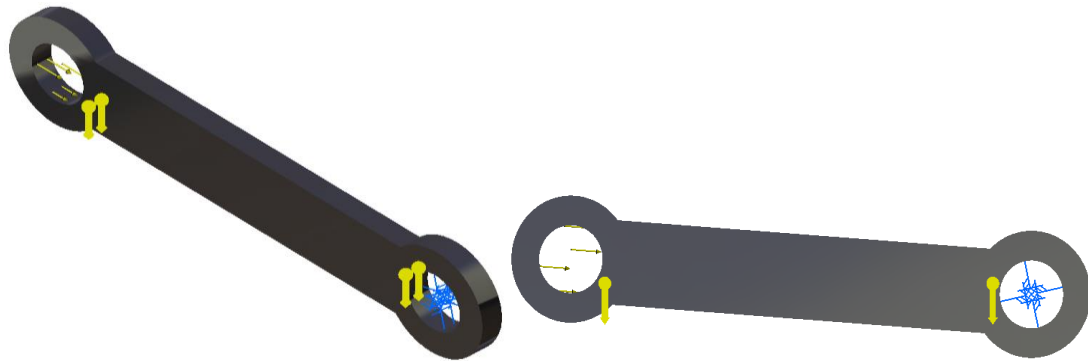
Análisis de tensiones



Análisis de desplazamientos



ESLABÓN 1



STRUCTURE Computation

Number of nodes : 109531
 Number of elements : 68367
 Number of D.O.F. : 328593
 Number of Contact relations : 0
 Number of Kinematic relations : 0

Parabolic tetrahedron : 68367

ELEMENT QUALITY:

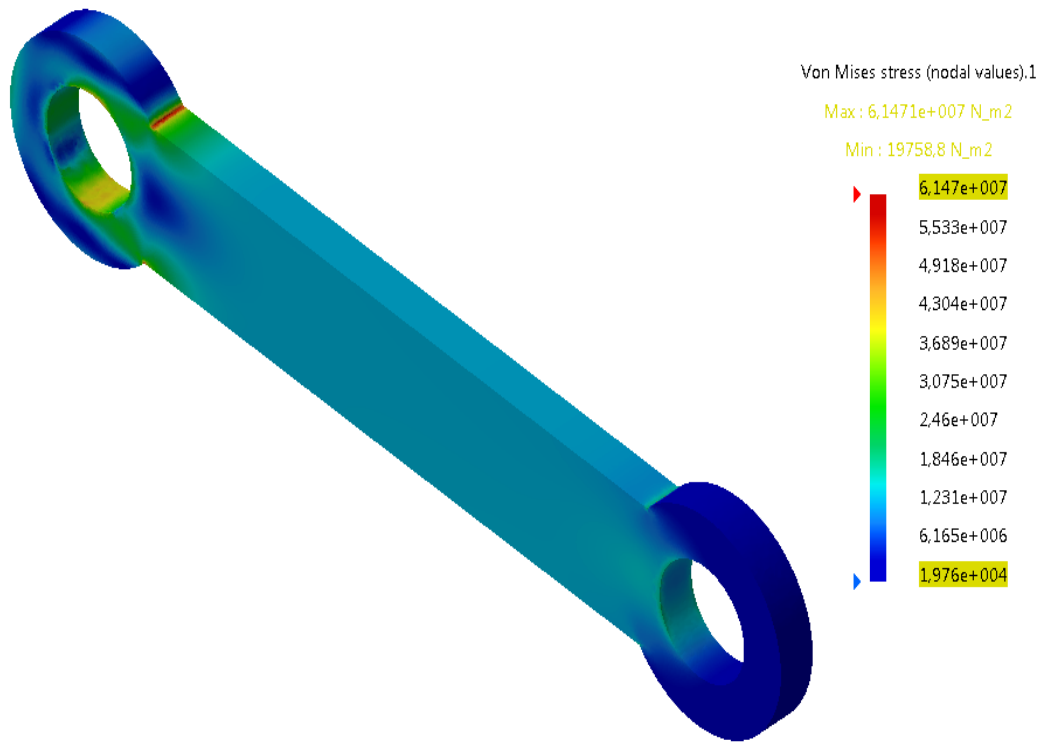
| Criterion | Good | Poor | Bad | Worst | Average |
|--------------|------------------|------------|------------|-------|---------|
| Stretch | 68367 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 0,402 | 0,628 |
| Aspect Ratio | 68367 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 3,727 | 1,869 |

Strain Energy : 8.317e-001 J

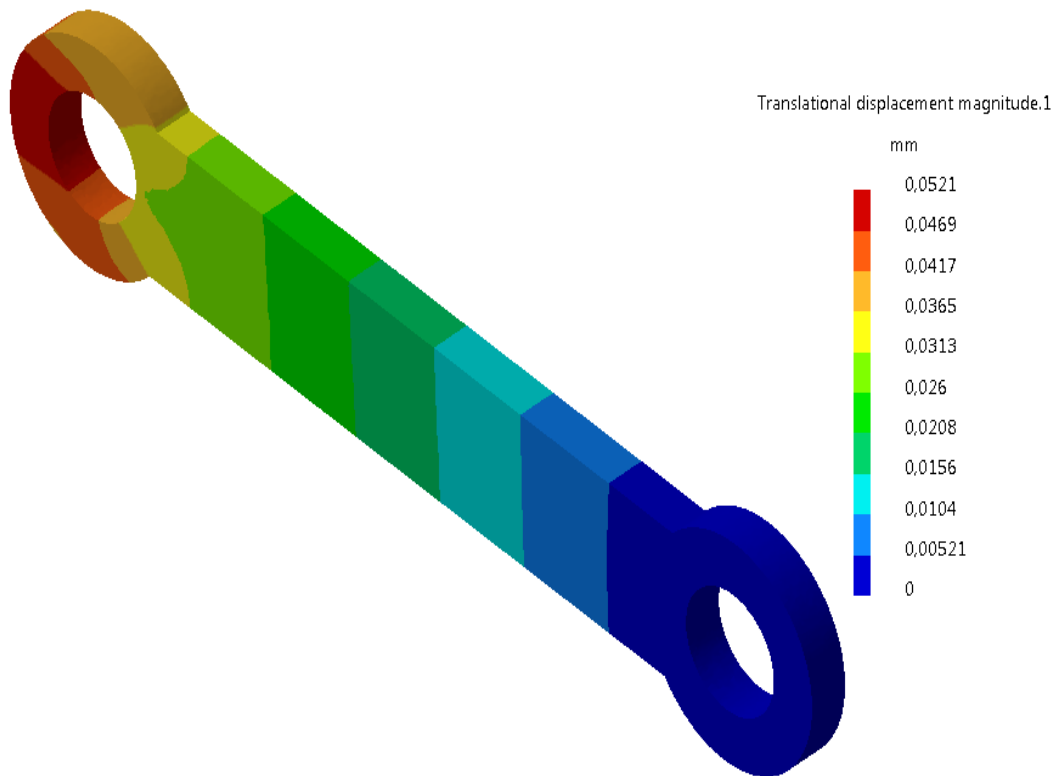
Equilibrium

| Components | Applied Forces | Reactions | Residual | Relative Magnitude Error |
|------------|----------------|--------------|--------------|--------------------------|
| Fx (N) | 5.2883e-008 | -5.3908e-008 | -1.0243e-009 | 5.8923e-012 |
| Fy (N) | 3.9763e+004 | -3.9763e+004 | 9.7862e-009 | 5.6294e-011 |
| Fz (N) | -2.9750e+003 | 2.9750e+003 | -1.8704e-009 | 1.0759e-011 |
| Mx (Nxm) | -4.6925e+001 | 4.6925e+001 | 1.5075e-010 | 1.3211e-012 |
| My (Nxm) | -4.4965e-009 | 4.5674e-009 | 7.0861e-011 | 6.2098e-013 |
| Mz (Nxm) | -2.3755e-007 | 2.3769e-007 | 1.4116e-010 | 1.2371e-012 |

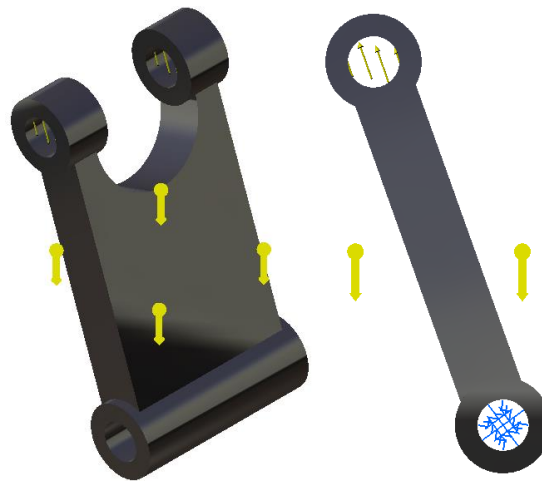
Análisis de tensiones



Análisis de desplazamientos



ESLABÓN 2



STRUCTURE Computation

Number of nodes : 60650
 Number of elements : 38155
 Number of D.O.F. : 181950
 Number of Contact relations : 0
 Number of Kinematic relations : 0

Parabolic tetrahedron : 38155

ELEMENT QUALITY:

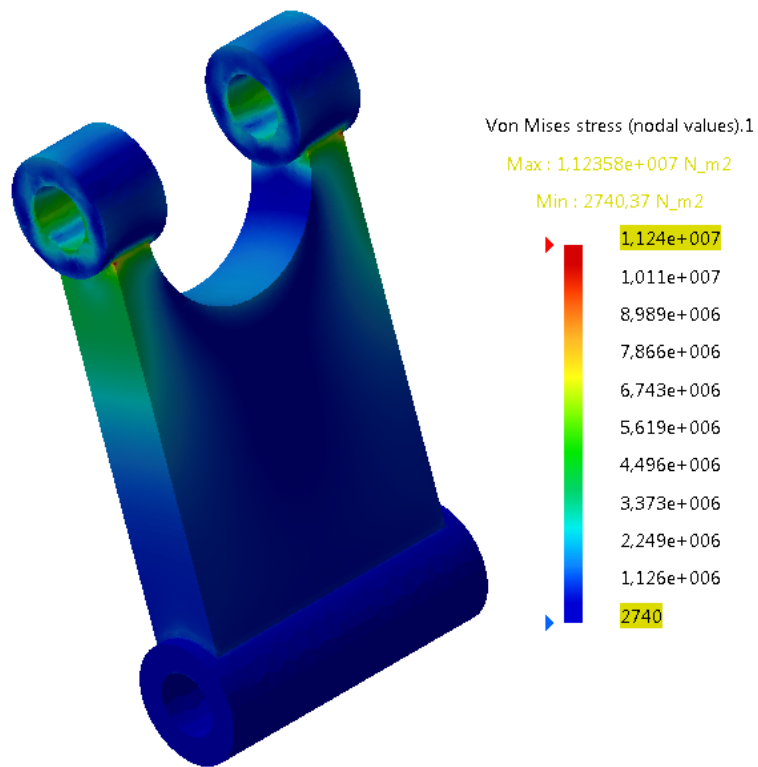
| Criterion | Good | Poor | Bad | Worst | Average |
|--------------|-------------------|-------------|-------------|-------|---------|
| Stretch | 38155 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 0,385 | 0,649 |
| Aspect Ratio | 38155 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 3,803 | 1,826 |

Strain Energy : 8.425e-002 J

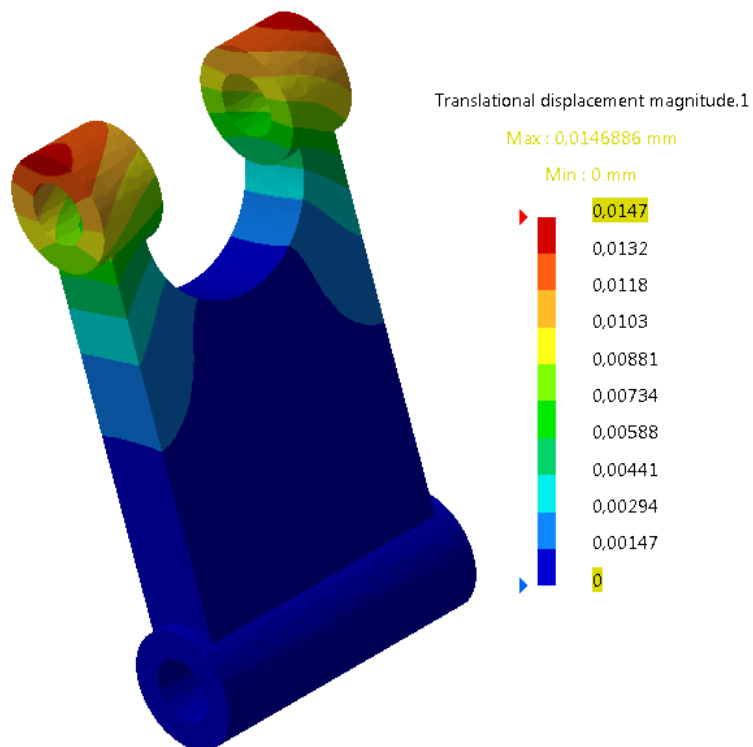
Equilibrium

| Components | Applied Forces | Reactions | Residual | Relative Magnitude Error |
|------------|----------------|--------------|--------------|--------------------------|
| Fx (N) | -9.3714e-009 | 1.0624e-008 | 1.2526e-009 | 1.1645e-011 |
| Fy (N) | -1.0363e+004 | 1.0363e+004 | -2.4193e-010 | 2.2490e-012 |
| Fz (N) | 2.7802e+004 | -2.7802e+004 | 4.0745e-010 | 3.7878e-012 |
| Mx (Nxm) | -3.0534e+003 | 3.0534e+003 | -3.1832e-012 | 7.8913e-014 |
| My (Nxm) | 2.3138e-005 | -2.3138e-005 | 3.9576e-010 | 9.8111e-012 |
| Mz (Nxm) | 1.0665e-006 | -1.0662e-006 | 3.5691e-010 | 8.8479e-012 |

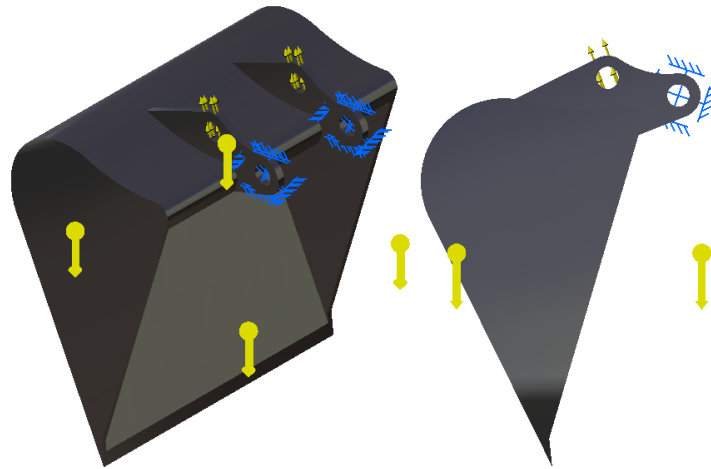
Análisis de tensiones



Análisis de desplazamientos



CUCHARA



STRUCTURE Computation

Number of nodes : 342254
 Number of elements : 197047
 Number of D.O.F. : 1026762
 Number of Contact relations : 0
 Number of Kinematic relations : 0

Parabolic tetrahedron : 197047

ELEMENT QUALITY:

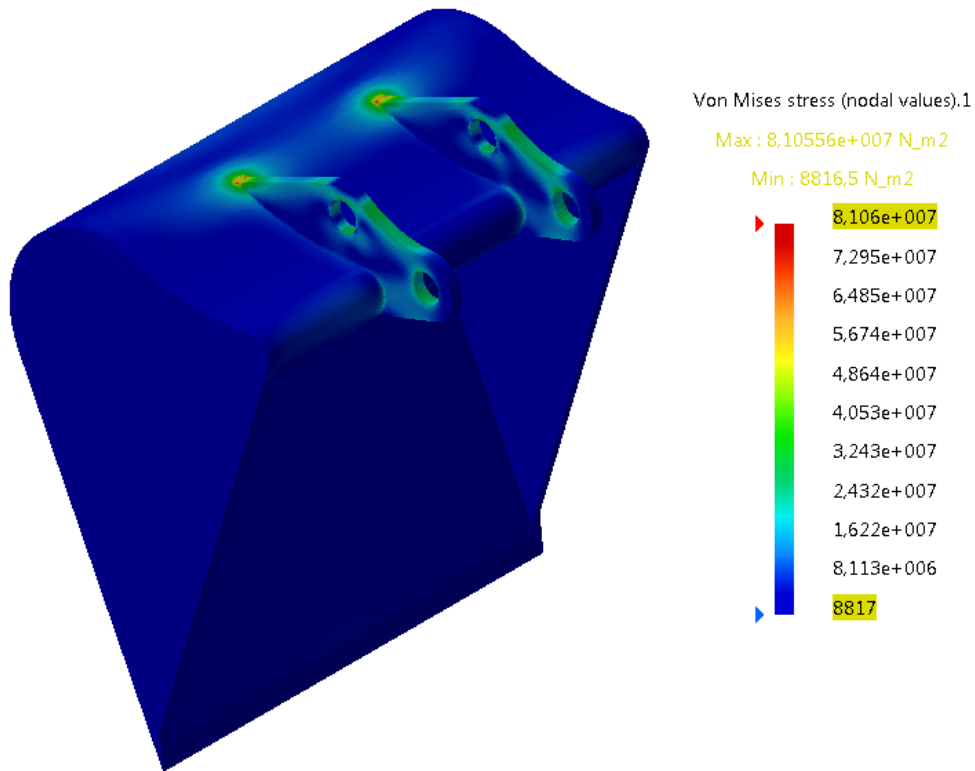
| Criterion | Good | Poor | Bad | Worst | Average |
|--------------|-------------------|------------|------------|-------|---------|
| Stretch | 197047 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 0,311 | 0,635 |
| Aspect Ratio | 197047 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 4,513 | 1,933 |

Strain Energy : 3.927e+000 J

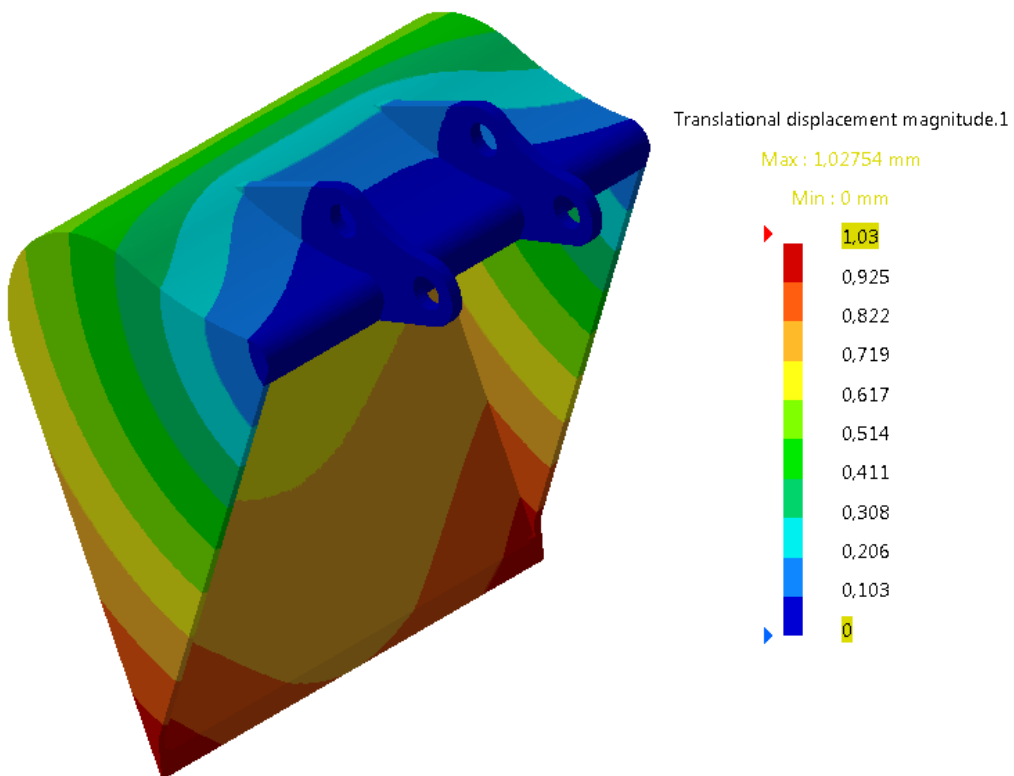
Equilibrium

| Components | Applied Forces | Reactions | Residual | Relative Magnitude Error |
|------------|----------------|--------------|--------------|--------------------------|
| Fx (N) | -8.6175e-010 | 7.0323e-008 | 6.9461e-008 | 5.4235e-011 |
| Fy (N) | -1.0411e+004 | 1.0411e+004 | 1.8561e-008 | 1.4492e-011 |
| Fz (N) | 5.0454e+003 | -5.0454e+003 | 2.8221e-007 | 2.2035e-010 |
| Mx (Nxm) | 6.8496e+003 | -6.8496e+003 | -3.2088e-007 | 1.8707e-010 |
| My (Nxm) | 2.5605e-002 | -2.5605e-002 | -1.7858e-007 | 1.0411e-010 |
| Mz (Nxm) | -8.0077e-007 | 9.4038e-007 | 1.3961e-007 | 8.1390e-011 |

Análisis de tensiones



Análisis de desplazamientos



2.4.1.3. Posición de máxima altura de carga

PLUMA



STRUCTURE Computation

Number of nodes : 590821
 Number of elements : 334134
 Number of D.O.F. : 1772463
 Number of Contact relations : 0
 Number of Kinematic relations : 0

Parabolic tetrahedron : 334134

ELEMENT QUALITY:

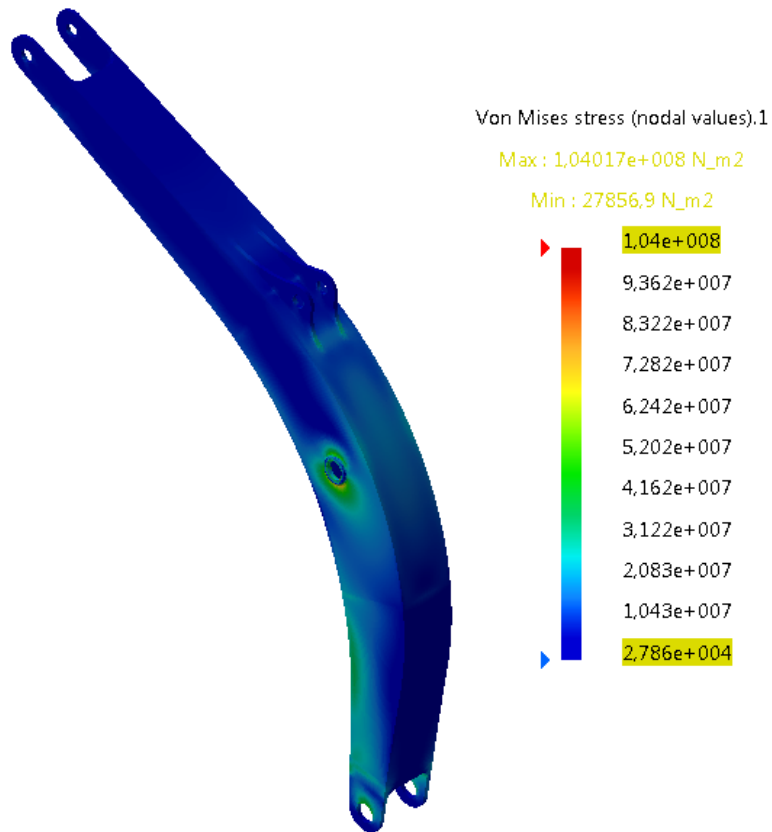
| Criterion | Good | Poor | Bad | Worst | Average |
|--------------|-------------------|------------|------------|-------|---------|
| Stretch | 334134 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 0,316 | 0,595 |
| Aspect Ratio | 334134 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 4,926 | 2,231 |

Strain Energy : 9.919e+001 J

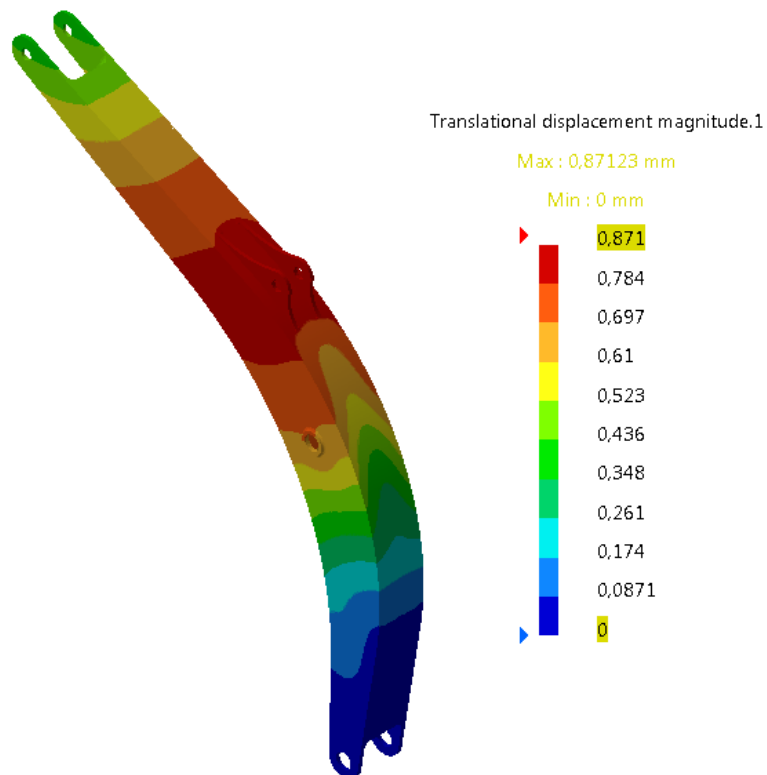
Equilibrium

| Components | Applied Forces | Reactions | Residual | Relative Magnitude Error |
|------------|----------------|--------------|--------------|--------------------------|
| Fx (N) | 8.9713e-009 | 2.2208e-007 | 2.3105e-007 | 5.7026e-011 |
| Fy (N) | -2.0682e+004 | 2.0682e+004 | 2.5902e-007 | 6.3930e-011 |
| Fz (N) | 4.9577e+005 | -4.9577e+005 | 5.9785e-007 | 1.4756e-010 |
| Mx (Nxm) | 3.5058e+004 | -3.5058e+004 | -1.6792e-006 | 6.8269e-011 |
| My (Nxm) | -2.1244e-003 | 2.1255e-003 | 1.1016e-006 | 4.4785e-011 |
| Mz (Nxm) | 1.7237e-005 | -1.6728e-005 | 5.0839e-007 | 2.0669e-011 |

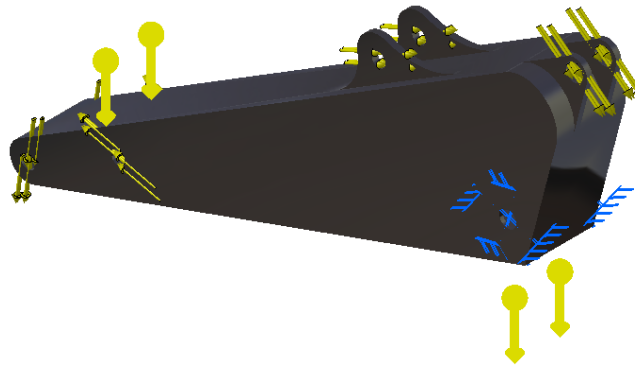
Análisis de tensiones



Análisis de desplazamientos



BRAZO



STRUCTURE Computation

Number of nodes : 276498
 Number of elements : 146013
 Number of D.O.F. : 829494
 Number of Contact relations : 0
 Number of Kinematic relations : 0

Parabolic tetrahedron : 146013

ELEMENT QUALITY:

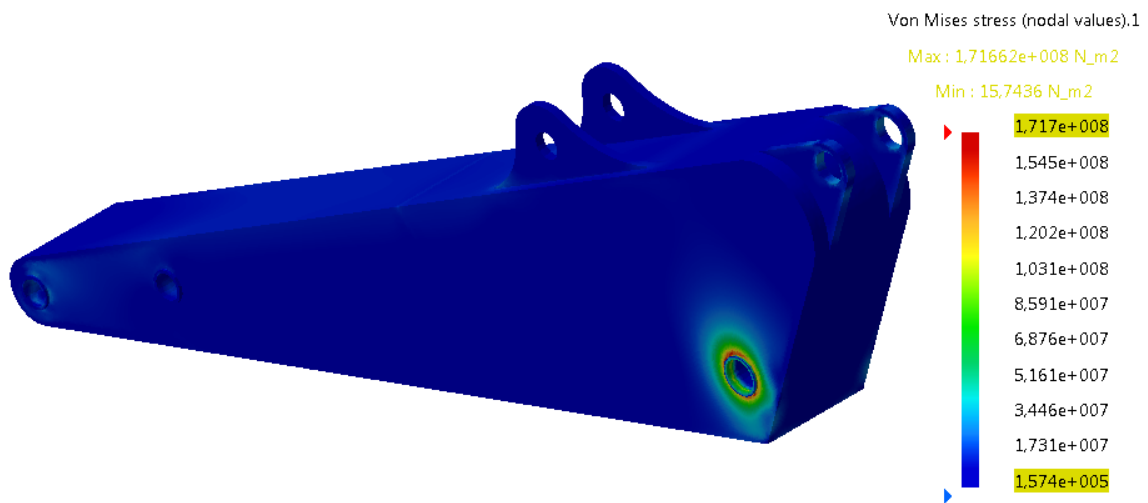
| Criterion | Good | Poor | Bad | Worst | Average |
|--------------|-------------------|------------|------------|-------|---------|
| Stretch | 146013 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 0,332 | 0,588 |
| Aspect Ratio | 146013 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 4,119 | 2,235 |

Strain Energy : 3.463e+001 J

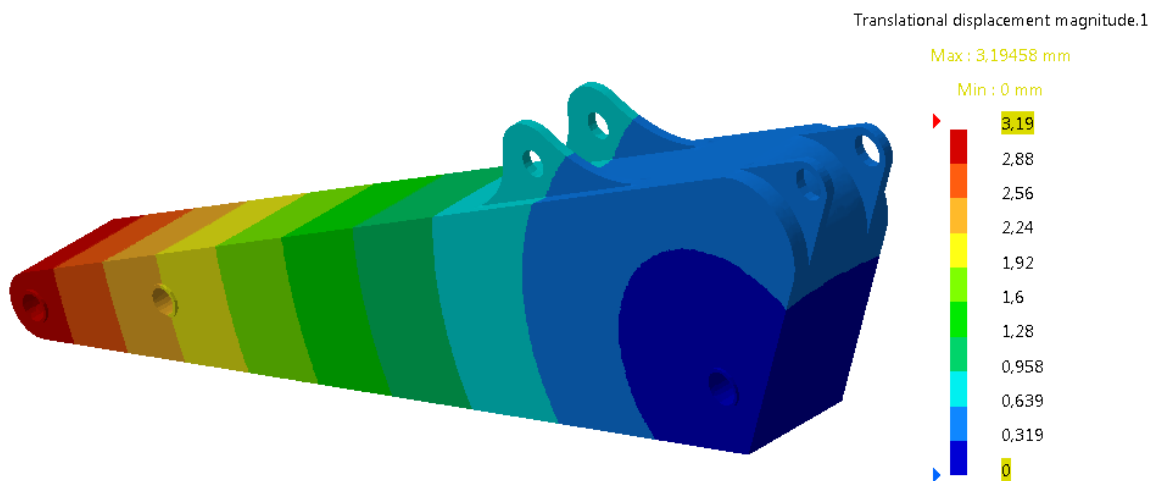
Equilibrium

| Components | Applied Forces | Reactions | Residual | Relative Magnitude Error |
|------------|----------------|--------------|--------------|--------------------------|
| Fx (N) | -2.8523e-007 | 4.2887e-007 | 1.4364e-007 | 1.7792e-011 |
| Fy (N) | 1.6336e+004 | -1.6336e+004 | 1.4027e-006 | 1.7375e-010 |
| Fz (N) | -7.2666e+004 | 7.2666e+004 | 3.9460e-007 | 4.8879e-011 |
| Mx (Nxm) | -3.1008e+004 | 3.1008e+004 | -4.4689e-006 | 1.3816e-010 |
| My (Nxm) | -1.8410e-003 | 1.8417e-003 | 7.1514e-007 | 2.2108e-011 |
| Mz (Nxm) | -4.1628e-006 | 4.4923e-006 | 3.2945e-007 | 1.0185e-011 |

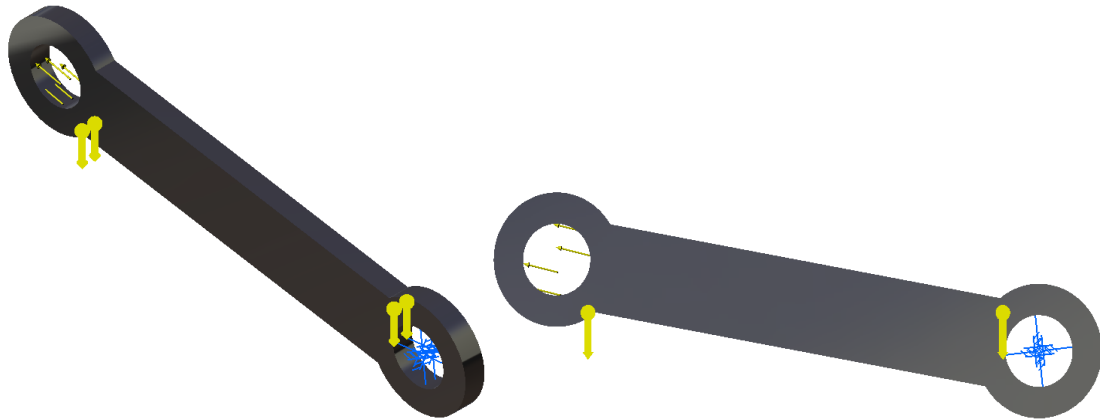
Análisis de tensiones



Análisis de desplazamientos



ESLABÓN 1



STRUCTURE Computation

Number of nodes : 111552
 Number of elements : 69806
 Number of D.O.F. : 334656
 Number of Contact relations : 0
 Number of Kinematic relations : 0

Parabolic tetrahedron : 69806

ELEMENT QUALITY:

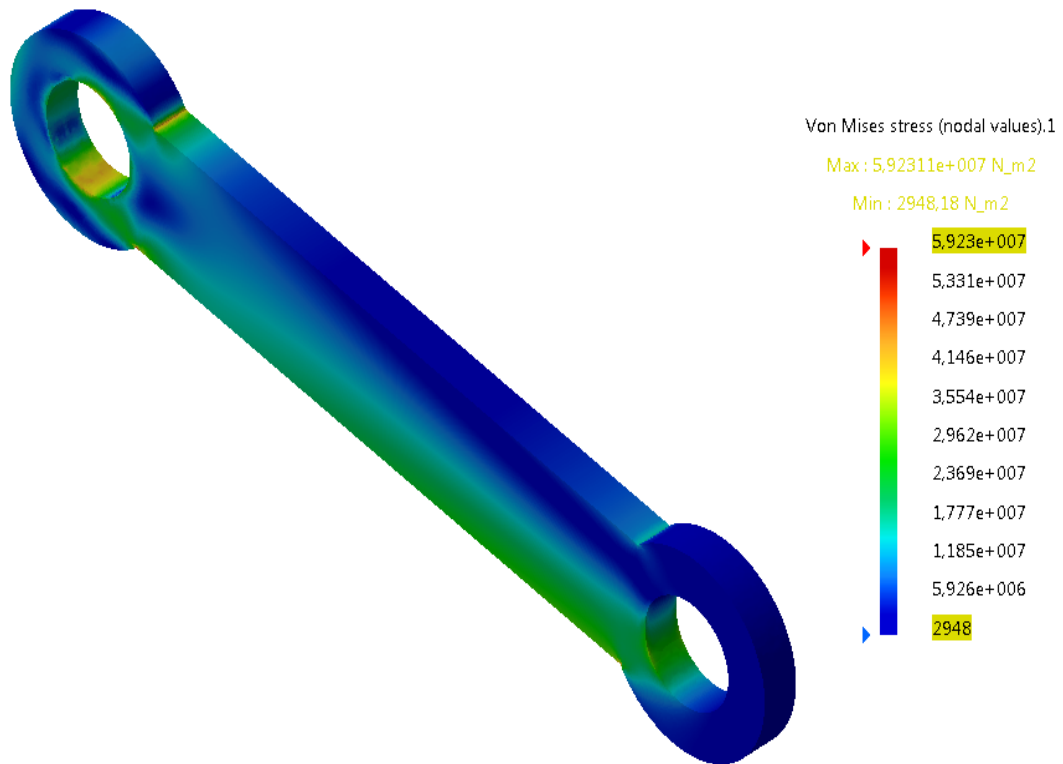
| Criterion | Good | Poor | Bad | Worst | Average |
|--------------|------------------|------------|------------|-------|---------|
| Stretch | 69806 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 0,402 | 0,631 |
| Aspect Ratio | 69806 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 3,523 | 1,860 |

Strain Energy : 8.923e-001 J

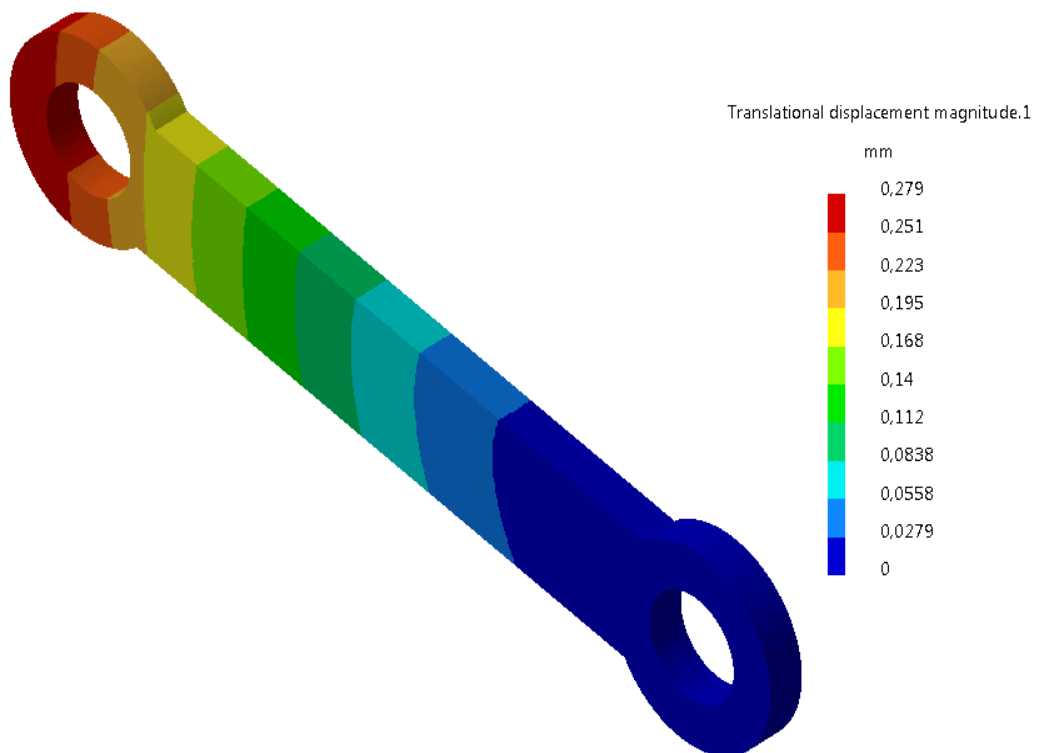
Equilibrium

| Components | Applied Forces | Reactions | Residual | Relative Magnitude Error |
|------------|----------------|--------------|--------------|--------------------------|
| Fx (N) | -4.3219e-009 | 5.2063e-009 | 8.8439e-010 | 3.3049e-012 |
| Fy (N) | -3.4693e+004 | 3.4693e+004 | 7.3487e-009 | 2.7461e-011 |
| Fz (N) | 8.0446e+003 | -8.0446e+003 | 4.4010e-009 | 1.6446e-011 |
| Mx (Nxm) | -4.6320e+001 | 4.6320e+001 | 7.1290e-009 | 4.1053e-011 |
| My (Nxm) | -1.0856e-007 | 1.0789e-007 | -6.6380e-010 | 3.8226e-012 |
| Mz (Nxm) | 1.6999e-007 | -1.6982e-007 | 1.6811e-010 | 9.6810e-013 |

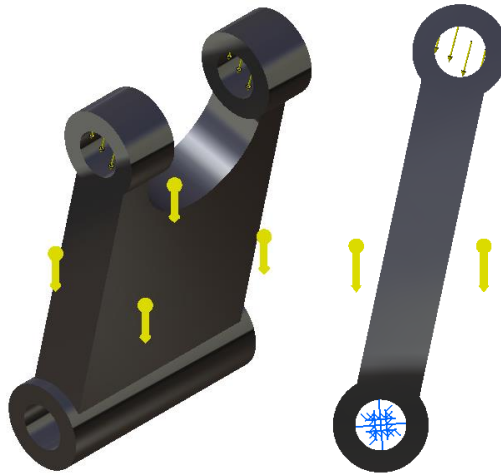
Análisis de tensiones



Análisis de desplazamientos



ESLABÓN 2



STRUCTURE Computation

Number of nodes : 61765
 Number of elements : 38752
 Number of D.O.F. : 185295
 Number of Contact relations : 0
 Number of Kinematic relations : 0

Parabolic tetrahedron : 38752

ELEMENT QUALITY:

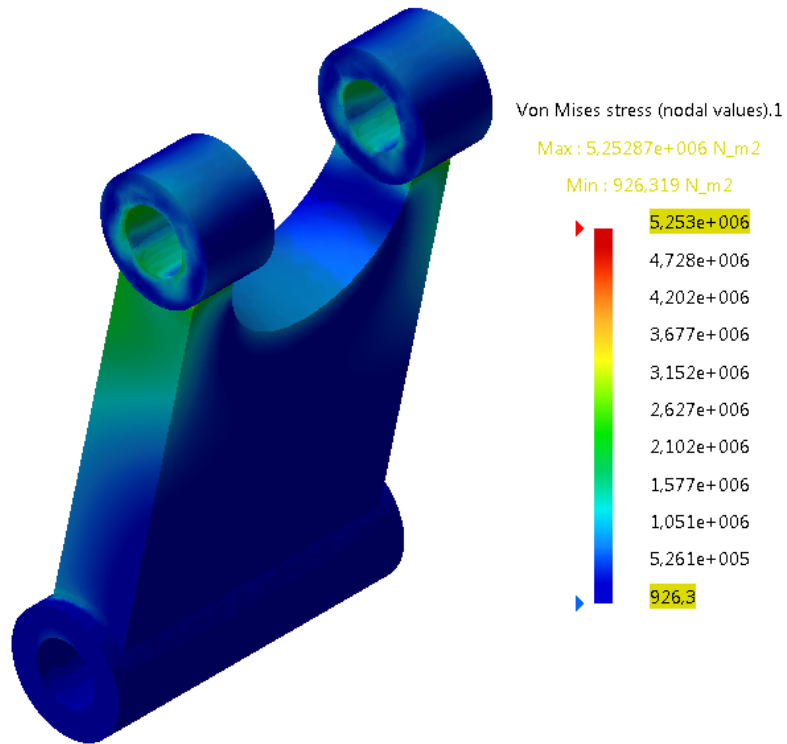
| Criterion | Good | Poor | Bad | Worst | Average |
|--------------|------------------|------------|------------|-------|---------|
| Stretch | 38752 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 0,389 | 0,649 |
| Aspect Ratio | 38752 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 4,255 | 1,826 |

Strain Energy : 1.974e-002 J

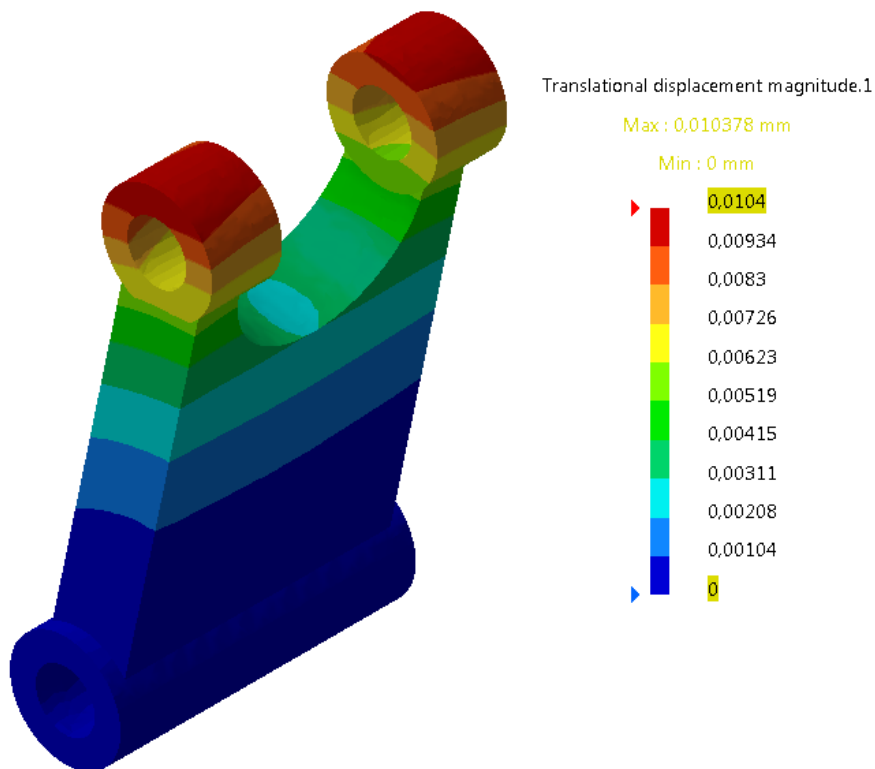
Equilibrium

| Components | Applied Forces | Reactions | Residual | Relative Magnitude Error |
|------------|----------------|-------------|--------------|--------------------------|
| Fx (N) | -2.7496e-008 | 2.8965e-008 | 1.4695e-009 | 3.2248e-011 |
| Fy (N) | -3.5562e+003 | 3.5562e+003 | -2.2660e-009 | 4.9728e-011 |
| Fz (N) | -1.5267e+004 | 1.5267e+004 | -2.5648e-010 | 5.6285e-012 |
| Mx (Nxm) | -7.4857e+002 | 7.4857e+002 | 3.0434e-010 | 1.7811e-011 |
| My (Nxm) | -2.2007e-005 | 2.2007e-005 | 4.6404e-010 | 2.7157e-011 |
| Mz (Nxm) | -1.6027e-007 | 1.6045e-007 | 1.7519e-010 | 1.0253e-011 |

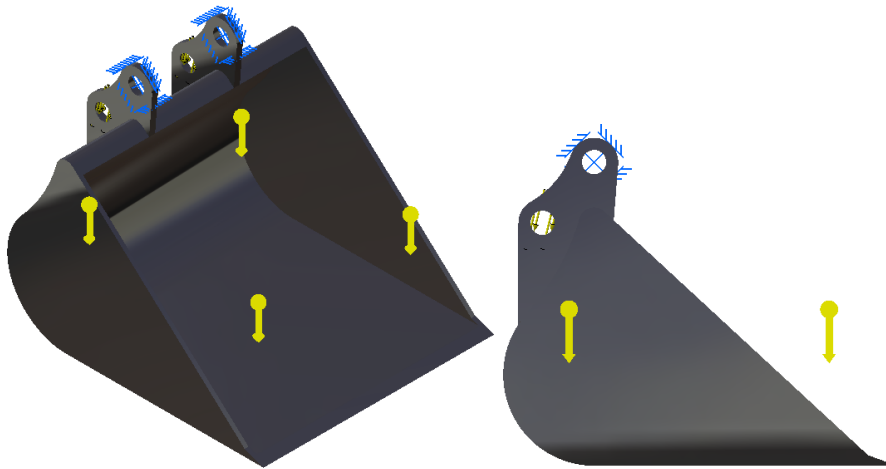
Análisis de tensiones



Análisis de desplazamientos



CUCHARA



STRUCTURE Computation

Number of nodes : 335331
 Number of elements : 192440
 Number of D.O.F. : 1005993
 Number of Contact relations : 0
 Number of Kinematic relations : 0

Parabolic tetrahedron : 192440

ELEMENT QUALITY:

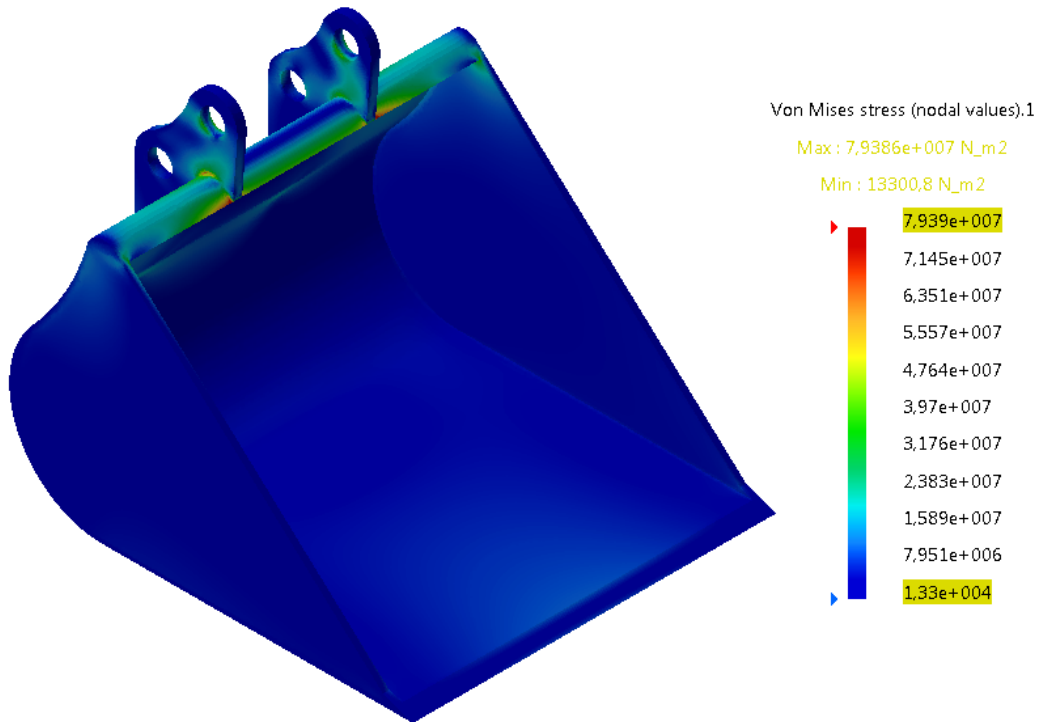
| Criterion | Good | Poor | Bad | Worst | Average |
|--------------|-------------------|------------|------------|-------|---------|
| Stretch | 192440 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 0,302 | 0,641 |
| Aspect Ratio | 192440 (100,00%) | 0 (0,00%) | 0 (0,00%) | 4,811 | 1,918 |

Strain Energy : 5.627e+000 J

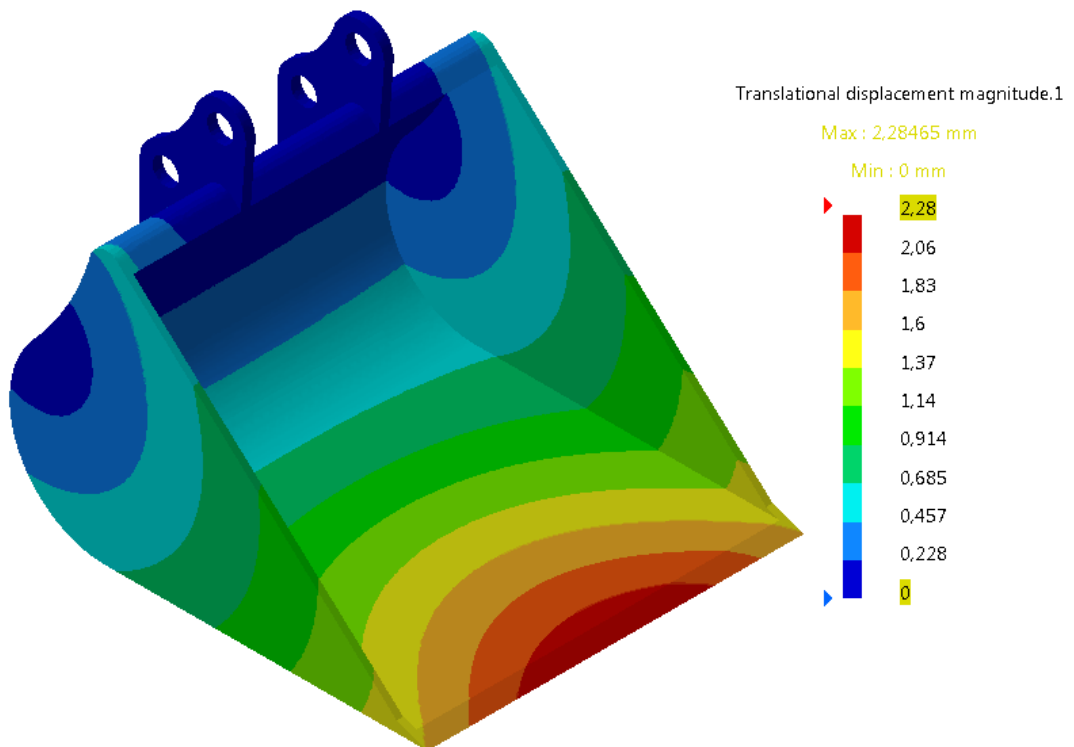
Equilibrium

| Components | Applied Forces | Reactions | Residual | Relative Magnitude Error |
|------------|----------------|--------------|--------------|--------------------------|
| Fx (N) | 3.6816e-009 | -3.1013e-007 | -3.0645e-007 | 2.5147e-010 |
| Fy (N) | -3.5686e+003 | 3.5686e+003 | 1.4269e-007 | 1.1709e-010 |
| Fz (N) | -3.8007e+004 | 3.8007e+004 | -1.4350e-006 | 1.1775e-009 |
| Mx (Nxm) | -1.4675e+003 | 1.4675e+003 | -6.6720e-007 | 5.4749e-010 |
| My (Nxm) | 2.1873e-005 | -2.1858e-005 | 1.5481e-008 | 1.2704e-011 |
| Mz (Nxm) | -3.1149e-007 | 3.9322e-007 | 8.1726e-008 | 6.7063e-011 |

Análisis de tensiones



Análisis de desplazamientos



2.5. Propiedades de los materiales empleados

2.5.1. Elementos principales

Para la fabricación de los elementos principales (pluma, brazo, eslabón 1, eslabón 2 y cuchara) se empleará acero estructural S235 JR. Equivalente al acero no aleado al carbono F1110.

| EUROPA EN 10083 | ESPAÑA UNE 36011-12 | ALEMANIA DIN 17200 | ALEMANIA STAND N° | FRANCIA NF A35-552-86 | ITALIA UNI 7846 | USA AISI/SAE |
|--------------------|---------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------|
| | F1110 | CK15 | 1.0401 | XC15 | C15 | SAE 1015 |

COMPOSICIÓN QUÍMICA

| Tipo | P (% máx) | S (% máx) |
|---------|-----------|-----------|
| S235 JR | 0,045 | 0,045 |

| C | Si | Mn | P | S |
|-----------|-------|-----------|--------|--------|
| 0.12/0.18 | <0.40 | 0.30/0.60 | <0.045 | <0.045 |

En la siguiente tabla se indican los valores del límite elástico (f_y) mínimo y la resistencia última a tracción (f_u) del acero empleado.

| Tipo | Espesor nominal t (mm) | | | |
|-------|------------------------|-------------------|-------------|-------------------|
| | t ≤ 40 | | 40 < t ≤ 80 | |
| | f_y | f_u | f_y | f_u |
| S 235 | 235 | 360 < f_u < 510 | 215 | 360 < f_u < 510 |

2.5.2. Bulones

Para la fabricación de los bulones se empleará acero C45E sometido a un tratamiento térmico de normalizado.

| Designación | | Otras designaciones | | | | | | | | | |
|-----------------------|----------|---------------------|--------|--------------------|--|------------------|--------|-----------------------|-----------------|----------------|---------------|
| Según EN 10083-1:1997 | | Alemania DIN 17200 | | Reino Unido BS 970 | | España UNE 36011 | | Francia NF A35-552-86 | Italia UNI 7846 | ISO 683-1:1987 | AISI SAE ASTM |
| Simbólica | Numérica | Designación | Número | | | Designación | Número | | | | |
| C45E | 1.1191 | CK 45 | 1.1191 | (080M46) | | C45K | F1140 | XC 45 | C45 | (C 45 E 4) | 1042 |

CONDICIONES DE TRATAMIENTO TÉRMICO

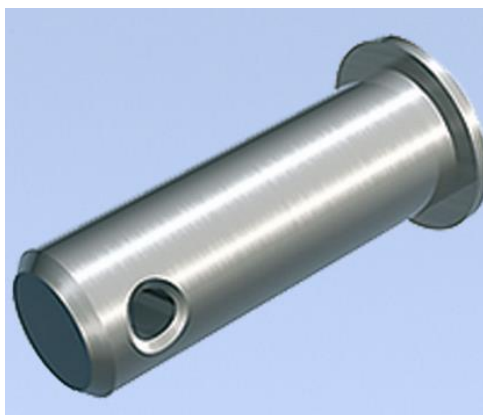
| Forja o laminación en caliente | Normalizado | Recocido | Temple | Medio de temple | Revenido | Ensayo de templabilidad Jominy |
|--------------------------------|-------------|----------|---------|-----------------|----------|--------------------------------|
| Temperatura (°C) | | | | | | |
| 850-1.250 | 840-870 | 680 | 840-860 | Agua o aceite | 550-660 | 850±5 |

COMPOSICIÓN QUÍMICA

| Análisis sobre colada (%) | | | | | | | | |
|---------------------------|--------------------|-----------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|
| C | Si _{máx.} | Mn | P _{máx.} | S _{máx.} | Cr _{máx.} | Mo _{máx.} | Ni _{máx.} | Cr+Mo+Ni _{máx.} |
| 0,42-0,50 | 0,40 | 0,50-0,80 | 0,035 | 0,035 | 0,40 | 0,10 | 0,40 | 0,63 |

En la siguiente tabla se indican los valores del límite elástico (f_y) mínimo y la resistencia última a tracción (f_u) del acero empleado.

| Ensayo de tracción | | | | |
|--|-------------------------|--|---------------------------|--|
| Estado de normalizado (+N) | | | | |
| Diámetros nominales (mm) | Límite elástico | | Resistencia a la tracción | |
| | R _{p0,2} (MPa) | | R _m (MPa) | |
| Alargamiento | | | | |
| A (%) L ₀ =5d Diámetro nominal (mm) | | | | |
| d ≤ 16 | ≥ 340 | | 620 | |
| 16 < d ≤ 100 | ≥ 305 | | 580 | |
| 100 < d ≤ 250 | ≥ 275 | | 560 | |
| | | | ≥ 14 | |
| | | | ≥ 16 | |
| | | | ≥ 16 | |



2.5.3. Casquillos autolubricados

Fabricados partiendo de bandas de bronce laminado con una composición del 92% de cobre (Cu) más un 8% de estaño (Sn), cortadas según el desarrollo de la pieza y dobladas para conseguir su forma.

En su parte interior representan unos alveolos de forma rómbica en la que se acumulará la grasa que se debe aplicar durante el montaje. La selección de la grasa a utilizar dependerá de las condiciones de uso, siendo la grasa para rodamiento común la más utilizada.

Se trata de un material con una relación dureza/coeficiente de fricción elevada, elevado coeficiente de conductividad térmica que permite la transmisión de calor generado por el rozamiento y una más efectiva resistencia a la corrosión.

NORMA: ISO 3547 / DIN 1494

Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas del casquillo se resumen en la siguiente tabla:

| | |
|------------------------------------|-----------------------------|
| Densidad | 8,8 gr / cm ³ |
| Carga máx. (estática) | 470 N / mm ² |
| Coef. conductividad térmica | 58 W / m · K |
| Coef. dilatación térmica | 18,5 · 10 ⁻⁶ / K |
| PV Máximo | 2,8 N/mm ² · m/s |
| Coeficiente de fricción | 0,08 - 0,25 |
| Elongación | 40 % |

Resistencia a la corrosión

La resistencia a la corrosión de los casquillos de la serie SB es elevada debido al material base que lo componen. Se trata por tanto, de un casquillo apto para ambientes sucios y agresivos.

La presencia de agua no le afecta, aunque debido a la necesidad de lubricante añadido no es apto para trabajos sumergidos.

Tan sólo se verá corroído por aquellas substancias que por naturaleza atacan al bronce o las que pudieran ocasionar un deterioro de la grasa lubricante.

Temperaturas

Los límites de temperaturas vendrán fuertemente influenciados por la selección de los lubricantes utilizados. En principio, se proponen unos límites de funcionamiento constante que van desde los -20°C a los 100°C.

Se pueden modificar los valores de los extremos del intervalo de aplicación mediante el empleo de aceites y grasas de altas sollicitaciones.

Aplicaciones

Se puede considerar a este casquillo como uno de los más apropiados para las siguientes aplicaciones:

- Cargas elevadas.
- Movimientos rotatorios, oscilatorios y lineales.
- Ambientes externos corrosivos.
- Ambientes sucios.
- Resistencia a impactos producidos en el eje.

Por lo que son ideales para las siguientes aplicaciones:

- Remolques, tractores.
- Maquinaria de movimiento de tierras en general.
- Cilindros hidráulicos.
- Industria maderera.
- Industria cerámica.










2.5.4. Elementos de unión

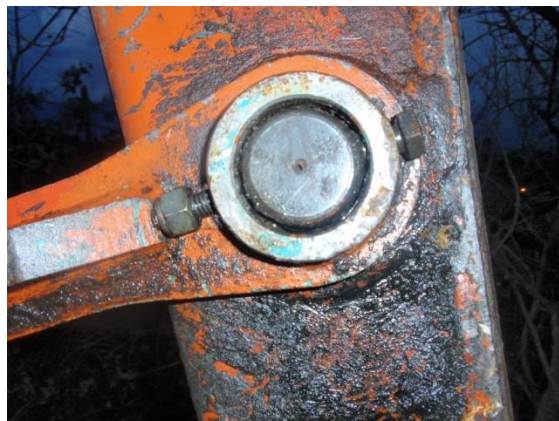
Para realizar las uniones se han empleado los siguientes elementos:

- Tornillo cabeza hexagonal, rosca parcial (DIN 931)
- Tuerca autoblocante con inserción no metálica (DIN 985)

Ambos elementos son de acero de calidad 10.9 cuyas características son mostradas en las siguientes tablas:

| Número de Clase | Rango del diámetro [mm] | Resistencia de prueba mínima [MPa] | Resistencia elástica mínima [MPa] | Resistencia a la tracción mínima [MPa] | Material | Marcado de la cabeza |
|-----------------|-------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--|---|---|
| 4.6 | M5-M36 | 225 | 240 | 400 | Acero de mediano o bajo carbono |  |
| 4.8 | M1.6-M16 | 310 | 340 | 420 | Acero de mediano o bajo carbono |  |
| 5.8 | M5-M24 | 380 | 420 | 520 | Acero de mediano o bajo carbono |  |
| 8.8 | M16-M36 | 600 | 660 | 830 | Acero de mediano o bajo carbono, templado y revenido |  |
| 9.8 | M1.6-M16 | 650 | 720 | 900 | Acero de mediano o bajo carbono, templado y revenido |  |
| 10.9 | M5-M36 | 830 | 940 | 1040 | Acero martensítico de bajo carbono, templado y revenido |  |
| 12.9 | M1.6-M36 | 970 | 1100 | 1220 | Acero de aleación, templado y revenido |  |

| Clase de resistencia | Material y tratamiento térmico | Composición química (porcentaje en %) | | | | Temperatura de revenido |
|----------------------|--|---------------------------------------|--------|--------|--------|-------------------------|
| | | C mín. | C max. | P max. | S max. | °C mín. |
| 10,9 | Acero al carbono templado y revenido | 0,25 | 0,55 | 0,035 | 0,035 | 425 |
| | Acero al carbono con adiciones (p.e. Boro, o Mn o Cr), templado y revenido | 0,20 3* | 0,55 | 0,035 | 0,035 | |

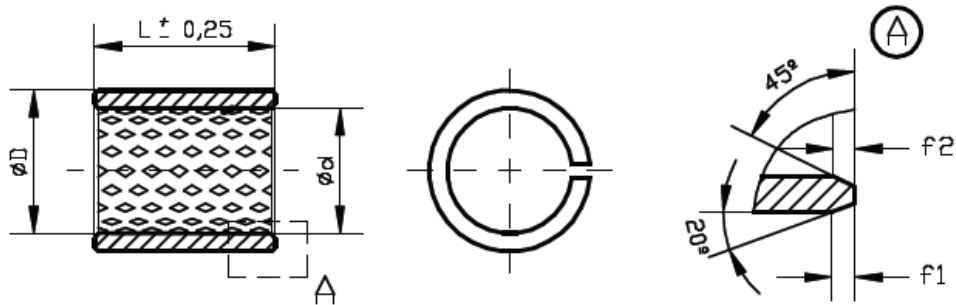


2.6. Dimensiones de los elementos normalizados utilizados

2.6.1. Casquillos autolubricados serie SB (fabricante Sanmetal S.A)

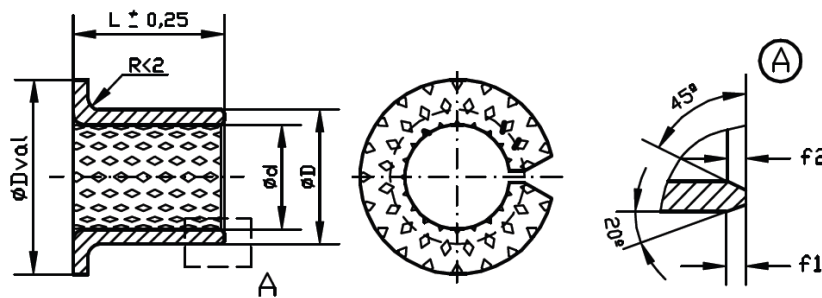


➤ Sin valona (SBA)



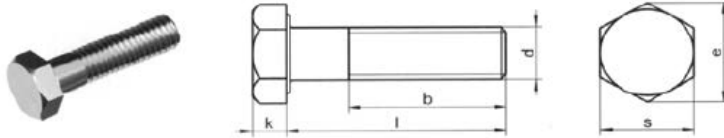
| Cod. | Diámetros | | f1 | f2 | Ød montado | | ØD | | Longitudes (L) |
|------|-----------|-----|-----|-----|------------|--------|--------|--------|----------------|
| | Ød | ØD | | | Min | Max | Min | Max | |
| SBA | 80 | 85 | 1,8 | 0,6 | +0,000 | +0,074 | +0,055 | +0,100 | 100 |
| SBA | 100 | 105 | 1,8 | 0,6 | +0,000 | +0,087 | +0,070 | +0,120 | 100 |

➤ Con valona (SBB)



| Cod. | Diámetros | | | Espesor de valona | f1 | f2 | Ød montado | | ØD | | Longitudes (L) |
|------|-----------|-----|-------|-------------------|-----|-----|------------|--------|--------|--------|----------------|
| | Ød | ØD | ØDval | | | | Min | Max | Min | Max | |
| SBB | 80 | 85 | 100 | 2,5 | 1,2 | 0,4 | +0,000 | +0,074 | +0,070 | +0,120 | 40 |
| SBB | 100 | 105 | 120 | 2,5 | 1,2 | 0,4 | +0,000 | +0,087 | +0,070 | +0,120 | 50 |
| SBB | 150 | 155 | 180 | 2,5 | 1,2 | 0,4 | +0,000 | +0,100 | +0,100 | +0,170 | 60 90 |

2.6.3. Tornillo cabeza hexagonal, rosca parcial DIN 931 (fabricante Andalinox S.L)



INOX A-2 • INOX A-4 • ACERO • 8.8 10.9 12.9 Medidas en mm

| | 16 | 18 | 22 | 26 | 30 | 34 | 38 | 42 | 46 | 50 | 54 | 60 | 66 | 72 | 78 |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| b<125 | 16 | 18 | 22 | 26 | 30 | 34 | 38 | 42 | 46 | 50 | 54 | 60 | 66 | 72 | 78 |
| b>125 | 22 | 24 | 28 | 32 | 36 | 40 | 44 | 48 | 52 | 56 | 60 | 66 | 72 | 78 | 84 |
| S | 8 | 10 | 13 | 17 | 19 | 22 | 24 | 27 | 30 | 32 | 36 | 41 | 46 | 50 | 55 |
| k min. | 3,35 | 3,85 | 5,15 | 6,22 | 7,32 | 8,62 | 9,82 | 11,28 | 12,28 | 13,78 | 14,78 | 16,65 | 18,28 | 20,58 | 22,08 |
| e | 8,79 | 11 | 14,4 | 18,9 | 21,1 | 24,5 | 26,8 | 30,1 | 33,5 | 35,7 | 40 | 45,2 | 50,9 | 55,4 | |
| L/ φ | M5 | M6 | M8 | M10 | M12 | M14 | M16 | M18 | M20 | M22 | M24 | M27 | M30 | M33 | M36 |
| 25 | •• | •• | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | •• | •• | •• | | | | | | | | | | | | |
| 35 | •• | •• | •• | •• | | | | | | | | | | | |
| 40 | •• | •• | •• | •• | •• | | | | | | | | | | |
| 45 | •• | •• | •• | •• | •• | •• | | | | | | | | | |
| 50 | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | | | | | | | | |
| 55 | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | | | | | | | |
| 60 | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | | | | | | |
| 65 | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | | | | | |
| 70 | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | | | | |
| 75 | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | | | |
| 80 | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | | |
| 85 | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | |
| 90 | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• |
| 95 | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• |
| 100 | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• |
| 110 | | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• |
| 120 | | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• |
| 130 | | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• |
| 140 | | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• |
| 150 | | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• |
| 160 | | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• |
| 170 | | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• |
| 180 | | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• |
| 190 | | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• |
| 200 | | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• | •• |

2.6.4. Tuerca autoblocante con inserción no metálica DIN 985 (fabricante Andalinox S.L)



INOX A-2 • INOX A-4 • ACERO • 8.8 10.9 12.9 LATÓN • Medidas en mm

| d | m | h | s | e | |
|------|------|------|-----|-------|------|
| M2,5 | 3,5 | 2,3 | 5 | 5,5 | ••• |
| M3 | 2,4 | 2,4 | 5,5 | 6,01 | ••• |
| M4 | 2,9 | 2,9 | 7 | 7,66 | •••• |
| M5 | 3,2 | 3,2 | 8 | 8,79 | •••• |
| M6 | 4 | 6 | 10 | 11,05 | •••• |
| M8 | 5,5 | 8 | 13 | 14,38 | •••• |
| M10 | 6,5 | 10 | 17 | 18,9 | •••• |
| M12 | 8 | 12 | 19 | 21,1 | •••• |
| M14 | 9,5 | 14 | 22 | 24,49 | •••• |
| M16 | 10,5 | 16 | 24 | 26,75 | •••• |
| M18 | 13 | 18,5 | 27 | 29,56 | ••• |
| M20 | 14 | 20 | 30 | 32,95 | ••• |
| M22 | 15 | 22 | 32 | 35,03 | ••• |
| M24 | 15 | 24 | 36 | 39,55 | ••• |
| M27 | 17 | 27 | 41 | 45,2 | ••• |
| M30 | 19 | 30 | 46 | 50,85 | ••• |
| M33 | 22 | 33 | 50 | 55,37 | ••• |
| M36 | 25 | 36 | 55 | 60,79 | ••• |