

Curso 2015/16



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

DOCUMENTO I

-MEMORIA-

-TRABAJO FINAL DE GRADO -

-Análisis, diseño y dimensionamiento de grúa telescópica autoportante de 10 Tm y 7 m de alcance para vehículo medio-pesado.-

Datos del alumno: Ignacio Ramón Martín (561619).

Datos del director: Javier Óscar Abad Blasco.
Departamento: Ingeniería Mecánica.



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

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

TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER

D./D^a. Ignacio Ramón Martín,

con nº de DNI 76924016-X en aplicación de lo dispuesto en el art.

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

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

Análisis, diseño y dimensionamiento de una grúa telescópica autoportante de 10 Tm y 7 m de alcance, para vehículo medio y pesado.

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

Zaragoza, a 01 de Septiembre del 2016.

Fdo: Ignacio Ramón Martín.

Índice general:

1- Objeto del proyecto.	11
2- Titular de la actividad.	11
3- Alcance del proyecto.	11
4- Definición y clasificación de la grúa.	12
4.1- Grúas fijas.	12
Figura 1: Ejemplo de grúa fija: Grúa - torre.	12
4.2- Grúas móviles.	13
Figura 2: Ejemplo de grúa móvil: De celosía.	13
Figura 3: Superestructura de la grúa.	14
5- Normativa aplicada y bibliografía.	15
6- Valores límite.	16
7- Metodología de cálculo.	17
Figura 4: Representación teórica en MEFI viga B.	17
Figura 5: Diagrama de momentos en MEFI viga B.	17
Figura 6: Fórmula utilizada para el cálculo inicial.	17
Gráfico 1: Curva S/N del material.	18
Figura 7: Mallado viga E.	19
Figura 8: Simulación de tensiones viga E.	19
Figura 9: Simulación de fatiga viga C.	20
7- Dimensiones principales de la grúa.	21
Figura 10: Extensión mínima de la grúa.	21
Figura 11: Extensión máxima de la grúa.	21
Figura 12: Inclinación máxima de la grúa.	22
Figura 13: Inclinación mínima de la grúa.	22
8- Componentes de la grúa.	23
8.1- Perfiles de sujeción.	23
Figura 14: Viga A0 (izquierda) y A1 (derecha).	23
Figura 15: Viga A2.	24
Figura 16: Longitud total perfiles de sujeción.	24
Figura 17: Altura total perfiles de sujeción.	25
Figura 18: Ensamblaje para análisis de viga A2.	25
Figura 19: Tensión de Von Mises viga A2.	26
Figura 20: Tensión máxima viga A2.	26
8.2- Vigas de extensión.	27
Figura 21: Diagrama de momentos viga E.	27
Figura 22: Cálculo de momento resistente viga E.	27
Figura 23: Vista lateral con condiciones de contorno (viga empotrada) viga E.	28
Figura 24: Tensión de Von Mises viga B.	28
Figura 25: Cálculo manual a fatiga viga C.	29
Figura 26: Vida en ciclos del perfil viga C.	29
8.3- Cilindros de posicionamiento.	30
Figura 27: Cilindros de posicionamiento.	30
Figura 28: Cálculo del área del cilindro.	31

Gráfico 2: Diámetro de vástago a pandeo.....	31
8.4- Cilindros de extensión.	32
Tabla 1: Ángulos de inclinación mínimo y máximo de la grúa.....	32
Figura 29: Diagrama sólido libre para cilindros de extensión.	32
Figura 30: Fuerza de empuje.	32
Figura 31: Fuerza de retroceso.....	32
Tabla 2: Cálculo de soportes de extensión.....	33
Figura 32: Cilindros de extensión 1 y 2.....	33
Figura 33: Cilindros de extensión 1,2 y 3.....	34
8.5- Patines.	35
Figura 34: Boceto patín de sujeción viga B.....	35
Figura 35: Modo de sujeción de los patines.	36
Figura 36: Mallado ensamblaje para análisis de patines.....	36
Figura 37: Tensión de Von Mises ensamblaje patines viga B.	37
8.6- Tapas.....	38
Figura 38: Tapa viga C.....	38
Figura 39: Boceto tapa de la viga A2.	38
Figura 40: Unión tapa con patines a la viga.....	39
8.7- Pasadores de unión de elementos.	40
Figura 41: Cálculo a cortante.....	40
Figura 42: Cálculo por aplastamiento.....	40
Figura 43: Ejemplo pasador de unión entre viga A1 y A2.....	40
9- Optimización de la grúa.....	41
Figura 44: Primer vaciado viga E.	41
Figura 45: Modificación de tensiones viga A1.	42
9- Conclusiones.....	42
ANEXO I: Desglose de la Normativa DIN 15018.	43
1- Introducción.	44
2- Cláusula 4. Cargas de diseño.....	44
2.1- Sub-cláusula 4.1.4. Efectos de las fuerzas de inercia.....	44
Tabla 1: Factor de peso propio.....	44
Tabla 2: Factor de carga nominal.	45
Gráfico 1: Factor de carga nominal / velocidad de elevación.	45
Tabla 3: Clasificación de grúas.....	46
2.2- Sub-cláusula 4.1.6. Fuerzas centrífugas.....	47
2.3- Sub-cláusula 4.2.1. Cargas generadas por viento.	47
Figura 1: Mapa de velocidad de viento en la península ibérica.	48
Figura 2: Coeficientes de arrastre.	49
2.4- Sub-cláusula 4.3.3. Cargas de prueba para verificación de estabilidad.....	50
3- Cláusula 5. Casos de carga.	50
Tabla 4: Casos de carga.	50
4- Cláusula 6. Cálculo.	51
4.1- Sub-cláusula 6.4 Materiales.....	51
Tabla 5: Materiales de fabricación.	51
5- Cláusula 7. Verificación y análisis.....	52
5.1- Sub-cláusula 7.2.1. Tensiones permisibles y casos de carga.	52
Tabla 6: Tensiones permisibles.	52
Tabla 7: Tensiones permisibles en soldaduras.	52

Tabla 8: Tensiones permisibles en sujeciones.....	53
5.2- Sub-cláusula 7.4.1. Verificación de fuerza en servicio. Restricciones a fatiga.....	54
Tabla 9: Grupos de carga por fatiga.....	54
Gráfico 2: Coeficiente corrector de superficie.....	55
Gráfico 3: Curva S/N de acero estructural St 52-3.....	56
6- Coeficiente de seguridad por simulación de elementos finitos.....	57
ANEXO II: Cálculos Justificativos.....	58
1- Introducción.....	59
2- Primer cálculo – Valores de carga según extensión de la pluma.....	59
Tabla 1: Carga máxima por extensión.....	59
3- Componentes estructurales - Extensiones.....	60
Figura 1: Perfil de tubo rectangular.....	60
3.1- Cuarta extensión – Perfil viga E.....	62
Figura 2: Representación teórica viga E.....	62
Figura 3: Longitud viga E.....	62
Figura 4: Diagrama de momentos viga E.....	63
Figura 5: Diagrama de cortantes viga E.....	63
Tabla 2: Calculo teórico perfil viga E.....	64
Figura 6: Boceto perfil viga E en SolidWorks.....	64
Figura 7: Fuerza ponderada aplicada al perfil viga E.....	65
Figura 8: Vista lateral con condiciones de contorno (viga empotrada) viga E.....	66
Figura 9: Mallado viga E.....	66
Figura 10: Tensión de Von Mises viga E (perfil teórico).....	67
Figura 11: Desplazamiento vertical viga E (perfil teórico).....	67
Figura 12: Nueva sección del perfil viga E.....	68
Figura 13: Esfuerzos de simulación combinados viga E.....	69
Figura 14: Nuevo mallado perfil viga E.....	70
Figura 15: Nueva tensión de Von Mises viga E.....	71
Figura 16: Tensión de Von Mises viga E.....	72
Figura 17: Perfil con radios modificados viga E.....	73
Figura 18: Tensiones de Von Mises definitivas viga E.....	74
Figura 19: Flecha definitiva viga E.....	74
Gráfico 1: Curva S/N del acero St 52-3.....	75
3.2- Tercera extensión – Perfil viga D.....	76
Figura 20: Representación teórica viga D.....	76
Figura 21: Longitud viga D.....	76
Figura 22: Diagrama de momentos viga D.....	77
Figura 23: Diagrama de cortantes viga D.....	77
Tabla 3: Cálculo teórico perfil viga D.....	77
Figura 24: Sección del perfil viga D.....	78
Figura 25: Esfuerzos de simulación combinados viga D.....	78
Figura 26: Mallado perfil viga D.....	79
Figura 27: Tensión de Von Mises viga D.....	79
Figura 28: Tensión de Von Mises viga D, primera iteración.....	80
Figura 29: Tensión de Von Mises viga D, segunda iteración.....	80
Figura 30: Desplazamiento en Y viga D.....	81
3.3- Segunda extensión – Perfil viga C.....	83
Figura 31: Representación teórica viga C.....	83
Figura 32: Longitud viga C.....	83
Figura 33: Diagrama de momentos viga C.....	84

Figura 34: Diagrama de cortantes viga C.....	84
Tabla 4: Cálculo teórico perfil viga C.	84
Figura 35: Sección del perfil viga C.	85
Figura 36: Esfuerzos de simulación combinados viga C.	85
Figura 37: Mallado viga C.	86
Figura 38: Tensión de Von Mises viga C.	86
Figura 39: Tensión de Von Mises viga C (1).	87
Figura 40: Desplazamiento en Y viga C.	87
Figura 41: Definición del suceso de fatiga viga C.	89
Figura 42: Definición de curva S/N del material.	89
Figura 43: Vida en ciclos del perfil viga C.	90
3.4- Primera extensión – Perfil viga B.	91
Figura 44: Representación teórica viga B.	91
Figura 45: Longitud viga B.	91
Figura 46: Diagrama de momentos viga B.	92
Figura 47: Diagrama de cortantes viga B.	92
Tabla 5: Cálculo teórico perfil viga B.	92
Figura 48: Sección del perfil viga B.	93
Figura 49: Esfuerzos de simulación combinados viga B.	93
Figura 50: Mallado viga B.	94
Figura 51: Tensión de Von Mises viga B.	94
Figura 52: Nueva tensión de Von Mises viga B.	95
Figura 53: Desplazamiento en Y viga B.	96
4- Componentes estructurales - Perfiles de sujeción.....	98
4.1- Perfiles de sujeción – Perfil viga A2.	98
Figura 54: Croquis del cálculo básico para el cilindro hidráulico.....	98
Figura 55: Representación teórica viga A2.	99
Figura 56: Longitud viga A2.	99
Figura 57: Diagrama de momentos viga A2.	100
Figura 58: Diagrama de cortantes viga A2.	100
Tabla 6: Cálculo teórico perfil viga A2.	100
Figura 59: Sección del perfil viga A2.	101
Figura 60: Esfuerzos simulación combinados viga A2.	102
Figura 61: Mallado viga A2.	102
Figura 62: Tensión de Von Mises viga A2.	103
Figura 63: Tensión de Von Mises viga A2 (2).	104
Figura 64: Diagrama sólido libre viga A2.	104
Tabla 7: Iteraciones de cálculo de la fuerza del cilindro.....	105
Tabla 8: Cálculo de las reacciones en el pasador.	106
Figura 65: Boceto apoyos inferiores con alojamiento para el pasador del cilindro.	109
Figura 66: Extrusión apoyos inferiores.	109
Figura 67: Boceto apoyo superior con alojamiento para pasador de la reacción.	110
Figura 68: Corte lateral del perfil.	110
Figura 69: Nueva altura de acción del cilindro.	111
Tabla 9: Nuevas reacciones en el pasador superior.	111
Figura 70: Pieza creada para análisis de viga A2 (1).	112
Figura 71: Pieza creada para análisis de viga A2 (1).	112
Figura 72: Corte del ensamblaje y ángulo de cilindro con respecto a la planta.	113
Figura 73: Condición de pasador para análisis viga A2.....	113
Figura 74: Sujeción pieza vástago.....	114
Figura 75: Sujeción pasador superior, momento liberado.	115
Figura 76: Esfuerzos combinados para análisis viga A2.....	115

Figura 77: Mallado ensamblaje viga A2.....	116
Figura 78: Tensión de Von Mises ensamblaje viga A2.....	116
Figura 79: Máxima tensión de Von Mises ensamblaje viga A2.	117
Figura 80: Máxima tensión de Von Mises ensamblaje viga A2 (1).	117
Figura 81: Máxima tensión de Von Mises ensamblaje viga A2 (2).	118
Figura 82: Máxima tensión de Von Mises ensamblaje viga A2 (3).	118
Figura 83: Tensión de Von Mises viga A2.	119
Figura 84: Tensión máxima viga A2.....	119
Figura 85: Desplazamiento en Y viga A2.....	120
Figura 86: Definición del suceso de fatiga viga A2.	121
Figura 87: Definición de curva S/N del material.....	121
Figura 88: Vida en ciclos del perfil viga A2.	122
Figura 89: Vida mínima en ciclos del perfil viga A2.	122
4.2- Perfiles de sujeción – Perfil viga A1.	123
Figura 90: Diagrama sólido libre viga A2.	123
Figura 91: Primer boceto viga A1.	124
Figura 92: Extrusión primer boceto viga A1.	125
Figura 93: Alojamiento de pasadores viga A1.....	125
Figura 94: Corte parte posterior viga A1.	126
Figura 95: Corte frontal viga A1.....	126
Figura 96: Esquema del triángulo formado por el cilindro 2 y los pasadores.	127
Tabla 10: Iteraciones de cálculo del cilindro 2.	128
Figura 97: Nuevos alojamientos de pasadores viga A1.	131
Figura 98: Nuevo espesor perfil viga A1.	131
Figura 99: Pieza cilindro para simulación de viga A1.....	132
Figura 100: Ensamblaje del conjunto viga A1 y ángulo de acción del cilindro 2.	132
Figura 101: Condición de pasador cilindro 2.	133
Figura 102: Sujeción pieza acción cilindro 2 y unión viga A1 con A0.	133
Figura 103: Esfuerzos en pasador de unión viga A1 – A2.....	134
Figura 104: Esfuerzos en pasador de cilindro 2 viga A1.	134
Figura 105: Mallado ensamblaje viga A1.....	135
Figura 106: Tensión de Von Mises viga A1 (1).....	135
Figura 107: Tensión máxima de Von Mises viga A1.	136
Figura 108: Tensión de Von Mises viga A1 (2).....	136
Figura 109: Tensión de Von Mises viga A1 (3).....	137
Figura 110: Vaciado lateral viga A1.	137
Figura 111: Vaciado superior viga A1.	138
Figura 112: Vaciado inferior viga A1.....	138
Figura 113: Tensión de Von Mises viga A1 (4).....	139
Figura 114: Tensión de Von Mises definitiva viga A1.	139
Figura 115: Desplazamientos viga A1.....	140
Figura 116: Vida en ciclos viga A1.	140
4.3- Perfiles de sujeción – Perfil viga A0.	141
Figura 117: Boceto inicial viga A0.....	142
Figura 118: Extrusión boceto inicial viga A0.....	142
Figura 119: Vista del primer boceto extruido viga A0.	143
Figura 120: Taladros alojamiento pasadores viga A0.....	143
Figura 121: Soportes para pasador cilindro 2 en viga A0.....	144
Figura 122: Espesor soportes para pasador cilindro 2 viga A0.....	144
Figura 123: Corte viga A0.	145
Figura 124: Mallado viga A0.	145
Figura 125: Tensión de Von Mises viga A0.	146
Figura 126: Desplazamientos viga A0.....	146

Figura 127: Vida en ciclos viga A0.	147
5- Cilindros de posicionamiento.	148
5.1- Cilindro de posicionamiento 1:.....	148
Tabla 10: Diámetros y áreas normalizadas para cilindros hidráulicos.	149
Tabla 11: Factores de pandeo cilindros hidráulicos.	150
Figura 128: Longitud total cilindro hidráulico 1.	150
Figura 129: Esquema cilindro hidráulico CICROSA serie 600.....	151
Tabla 12: Dimensiones del cilindro hidráulico CICROSA serie 600.	151
Gráfico 3: Diámetro de vástago cilindro 1.	152
Figura 130: Posición mínima cilindro 1.....	153
Figura 131: Inclinación mínima de la pluma.....	153
5.2- Cilindro de posicionamiento 2:.....	154
Figura 132: Longitud total cilindro hidráulico 2.	154
Tabla 13: Diámetros y áreas normalizadas para cilindros hidráulicos.	155
Tabla 14: Factores de pandeo cilindros hidráulicos.	156
Tabla 15: Dimensiones del cilindro hidráulico CICROSA serie 600.	156
Gráfico 5: Diámetro de vástago.....	157
Figura 133: Posición recogida cilindro 2.....	158
Figura 134: Nueva inclinación mínima de la pluma.....	158
Figura 135: Nueva inclinación viga A1.....	159
5.3- Modificación viga A1:	159
Figura 136: Refuerzos pasador viga A1.	160
Figura 137: Corte superior viga A1.	160
Figura 138: Tensión de Von Mises viga A1 modificada.	161
5.4- Modificación viga A0:	161
Figura 139: Modificación espesor en pasador de unión viga A0.....	162
Figura 140: Refuerzo pasador de unión viga A0.....	162
Figura 141: Tensión de Von Mises viga A0 modificada.	163
6- Patines de deslizamiento.....	164
Figura 142: Boceto patín de sujeción viga B (1).	164
Figura 143: Boceto patín de sujeción viga B (2).	165
Figura 144: Ensamblaje patines viga B.	165
Figura 145: Mallado ensamblaje para análisis de patines.	166
Figura 146: Tensión de Von Mises ensamblaje patines viga B.	166
Figura 147: Tensión de Von Mises ensamblaje patines viga B (1).....	167
7- Tapas.....	168
Figura 148: Tapa viga A2.	168
Figura 149: Detalle – corte tapa viga A2 con patines.	169
Figura 150: Croquis tapa viga A2 (1).....	169
Figura 151: Croquis tapa viga A2 (2).....	170
6- Cilindros de extensión.	171
Tabla 16: Coeficientes de rozamiento.	171
Figura 152: Diagrama sólido libre cilindros extensión.	172
Tabla 17: Resumen de pesos, cargas y coeficiente de rozamiento.	173
Tabla 18: Fuerza del cilindro necesaria para las 3 extensiones a 80º de inclinación.	173
Tabla 19: Cálculo diámetro y presión de los cilindros.	173
Tabla 20: Factores de pandeo cilindros hidráulicos.	174
Gráfico 6: Dimensionado vástago cilindros de extensión.	175
Tabla 21: Dimensionado vástago cilindros de extensión y fuerza de retroceso.	175
Figura 153: Esquema cilindro de doble efecto CICROSA serie 700.	176
Tabla 23: Ángulos de inclinación acordes con las limitaciones del proveedor.....	176

Figura 154: Gráficos de fuerzas máximas CICROSA serie 700.	177
Tabla 24: Ángulo de inclinación negativo por limitaciones del proveedor.	177
Figura 155: Alcance inclinación máxima.	178
Figura 156: Alcance inclinación mínima.	179
Tabla 25: Cálculo de pasadores.	179
Figura 157: Altura de acción cilindro de extensión 1.	180
Figura 158: Altura de acción cilindro de extensión 2.	180
Figura 159: Altura de acción cilindro de extensión 3.	181
Tabla 26: Cálculo de soportes de extensión.	181
Tabla 27: Cálculo soportes de extensión (1).....	181
Figura 160: Profundidad soporte cilindro de extensión 1.	182
Figura 161: Profundidad soporte cilindro de extensión 2.	182
Figura 162: Profundidad soporte cilindro de extensión 3.	183
9- Medidas principales de la grúa.	184
9.1- Longitudes principales:.....	184
Figura 163: Altura de la grúa.	184
Figura 164: Extensión mínima de la grúa.	184
Figura 165: Extensión máxima de la grúa.....	185
Figura 166: Anchura de la grúa.	185
9.2 Extensiones:.....	186
Figura 167: Longitud primera extensión.	186
Figura 168: Longitud segunda extensión.....	186
Figura 169: Longitud tercera extensión.....	186
9.3 Peso y centro de gravedad:	187
Figura 170: Nuevo sistema de coordenadas.	187
Figura 171: Peso de la grúa y centro de gravedad en posición de mínima extensión.	187
Figura 172: Centro de gravedad en posición de máxima extensión.	188
10- Conclusiones.	189
Figura 173: Peso de la grúa con aleación de aluminio.	189
ANEXO III: Optimización de la grúa.	190
1- Introducción.	191
2- Datos de partida.	191
Figura 1: Tensiones simulación completa real (1).	192
Figura 2: Comprobación vigas E, D, C.	192
Figura 3: Comprobación vigas B, A2 y A1.	193
Figura 4: Comprobación viga A0.....	193
Figura 5: Desplazamiento máximo acero.	194
Figura 6: Desplazamiento máximo aluminio.	194
3- Optimización.....	195
3.1- Optimización viga E.	195
Figura 7: Perfil inicial viga E.	195
Figura 8: Modificación viga E (1).	195
Figura 9: Modificación tensiones en viga E.	196
Figura 10: Primer vaciado viga E.	196
Figura 11: Modificación tensiones viga E (1).	197
Figura 12: Modificación de tensiones viga E (2).	197
Figura 13: Modificación de tensiones viga E (3).	198
Figura 14: Modificación de peso viga E.	198
3.2- Optimización viga D.	199

Figura 15: Perfil inicial viga D.	199
Figura 16: Tensiones iniciales viga D.	199
Figura 17: Modificación de tensiones viga D (1).	200
Figura 18: Tensiones máximas en modificación viga D (1).	200
Figura 19: Tensiones máximas en modificación viga D (2).	201
Figura 20: Modificación de tensiones viga D (2).	201
Figura 21: Vaciado central viga D.	202
Figura 22: Modificación de tensiones viga D (3).	202
Figura 23: Modificación de peso viga D.	203
3.3- Optimización viga C.	204
Figura 24: Perfil inicial viga C.	204
Figura 25: Tensiones iniciales viga C.	204
Figura 26: Modificación de tensiones viga C (1).	205
Figura 27: Tensiones máximas en modificación viga C (2).	205
Figura 28: Modificación de tensiones viga C (2).	206
Figura 29: Vaciado interior viga C.	206
Figura 30: Modificación de tensiones viga C (3).	207
Figura 31: Modificación de peso viga C.	207
3.4- Optimización viga B.	208
Figura 32: Perfil inicial viga B.	208
Figura 33: Tensiones iniciales viga B.	208
Figura 34: Modificación de tensiones viga B.	209
Figura 35: Modificación de peso viga B.	209
3.5- Optimización viga A2.	210
Figura 36: Perfil inicial viga A2.	210
Figura 37: Tensión inicial viga A2.	210
Figura 38: Vaciado lateral viga A2.	211
Figura 39: Vaciado superior viga A2.	211
Figura 40: Vaciado inferior viga A2.	212
Figura 41: Modificación de tensiones viga A2 (1).	212
Figura 42: Modificación de tensiones viga A2 (2).	213
Figura 43: Modificación de peso viga A2.	213
3.6 Optimización viga A1.	214
Figura 44: Perfil inicial viga A1.	214
Figura 45: Modificación espesor viga A1.	214
Figura 46: Modificación distancia de acción cilindro 2 viga A1.	215
Tabla 1: Modificación fuerza e inclinación cilindro 2.	215
Tabla 2: Diámetros y áreas normalizadas para cilindros hidráulicos.	216
Tabla 3: Factores de pandeo cilindros hidráulicos.	217
Tabla 4: Diámetros de vástago y pistón CICROSA.	218
Figura 47: Modificación cortes viga A1.	220
Figura 48: Modificación tensiones viga A1 (1).	220
Figura 49: Refuerzos en pasadores viga A1.	221
Figura 50: Refuerzo parte superior viga A1.	221
Figura 51: Modificación tensiones viga A1 (2).	222
Figura 52: Refuerzo adicional parte superior viga A1.	222
Figura 53: Modificación de tensiones viga A1 (3).	223
Figura 54: Modificación de tensiones viga A1 (4).	223
Figura 55: Modificación de peso viga A1.	224
3.7- Re-diseño y optimización viga A0.	225
Figura 56: Re-diseño viga A0 (1).	225
Figura 57: Soportes pasador cilindro 2 viga A0.	226
Figura 58: Modificación tensiones viga A0 (1).	226

Figura 59: Modificación tensiones máximas viga A0.....	227
Figura 60: Refuerzo parte posterior viga A0.....	227
Figura 61: Modificación de tensiones viga A0 (2).....	228
Figura 62: Vaciado lateral viga A0.	228
Figura 63: Vaciado frontal viga A0 (1).	229
Figura 64: Vaciado frontal viga A0 (2).	229
Figura 65: Modificación de tensiones viga A0 (3).....	230
Figura 66: Modificación peso viga A0.....	230
4- Datos finales de la grúa.	232
Figura 67: Modificación de flecha máxima grúa completa.	232
Figura 68: Modificación de peso grúa completa.	232
Figura 69: Sistema de coordenadas.	233
Figura 70: Modificación centro de masas en posición extendida.	233
Figura 71: Modificación centro de masas en posición recogida.	233

1- Objeto del proyecto.

El objeto principal del presente proyecto es el de asentar y aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo de la formación académica, así como el de desarrollar la capacidad de enfrentamiento ante los problemas del diseño mecánico y tridimensional en el mundo real de la ingeniería.

Además, el desarrollar una metodología de trabajo ante las diferentes fases de diseño y aprender a aplicar las herramientas adecuadas a cada situación es otro de los objetivos principales.

De carácter más técnico, el objetivo del presente proyecto es el de diseñar una grúa hidráulica extensible de 7 metros de alcance máximo y una capacidad de 10 toneladas por metro.

2- Titular de la actividad.

Es titular de la actividad del presente proyecto el alumno *D. Ignacio Ramón Martín*, perteneciente al grado en Ingeniería Mecánica y a la especialidad de Máquinas y Vehículos.

El director del presente proyecto es *D. Javier Óscar Abad Blasco*, profesor del departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza.

3- Alcance del proyecto.

El alcance del presente proyecto es el de solucionar los aspectos de diseño de la pluma extensible y de los perfiles de sujeción de la grúa.

Además, se diseñará los cilindros hidráulicos tanto de posicionamiento como los de los perfiles de extensión, los pasadores de unión de todos los elementos, los patines de deslizamiento de los perfiles y las tapas que cubren los extremos de dichos perfiles.

Quedan pendientes los cálculos del sistema eléctrico e hidráulico, y también el del motor de giro de la estructura y su sistema de engranajes.

4- Definición y clasificación de la grúa.

Una grúa se define como una máquina destinada a elevar y transportar grandes cargas dentro del radio de acción de su brazo o pluma. La sujeción de las cargas se realiza normalmente mediante un gancho o polipasto, imanes de gran potencia o mediante garras.

Los tipos de grúa dependen de su movilidad, estructura y campo de aplicación. Por lo general la primera clasificación depende de su movilidad.

4.1- Grúas fijas.

Sacrifican la capacidad de traslación que da la grúa móvil con la de soportar mayores cargas y conseguir mayores alturas incrementando la estabilidad. Este tipo se caracteriza por quedar ancladas en el suelo (o al menos su estructura principal) durante el periodo de uso. A pesar de esto algunas pueden ser ensambladas y desensambladas en el lugar de trabajo.



Figura 1: Ejemplo de grúa fija: Grúa - torre.

4.2- Grúas móviles.

En el más amplio sentido de su acepción denominaremos grúa móvil a todo conjunto formado por un vehículo portante, sobre ruedas o sobre orugas, dotado de sistemas de propulsión y dirección propios sobre cuyo chasis se acopla un aparato de elevación tipo pluma.

Dentro de esta clasificación podemos encontrarnos con dos tipos de grúa móvil:

- Chasis portante: Estructura metálica sobre la que, además de los sistemas de propulsión y dirección, se fijan los restantes componentes.
- Superestructura: Constituida por una plataforma base sobre corona de orientación que la une al chasis y permite el giro de 360°, la cual soporta la flecha o pluma que puede ser de celosía o telescópica, equipo de elevación, cabina de mando, y en algunos casos, contrapeso desplazable.

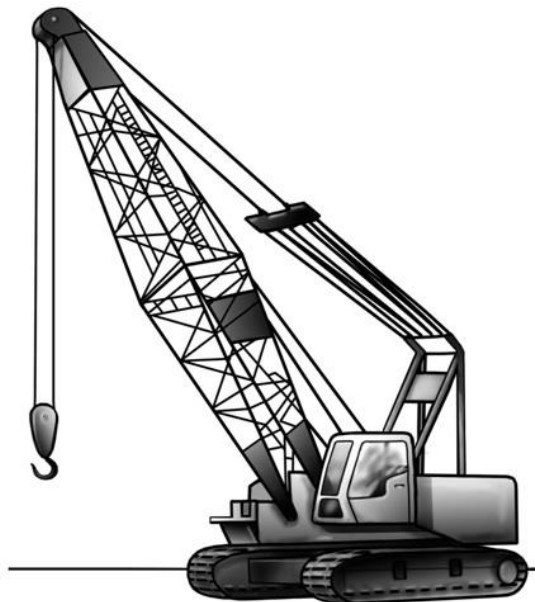


Figura 2: Ejemplo de grúa móvil: De celosía.

Para ambos tipos de grúa se toma otra clasificación que depende de la forma de la estructura de la pluma. Algunos de los tipos de grúa son:

- Grúas puente o grúas pórtico: Generalmente fijas y empleadas en la construcción naval y en los pabellones industriales.
- Grúa Torre: Se denomina grúa torre a un tipo de grúa normalmente fija, de estructura metálica desmontable, alimentada por corriente eléctrica y especialmente diseñada para trabajar como herramienta en la construcción.
- Grúa Derrick: Es una grúa formada por un mástil de estructura de celosía sujeto por vientos, un brazo de la misma estructura unido al mástil por un extremo inferior y sujeto al mismo mediante cables por su extremo superior, un cabrestante situado en el suelo y un cable que se reenvía a través de poleas situadas en el brazo. Generalmente suelen ser móviles.
- Grúa horquilla: Una carretilla elevadora, grúa horquilla, montacargas o coloquialmente “*toro*” es un vehículo contrapesado en su parte trasera que, mediante dos horquillas, puede transportar y apilar cargas generalmente montadas sobre tarimas o palés.
- Grúa de brazo nivelado: Una grúa de brazo nivelado se caracteriza porque es capaz de desplazar longitudinalmente la carga suspendida (es decir, hacia atrás o hacia adelante) mientras el gancho de suspensión se mantiene a una altura fija de forma automática.
- Grúa telescópica: Consistente en varios perfiles extensibles que permiten a la grúa variar su longitud mediante un sistema de telescopado hidráulico que actúa sobre ellos. Su uso es muy variado en la industria, y se pueden encontrar tanto de tipo fijo como móvil.

Por tanto, podemos decir que la grúa del presente proyecto pertenece al tipo móvil con superestructura y de clasificación de pluma telescópica. A continuación se muestra la parte estructural de la superestructura de la grúa del presente proyecto:

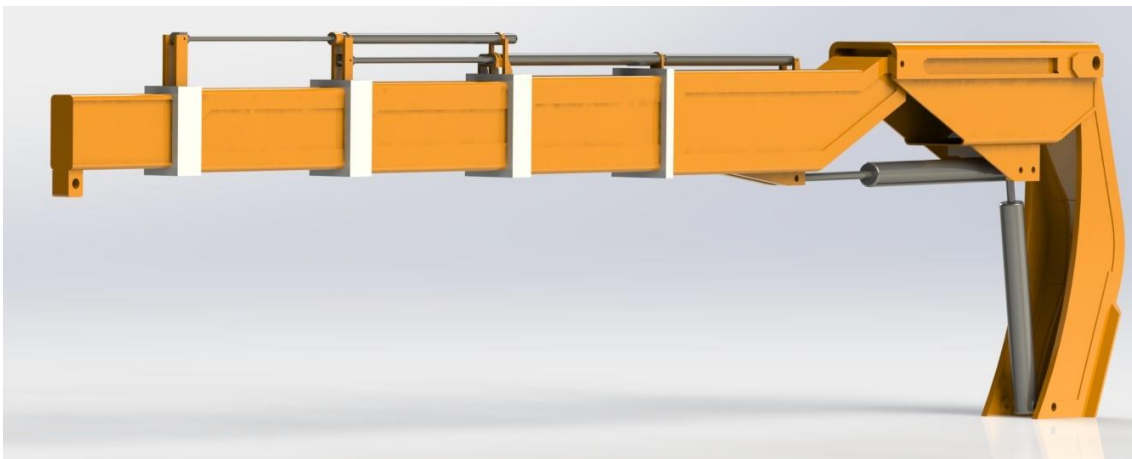


Figura 3: Superestructura de la grúa.

5- Normativa aplicada y bibliografía.

Los cálculos resistentes realizados para la definición de los componentes de la grúa, así como las restricciones con respecto a los materiales y coeficientes de seguridad utilizados, tienen como principal objeto el cumplimiento de la normativa especificada a continuación.

El presente proyecto está calculado para cumplir con la normativa alemana, “*Deutsches Institut für Normung*” o **DIN**. Específicamente la norma que lo rige es la **DIN 15018**, en sus partes 1, 2 y 3.

Dentro de la norma descrita, se hacen referencia a una serie de normativas necesarias para la correcta clasificación y cálculo de los componentes de la grúa. A continuación se describen las más relevantes:

- DIN 15001-1: Grúas; terminología; clasificación con respecto al tipo.
- DIN 1055-4: Cargas de diseño para construcción; cargas impuestas; cargas de viento de estructuras no susceptibles a la vibración.
- DIN 1055-5: Cargas de diseño para construcción; cargas impuestas; cargas de nieve y hielo.
- DIN 15019-1: Grúas; estabilidad para grúas exceptuando grúas montadas móviles sin railes y grúas flotantes.
- DIN 15019-2: Grúas; estabilidad para grúas montadas móviles sin railes; cargas de prueba y cálculo.
- DIN 18800-1: Estructuras de acero; diseño y construcción.
- DIN 17100: Aceros para uso estructural general; calidad y especificaciones.
- DIN 4114-1: Estructuras de acero; casos de estabilidad; principios de diseño, regulación.
- DIN 4114-2: Estructuras de acero; casos de estabilidad; principios de diseño, pautas.

En el anexo número uno del presente proyecto se podrá encontrar el desglose detallado de la normativa y el cálculo de los coeficientes de seguridad y las restricciones de tensiones máximas utilizadas para el cálculo resistente.

También se han consultado los siguientes libros para la realización del proyecto:

- Criterios de diseño de máquinas – *Javier Abad Blasco, Paula Canalís Martínez, Antonio Serrano Nicolás*.
- Cálculo y selección de elementos de máquinas – *Antonio Serrano Nicolás*.

6- Valores límite.

Los valores resistentes máximo sobre los que se ha tenido en cuenta el diseño de los componentes de la grúa se han obtenido a través de la normativa ya citada. Si bien la obtención de dichos valores está completamente detallada en el anexo I, se procede a hacer un resumen de los mismos:

- Tensión máxima: 360 MPa.
- Coeficiente de seguridad: 1,5.
- Coeficiente de seguridad por peso propio: 1,2 (aplicado sólo al peso propio).
- Coeficiente de seguridad por movimientos verticales: 1,567.
- Tensión máxima ponderada: 153,19 MPa.
- Tensión máxima en sujeciones a cortante: 168 MPa.
- Tensión máxima en sujeciones por aplastamiento: 210 MPa.
- Límite de ciclos por fatiga: Mínimo 200000.

Por su parte, se ha tenido en cuenta para el cálculo de los componentes de la grúa la situación más desfavorable; esto es, para una extensión de 7000 mm, la carga correspondiente y las acciones del viento y el peso propio. Aunque dichos cálculos se encuentran detallados en el anexo II, se adjunta un resumen de los mismos:

- Carga a izar: 14014,29 N.
- Extensión: 7000 mm (extensión máxima).
- Ángulo de posición de la pluma: 0°.
- Peso propio: Coeficiente aplicado a la gravedad, es decir $9,81 * 1,2 = 11,772 \frac{m}{s^2}$.
- Acción del viento (como presión): Según calculado en anexo I, $592,94 N/m^2$, aplicada a la cara lateral de las vigas.

7- Metodología de cálculo.

El cálculo de la grúa del presente proyecto se divide en dos partes, un primer cálculo manual y un segundo mediante la herramienta de elementos finitos del programa de diseño paramétrico SolidWorks.

La metodología del cálculo manual se ha basado en los conceptos básicos del cálculo estático resistente, utilizando las fórmulas aprendidas durante la formación académica. Se realizó primero el cálculo manual y a continuación una comprobación mediante MEFI, de donde se obtuvieron los diagramas de esfuerzos:

Extensión 7000 mm , viga B (estado 1)

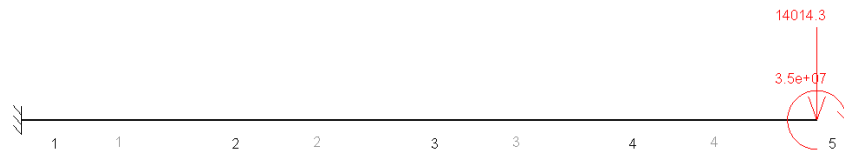


Figura 4: Representación teórica en MEFI viga B.

Extensión 7000 mm , viga B (estado 1)

Momentos flectores

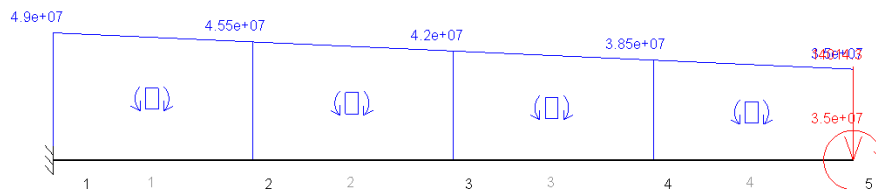


Figura 5: Diagrama de momentos en MEFI viga B.

A continuación se calculó la resistencia necesaria de cada perfil y, mediante una serie de iteraciones en Excel, se creó el diseño inicial de las vigas.

$$\frac{\sigma_x}{\varphi} = \frac{M_x}{W_x}$$

Figura 6: Fórmula utilizada para el cálculo inicial.

Para el cálculo teórico a fatiga, se han tenido en cuenta los conceptos de cálculo por rigidez, mediante la curva S/N del material, las tensiones permisibles del material y las tensiones máximas en los componentes. En la siguiente gráfica se muestra la curva S/N calculada para el material:

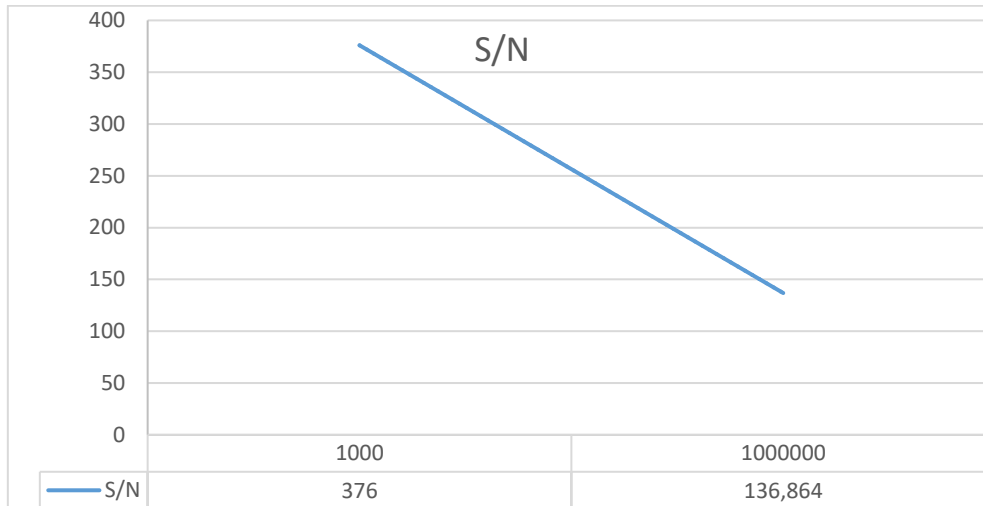


Gráfico 1: Curva S/N del material.

Para el cálculo mediante elementos finitos, se tomó como referencia los parámetros calculados manualmente, para después adaptar esa geometría a las necesidades de la grúa. Se realizaron simulaciones de tensiones, desplazamientos, deformaciones unitarias y fatiga, comprobando que el perfil cumpliera las exigencias de la normativa y modificando los parámetros cuando fuese necesario. Se intentó simular elementos lo más pequeños posibles, si bien en ensamblajes se tuvo que aumentar dicho tamaño.

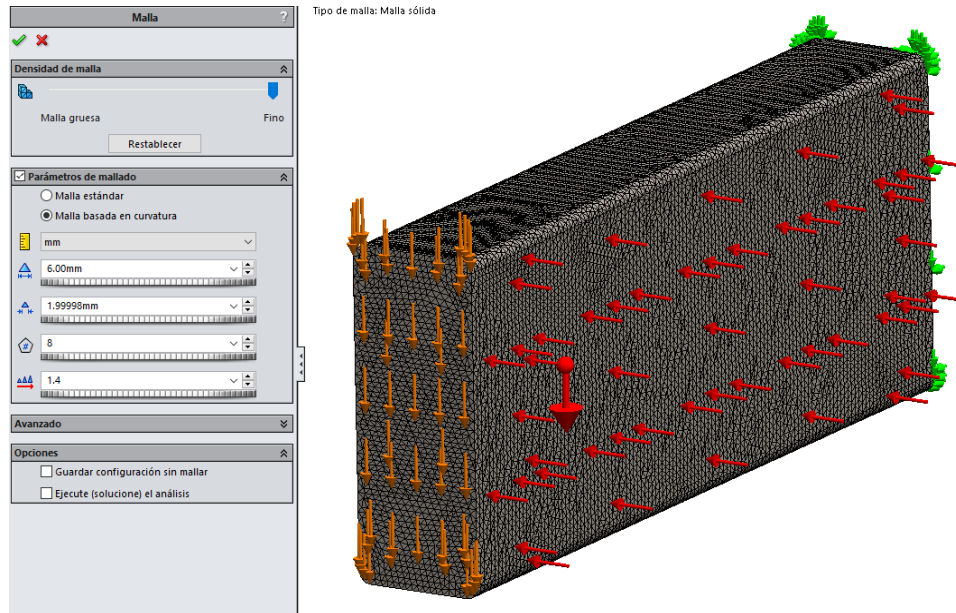


Figura 7: Mallado viga E.

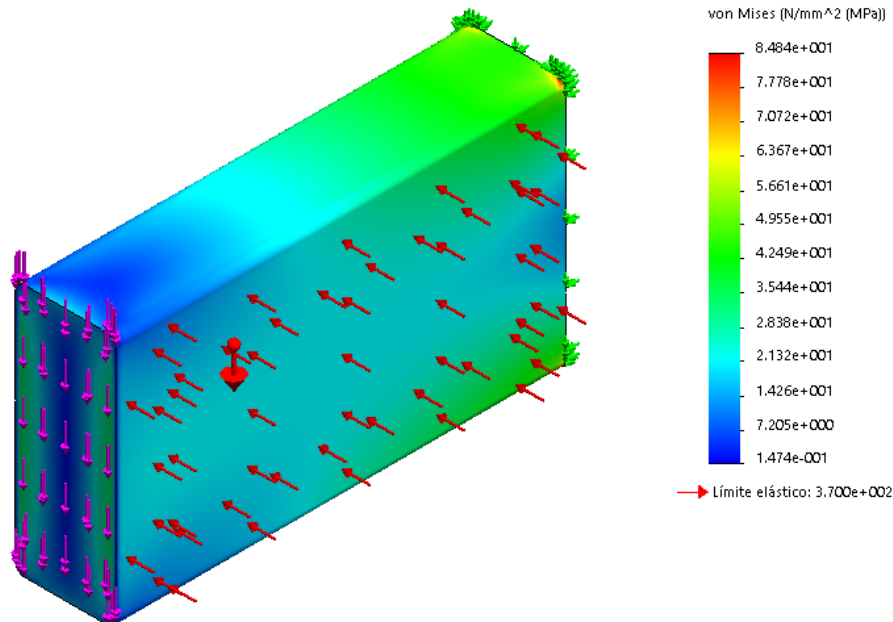


Figura 8: Simulación de tensiones viga E.

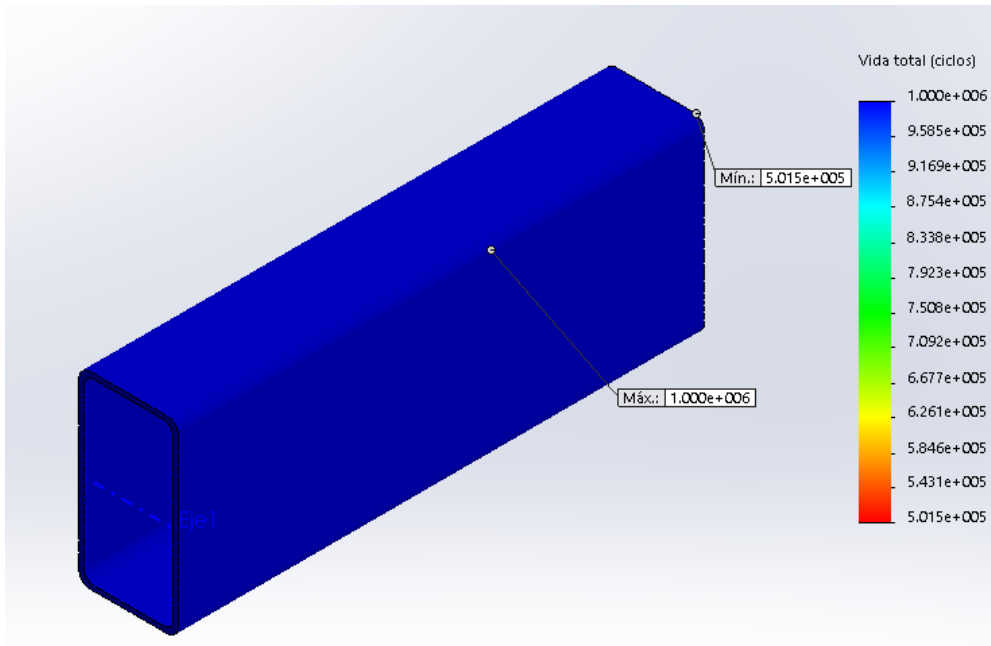


Figura 9: Simulación de fatiga viga C.

7- Dimensiones principales de la grúa.

La grúa del presente proyecto está preparada para levantar un peso máximo de 1400 kg a 7 m y un ángulo de inclinación de 0°. Su longitud mínima son 3965 mm y la máxima 7055 mm.

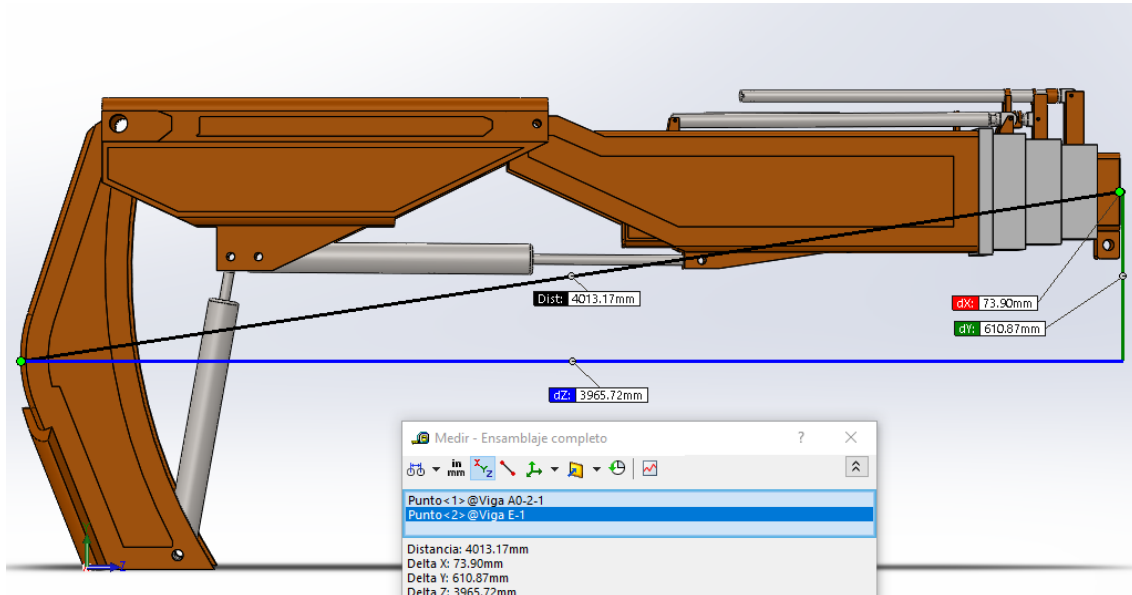


Figura 10: Extensión mínima de la grúa.

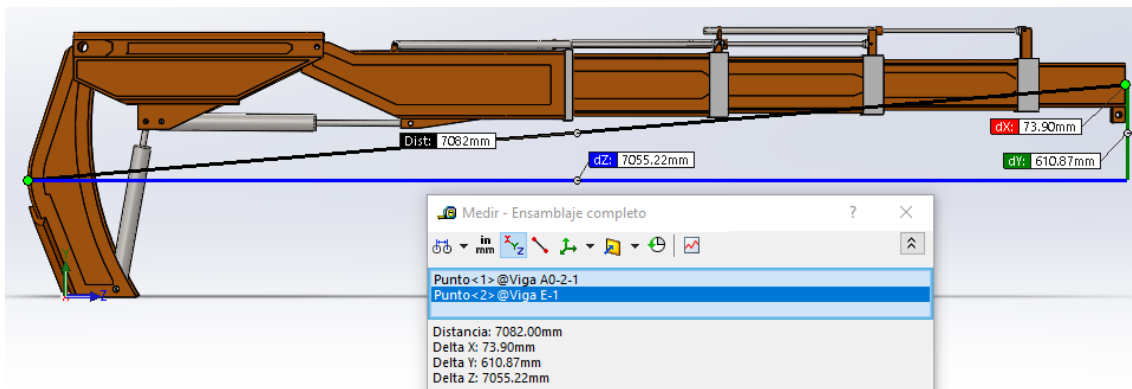


Figura 11: Extensión máxima de la grúa.

La pluma se puede inclinar mediante la acción de dos cilindros hidráulicos de posicionamiento, siendo su inclinación mínima -31° , limitada por la fuerza de tracción de los cilindros de expansión, y la máxima $76,48^{\circ}$, limitada por la fuerza de empuje de los mismos cilindros..

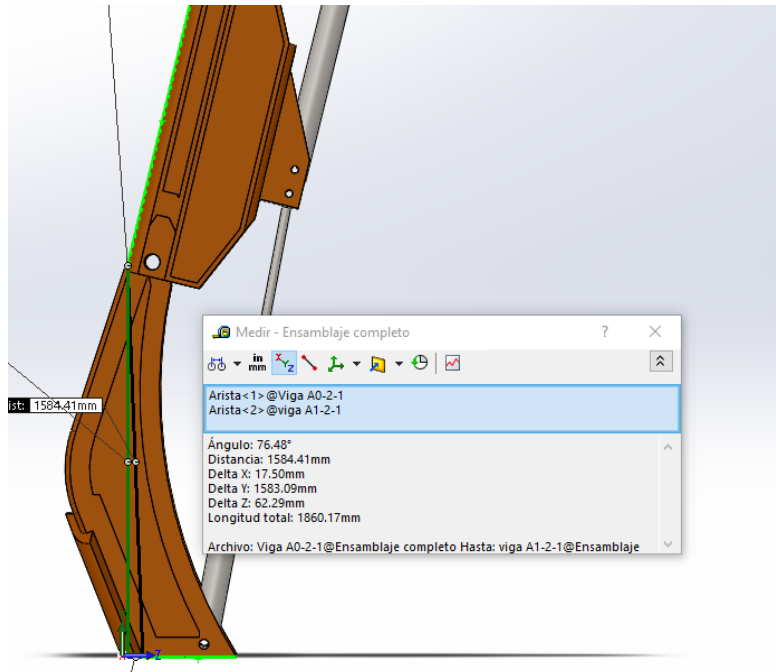


Figura 12: Inclinación máxima de la grúa.

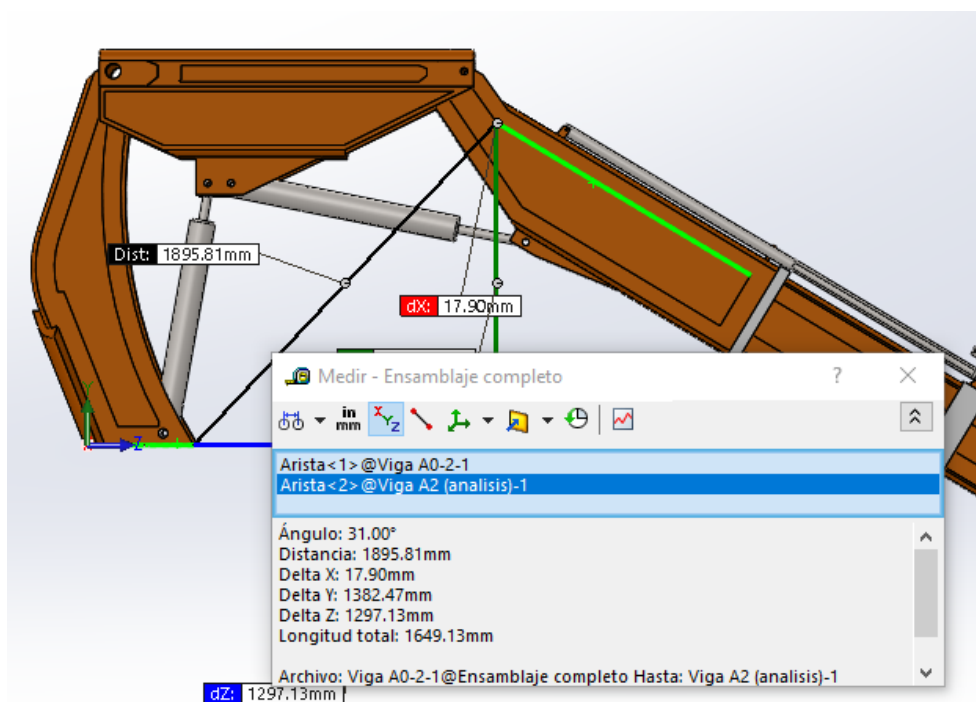


Figura 13: Inclinación mínima de la grúa.

8- Componentes de la grúa.

La grúa del presente proyecto está compuesta de los siguientes conjuntos de componentes:

- Vigas de sujeción.
- Vigas de extensión.
- Patines de deslizamiento.
- Tapas
- Cilindros hidráulicos de posicionamiento.
- Cilindros hidráulicos de extensión.
- Pasadores de unión.

Las vigas de sujeción y extensión están fabricadas en acero estructural St 52-3, según lo establece la norma. Por su parte, el resto de componentes estarán fabricados en el material que más convenga en cada situación.

8.1- Perfiles de sujeción.

Estos perfiles son los encargados de soportar las reacciones de las partes extensibles, así como de transmitir los esfuerzos de los cilindros de posicionamiento.

Son 3 en total, descritos como A0, A1 y A2. Cada uno de ellos ha sido calculado y simulado por elementos finitos de manera que cumpla con las restricciones de la normativa.



Figura 14: Viga A0 (izquierda) y A1 (derecha).

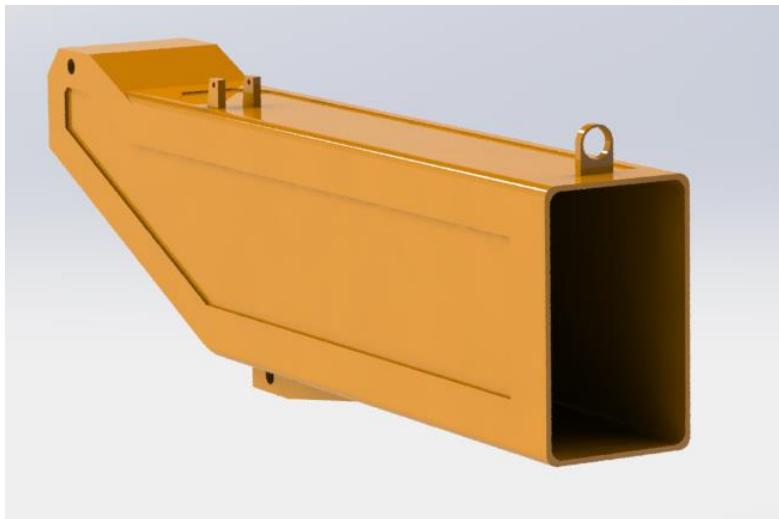


Figura 15: Viga A2.

A continuación se muestra el ensamblaje de los 3 perfiles y sus medidas de altura y longitud:

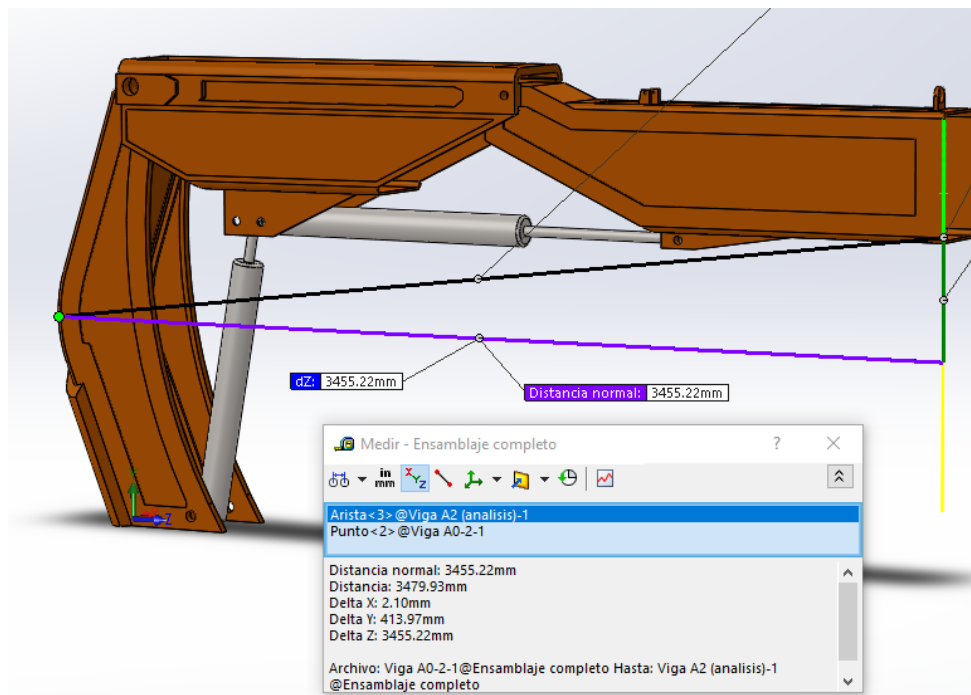


Figura 16: Longitud total perfiles de sujeción.

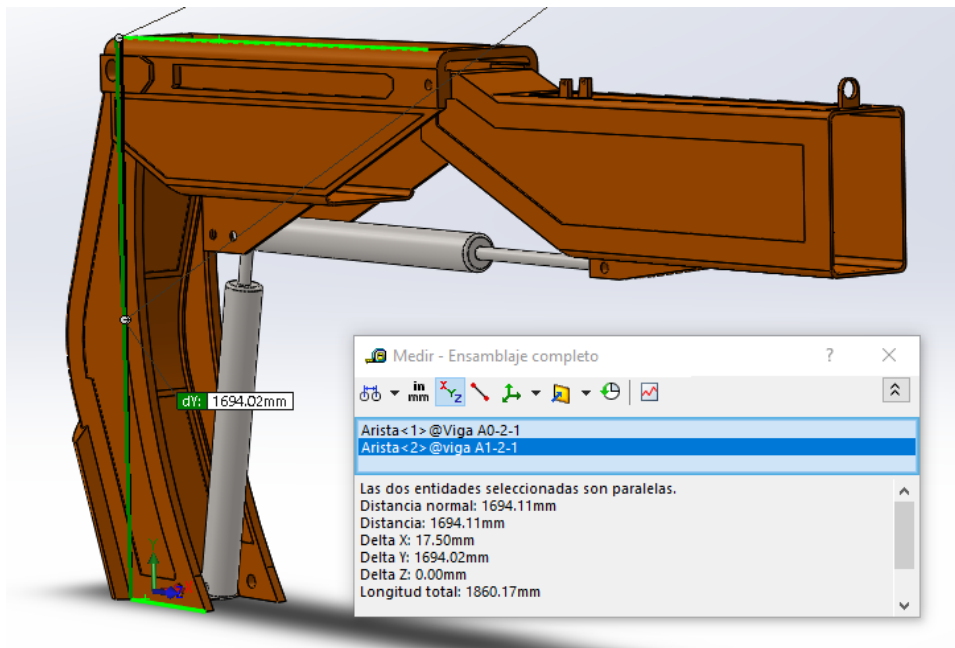


Figura 17: Altura total perfiles de sujeción.

La simulación de la viga A0 se realizó mediante empotramiento en su cara inferior y la aplicación de los esfuerzos correspondientes. Por su parte, se tuvieron que crear unos ensamblajes para las vigas A1 y A2 que representaran fielmente el ángulo de acción de los cilindros hidráulicos de posicionamiento. Se muestra a continuación el ensamblaje y simulación de tensiones de la viga A2:

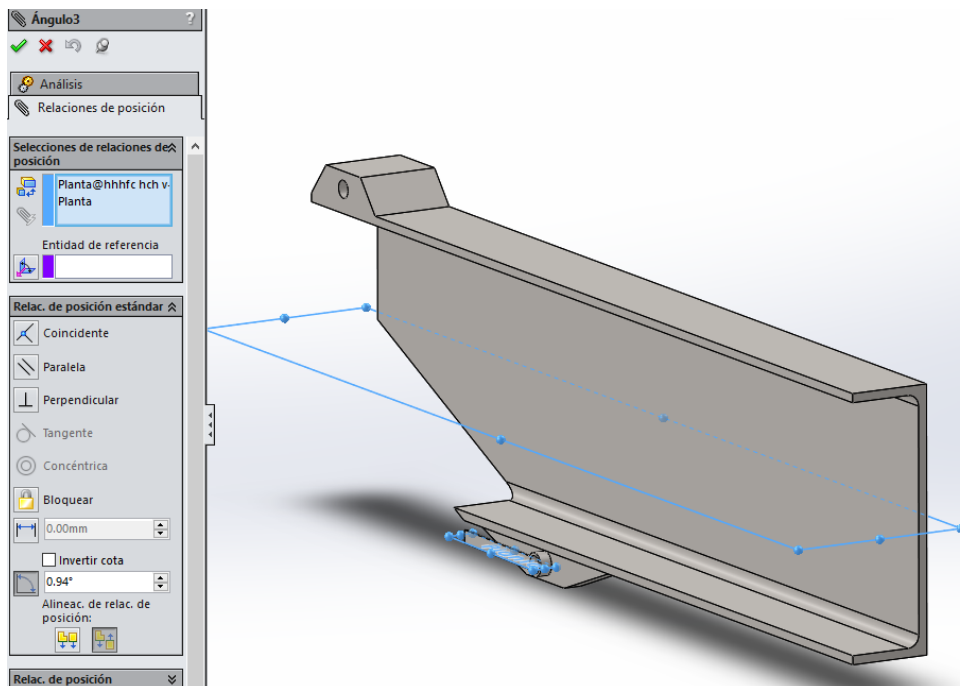


Figura 18: Ensamblaje para análisis de viga A2.

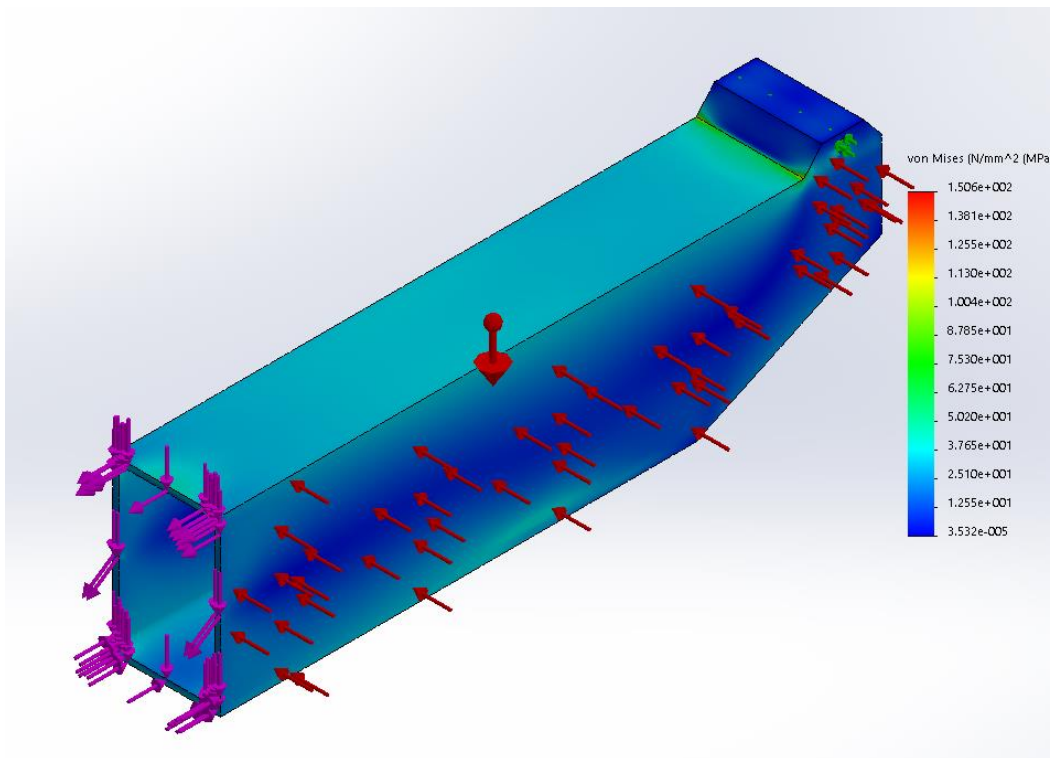


Figura 19: Tensión de Von Mises viga A2.

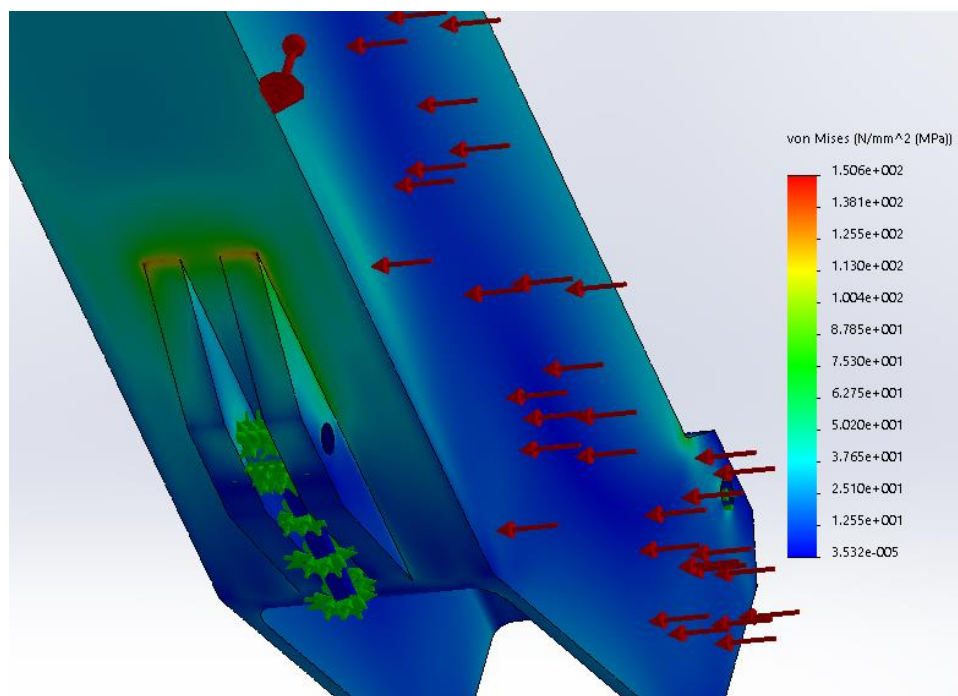


Figura 20: Tensión máxima viga A2.

8.2- Vigas de extensión.

Los perfiles de extensión soportan las reacciones y los momentos flectores generados por las cargas izadas. Son 4 en total:

- Viga E: Última extensión, con una longitud de 500 mm. Sujeta mediante patines a la viga D. La extensión se realiza manualmente, y se fija en las posiciones mínima y máxima mediante pasador.
- Viga D: Tercera extensión, con una longitud de 1000 mm. Sujeta mediante patines a la viga C. La extensión se realiza mediante la acción de un cilindro hidráulico.
- Viga C: Segunda extensión, con una longitud de 1000 mm. Sujeta mediante patines a la viga B. La extensión se realiza mediante la acción de un cilindro hidráulico.
- Viga B: Primera extensión, con una longitud de 1000 mm. Sujeta mediante patines a la viga de sujeción A2. La extensión se realiza mediante la acción de un cilindro hidráulico.

Todas las vigas de extensión han sido calculadas manualmente mediante la simplificación de viga empotrada, y sus resultados comprobados mediante MEFI. Una vez dibujados los diagramas de esfuerzos, se realizó un cálculo del momento resistente necesario:

Extensión 7000 mm , viga E (estado 1)

Momentos flectores

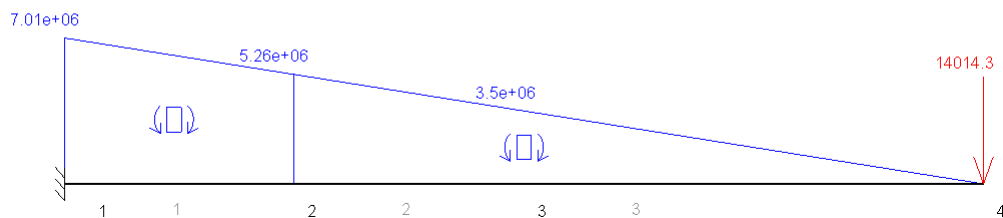


Figura 21: Diagrama de momentos viga E.

$$W_x(\text{mm}^3) = \frac{M_x(\text{N} * \text{mm})}{153,19 \text{ MPa}} = \frac{14014,19 * 500 (\text{N} * \text{mm})}{153,19 \left(\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right)} = 46356,75 \text{ mm}^3$$

Figura 22: Cálculo de momento resistente viga E.

A continuación se realizó una simulación mediante elementos finitos. En esta simulación, se empotró las vigas y se las sometió a los esfuerzos correspondientes:

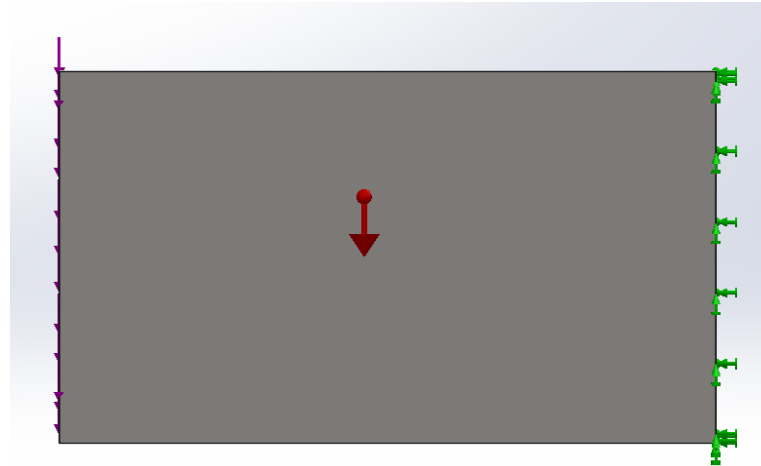


Figura 23: Vista lateral con condiciones de contorno (viga empotrada) viga E.

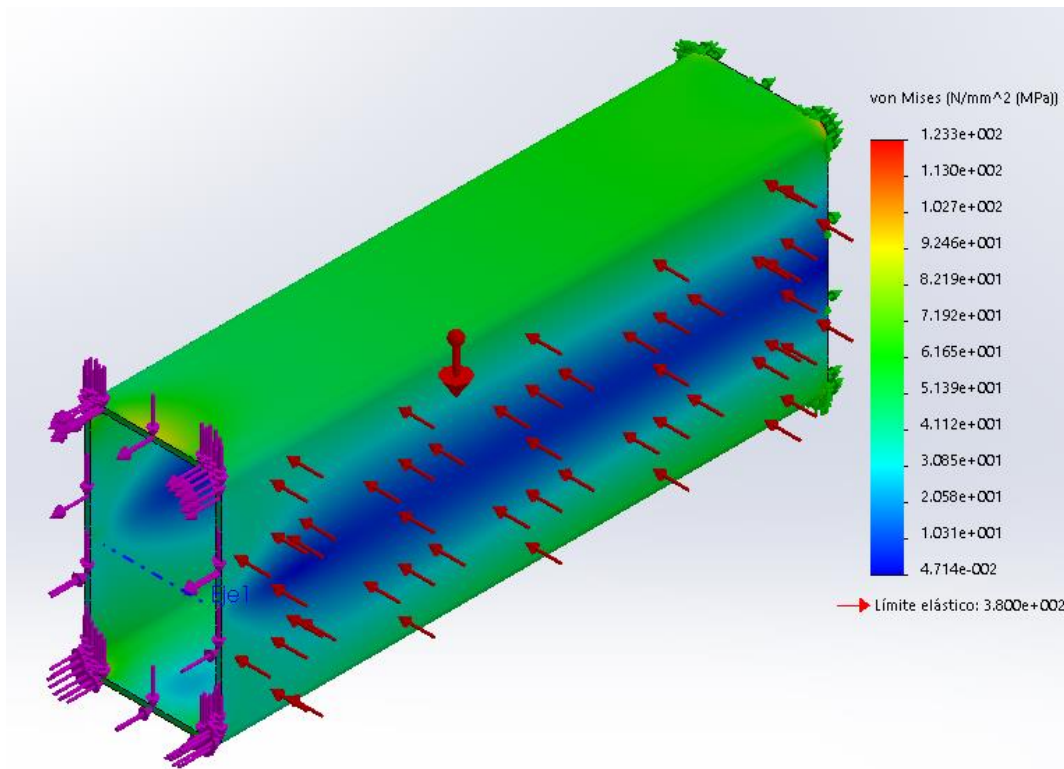


Figura 24: Tensión de Von Mises viga B.

Por último, se realizó un cálculo manual de fatiga y una comprobación mediante elementos finitos:

$$\frac{376 - 136,864}{\log(10^6) - \log(10^3)} = \frac{376 - 143,70}{\log(N) - \log(10^3)}$$

$$N = 820804 \text{ ciclos.}$$

Figura 25: Cálculo manual a fatiga viga C.

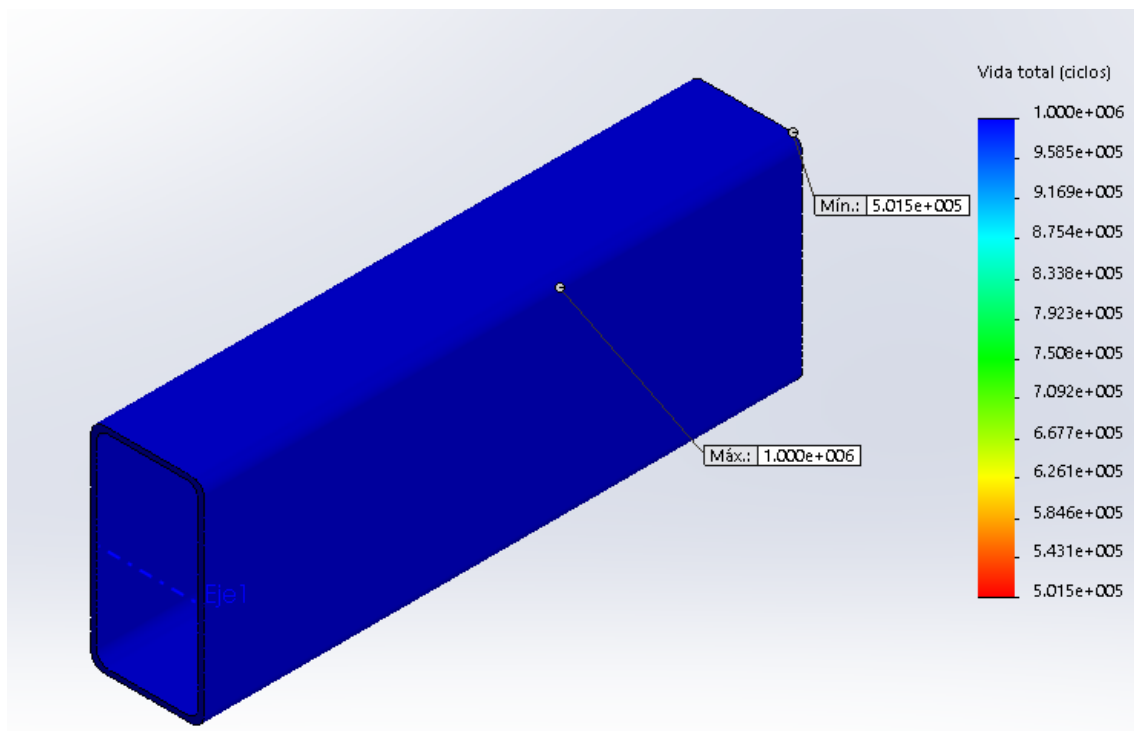


Figura 26: Vida en ciclos del perfil viga C.

8.3- Cilindros de posicionamiento.

El sistema de posicionamiento de la grúa se compone de dos cilindros hidráulicos que permiten la variación de la inclinación de la pluma. Ambos son cilindros de un único sentido, puesto que la gravedad hace el efecto en sentido contrario.



Figura 27: Cilindros de posicionamiento.

El primer cilindro de posicionamiento une la viga A1 con la A2. Permite la inclinación negativa de la pluma, pudiendo variar su ángulo entre -57° y 0° , si bien está limitado como se ha comentado por los cilindros de extensión. Sus dimensiones principales son:

- Fuerza de empuje: 15 toneladas.
- Longitud mínima (cilindro recogido): 920 mm.
- Carrera: 725 mm.
- Longitud máxima (cilindro extendido): 1645 mm.

El segundo de los cilindros de posicionamiento une la viga A2 con la A0. Permite la inclinación positiva de la pluma, con un rango de 0° a $76,48^{\circ}$. Sus dimensiones principales son:

- Fuerza de empuje: 15 toneladas.
- Longitud mínima (cilindro recogido): 985 mm.
- Carrera: 700 mm.
- Longitud máxima (cilindro extendido): 1685 mm.

Ambos cilindros han sido diseñados siguiendo las fórmulas de cálculo resistente del pistón y dimensionado a pandeo del vástago. Para ello, se han tomado como referencia las fórmulas aprendidas en la asignatura de cálculos de elementos de máquinas:

$$A_{pistón} = \frac{F_c * 9,81}{p}$$

Figura 28: Cálculo del área del cilindro.

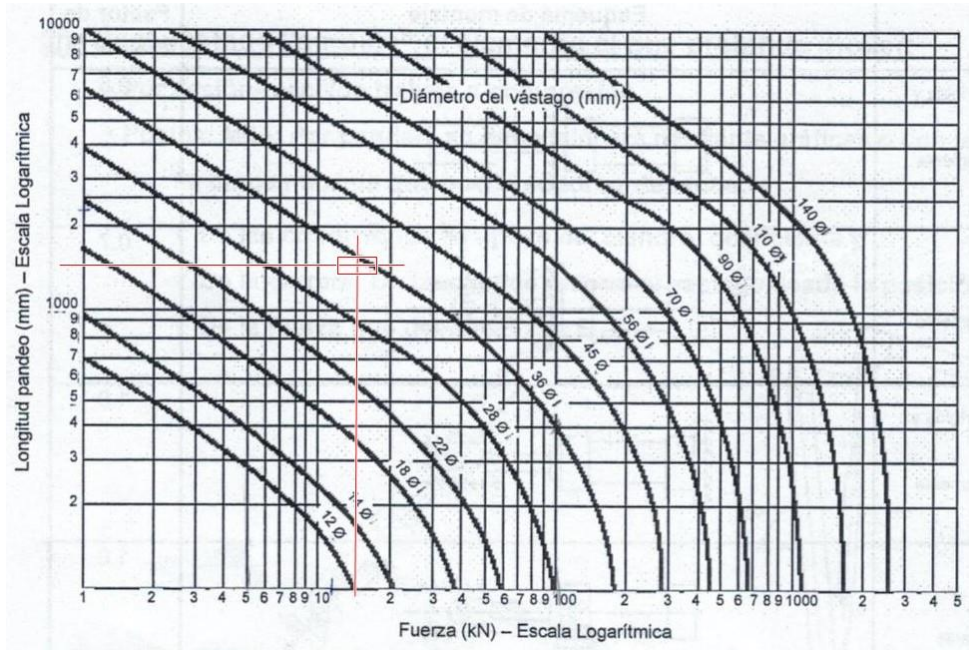


Gráfico 2: Diámetro de vástago a pandeo.

Las longitudes, por su parte, se tomaron mediante una combinación de las necesidades de la grúa (ángulos de posicionamiento) y de las referencias tomadas de las grúas presentes en la industria.

8.4- Cilindros de extensión.

Estos cilindros son los que se encargan de compensar las fuerzas de rozamiento de los perfiles de extensión de manera que sea posible variar la longitud de la pluma. Son 3 cilindros individuales de doble efecto, preparados para levantar la carga máxima según la extensión de la grúa a unas inclinaciones de 80° y -31°:

Ángulo alpha (°)	Ángulo alpha (rad)	F. Cilindro A-B (N)	F. Cilindro B-C (N)	F. Cilindro C-D (N)
31,00	0,54	14970,22	11952,63	9708,94
80,00	1,40	24973,62	19939,61	16196,64

Tabla 1: Ángulos de inclinación mínimo y máximo de la grúa.

Se calcularon dichas fuerzas mediante un diagrama de sólido libre de las vigas, y las fuerzas de empuje y tracción mediante las fórmulas de diseño de cilindros:

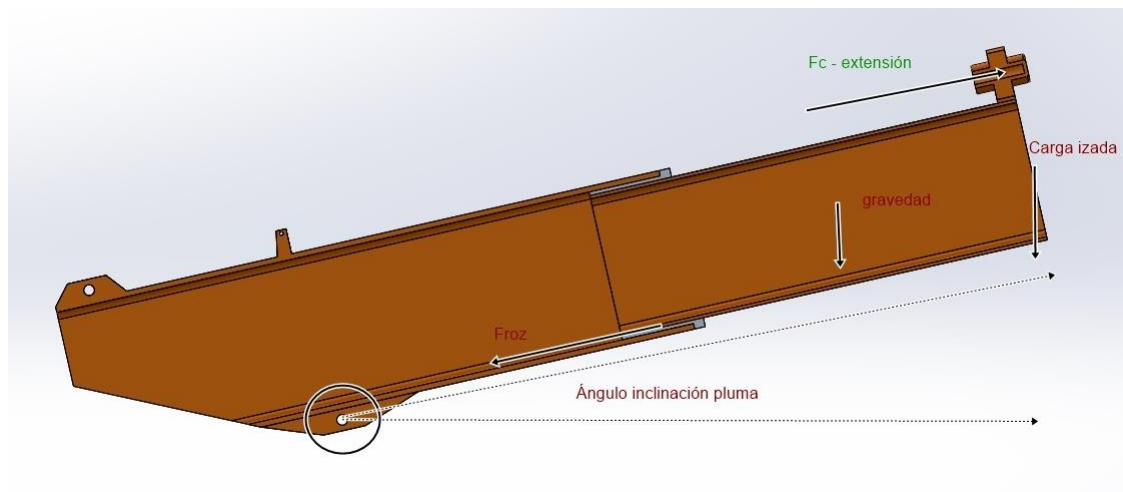


Figura 29: Diagrama sólido libre para cilindros de extensión.

$$F_c = \frac{A_{pistón} * 9,81}{p}$$

Figura 30: Fuerza de empuje.

$$F_r = \frac{p * \frac{\pi * (\phi_{cil} - \phi_{vast})^2}{4}}{9,81}$$

Figura 31: Fuerza de retroceso.

Los soportes que transmiten la fuerza del cilindro a las vigas fueron calculados teniendo en cuenta el momento flector generado por dichas fuerzas:

Cilindro	Fuerza (N)	h (mm)	M (N*mm)	Wx (mm ³)
1	24973,62	65,00	811642,67	5299,31
2	19939,61	86,00	857403,26	5598,09
3	16196,64	190,00	1538681,25	10046,23

Tabla 2: Cálculo de soportes de extensión.

Dos de los cilindros actúan casi en el mismo plano, mientras que el cilindro de la tercera extensión se tuvo que elevar por cuestiones de geometría de la grúa.

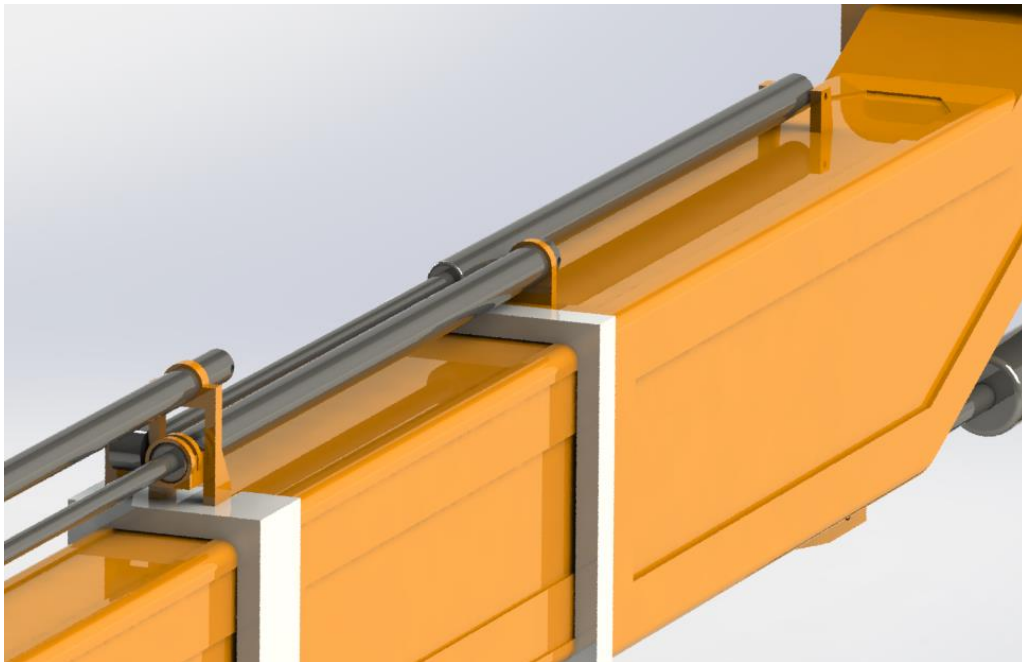


Figura 32: Cilindros de extensión 1 y 2.

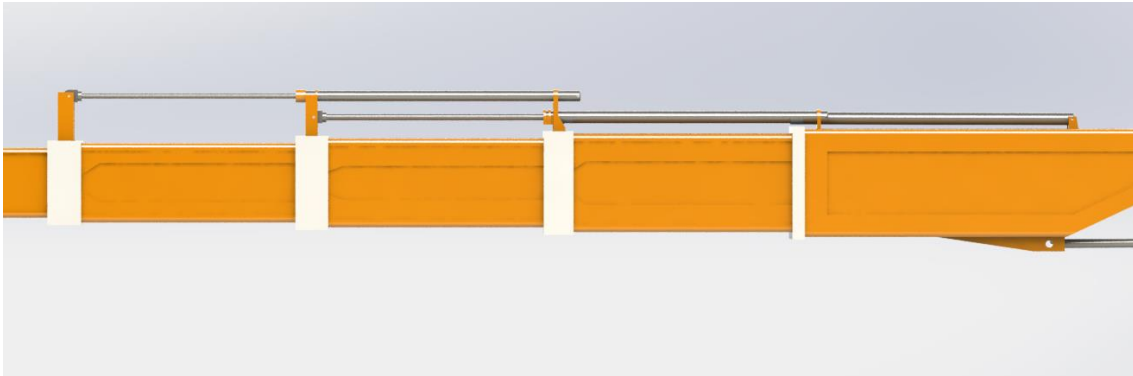


Figura 33: Cilindros de extensión 1,2 y 3.

A continuación se resumen las medidas principales de los cilindros:

- Cilindro 1 y 2: Diámetro de pistón 40 mm, de vástago 25 mm, longitud recogida 1170 mm y carrera 1000 mm.
- Cilindro 3: Diámetro de pistón 32 mm, de vástago 20 mm, longitud recogida 1155 mm y carrera 1000 mm.

8.5- Patines.

Los patines forman parte del sistema de telescopado, y se adaptan a la forma de los perfiles de extensión. Su cometido es tanto el de sujetar a los perfiles como el de centrarlos, de manera que la extensión sea lo más homogénea posible. Están fabricados en el mismo material que el resto de la estructura, y será necesario lubricarlos para alcanzar un coeficiente de fricción de 0,1.

Su longitud es de 400 mm, que equivale a la parte de las vigas que no se extiende para sujetar a la parte restante. El espesor se tomó a partir del máximo de las vigas, añadiéndole 1 mm de margen.

En cuanto a la parte que sujeta el patín a la viga, se diseñó para adaptarse a la forma de la misma, y se le dio un espesor de 30 mm.

El modo de sujeción es mediante tornillos fijados al mismo perfil.

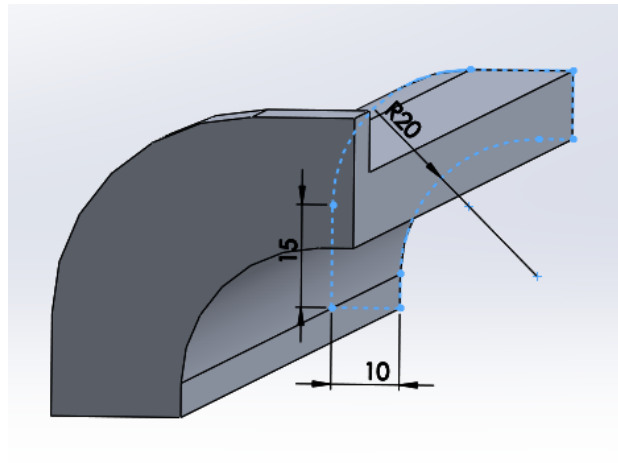


Figura 34: Boceto patín de sujeción viga B.

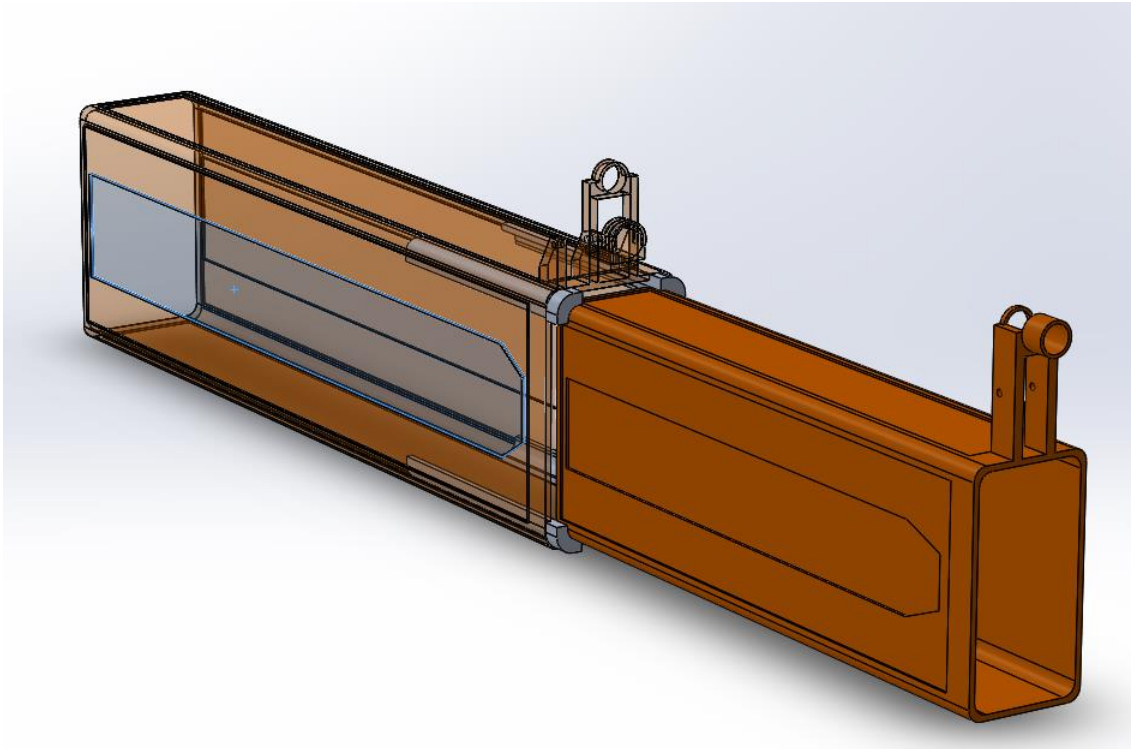


Figura 35: Modo de sujeción de los patines.

Una vez diseñados, los patines fueron simulados mediante un ensamblaje en su condición más desfavorable. Este paso sirvió para comprobar que el diseño había sido correcto y que los patines resistirían los esfuerzos de la grúa:

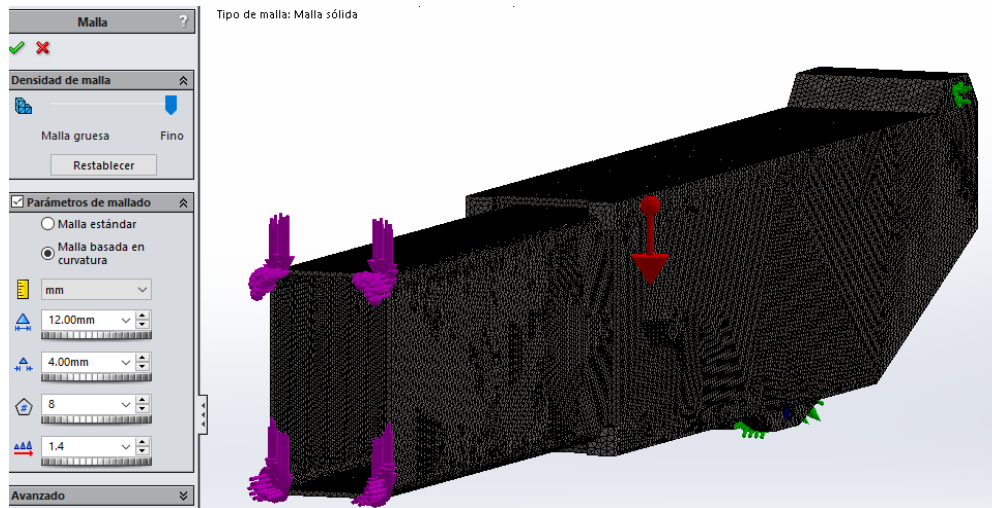


Figura 36: Mallado ensamblaje para análisis de patines.

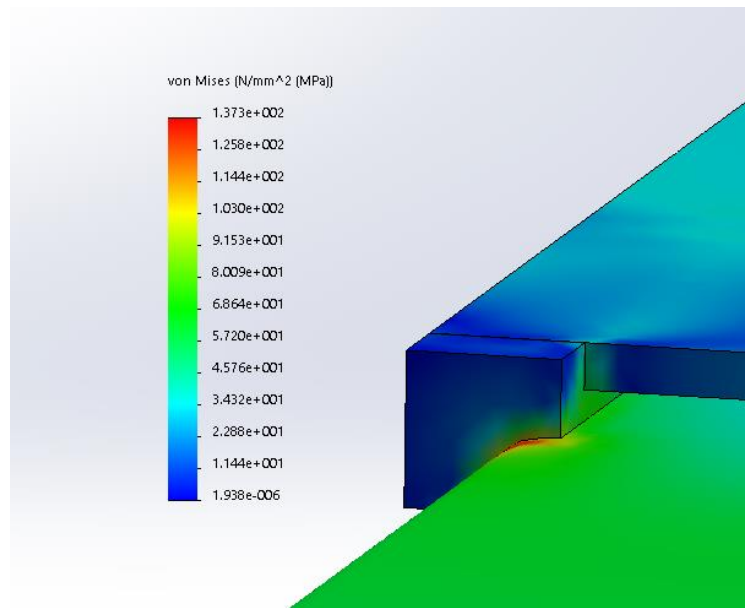


Figura 37: Tensión de Von Mises ensamblaje patines viga B.

8.6- Tapas.

Las tapas son elementos de protección para salvaguardar los perfiles de la intemperie, evitando así que se introduzcan elementos no deseados dentro del sistema de telescopado. Están diseñadas para adaptarse a la forma de los perfiles de extensión, y su modo de sujeción es mediante tornillos concéntricos a los de los patines, de manera que la unión es conjunta.

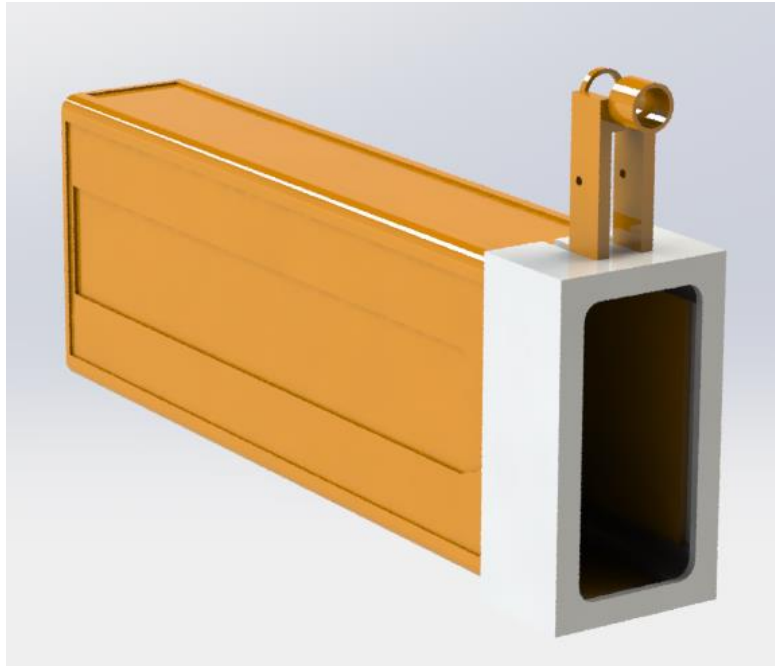


Figura 38: Tapa viga C.

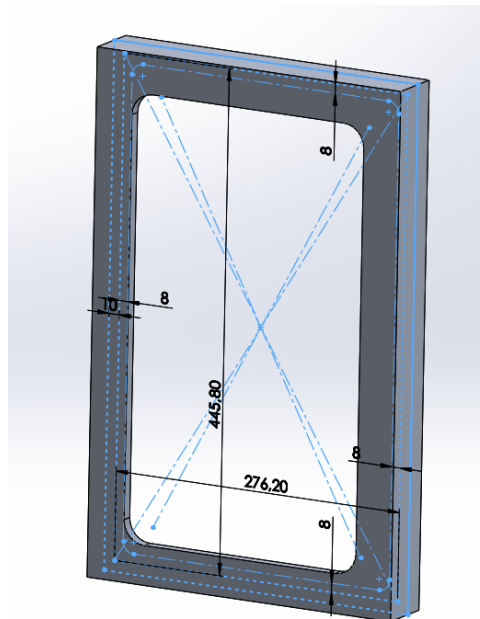


Figura 39: Boceto tapa de la viga A2.

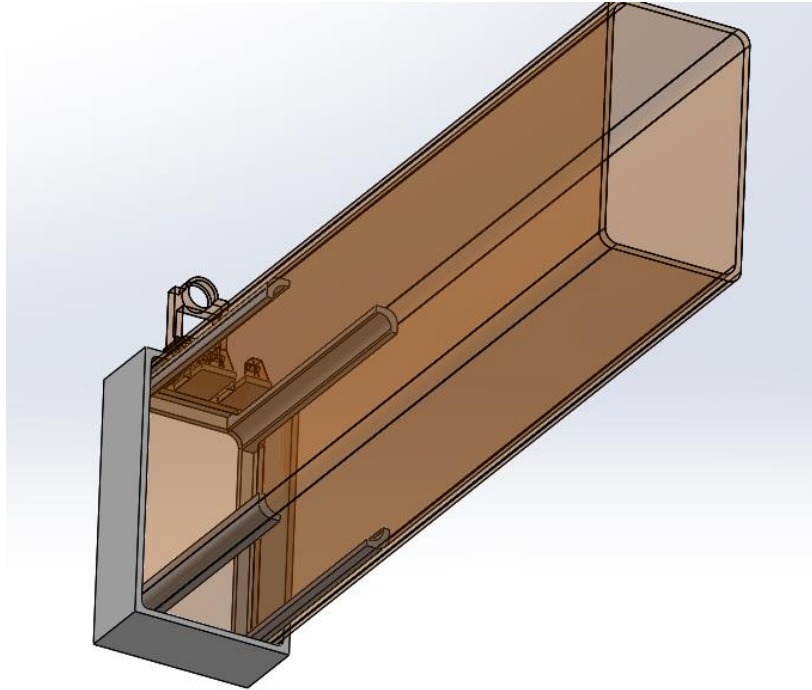


Figura 40: Unión tapa con patines a la viga.

8.7- Pasadores de unión de elementos.

La unión entre los distintos elementos de la grúa se ha realizado mediante pasadores, calculados mediante las fórmulas de cortante y aplastamiento, tomando como valores del cálculo la reacciones producidas por los diferentes esfuerzos a los que está sometida la estructura. Las dimensiones calculadas, no obstante, se variaron para adaptarse a la geometría y a las necesidades de la grúa.

Las mencionadas fórmulas de cálculo son las siguientes:

Cálculo a cortante:

$$r_{pasador} = \sqrt{\frac{0,5 * \varphi * R_{total}}{\tau_{lim} * \pi}}$$

Figura 41: Cálculo a cortante.

Cálculo por aplastamiento:

$$b = \frac{0,5 * R_{total}}{\sigma_{lim} * \phi_{pasador}}$$

Figura 42: Cálculo por aplastamiento.

A continuación se muestra el ejemplo de uno de los pasadores:

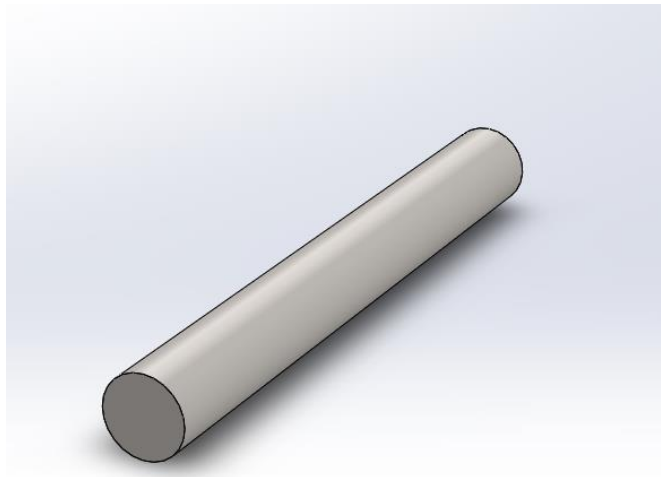


Figura 43: Ejemplo pasador de unión entre viga A1 y A2.

9- Optimización de la grúa.

Una vez se realizó el primer diseño de los componentes de la grúa, fueron sometidos a una optimización de cara a corregir los posibles fallos que tuviesen. Se buscó corregir lo siguiente:

- Reducción de peso.
- Fabricación de los componentes.
- Homogeneidad de espesores.
- Viga A0: Re-diseño completo.

Se partió de los siguientes parámetros a corregir:

- Peso total (acero): 2654 kg
- Espesores máximos: 50 mm y mínimo 4 mm.
- Radios de plegado no homogéneos en viga E, A2, A1 y A0.

Y se llegó a los siguientes:

- Peso total (acero): 938,24 kg (reducción del 64,64%).
- Espesor máximo de 18 mm (viga A0) y mínimo 9 mm (homogeneizado para las vigas restantes).
- Radios de plegado homogéneo en todas las vigas, de 20 mm.

A continuación se muestran dos figuras que resumen la optimización:

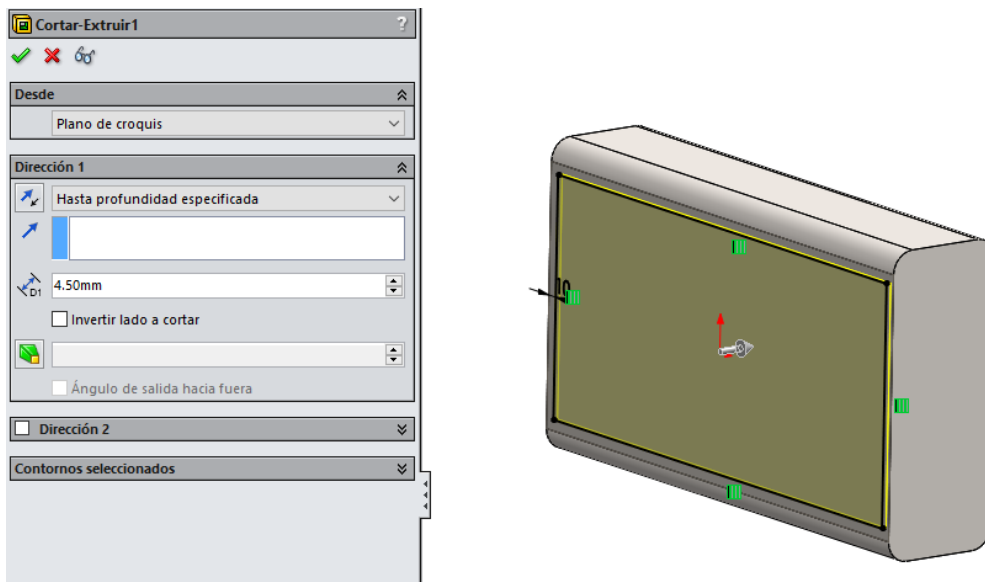


Figura 44: Primer vaciado viga E.

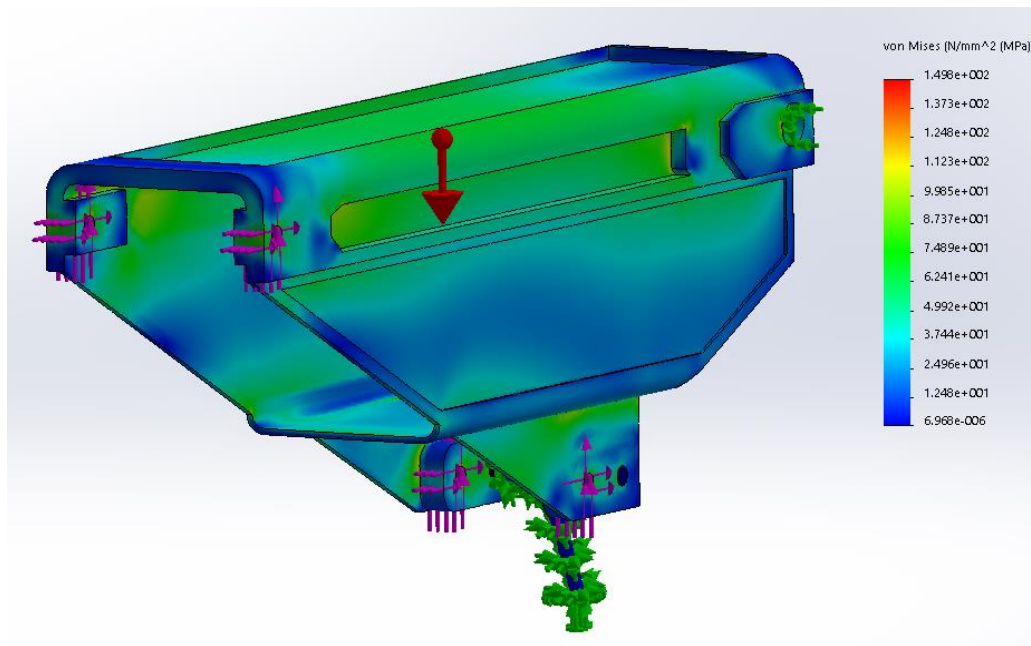


Figura 45: Modificación de tensiones viga A1.

9- Conclusiones.

La viga del presente proyecto ha sido diseñada para cumplir las exigencias de la normativa **DIN 15018**. Sus medidas principales coinciden con respecto a la mayoría de las grúas de la misma capacidad que existen en el mercado.

En una primera fase se diseñaron los componentes sin tener en cuenta problemas de exceso de peso ni aprovechamiento de material. Por ello se llevó a cabo una optimización del diseño para reducir los problemas detectados.

Además de las fases ya mencionadas, aun sería necesaria una fase de diseño de los componentes hidráulicos y eléctricos de la grúa, así como el sistema de giro de la misma.

ANEXO I: Desglose de la Normativa DIN 15018.

1- Introducción.

En este apartado se va a describir el proceso seguido para el desglose de la normativa **DIN 15018** para la identificación y aplicación de las restricciones necesarias para el correcto cumplimiento de la misma.

2- Cláusula 4. Cargas de diseño.

2.1- Sub-cláusula 4.1.4. Efectos de las fuerzas de inercia.

1. Factor de peso propio, φ : El peso propio de grúas móviles y de sus componentes tendrá que ser multiplicado por el factor de peso propio, que se calculará en la tabla siguiente:

Table 1. **Self weight factors φ**

Travelling speed v_F , in m/min		Self weight factor φ
Runways		
with rail joints or irregularities (road)	without rail joints or with welded and machined rail joints	
Up to 60	Up to 90	1,1
Over 60 up to 200	Over 90 up to 300	1,2
Over 200	~	$\geq 1,2$

Tabla 1: Factor de peso propio.

La grúa definida en el presente proyecto entra dentro de la categoría de la izquierda, puesto que su movimiento se va a realizar por carretera, transmitiéndose las irregularidades de la misma a través del chasis del camión.

Como se ha definido anteriormente, la grúa del presente proyecto va a estar limitada a un uso urbano, de manera que la velocidad máxima a la que va a verse sometida es de 50 km/h, que son 833,33 m/min, por encima de los 200 que establece la tabla, de manera que el factor a considerar ha de ser igual o mayor que 1,2.

Por tanto, el factor de peso propio φ a considerar es 1,2. Se tomará en cuenta al realizar la simulación por elementos finitos, ponderando el factor de la gravedad, de manera que:

$$g' = 9,81 * 1,2 = 11,772 \frac{m}{s^2}.$$

2. Factor de carga nominal ψ , y categorías de elevación:

Las cargas elevadas o las tensiones resultantes debido a la elevación de dichas cargas deberán ser multiplicadas por un factor de carga nominal que corresponda según la siguiente tabla:

Table 2. **Nominal load spectrum factor ψ**

Lifting class	Nominal load spectrum factor ψ at hoisting speed v_H , in m/min	
	Up to 90	Over 90
H 1	$1,1 + 0,0022 \cdot v_H$	1,3
H 2	$1,2 + 0,0044 \cdot v_H$	1,6
H 3	$1,3 + 0,0066 \cdot v_H$	1,9
H 4	$1,4 + 0,0088 \cdot v_H$	2,2

Tabla 2: Factor de carga nominal.

Como se puede apreciar, dicho factor depende de la velocidad de elevación, "Vh", y de la categoría de elevación a la que pertenece la grúa, como se puede apreciar en el siguiente gráfico:

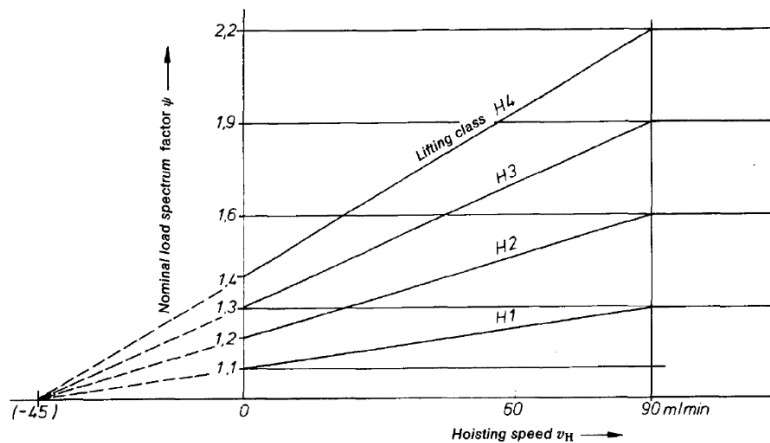


Gráfico 1: Factor de carga nominal / velocidad de elevación.

En el caso de la grúa del presente proyecto, se tomó como velocidad de elevación la velocidad dada por el cilindro hidráulico, en este caso 0,5 m/s, que son 83,33 m/min.

La clase de elevación se obtuvo de la tabla siguiente:

Table 23. Lifting classes (subclause 4.1.4.2) and loading groups (subclause 7.4.2)

Item No.	Type of crane		Lifting classes	Loading groups
1	Hand-operated cranes		H 1	B 1, B 2
2	Erection cranes		H 1, H 2	B 1, B 2
3	Powerhouse cranes		H 1	B 2, B 3
4	Storage cranes	Intermittent operation	H 2	B 4
5	Storage cranes, spreader bar cranes, scrap yard cranes	Continuous operation	H 3, H 4	B 5, B 6
6	Workshop cranes		H 2, H 3	B 3, B 4
7	Bridge cranes, ram cranes	Grab or magnet operation	H 3, H 4	B 5, B 6
8	Casting cranes		H 2, H 3	B 5, B 6
9	Soaking pit cranes		H 3, H 4	B 6
10	Stripper cranes, charging cranes		H 4	B 6
11	Forging cranes		H 4	B 5, B 6
12	Transporter bridges, semi-portal cranes, portal cranes with trolley or slewing crane	Hook operation	H 2	B 4, B 5
13	Transporter bridges, semi-portal cranes, portal cranes with trolley or slewing crane	Grab or magnet operation	H 3, H 4	B 5, B 6
14	Travelling belt bridges with fixed or sliding belt(s)		H 1	B 3, B 4
15	Dockyard cranes, slipway cranes, fitting-out cranes	Hook operation	H 2	B 3, B 4
16	Wharf cranes, slewing cranes, floating cranes, level luffing slewing cranes	Hook operation	H 2	B 4, B 5
17	Wharf cranes, slewing cranes, floating cranes, level luffing slewing cranes	Grab or magnet operation	H 3, H 4	B 5, B 6
18	Heavy duty floating cranes, gantry cranes		H 1	B 2, B 3
19	Shipboard cargo cranes	Hook operation	H 2	B 3, B 4
20	Shipboard cargo cranes	Grab or magnet operation	H 3, H 4	B 4, B 5
21	Tower slewing cranes for the construction industry		H 1	B 3
22	Erection cranes, derrick cranes	Hook operation	H 1, H 2	B 2, B 3
23	Rail-mounted slewing cranes	Hook operation	H 2	B 3, B 4
24	Rail-mounted slewing cranes	Grab or magnet operation	H 3, H 4	B 4, B 5
25	Railway cranes authorized on trains		H 2	B 4
26	Truck cranes, mobile cranes	Hook operation	H 2	B 3, B 4
27	Truck cranes, mobile cranes	Grab or magnet operation	H 3, H 4	B 4, B 5
28	Heavy-duty truck cranes, heavy-duty mobile cranes		H 1	B 1, B 2

Tabla 3: Clasificación de grúas.

El tipo de grúa elegido es el 26: Grúas de camión, grúas móviles, dentro de la operación de gancho. Por tanto la clase de elevación a tomar en consideración es la H2, y los grupos de carga serán B3 y B4.

Volviendo a la tabla 2, aplicamos la fórmula correspondiente a una velocidad de elevación de 83,33 m/min y una clase de elevación H2.

$$\psi = 1,2 + 0.0044 * v_H = 1,567$$

2.2- Sub-cláusula 4.1.6. Fuerzas centrífugas.

Las fuerzas centrífugas deberán ser calculadas sólo teniendo en cuenta el peso propio de los componentes de la pluma. Se considerará la carga elevada como suspendida en la punta de la pluma.

2.3- Sub-cláusula 4.2.1. Cargas generadas por viento.

Para el cálculo de las fuerzas generadas por el viento, deben de tenerse en cuenta dos factores. El primero de ellos es la presión ejercida por el viento sobre la grúa; dicha presión dependerá de la situación geográfica en la que se encuentre o para la que esté diseñada la misma. El segundo factor a tomar en consideración es la resistencia ejercida por el perfil utilizado contra el viento en la situación más desfavorable; esta resistencia se puede conocer a través del coeficiente de arrastre.

Ambos factores se aplican al área resistente como se muestra en la fórmula siguiente:

$$F = A_{resistente} * p * C_f$$

Siendo “p” la presión ejercida por el viento y “Cf” el coeficiente de arrastre.

La presión ejercida por el viento se calcula a través de la fórmula mostrada a continuación:

$$p = 0,000613 * v_s^2$$

Siendo “Vs” la velocidad del viento. Para conocer dicha velocidad se adjunta un mapa de la península ibérica mostrando las 3 zonas que dividen al territorio en este sentido.

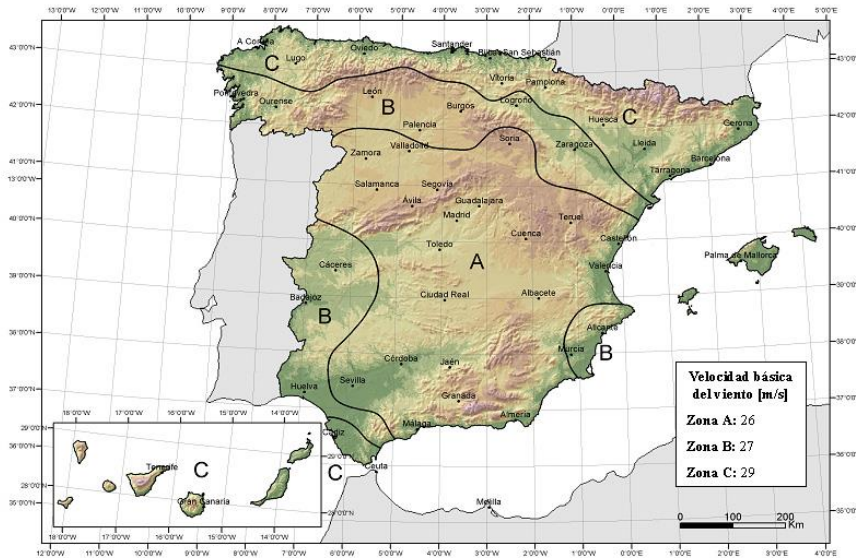


Figura D.1 Valor básico de la velocidad del viento, v_b

Figura 1: Mapa de velocidad de viento en la península ibérica.

La grúa del presente proyecto va a ser diseñada para trabajar en todo el territorio nacional, de manera que la velocidad de viento a utilizar es la más desfavorable, en este caso de 29 m/s que se dará en la zona C.

Para la obtención del coeficiente de arrastre, basta con acudir al diagrama que relaciona las diferentes formas geométricas con el coeficiente correspondiente.

En el caso de la grúa del presente proyecto, el viento podrá actuar principalmente de dos maneras:

- Directamente sobre la cara lateral, en cuyo caso el tipo de forma será "Short cylinder" y C_f igual a 1,15.
- Con ángulo, de manera que la forma pasará a ser "Angled cube" y el coeficiente 0,80.

Para el diseño se ha optado por elegir la forma más restrictiva, por tanto el coeficiente de arrastre a tener en cuenta es 1,15.

Shape	Drag Coefficient
Sphere	0.47
Half-sphere	0.42
Cone	0.50
Cube	1.05
Angled Cube	0.80
Long Cylinder	0.82
Short Cylinder	1.15
Streamlined Body	0.04
Streamlined Half-body	0.09

Measured Drag Coefficients

Figura 2: Coeficientes de arrastre.

Ahora se aplican ambos factores a la fórmula:

$$\boxed{F} = A_{resistente} * 0,000613 * 29^2 * 1,15 = \boxed{0,593 * A_{resistente} \left(\frac{kN}{m^2} \right)}$$

2.4- Sub-cláusula 4.3.3. Cargas de prueba para verificación de estabilidad.

La grúa del presente proyecto no requiere una verificación de estabilidad, puesto que dicha verificación dependerá del vehículo al que vaya instalado. Este proyecto termina con los cálculos resistivos y de fatiga de los componentes, de manera que los cálculos de estabilidad deberán de realizarlo los técnicos encargados de la instalación de la grúa y reforma del vehículo según la normativa **DIN 15019 – 1**.

3- Cláusula 5. Casos de carga.

Las cargas principales, cargas adicionales y cargas especiales descritas en la cláusula anterior están clasificadas en la tabla siguiente según los tipos H, HZ y HS respectivamente.

Table 7. Load cases

Types of load		Symbol	Normal load cases								Special load cases			
4.1 Main loads	4.1.1 Self weight	G	$\varphi \cdot G$	$\varphi \cdot G$	G	$\varphi \cdot G$	G	G	$\varphi \cdot G$	G	$\varphi \cdot G$	G	G	
	4.1.4.1 Self weight factor	φ	$\varphi \cdot Gm$	$\varphi \cdot Gm$	Gm	$\varphi \cdot Gm$	$\varphi \cdot Gm$	$\varphi \cdot Gm$	$\varphi \cdot Gm$	$\varphi \cdot Gm$	$\varphi \cdot Gm$	$\varphi \cdot Gm$	$\varphi \cdot Gm$	
	4.1.2 Loads arising from bulk materials in bins and on continuous conveyors	Gm	$\varphi \cdot Gm$	$\varphi \cdot Gm$	Gm	$\varphi \cdot Gm$	$\varphi \cdot Gm$	$\varphi \cdot Gm$	$\varphi \cdot Gm$	$\varphi \cdot Gm$	$\varphi \cdot Gm$	$\varphi \cdot Gm$	$\varphi \cdot Gm$	
	4.1.3 Lifted load	P	$\psi \cdot P$	$\psi \cdot P$	$\psi \cdot P$	$\psi \cdot P$	$\psi \cdot P$	$\psi \cdot P$	$\psi \cdot P$	$\psi \cdot P$	$\psi \cdot P$	$\psi \cdot P$	$\psi \cdot P$	
	4.1.4.2 Nominal load spectrum factor	ψ	$\psi \cdot P$	$\psi \cdot P$	$\psi \cdot P$	$\psi \cdot P$	$\psi \cdot P$	$\psi \cdot P$	$\psi \cdot P$	$\psi \cdot P$	$\psi \cdot P$	$\psi \cdot P$	$\psi \cdot P$	
	4.1.4.3 Dropping or sudden setting down of useful loads	$-0,25 \cdot \psi \cdot P$	$-0,25 \cdot \psi \cdot P$	$-0,25 \cdot \psi \cdot P$	$-0,25 \cdot \psi \cdot P$	$-0,25 \cdot \psi \cdot P$	$-0,25 \cdot \psi \cdot P$	$-0,25 \cdot \psi \cdot P$	$-0,25 \cdot \psi \cdot P$	$-0,25 \cdot \psi \cdot P$	$-0,25 \cdot \psi \cdot P$	$-0,25 \cdot \psi \cdot P$	$-0,25 \cdot \psi \cdot P$	
	4.1.3 Lifted load without effect of useful load	Po	Po	Po	Po	Po	Po	Po	Po	Po	Po	Po	Po	
	4.1.5 Inertia forces arising from driving mechanisms	Trolley travel	Ka	Ka	Ka	Ka	Ka	Ka	Ka	Ka	Ka	Ka	Ka	Ka
		Crane travel	Kr	Kr	Kr	Kr	Kr	Kr	Kr	Kr	Kr	Kr	Kr	Kr
		Slewing	Dr	Dr	Dr	Dr	Dr	Dr	Dr	Dr	Dr	Dr	Dr	Dr
Luffing		Wp	Wp	Wp	Wp	Wp	Wp	Wp	Wp	Wp	Wp	Wp	Wp	
4.1.6 Centrifugal forces	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z		
4.2 Additional loads	4.2.1 Wind load, with crane	in service	Wi	Wi	Wi	Wi	Wi	Wi	Wi	Wi	Wi	Wi	Wi	
		out of service	Wa	Wa	Wa	Wa	Wa	Wa	Wa	Wa	Wa	Wa	Wa	
4.2.2 Forces arising from skewing	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S		
4.3 Special loads	4.3.1 Tilting force arising in crane trolleys with positive guidance of the lifted load	Ki	Ki	Ki	Ki	Ki	Ki	Ki	Ki	Ki	Ki	Ki	Ki	
	4.3.2 Buffer forces	Pu	Pu	Pu	Pu	Pu	Pu	Pu	Pu	Pu	Pu	Pu	Pu	
	4.3.3 Test loads	Small	Pk	Pk	Pk	Pk	Pk	Pk	Pk	Pk	Pk	Pk	Pk	
Large		Pg	Pg	Pg	Pg	Pg	Pg	Pg	Pg	Pg	Pg	Pg		

Tabla 4: Casos de carga.

4- Cláusula 6. Cálculo.

4.1- Sub-cláusula 6.4 Materiales.

A continuación se muestra la tabla con los materiales permitidos en el diseño de los perfiles de la grúa. Se pueden utilizar distintos materiales siempre que se demuestre que sus propiedades mecánicas, químicas y su soldabilidad (si fuese necesario) estén garantizadas por el fabricante.

Table 8. Characteristic values of steel grades used for the calculation

Steel grade		Characteristic values			α_T mm mm · K
		Yield stress σ_S N/mm ²	Modulus of elasticity (tension, compression) E N/mm ²	Shear modulus G N/mm ²	
Brief designation	Specified in				
Structural steel St 37 *)	DIN 17 100	240	210 000	81 000	12 · 10 ⁻⁶ 12 · 10 ⁻⁶
Tube steel St 35 *)	DIN 1629 Parts 1 and 3				
Structural steel St 52-3	DIN 17 100	360	210 000	81 000	12 · 10 ⁻⁶ 12 · 10 ⁻⁶
Rail steel with a tensile strength of not less than 600 N/mm ²					
*) Covers all quality groups, steelmaking and casting processes.					

Tabla 5: Materiales de fabricación.

Para los cálculos de los perfiles de la grúa del presente proyecto, se ha decidido utilizar el grado de acero estructural más alto, ya que uno de los objetivos principales es que las dimensiones de la grúa sean lo menores posible. Por esto se ha elegido el acero St52-3, cuya designación más actual es s355, siendo sus propiedades más relevantes para el presente proyecto:

- Límite elástico, σ_F : 355 MPa.
- Límite de tracción, σ_R : 470 MPa.

Para los elementos de sujeción se utilizará, en el caso del acero estructural St52, RSt 44-2 para pasadores y tornillos de clase 5.6.

5- Cláusula 7. Verificación y análisis.

5.1- Sub-cláusula 7.2.1. Tensiones permisibles y casos de carga.

En la siguiente tabla se muestran los valores límite de las tensiones clasificadas según el tipo de acero utilizado, que corresponden en el caso de tensión flectora con un coeficiente de seguridad de 1,5 en el caso de carga H y 1,33 en el caso HZ.

Table 10. Permissible stresses in members for the general stress analysis and the verification of stability

Steel grade of member		Load case	Permissible comparison stress $zul \sigma_z$ N/mm ²	Permissible tensile stress	Permissible compressive stress $zul \sigma_d$ N/mm ²	Permissible shear stress $zul \tau$ N/mm ²
Symbol	Specified in					
St 37*)	DIN 17 100	H	160		140	92
		HZ	180		160	104
St 52-3	DIN 17 100	H	240		210	138
		HZ	270		240	156

*) Covers all quality groups, steelmaking and casting processes.

Tabla 6: Tensiones permisibles.

Las soldaduras deberán presentar unas propiedades mecánicas iguales a las del material que están soldando, como se especifica en la siguiente tabla:

Table 11. Permissible stresses in welds for the general stress analysis

Steel grade of welded member		Load case	Permissible comparison value	Permissible tensile stress for transverse loading $zul \sigma_{wz}$ N/mm ²			Permissible compressive stress for transverse loading $zul \sigma_{wd}$ N/mm ²		Permissible shear stress $zul \tau_w$ N/mm ²
Symbol	Specified in			All types of weld	Butt weld, double bevel butt weld; special quality	Double bevel butt weld; standard quality	Fillet weld	Butt weld, double bevel butt weld	
St 37*)	DIN 17 100	H	160	140	113	160	130	113	
		HZ	180	160	127	180	145	127	
St 52-3	DIN 17 100	H	240	210	170	240	195	170	
		HZ	270	240	191	270	220	191	

*) Covers all quality groups, steelmaking and casting processes.

Tabla 7: Tensiones permisibles en soldaduras.

Las sujeciones, por su parte, deberán de cumplir las siguientes especificaciones:

Table 12. Permissible stresses in fasteners for the general stress analysis

Type of connection		Steel grade/ property class		Load case	Permissible shear stress $zul \tau_a$ N/mm ²	Permissible bolt or rivet bearing stress $zul \sigma_1$ N/mm ²	Permissible tensile stress $zul \sigma_2$ N/mm ²		
Fastener	Joint		Specified in						
Rivets	Single shear	USt 36	DIN 17 111	H	0,6 · zul σ_d	1,5 · zul σ_d	84	210	(30)
				HZ			96	240	
		RSt 44-2	DIN 17 111	H			126	315	(45)
				HZ			144	360	
	Multiple shear	USt 36	DIN 17 111	H	0,8 · zul σ_d	2 · zul σ_d	113	280	(30)
				HZ			128	320	
		RSt 44-2	DIN 17 111	H			168	420	(45)
				HZ			192	480	
Fit bolts	Single shear	4.6	DIN 267 Part 3	H	0,6 · zul σ_d	1,5 · zul σ_d	84	210	100
				HZ			96	240	110
		5.6	DIN 267 Part 3	H			126	315	140
				HZ			144	360	154
	Multiple shear	4.6	DIN 267 Part 3	H	0,8 · zul σ_d	2 · zul σ_d	112	280	100
				HZ			128	320	110
		5.6	DIN 267 Part 3	H			168	420	140
				HZ			192	480	154
Non-fit bolts	4.6	DIN 267 Part 3	H	-	-	70	160	100	
			HZ			80	180	110	
	5.6	DIN 267 Part 3	H			70	160	140	
			HZ			80	180	154	
Diameter to be considered for				Diameter of hole					
rivets				Diameter of unthreaded shank				Minor thread diameter	
bolts									
The tensile stress values for rivets given in brackets are permitted for exceptional cases only.									

Tabla 8: Tensiones permisibles en sujeciones.

Por tanto los pasadores tendrán que soportar un valor máximo de:

- A cortante: 168 MPa.
- A compresión: 210 MPa.
- A flexión: 140 MPa.

5.2- Sub-cláusula 7.4.1. Verificación de fuerza en servicio. Restricciones a fatiga.

Las tensiones permisibles para un número determinado de ciclos serán iguales para cada grupo de carga.

El número de ciclos “N” viene dado por la siguiente tabla:

Table 14. Loading groups according to stress cycle ranges and stress collectives

Stress cycle range	N1	N2	N3	N4
Total number of anticipated stress cycles \hat{N}	Over $2 \cdot 10^4$ up to $2 \cdot 10^5$	Over $2 \cdot 10^5$ up to $6 \cdot 10^5$	Over $6 \cdot 10^5$ up to $2 \cdot 10^6$	Over $2 \cdot 10^6$
	Occasional irregular use with long periods of non-use	Regular use in intermittent operation	Regular use in continuous operation	Regular use in heavy-duty continuous operation
Stress collective	Loading group			
S ₀ , very light	B 1	B 2	B 3	B 4
S ₁ , light	B 2	B 3	B 4	B 5
S ₂ , medium	B 3	B 4	B 5	B 6
S ₃ , heavy	B 4	B 5	B 6	B 6

Tabla 9: Grupos de carga por fatiga.

Si recordamos la sub-cláusula 4.1.4.2, los grupos de carga de la grúa son B3 y B4, los correspondientes a las grúas de camión y grúas móviles con operación de gancho.

El rango del ciclo de cargas corresponde en este caso con un N2, “*Uso regular en operación intermitente*”, ya que la grúa del presente proyecto no va a ser sometida a unas cargas de trabajo continuas, pero sí estará operativa todos los días de la semana.

Con estos datos, comprobamos que la grúa del presente proyecto tiene que diseñarse para un número de ciclos comprendidos entre 200000 y 600000.

Para el cálculo a fatiga, necesitamos conocer la gráfica S/N del material. Dicha gráfica se dibuja mediante el cálculo de los límites superior e inferior del material, aplicados a la forma de la viga.

Límite superior (1000 ciclos):

$$\text{Lím sup} = 0,8 * \sigma_R = 0,8 * 470 = 376 \text{ MPa.}$$

Límite inferior (1000000 ciclos):

$$\sigma_{AF} = \sigma'_{AF} * k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_g$$

Siendo:

- σ'_{AF} límite del ensayo de fatiga en probeta, de valor:

$$\sigma'_{AF} = 0,5 * \sigma_R = 0,5 * 470 = 235 \text{ MPa.}$$

- K_a coeficiente corrector de superficie. Este coeficiente se obtiene de la siguiente gráfica:

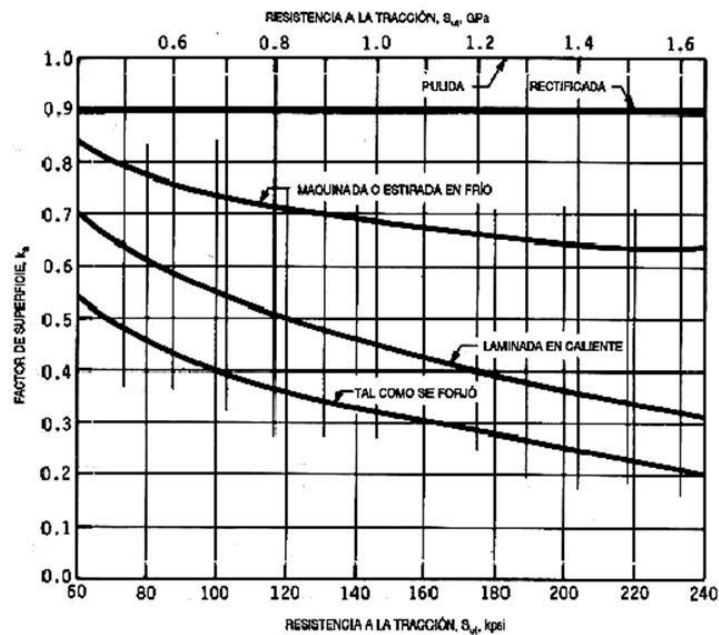


Gráfico 2: Coeficiente corrector de superficie.

Tomamos un valor de 0,65.

- K_b factor de tamaño. En nuestro caso lo tomamos como 1, ya que al tratarse de perfiles de un tamaño ya considerable las tensiones se estabilizan.
- K_c coeficiente de confianza o seguridad funcional. Partimos de la fórmula:

$$k_c = 1 - 0,08 * D$$

Siendo D el factor de multiplicación dependiente de la relación de supervivencia por 100. Se elige una relación de 90, lo que nos da un factor de 1,3 y un coeficiente de 0,896.

- K_d influencia de la temperatura. Tomamos el valor de 1.
- K_e concentración de tensiones. Las vigas están compuestas por perfiles rectangulares sin ningún tipo de concentrador, de manera que tomamos un valor de 1.
- K_g coeficiente de efectos diversos. Tomamos un valor de 1.

Por tanto:

$$\sigma_{AF} = 235 * 0,65 * 0,896 = 136,864 \text{ MPa.}$$

Obtenemos la gráfica S/N del material adaptado a los perfiles:

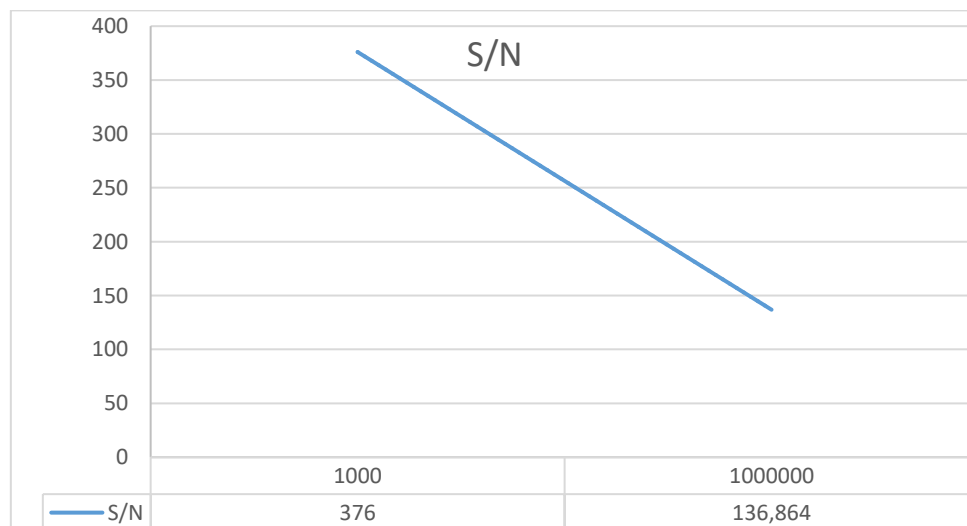


Gráfico 3: Curva S/N de acero estructural St 52-3.

Además de las cláusulas y sub-cláusulas explicadas en este apartado, las siguientes han sido tenidas en cuenta una vez realizados los primeros cálculos resistivos, de manera que estarán aplicadas en el apartado correspondiente a dichos cálculos.

- 4.1.6 Fuerzas centrífugas.
- 4.2.2 Fuerzas de rozamiento debidas a la inclinación de la pluma.
- 7.3 Seguridad ante pandeo.

6- Coeficiente de seguridad por simulación de elementos finitos.

Además de los coeficientes de seguridad establecidos por la normativa, para la simulación por elementos finitos se decidió usar, para aquellos componentes afectados por el movimiento de la pluma, un coeficiente de seguridad adicional para compensar el posible tamaño excesivo de los elementos de simulación. Se decidió tomar como valor de este coeficiente el mismo valor del factor de carga nominal, es decir, 1,567.

ANEXO II: Cálculos Justificativos.

1- Introducción.

El diseño de los componentes de la grúa del presente proyecto ha sido realizado tanto mediante cálculos teóricos como por simulación de elementos finitos, realizándose los cambios oportunos en la geometría para no sobrepasar la tensión límite establecida por la normativa.

2- Primer cálculo – Valores de carga según extensión de la pluma.

Como ya se ha descrito en apartados anteriores, la grúa del presente proyecto tiene una extensión máxima teórica de aproximadamente 7 metros y necesitará compensar un momento flector de 10 Toneladas por metro. Se tomó como longitud mínima 3,5 metros que, sumados a las 3 extensiones de 1 metro y a la extensión manual de 0,5 metros suman el total de 7 metros.

Se realizó un primer cálculo teórico para conocer los valores de carga que la grúa sería capaz de compensar según la extensión.

Partiendo de la definición de momento igual a fuerza por distancia, se hizo una tabla en Excel con un primer barrido que abarcaba de -50° (grúa mirando hacia abajo) hasta $+50^{\circ}$ (grúa mirando hacia arriba). Obviamente la situación más desfavorable para la grúa se daba en posición horizontal, de manera que el diseño de los componentes se basó en estos resultados.

ANGULO DE ELEVACION (°)	ANGULO ELEVACION (rad)	EXTENSION PLUMA (mm)	PESO MAXIMO (N)	PESO MAXIMO (Kg)
0	0,00	1000,00	98100,00	10000,00
		2000,00	49050,00	5000,00
		3500,00	28028,57	2857,14
		4500,00	21800,00	2222,22
		5500,00	17836,36	1818,18
		6500,00	15092,31	1538,46
		7000,00	14014,29	1428,57

Tabla 1: Carga máxima por extensión.

Una vez conocido el valor máximo que la grúa puede compensar en su máxima extensión, se pueden comenzar a diseñar los componentes. La situación más desfavorable para dichos componentes es precisamente para la de máxima extensión de la pluma, ya que el momento flector se transmite de extensión a extensión aumentando en valor.

3- Componentes estructurales - Extensiones.

Como se ha comentado en el apartado anterior, la grúa está compuesta por 4 extensiones, de manera que se puede variar la longitud de la misma según las necesidades de cada operación a realizar.

De las 4 extensiones, 3 tienen una longitud de 1000 mm, mientras que la última extensión es manual y tiene una longitud de 500 mm.

Se ha elegido para el diseño de las extensiones un perfil de tubo rectangular, con una relación "altura/base" de 2 en el cálculo teórico, si bien esta relación se verá modificada por la misma geometría de la grúa.

Tomando como base las fórmulas de inercia se puede calcular el módulo resistente necesario para los perfiles, y con ello se pueden estimar los parámetros de base, altura y espesor.



Figura 1: Perfil de tubo rectangular.

Para el cálculo de inercia, se dividió el perfil en 3 tipos de sub-componente:

- Sub-componente lateral de dimensiones $e \cdot (h-2e)$ -> 1
- Sub-componente horizontal de dimensiones $(b-2e) \cdot e$ -> 2
- Sub-componente en las esquinas de dimensiones $e \cdot e$ -> 3

Siendo las fórmulas utilizadas:

$$I_x = 2 * (I_{x1} + A_1 * d_{y1}) + 2 * (I_{x2} + A_2 * d_{y2}) + 4 * (I_{x3} + A_3 * d_{y3})$$

$$I_y = 2 * (I_{y1} + A_1 * d_{x1}) + 2 * (I_{y2} + A_2 * d_{x2}) + 4 * (I_{y3} + A_3 * d_{x3})$$

$$I_{x_{1,2}} = \frac{1}{12} * b * h^3$$

$$I_{y_{1,2}} = \frac{1}{12} * h * b^3$$

$$I_{x,y_3} = \frac{1}{12} * e^4$$

Aplicando las dimensiones de los sub-componentes queda:

$$I_x = 2 * \left[\frac{1}{12} * (b - 2e) * e^3 + (b - 2e) * e * \frac{1}{2} * (h - e) \right] + 2 * \left[\frac{1}{12} * e * (h - 2e)^3 \right] + 4 * \left[\frac{1}{12} * e^4 + e^2 * \frac{1}{2} * (h - e) \right]$$

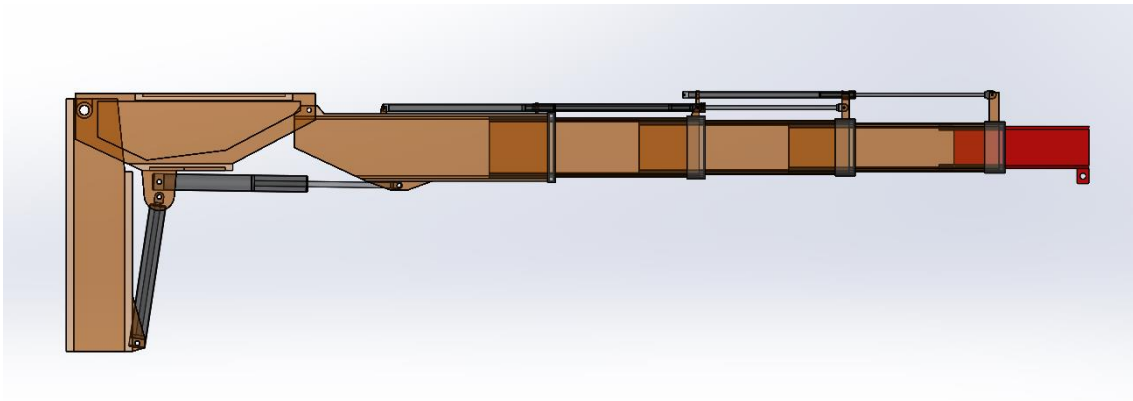
$$I_y = 2 * \left[\frac{1}{12} * e * (b - 2e)^3 \right] + 2 * \left[\frac{1}{12} * (h - 2e) * e^3 + (h - 2e) * e * \frac{1}{2} * (b - e) \right] + 4 * \left[\frac{1}{12} * e^4 + e^2 * \frac{1}{2} * (b - e) \right]$$

Ambas fórmulas resultantes se introdujeron en una tabla Excel, en la que se hizo una variación de las dimensiones del perfil. Por último, aplicamos la fórmula del módulo resistente:

$$W_x = \frac{I_x}{y_{max}} = \frac{I_x}{h/2} = \frac{2 * I_x}{h}$$

$$W_y = \frac{2 * I_y}{b}$$

3.1- Cuarta extensión – Perfil viga E.



Este perfil es el menos sometido a variaciones de carga y también el que menor modulo flector necesitará, al ser el de menor longitud y la última extensión. Las cargas a las que va a estar sometido son las siguientes:

- Peso propio.
- Carga a elevar, de valor máximo 14014,29 N.
- Viento, de valor máximo $592,94 \cdot A$ N/m².

Cálculos teóricos

Representación de los diagramas de sólido libre simplificados mediante MEFI:

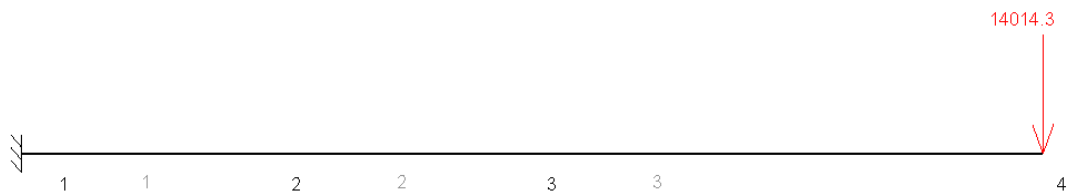


Figura 2: Representación teórica viga E.

Para este cálculo teórico, se ha empotrado a la barra en un extremo y se le ha dado una longitud de 500 mm, que será la longitud que tendrá esta extensión. En la siguiente imagen se muestran dicha longitud dividida en 3 tramos:

PUNTOS			
%	pun	X	Y
1	1	0.0	0.0
2	2	125.0	0.0
3	3	250.0	0.0
4	4	500.0	0.0

Figura 3: Longitud viga E.

Una vez creada la barra lanzamos el cálculo de los esfuerzos.

Diagramas de esfuerzos:

Extensión 7000 mm , viga E (estado 1)

Momentos flectores

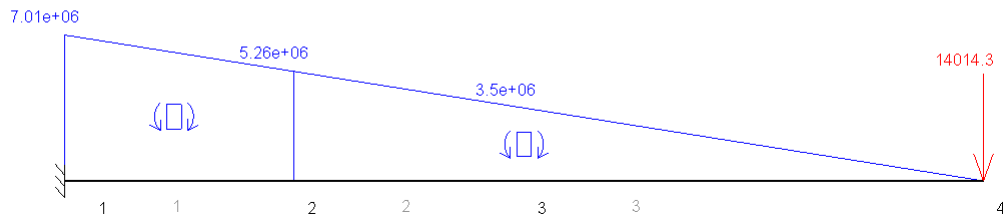


Figura 4: Diagrama de momentos viga E.

Extensión 7000 mm , viga E (estado 1)

Esfuerzos cortantes

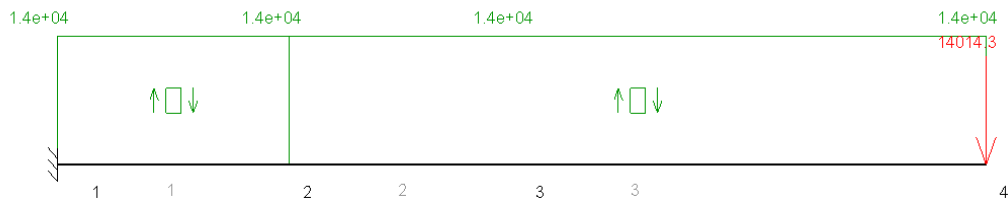


Figura 5: Diagrama de cortantes viga E.

Conociendo el valor máximo del momento flector, se puede calcular el módulo resistente necesario:

$$\frac{\sigma_x}{\varphi} = \frac{M_x}{W_x}$$

Siendo:

- M_x momento generado con respecto al eje x.
- φ el coeficiente de seguridad con respecto a la velocidad de elevación de la grúa, en nuestro caso 1,567.
- σ_x el valor de tensión límite establecido por la norma, en este caso 240 MPa.

Por tanto, si ponderamos el valor de tensión:

$$153,19 \text{ MPa} = \frac{M_x (N * mm)}{W_x (mm^3)}$$

El valor obtenido es de 46356,75 mm³, ó 46,36 cm³. Con este valor se consultó la tabla Excel antes mencionada con las variaciones de las longitudes principales del perfil y se filtró el resultado de manera que presentara los parámetros de menor a mayor.

b	h	e	Ix (mm ⁴)	Wx (cm ³)	Iy (mm ⁴)	Wy (cm ³)
112,200	281,800	2,000	7209141,704	51,165	486082,376	8,665

Tabla 2: Calculo teórico perfil viga E.

Estas fueron las medidas tomadas como referencia en la primera simulación por SolidWorks.

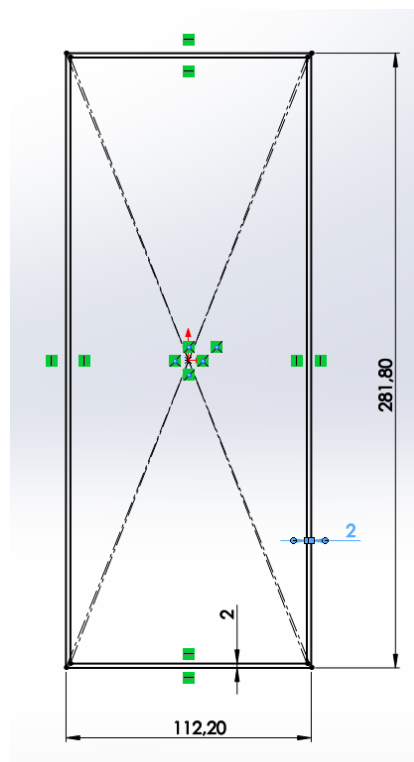


Figura 6: Boceto perfil viga E en SolidWorks.

Simulación por EF en SolidWorks.

Se generó en SolidWorks el perfil con las dimensiones antes calculadas y la longitud de la extensión. Una vez creado el perfil se empezó con la simulación.

Para dicha simulación, se empotró a la viga y se le sometió a la fuerza de la gravedad y a la carga de diseño ponderada con los coeficientes de seguridad, ya que como se mencionó en el desglose de la normativa, son necesarios para el cálculo de tensiones.

$$\text{Carga de simulación} = 14014,29 * 1,567 = 21960,40 \text{ N}$$

$$\text{Gravedad ponderada} = 9,81 * 1,2 = 11,772 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

$$\text{Carga de viento} = 592,94 * A \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right).$$

Al ser la última extensión, se cerró el perfil con una tapa delantera para que la simulación estuviese más adaptada a la realidad.

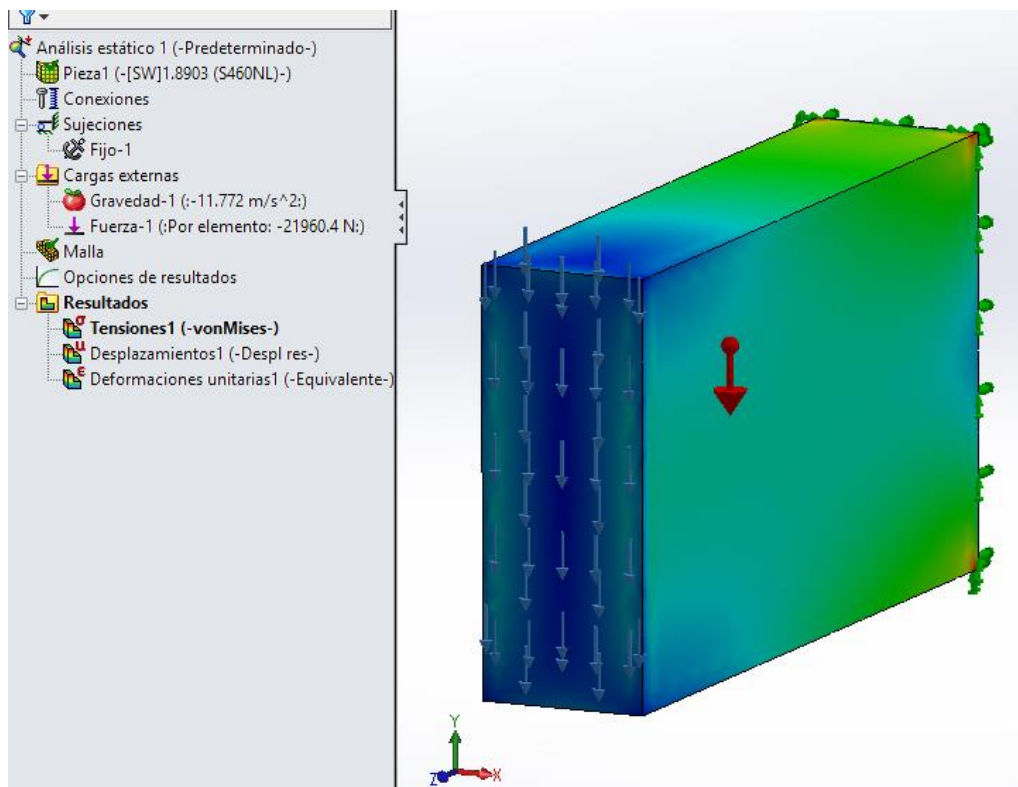


Figura 7: Fuerza ponderada aplicada al perfil viga E.

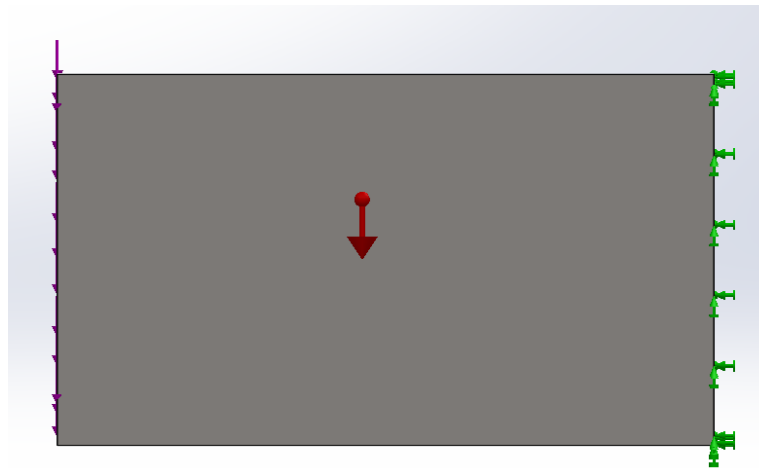


Figura 8: Vista lateral con condiciones de contorno (viga empotrada) viga E.

Para el mallado, se eligió el siguiente tamaño de elemento:

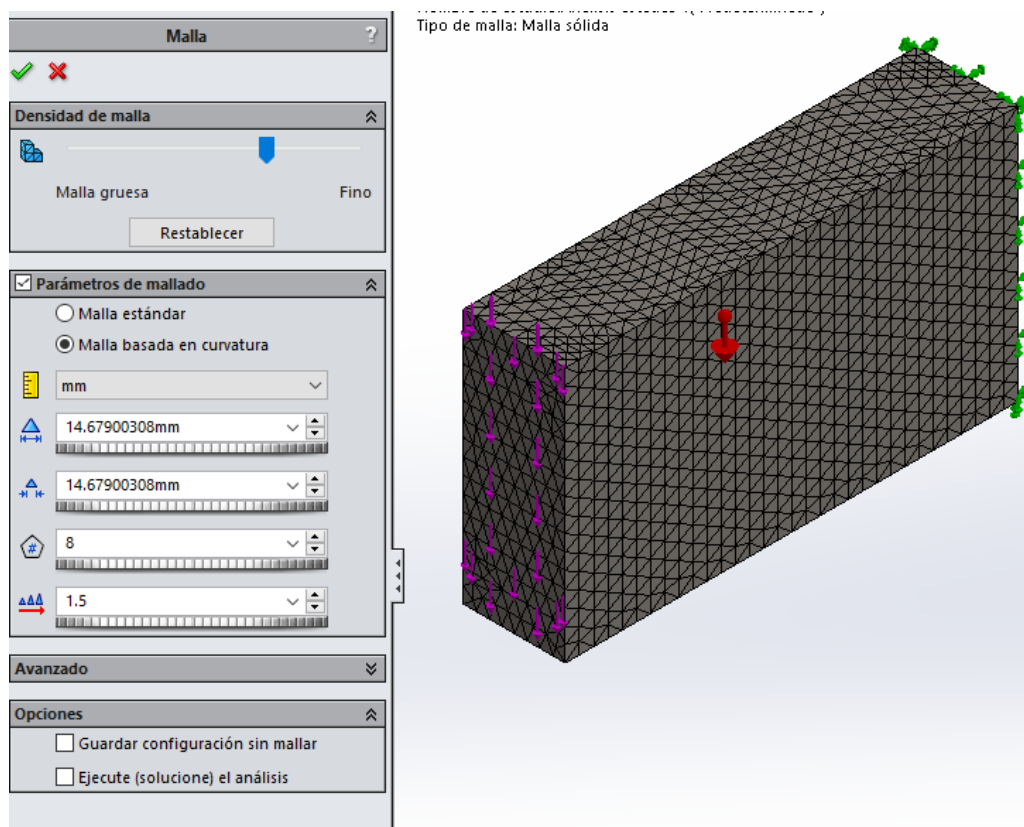


Figura 9: Mallado viga E.

Una vez realizada la malla, se lanzó el cálculo con los siguientes resultados:

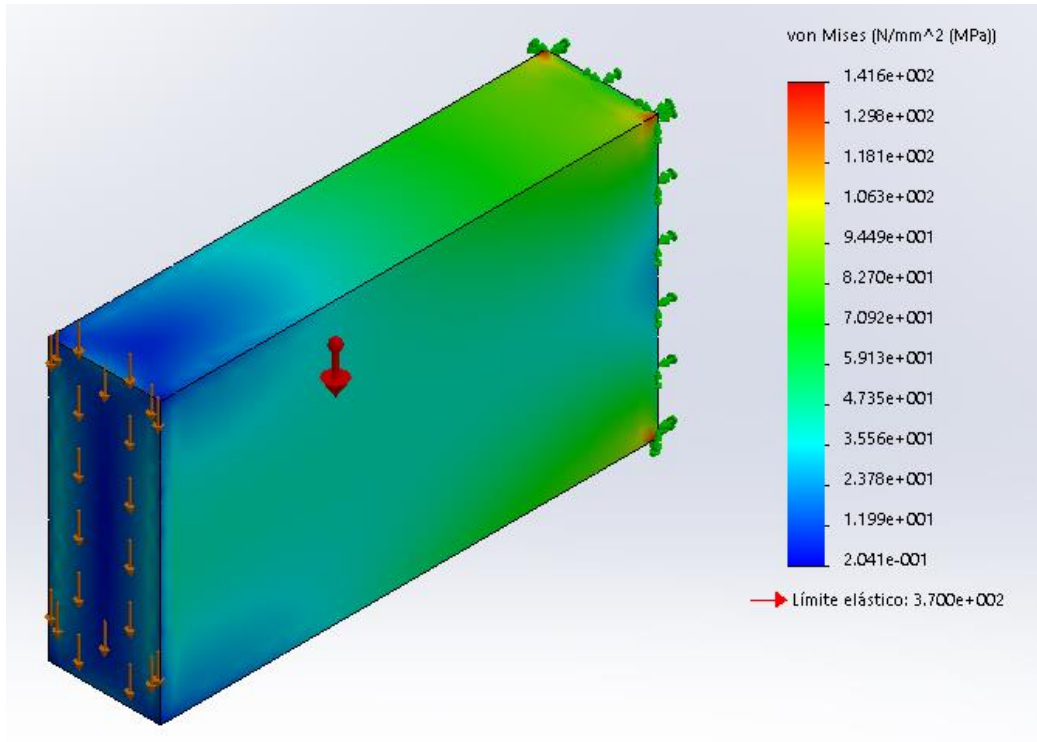


Figura 10: Tensión de Von Mises viga E (perfil teórico).

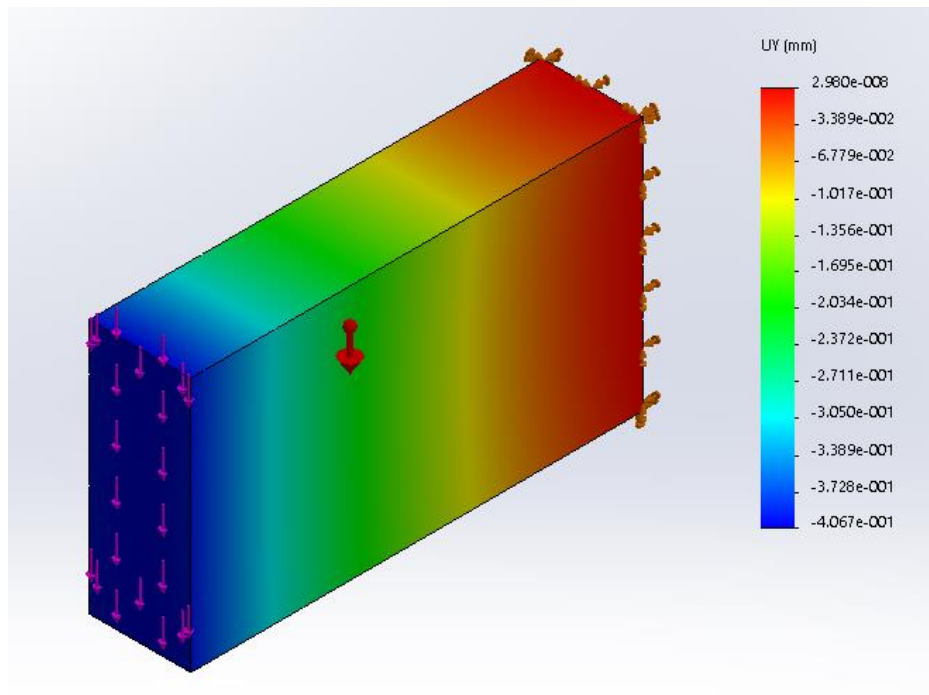


Figura 11: Desplazamiento vertical viga E (perfil teórico).

Una vez comprobado que el perfil cumple la norma, pasamos a añadirle los redondeos que servirán para que el perfil se deslice sobre los patines; estos redondeos son de 10 mm. La tapa delantera se conserva, ya que más adelante servirá como base para la pieza de sujeción del polipasto.

Además, a partir de esta simulación añadiremos los esfuerzos de viento, de manera que la simulación sea la más desfavorable para el perfil.

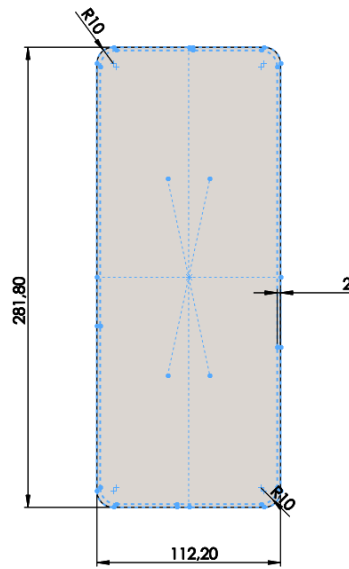


Figura 12: Nueva sección del perfil viga E.

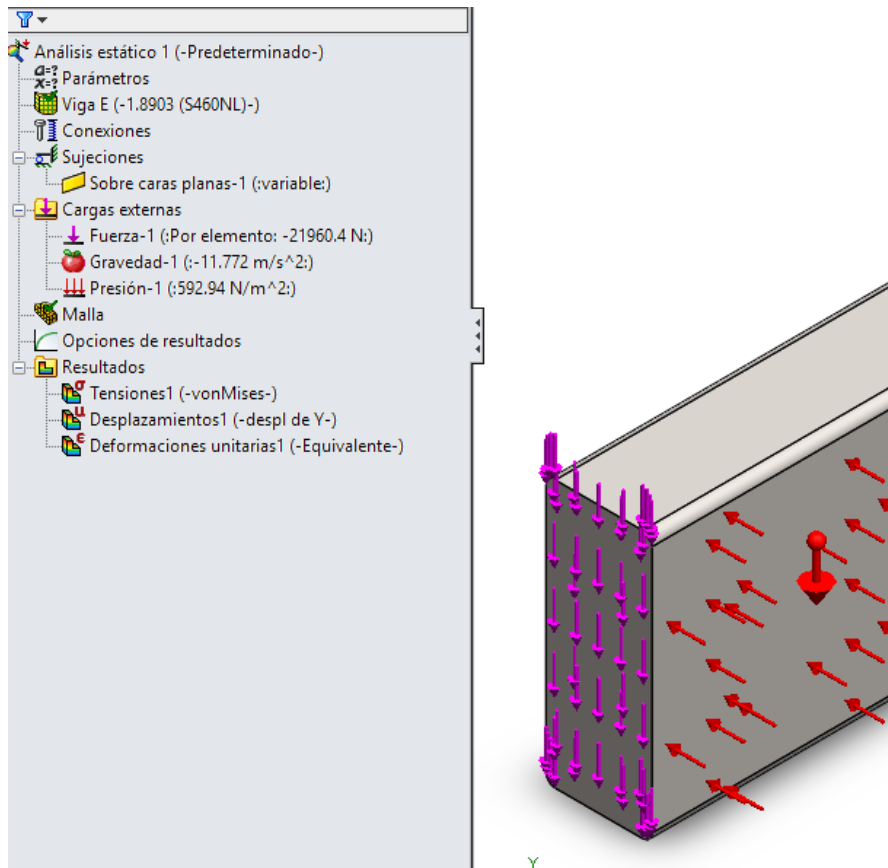


Figura 13: Esfuerzos de simulación combinados viga E.

Se decidió disminuir el tamaño del elemento en el mallado para obtener un resultado lo más real posible. Se pasó de un tamaño de 14,67 mm (máximo y mínimo) a un tamaño máximo de 6 mm y un mínimo de 2 mm, como se muestra en la siguiente figura:

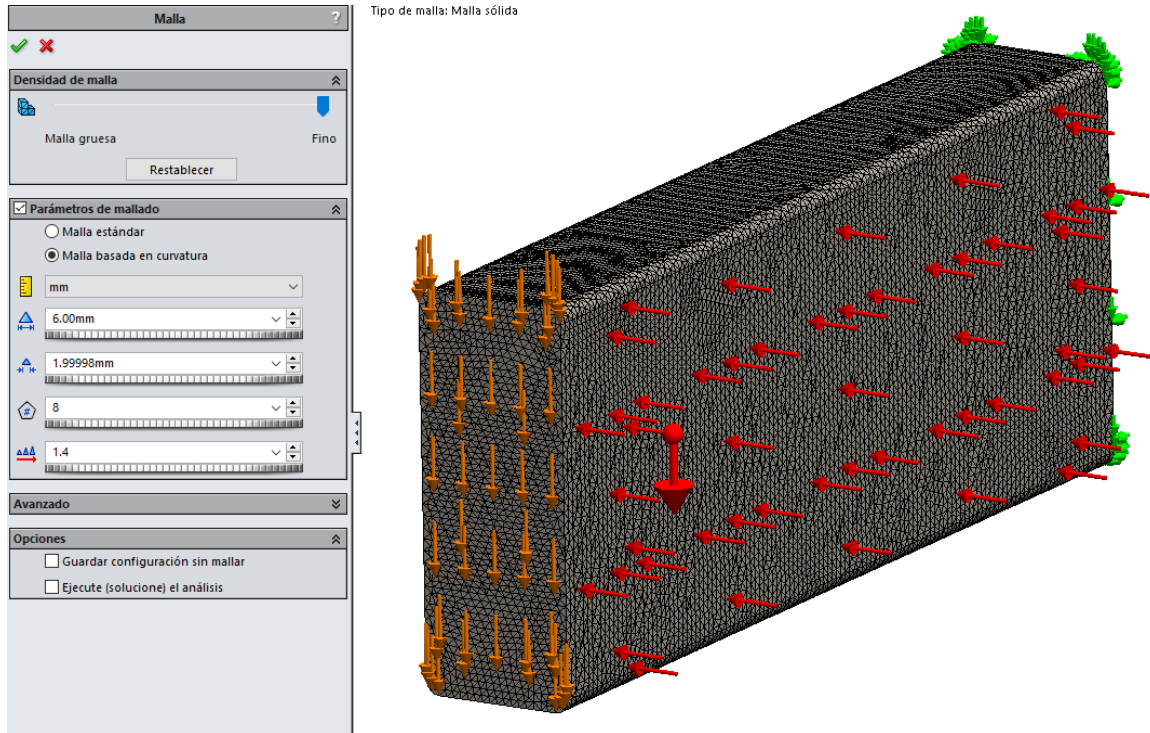


Figura 14: Nuevo mallado perfil viga E.

De nuevo lanzamos la simulación:

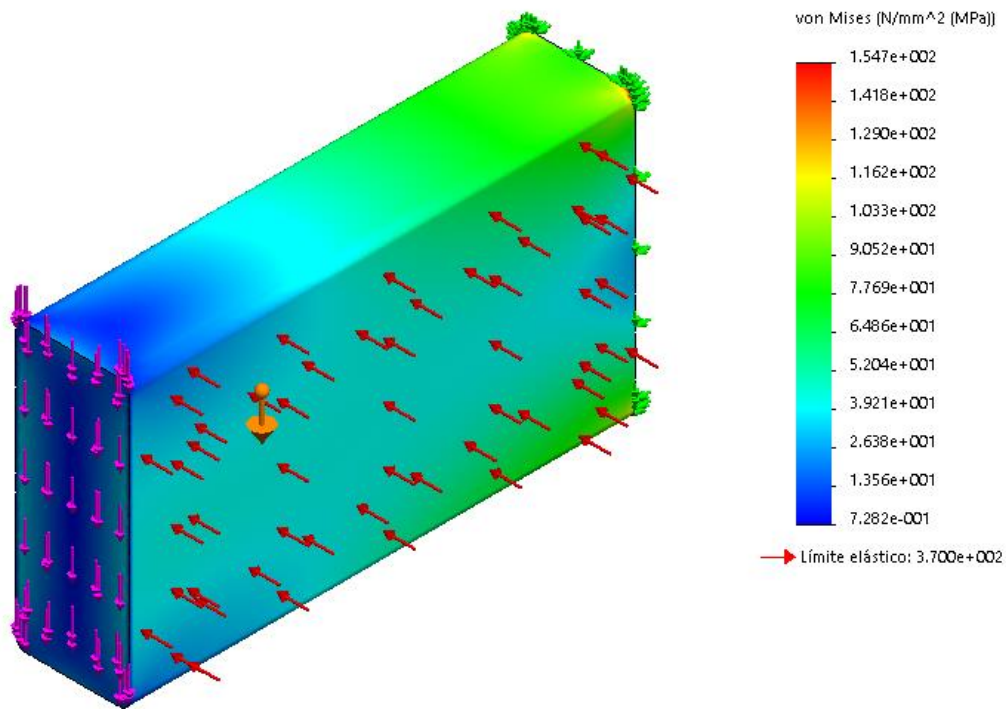


Figura 15: Nueva tensión de Von Mises viga E.

Al disminuir el tamaño de elemento, hemos aumentado la realidad de la simulación, de manera que estas nuevas tensiones son más fidedignas que las anteriores. Al haber superado el límite permisible por la norma, procedemos a aumentar el espesor del perfil. Como primera iteración, doblamos el espesor, de manera que éste será de 4 mm. Con el mismo tamaño de elemento, lanzamos la simulación:

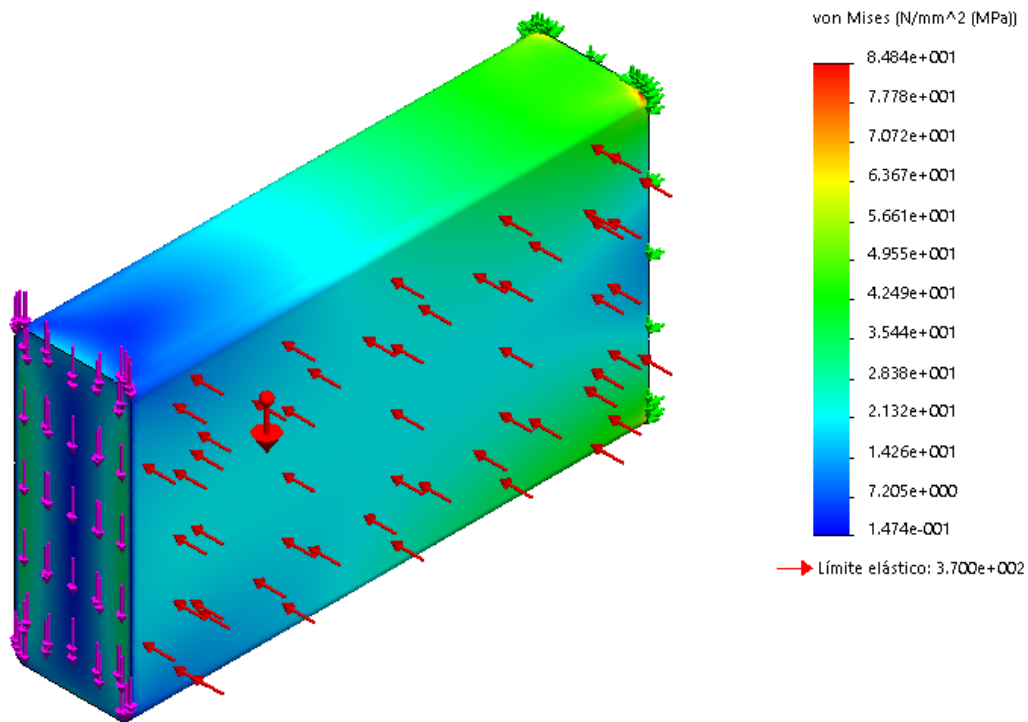


Figura 16: Tensión de Von Mises viga E.

Comprobamos que cumplimos con la norma, pero sobredimensionando el perfil. Sin embargo, realizando una búsqueda en distintos proveedores, comprobamos que el espesor mínimo para estas medidas aproximadas es el que hemos elegido de 4 mm, de manera que no vamos a reducir el espesor para ajustar las tensiones.

Sin embargo, en esa búsqueda se ha podido notificar que los radios de las esquinas de los perfiles de este tamaño aproximado son mayores, de 15-20 mm.

Para el perfil se elige un radio exterior de 20 mm, mientras que el interior se ha aumentado a 30 mm para que el espesor en estos radios sea igual o mayor que el espesor del perfil. Se muestra el boceto con los cambios:

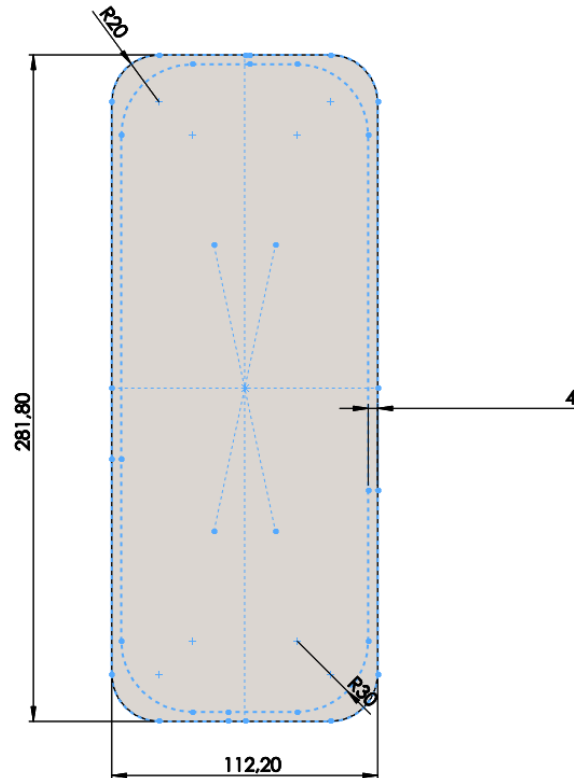


Figura 17: Perfil con radios modificados viga E.

Procedemos a la simulación:

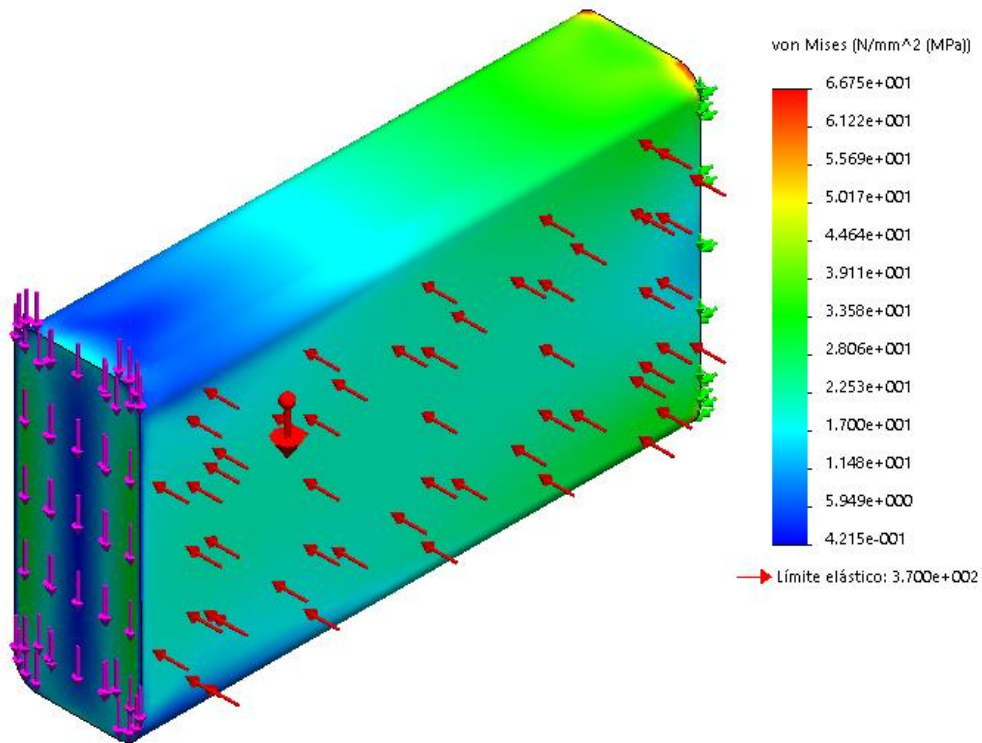


Figura 18: Tensiones de Von Mises definitivas viga E.

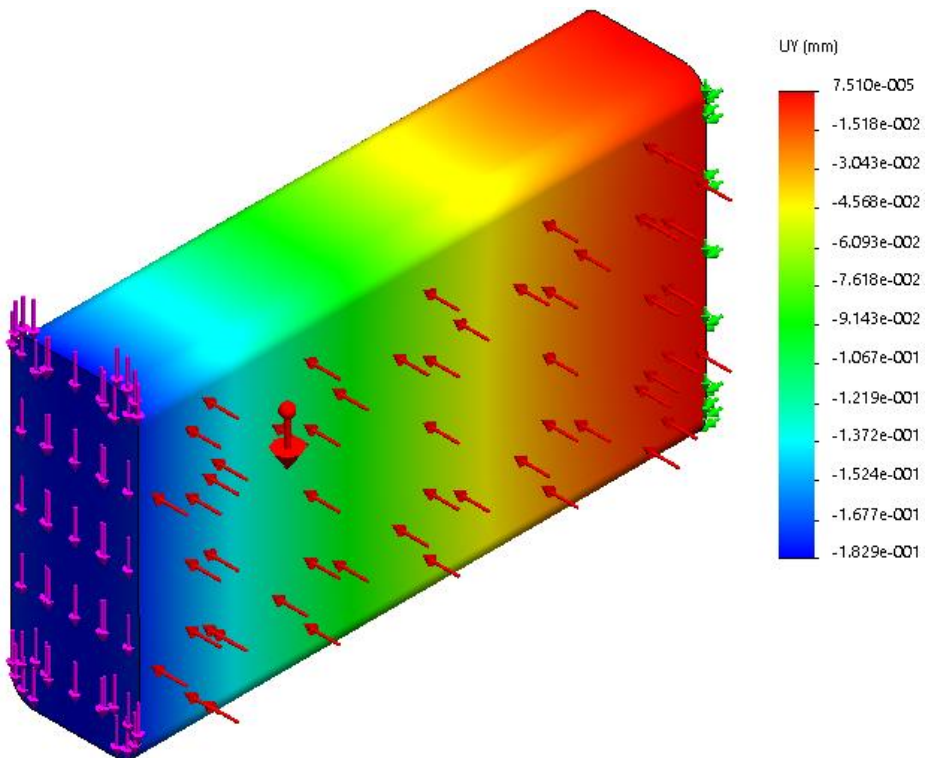


Figura 19: Flecha definitiva viga E.

Comprobación a fatiga.

Como se ha mencionado en apartados anteriores, la norma establece que el número de ciclos que la grúa del presente proyecto tiene que soportar está comprendido entre 200000 y 600000.

La tensión máxima a la que está sometido este perfil la conocemos gracias a la simulación por EF y tiene un valor de 66,75 MPa.

También conocemos la curva S/N del acero St 52-3:

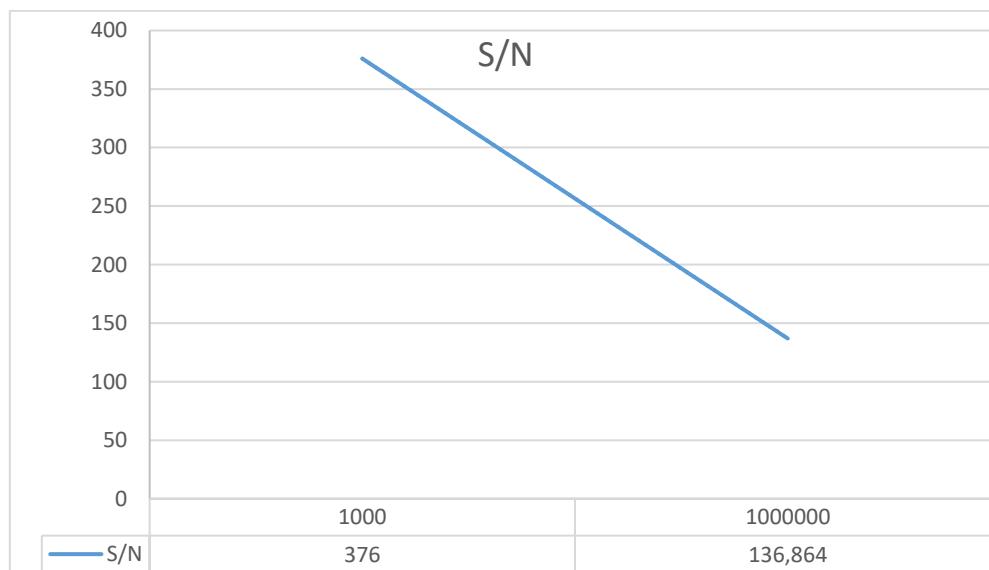
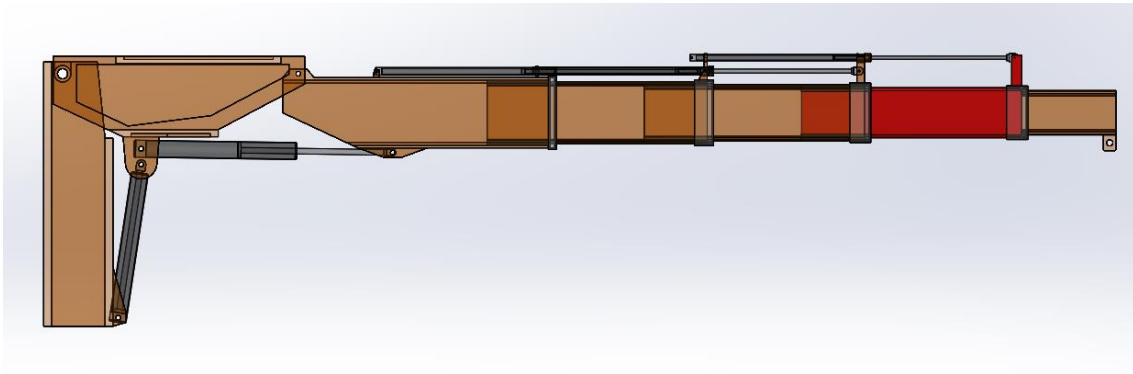


Gráfico 1: Curva S/N del acero St 52-3.

Comprobamos que, para este primer caso, no alcanzamos el valor mínimo de la curva S/N, de manera que no es necesario un cálculo a fatiga para este perfil.

3.2- Tercera extensión – Perfil viga D.



Este perfil está sometido a las siguientes solicitaciones:

- Peso propio
- Carga a elevar, transmitida desde la viga E, de valor 14014,29 N
- Momento flector, transmitido desde la viga E, de valor $7,01 \cdot 10^6$
- Viento, de valor máximo $592,94 \cdot A$ N/m²

Cálculos teóricos

Representación de los diagramas de sólido libre simplificados mediante MEFI:

Extensión 7000 mm , viga D (estado 1)

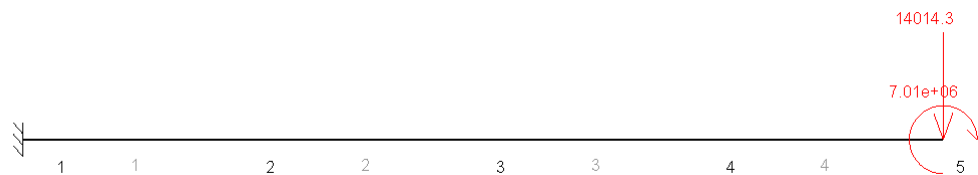


Figura 20: Representación teórica viga D.

Para este cálculo teórico, se ha empotrado a la barra en un extremo y se le ha dado una longitud de 1000 mm, que será la longitud que tendrá esta extensión. En la siguiente imagen se muestran dicha longitud dividida en 4 tramos:

TÍTULO Extensión 7000 mm , viga D			
PUNTOS			
%	pun	X	Y
1		0.0	0.0
2		250.0	0.0
3		500.0	0.0
4		750.0	0.0
5		1000.0	0.0

Figura 21: Longitud viga D.

Una vez creada la barra lanzamos el cálculo de los esfuerzos.

Diagramas de esfuerzos:

Extensión 7000 mm , viga D (estado 1)

Momentos flectores

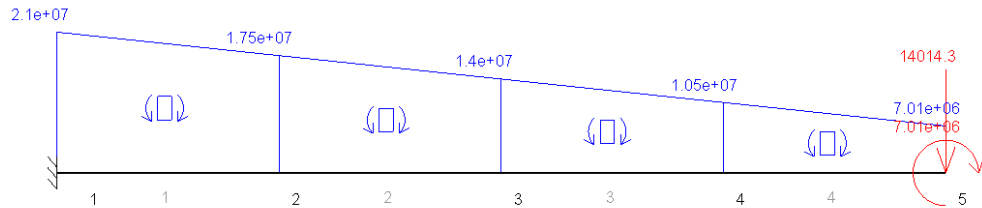


Figura 22: Diagrama de momentos viga D.

Extensión 7000 mm , viga D (estado 1)

Esfuerzos cortantes

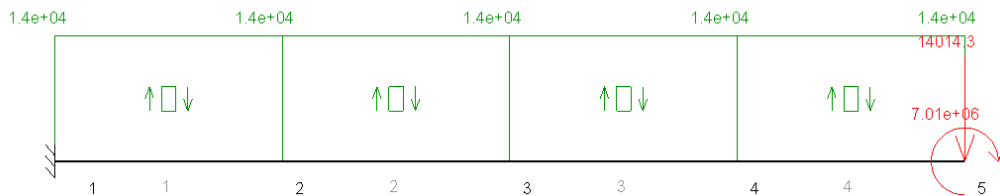


Figura 23: Diagrama de cortantes viga D.

Módulo resistente necesario: 137,11 cm³

Perfil teórico:

- Base mínima: $112,20 + 2 * 10,00 = 132,20$ mm
- Altura mínima: $281,80 + 2 * 10,00 = 301,80$ mm
- Radio esquinas : 10 mm

b	h	e	I _x (mm ⁴)	W _x (cm ³)	I _y (mm ⁴)	W _y (cm ³)
146,600	316,600	7,200	33453737,558	211,331	3127611,638	42,669

Tabla 3: Cálculo teórico perfil viga D.

Simulación:

Para la simulación, se empotró a la viga y se le sometió a la fuerza de la gravedad ponderada por el coeficiente ψ , a la carga de diseño y al momento transmitido ponderados por el coeficiente ϕ , y a la acción del viento.

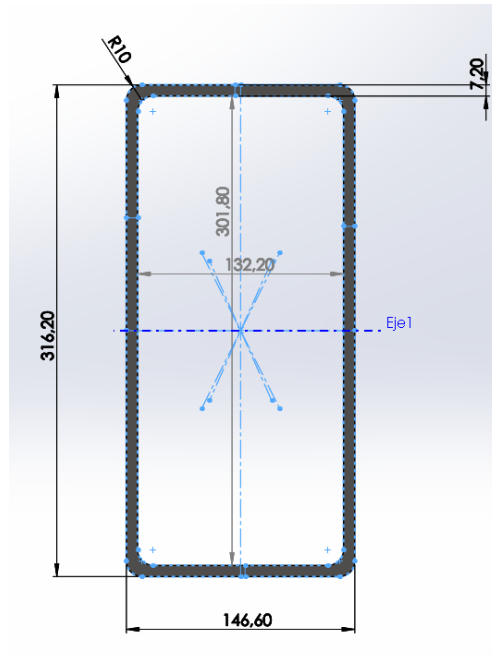


Figura 24: Sección del perfil viga D.

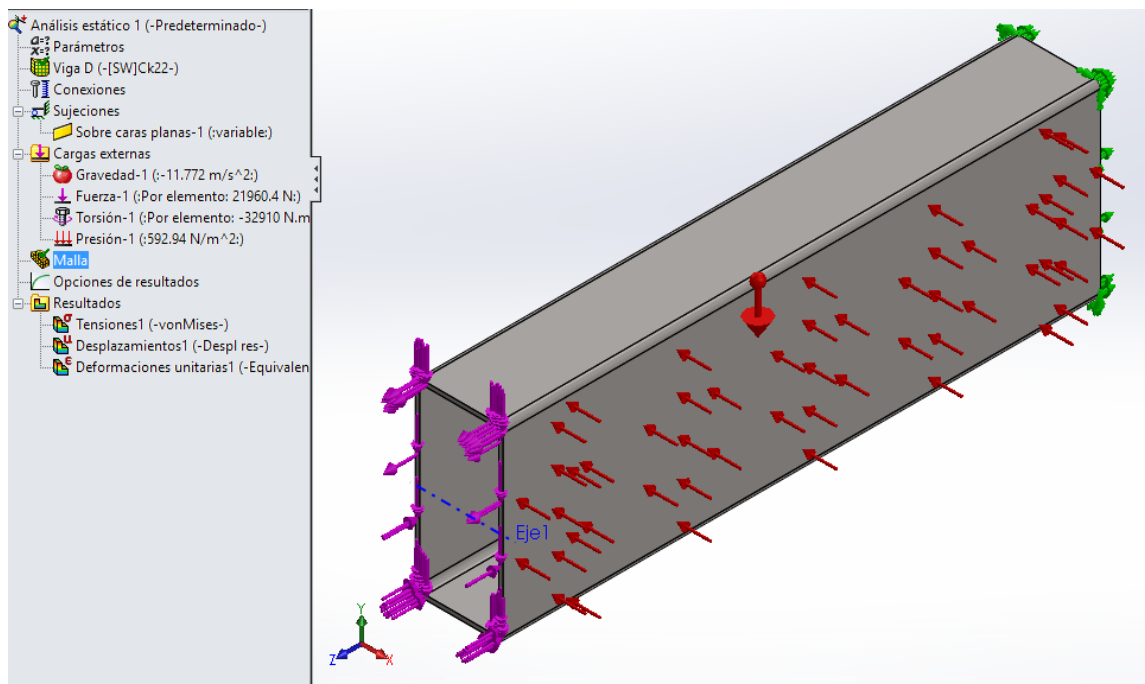


Figura 25: Esfuerzos de simulación combinados viga D.

Para el mallado se utilizó el mismo tamaño de elemento que en el perfil anterior, de 6 mm máximo y 2 mínimo:

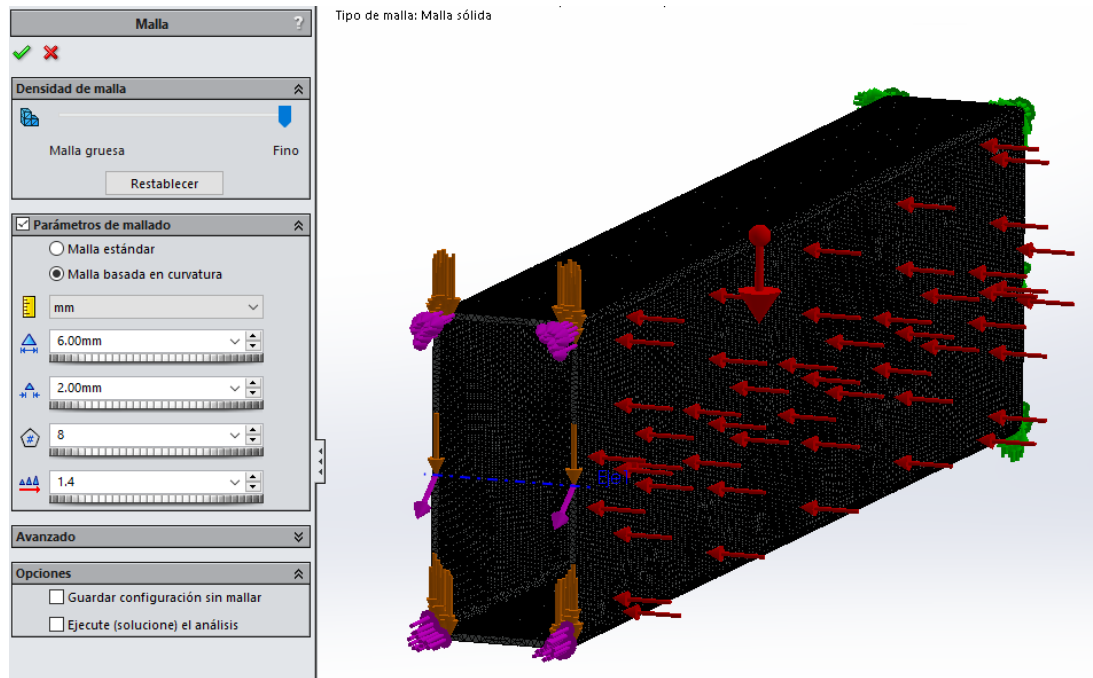


Figura 26: Mallado perfil viga D.

Con la malla ya realizada lanzamos la simulación:

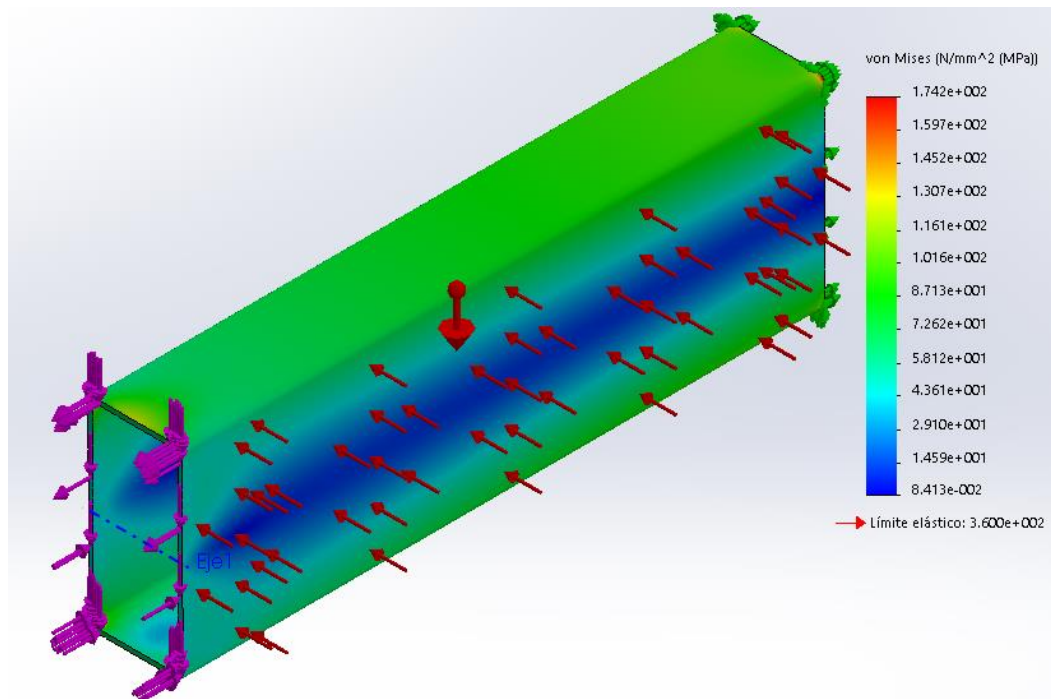


Figura 27: Tensión de Von Mises viga D.

Como nos ha ocurrido en el perfil anterior, las tensiones de la primera simulación han salido mayores al límite establecido por la norma. De nuevo, procedemos a aumentar el espesor, en este caso a 8 mm.

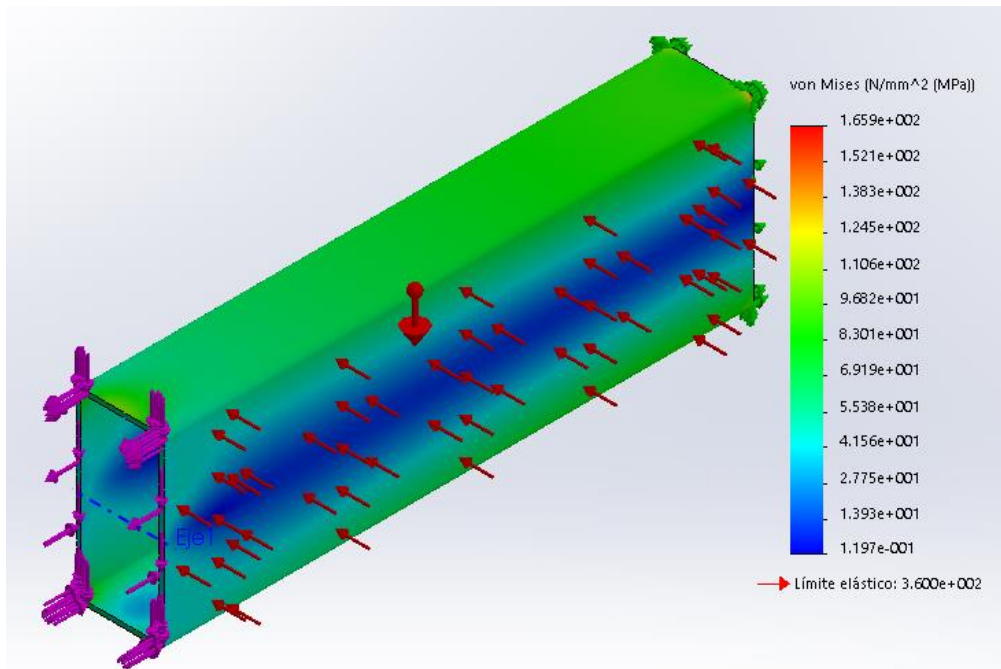


Figura 28: Tensión de Von Mises viga D, primera iteración.

Comprobamos que aún superamos el límite de tensión, de manera que aumentamos el espesor a 9 mm:

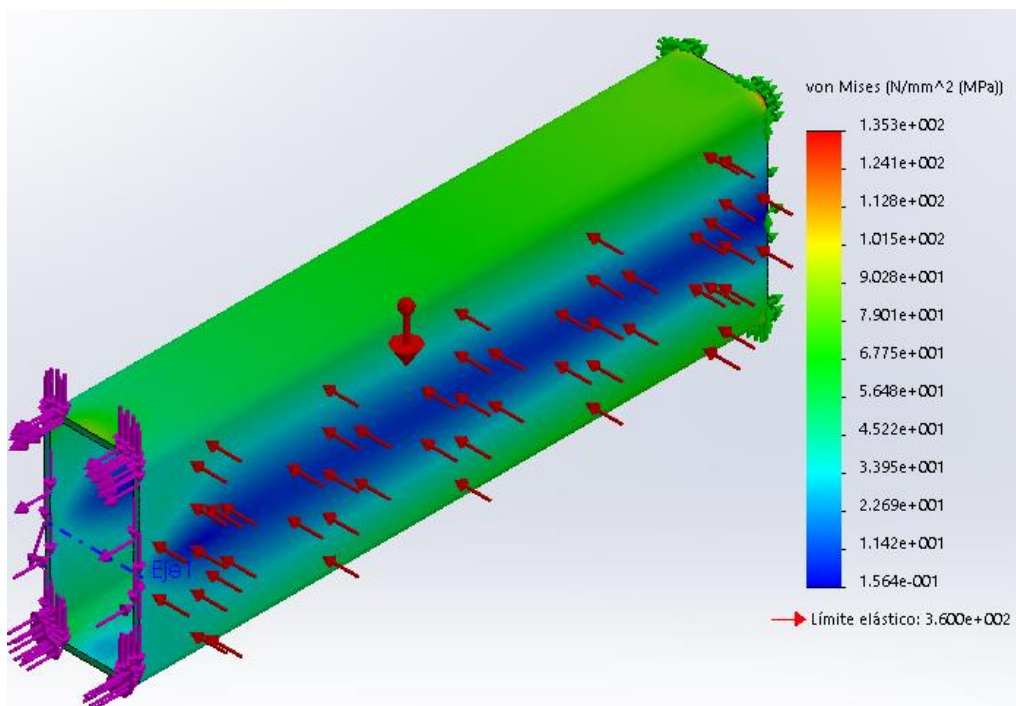


Figura 29: Tensión de Von Mises viga D, segunda iteración.

En esta iteración sí que cumplimos con los valores establecidos por la norma.

Se puede observar en la figura que se ha aumentado el radio de las esquinas. La razón de este cambio es porque se ha observado que en los perfiles comerciales no se encuentra un radio de 10 mm para estas dimensiones, sino que son de 15-20 mm. En este caso se ha aumentado a 20 mm. La simulación se ha realizado con este radio.

A continuación se muestran los resultados del desplazamiento vertical o flecha del perfil:

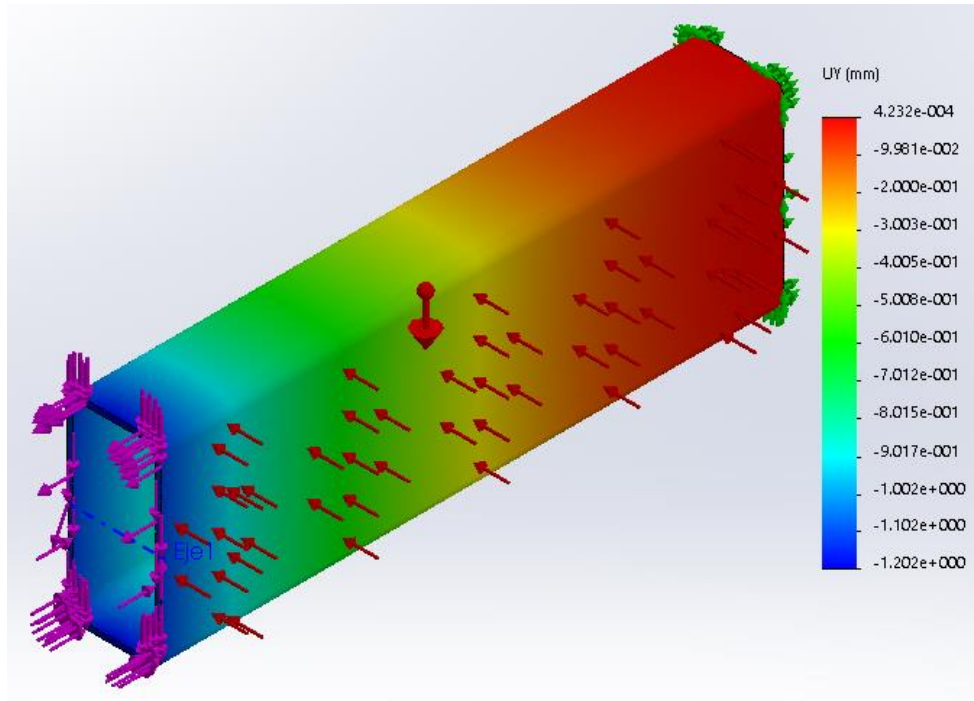
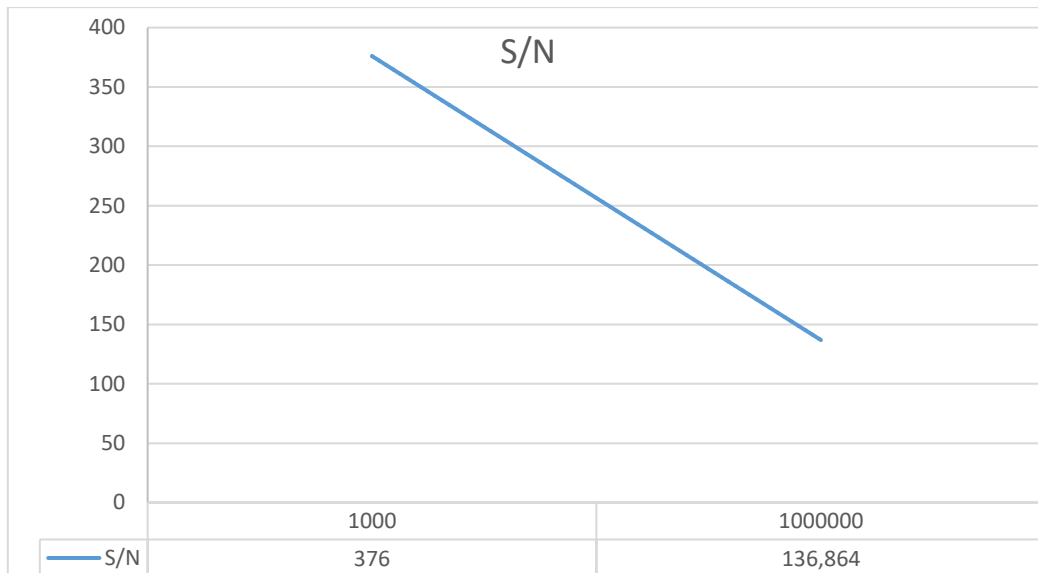


Figura 30: Desplazamiento en Y viga D.

Comprobación a fatiga.

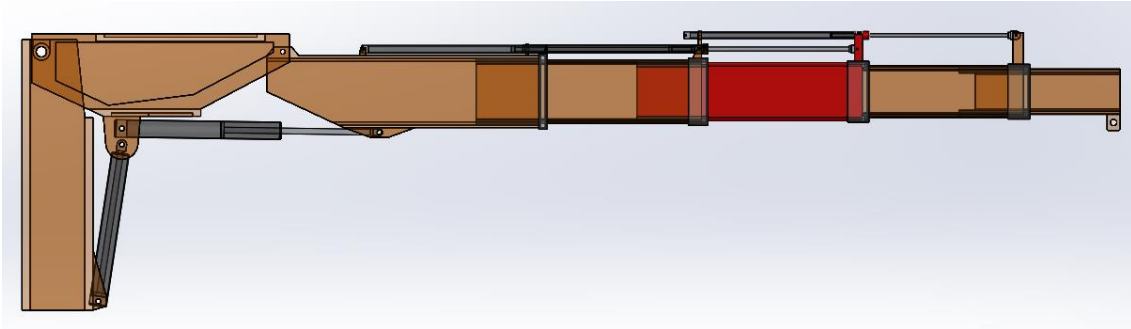
Datos conocidos:

- Tensión máxima: 135,30 MPa.
- Curva S/N del acero.



De nuevo no alcanzamos el valor mínimo de la curva S/N, de manera que no es necesario un cálculo a fatiga para este perfil.

3.3- Segunda extensión – Perfil viga C.



Este perfil está sometido a las siguientes solicitaciones:

- Peso propio.
- Carga a elevar, transmitida desde la viga D, de valor 14014,29 N.
- Momento flector, transmitido desde la viga D, de valor $2,1 * 10^7 \text{ N} * \text{mm}$.
- Viento, de valor máximo $592,94 * A \text{ N/m}^2$.

Cálculos teóricos

Representación de los diagramas de sólido libre simplificados mediante MEF1:

Extensión 7000 mm , viga C (estado 1)

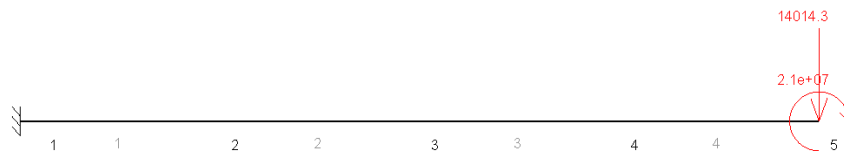


Figura 31: Representación teórica viga C.

Para este cálculo teórico, se ha empotrado a la barra en un extremo y se le ha dado una longitud de 1000 mm, que será la longitud que tendrá esta extensión. En la siguiente imagen se muestran dicha longitud dividida en 4 tramos:

TÍTULO Extensión 7000 mm , viga C			
PUNTOS			
%	pun	X	Y
1		0.0	0.0
2		250.0	0.0
3		500.0	0.0
4		750.0	0.0
5		1000.0	0.0

Figura 32: Longitud viga C.

Una vez creada la barra lanzamos el cálculo de los esfuerzos.

Diagramas de esfuerzos:

Extensión 7000 mm , viga C (estado 1)
Momentos flectores

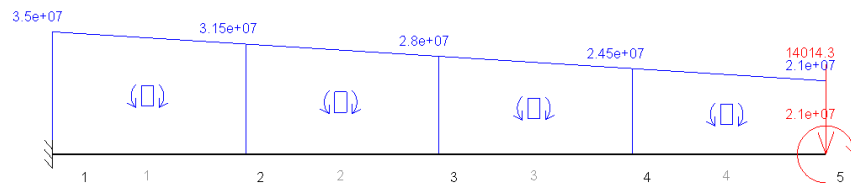


Figura 33: Diagrama de momentos viga C.

Extensión 7000 mm , viga C (estado 1)
Esfuerzos cortantes

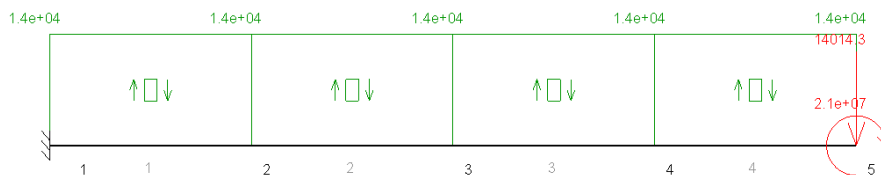


Figura 34: Diagrama de cortantes viga C.

Módulo resistente necesario: 228,52 cm³.

Perfil teórico:

- Base mínima: $150,20 + 2 * 10,00 = 170,20$ mm.
- Altura mínima: $319,80 + 2 * 10,00 = 339,80$ mm.
- Radio esquinas: 20,00 mm.

b (mm)	h (mm)	e (mm)	Ix (mm ⁴)	Wx (cm ³)	Iy (mm ⁴)	Wy (cm ³)
182,200	351,600	7,500	48153813,458	273,912	6347233,835	69,673

Tabla 4: Cálculo teórico perfil viga C.

Simulación:

Para la simulación, se empotró a la viga y se le sometió a la fuerza de la gravedad ponderada por el coeficiente ψ , a la carga de diseño y al momento transmitido ponderados por el coeficiente ϕ , y a la acción del viento.

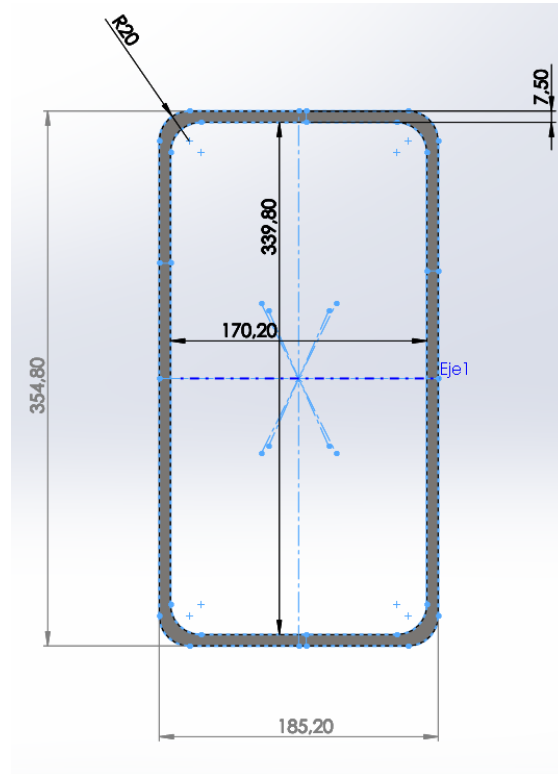


Figura 35: Sección del perfil viga C.

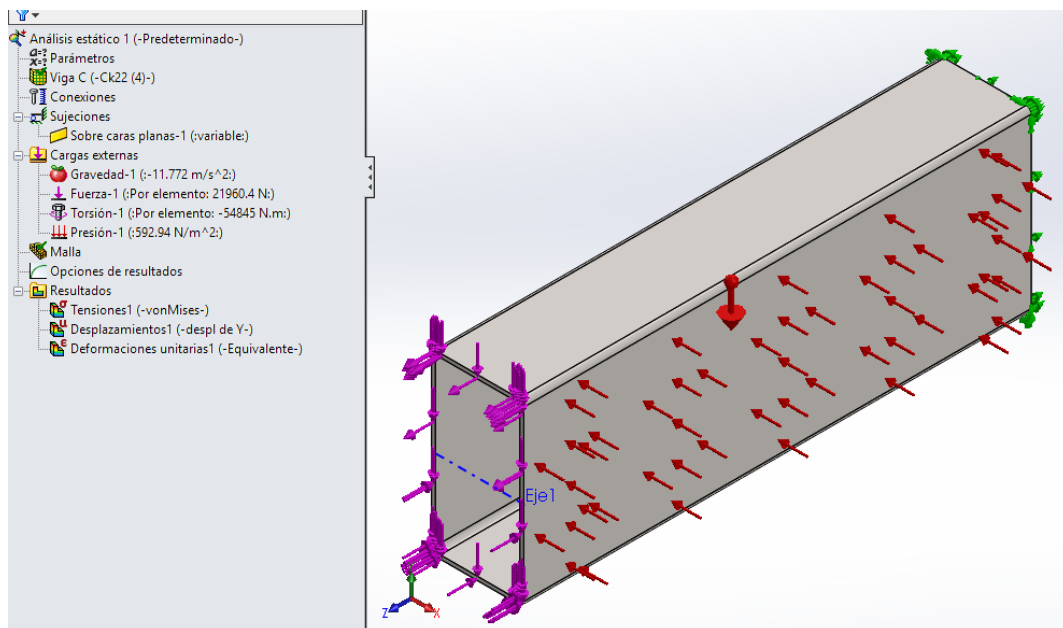


Figura 36: Esfuerzos de simulación combinados viga C.

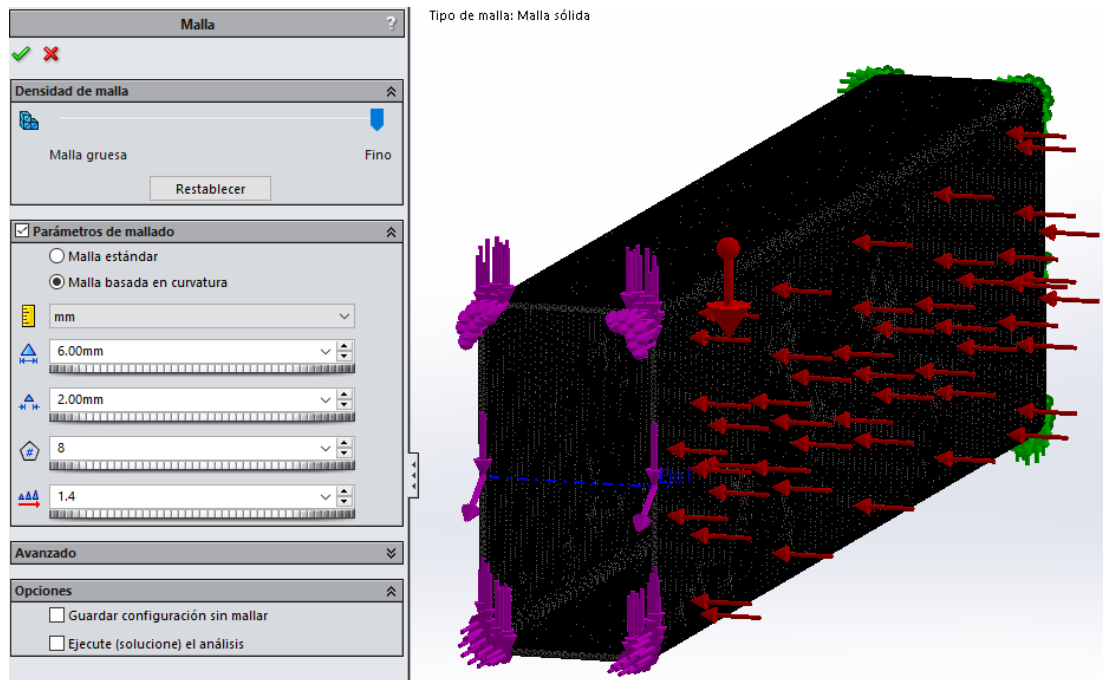


Figura 37: Mallado viga C.

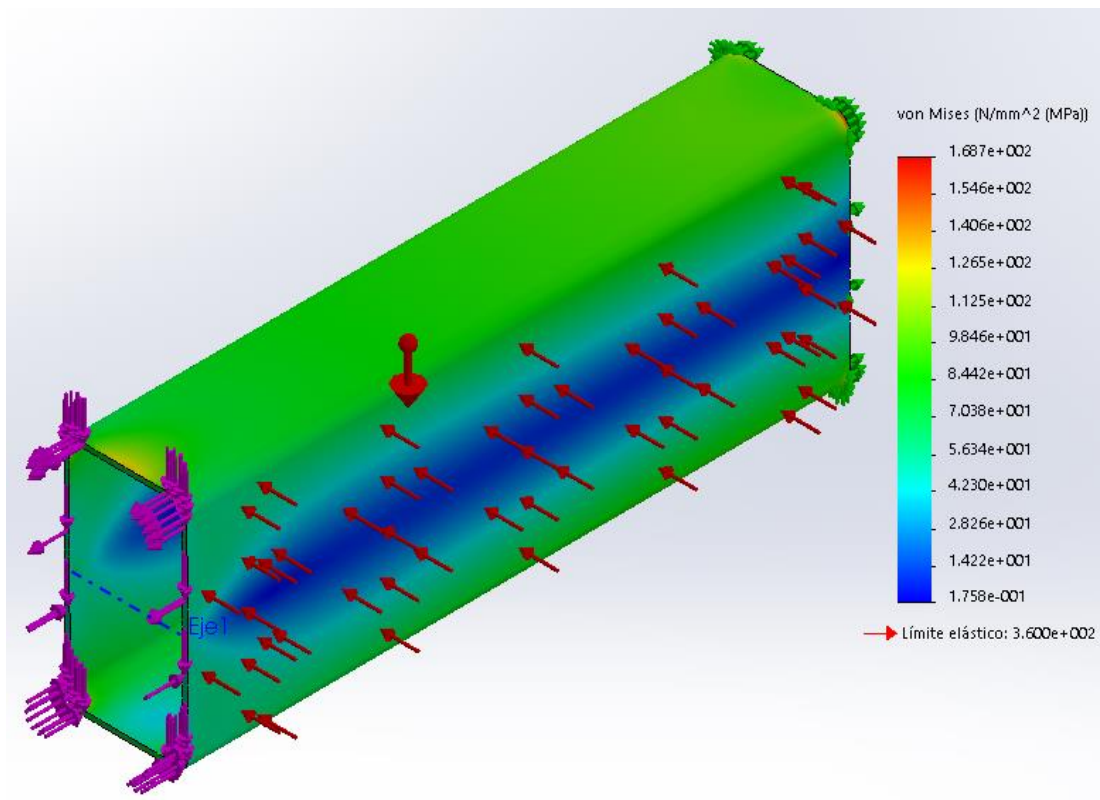


Figura 38: Tensión de Von Mises viga C.

Superamos el límite establecido por la norma. Aumentamos el espesor hasta 9 mm y volvemos a lanzar la simulación:

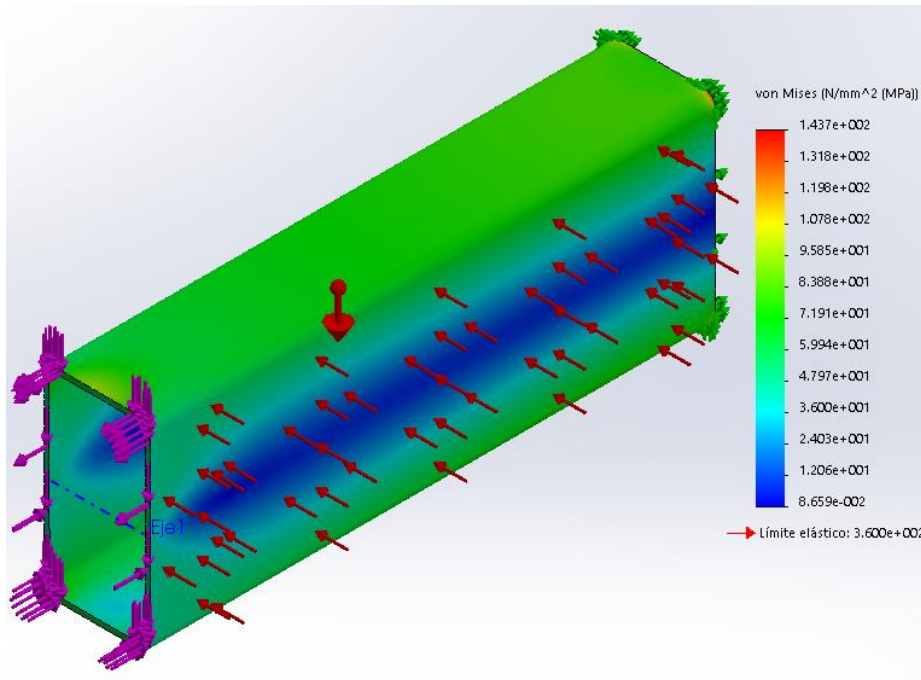


Figura 39: Tensión de Von Mises viga C (1).

Comprobamos que estamos por debajo de la tensión límite. Calculamos la flecha:

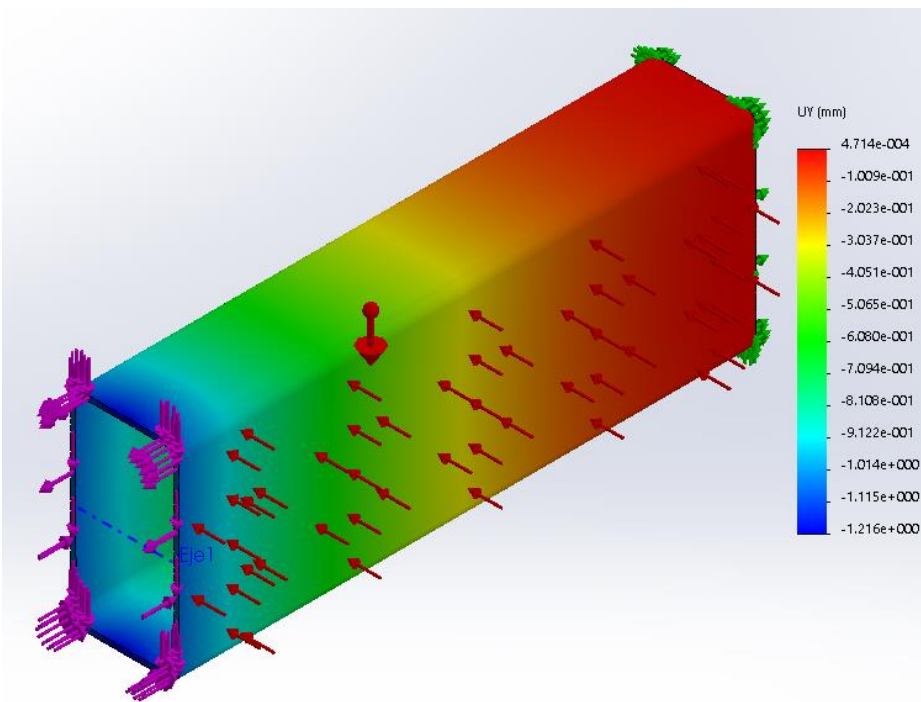
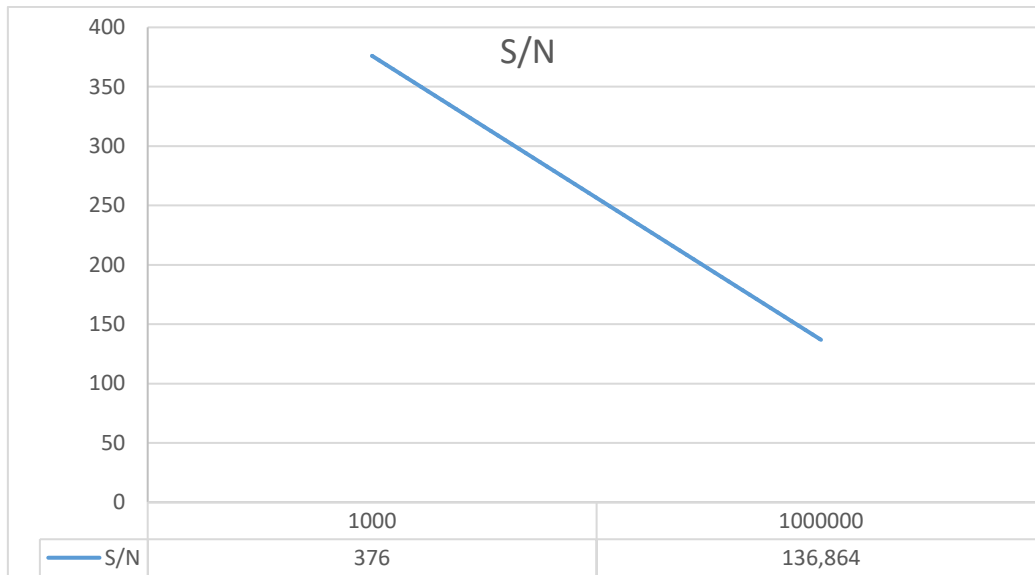


Figura 40: Desplazamiento en Y viga C.

Comprobación a fatiga.

Datos conocidos:

- Tensión máxima: 143,70 MPa.
- Curva S/N del acero.



$$\frac{376 - 136,864}{\log(10^6) - \log(10^3)} = \frac{376 - 143,70}{\log(N) - \log(10^3)}$$

$$N = 820804 \text{ ciclos.}$$

Comprobamos que superamos el límite mínimo de ciclos establecido por la norma.

A continuación procedemos a realizar una simulación mediante el módulo de fatiga de SolidWorks.

Los resultados presumiblemente serán diferentes a los calculados teóricamente, dependiendo de los coeficientes correctores y del método de cálculo del programa. No obstante, no deberían de ser tan diferentes como para salir de $x * 10^5$ ciclos.

Comprobación mediante EF:

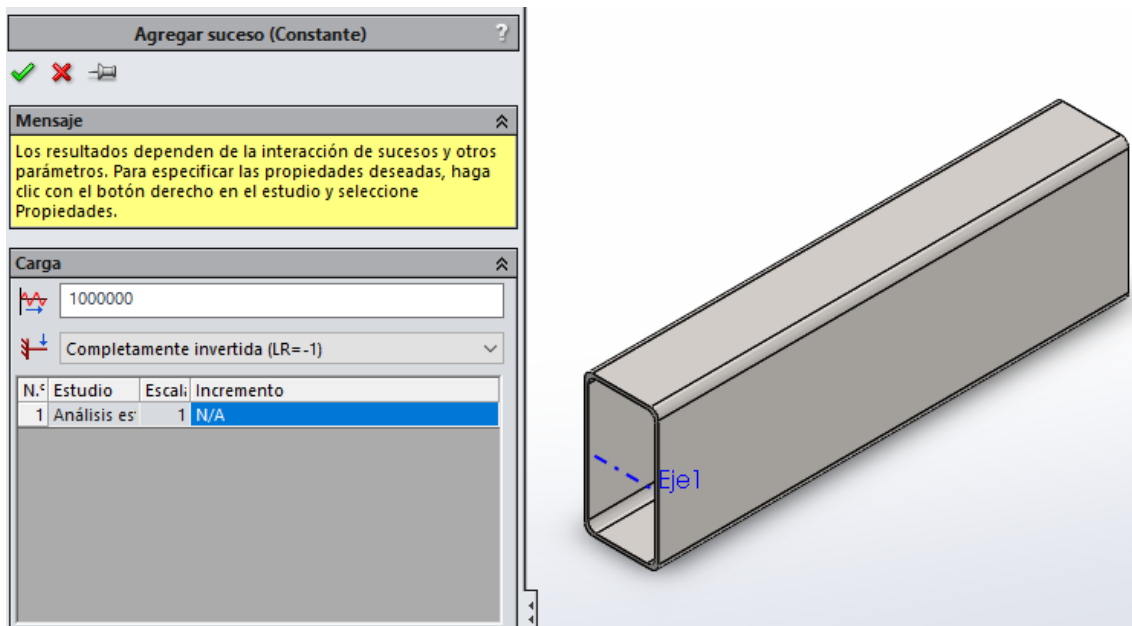


Figura 41: Definición del suceso de fatiga viga C.

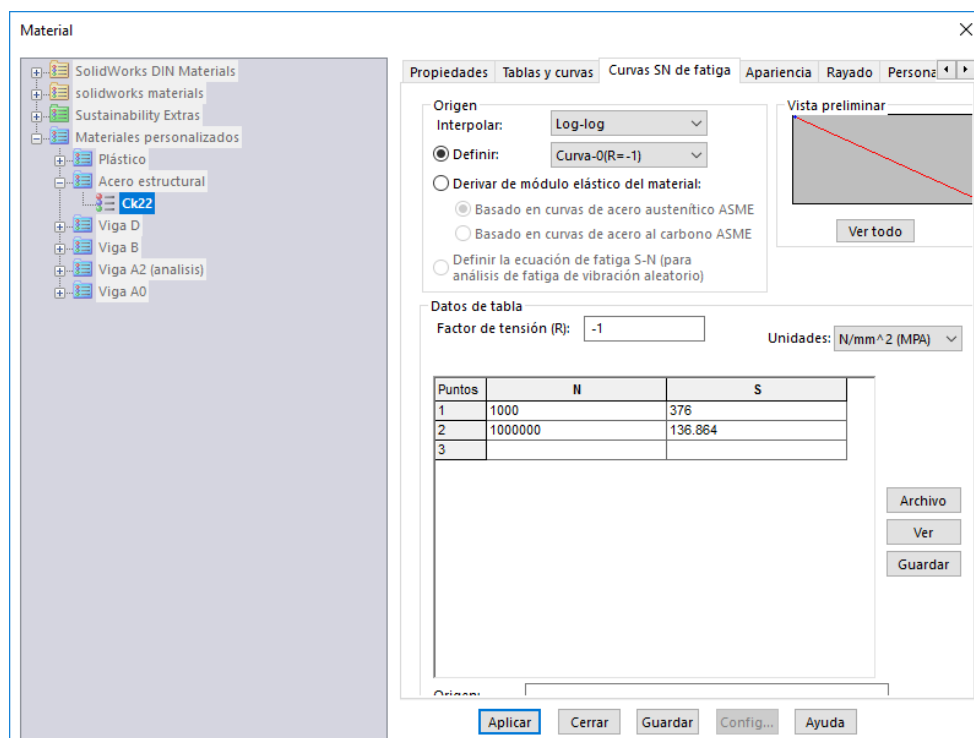


Figura 42: Definición de curva S/N del material.

Lanzamos la simulación:

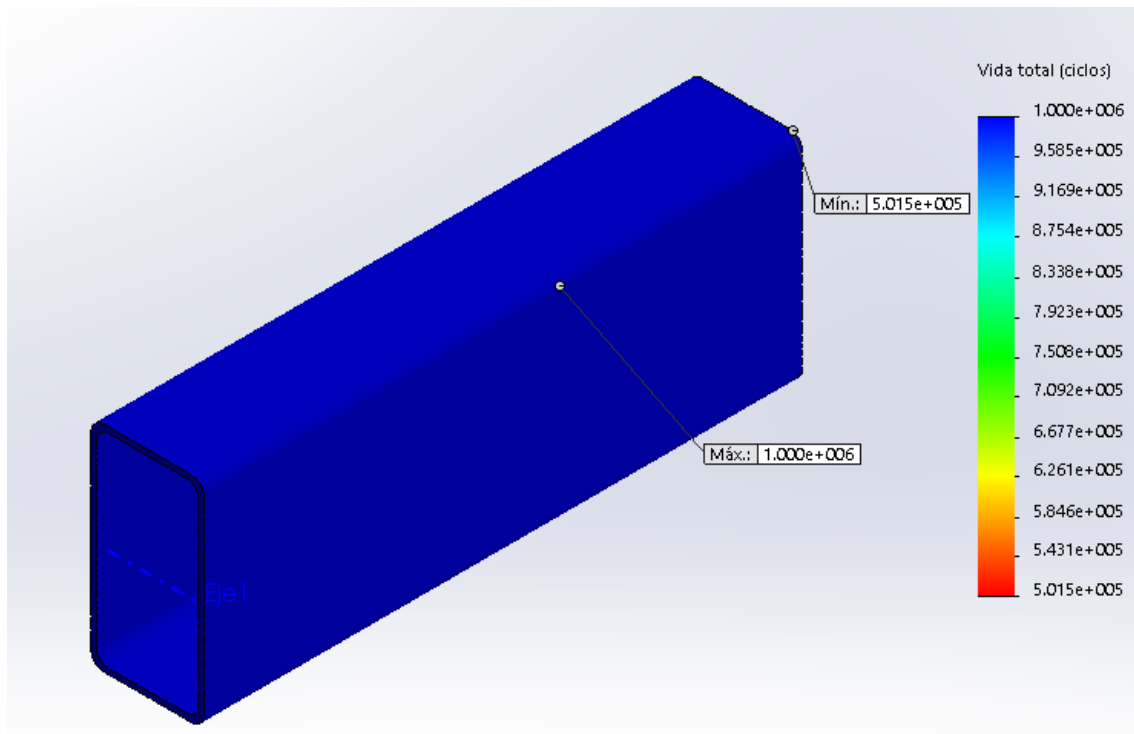
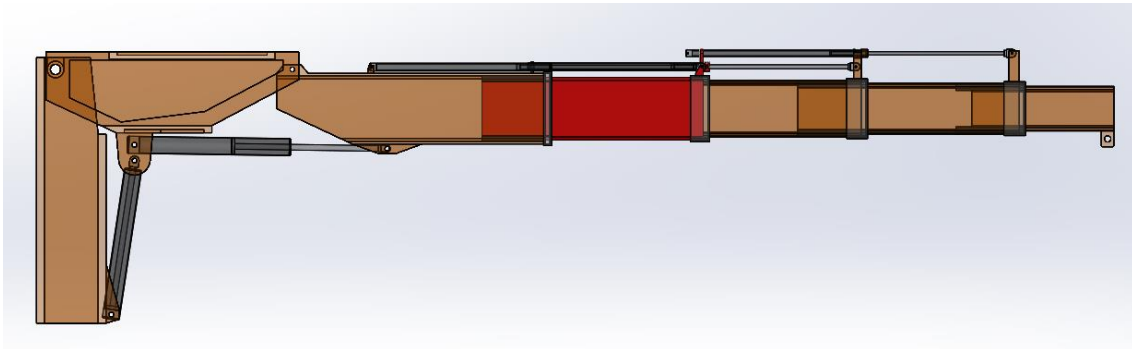


Figura 43: Vida en ciclos del perfil viga C.

3.4- Primera extensión – Perfil viga B.



Este perfil está sometido a las siguientes solicitaciones:

- Peso propio.
- Carga a elevar, transmitida desde la viga C, de valor 14014,29 N.
- Momento flector, transmitido desde la viga C, de valor $3,5 * 10^7 \text{ N} * \text{mm}$.
- Viento, de valor máximo $592,94 * A \text{ N/m}^2$.

Cálculos teóricos

Representación de los diagramas de sólido libre simplificados mediante MEF1:

Extensión 7000 mm , viga B (estado 1)

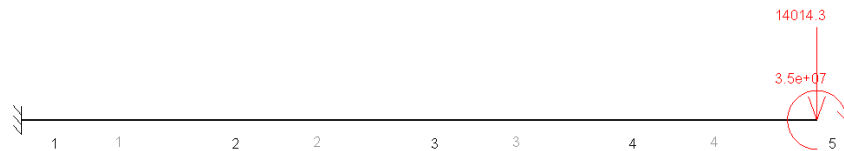


Figura 44: Representación teórica viga B.

Para este cálculo teórico, se ha empotrado a la barra en un extremo y se le ha dado una longitud de 1000 mm, que será la longitud que tendrá esta extensión. En la siguiente imagen se muestran dicha longitud dividida en 4 tramos:

TÍTULO Extensión 7000 mm , viga B			
PUNTOS			
%	pun	X	Y
1	1	0.0	0.0
2	2	250.0	0.0
3	3	500.0	0.0
4	4	750.0	0.0
5	5	1000.0	0.0

Figura 45: Longitud viga B.

Una vez creada la barra lanzamos el cálculo de los esfuerzos.

Diagramas de esfuerzos:

Extensión 7000 mm , viga B (estado 1)

Momentos flectores

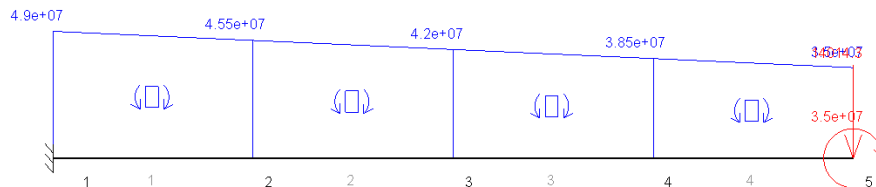


Figura 46: Diagrama de momentos viga B.

Extensión 7000 mm , viga B (estado 1)

Esfuerzos cortantes

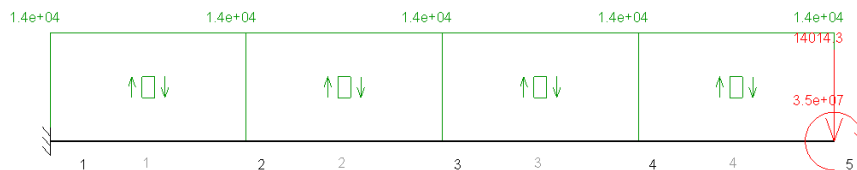


Figura 47: Diagrama de cortantes viga B.

Módulo resistente necesario: 319,95 cm³.

Como en los perfiles anteriores, se ponderará tanto la fuerza de la gravedad, como la reacción vertical como el momento transmitido por el perfil anterior.

Perfil teórico:

- Base mínima: $188,20 + 2 * 10,00 = 208,20$ mm.
- Altura mínima: $357,80 + 2 * 10,00 = 377,80$ mm.
- Radio esquinas: 20,00 mm.

b (mm)	h (mm)	e (mm)	Ix (mm ⁴)	Wx (cm ³)	Iy (mm ⁴)	Wy (cm ³)
208,200	377,800	7,600	60988325,274	322,860	9729350,682	93,462

Tabla 5: Cálculo teórico perfil viga B.

Simulación:

Para la simulación, se empotró a la viga y se le sometió a la fuerza de la gravedad ponderada por el coeficiente ψ , a la carga de diseño y al momento transmitido ponderados por el coeficiente ϕ , y a la acción del viento.

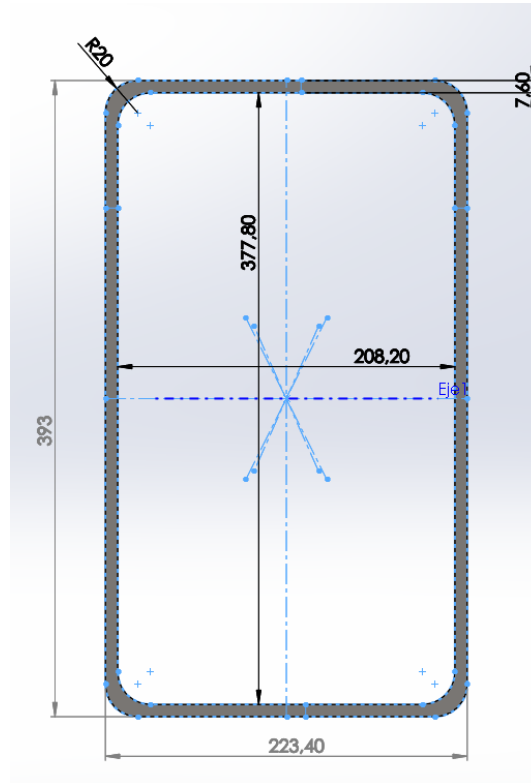


Figura 48: Sección del perfil viga B.

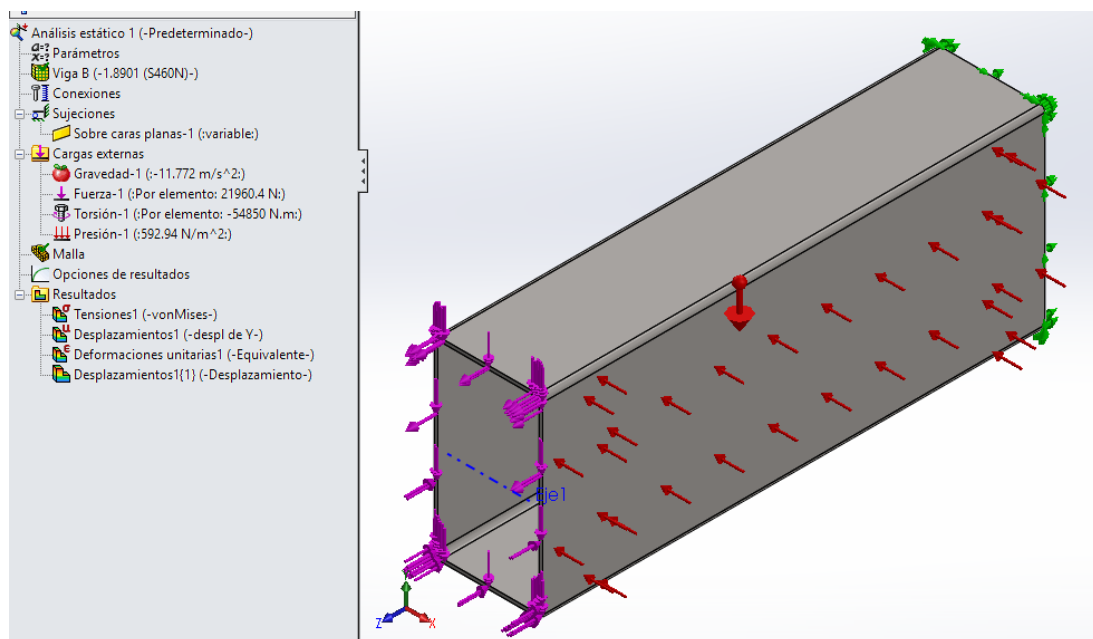


Figura 49: Esfuerzos de simulación combinados viga B.

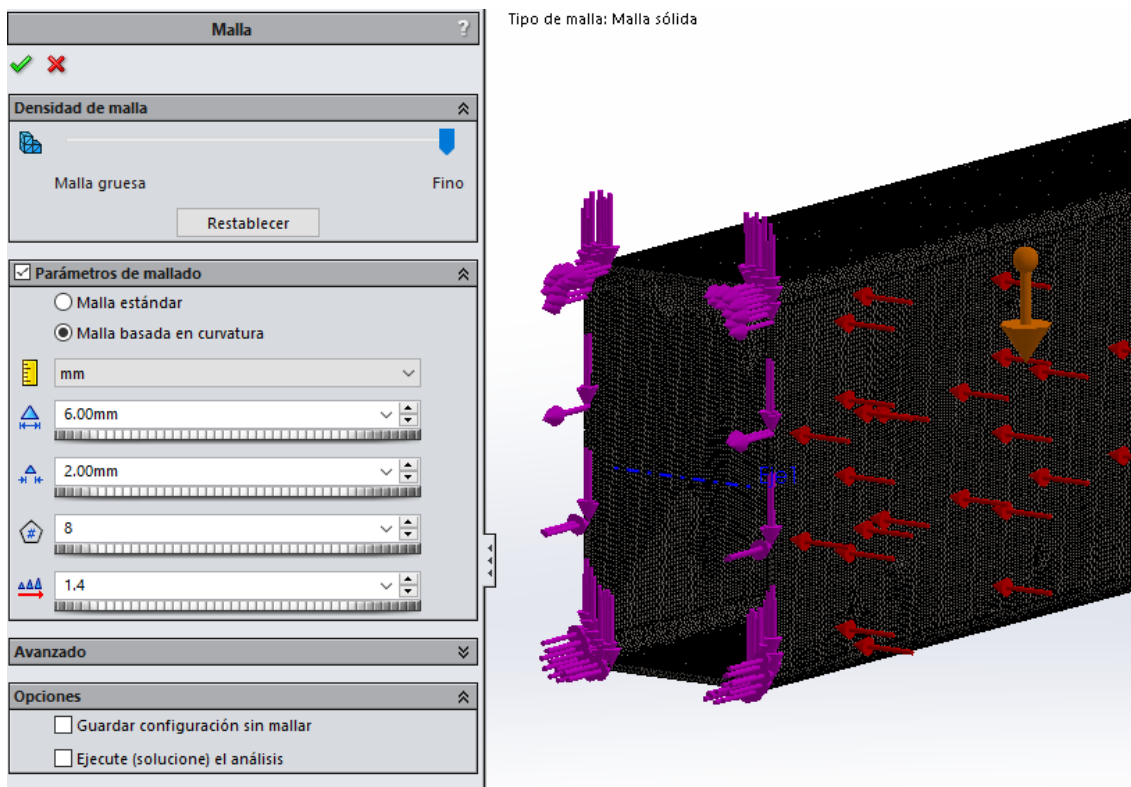


Figura 50: Mallado viga B.

Procedemos a lanzar la simulación:

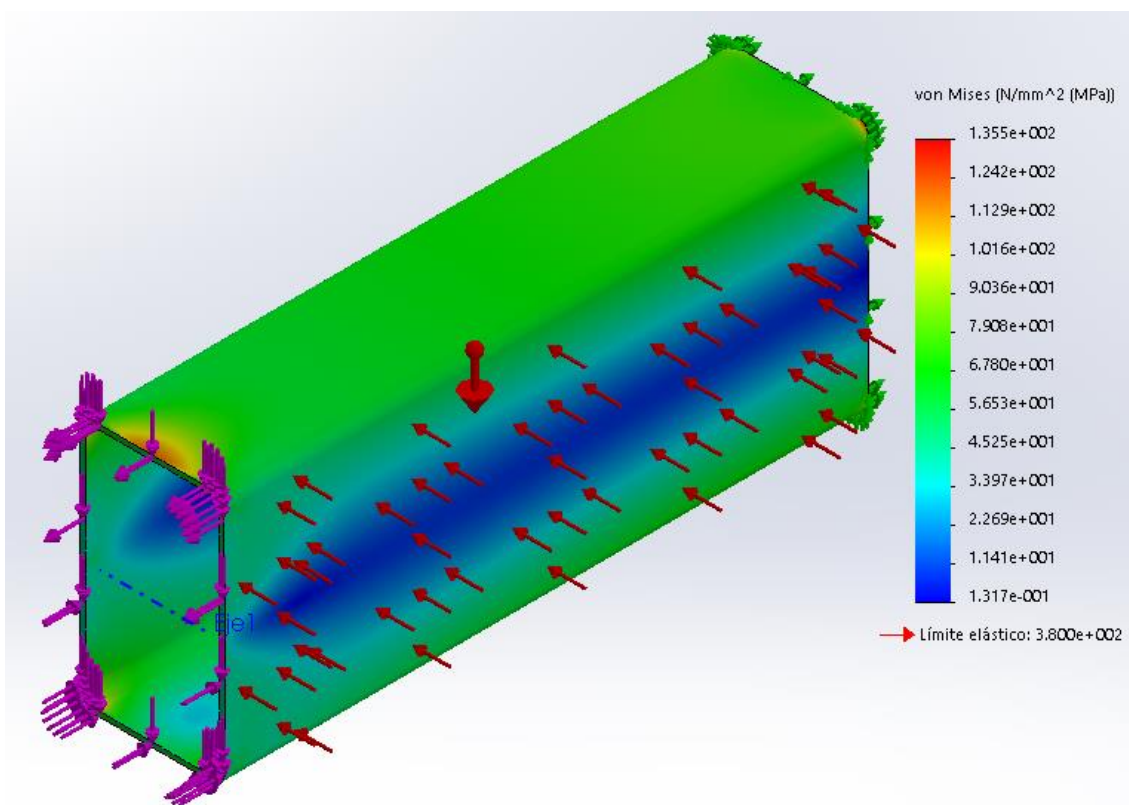


Figura 51: Tensión de Von Mises viga B.

Comprobamos que estamos dentro de los límites de tensión establecidos por la norma. Sin embargo, a fin de intentar homogeneizar lo más posible los espesores de las vigas, se va a aumentar el espesor hasta 9 mm, aunque estemos sobredimensionando el perfil.

Volvemos a lanzar la simulación:

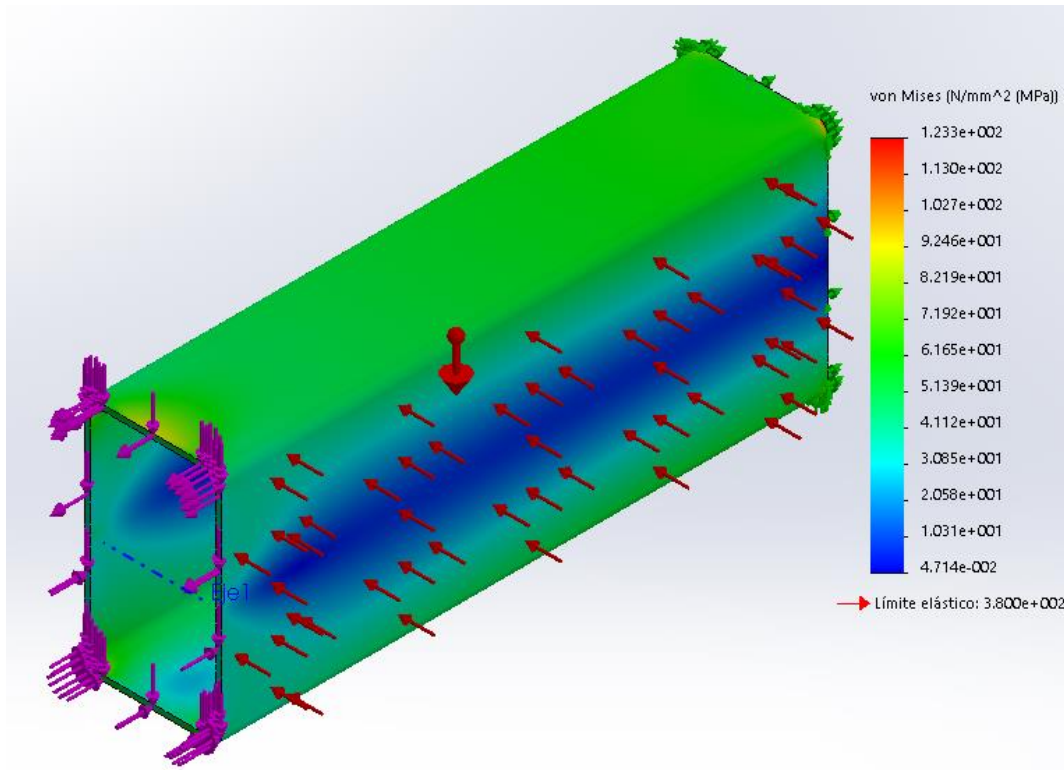


Figura 52: Nueva tensión de Von Mises viga B.

Y calculamos la flecha:

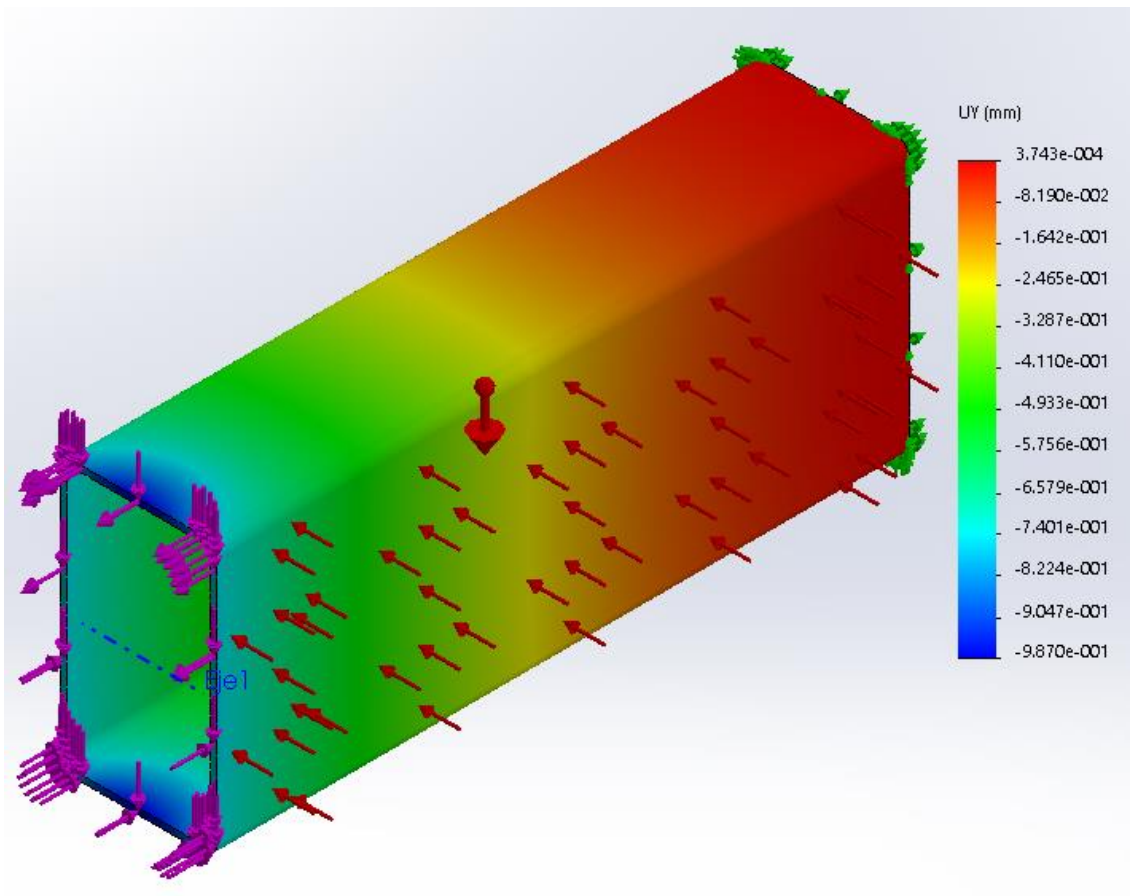
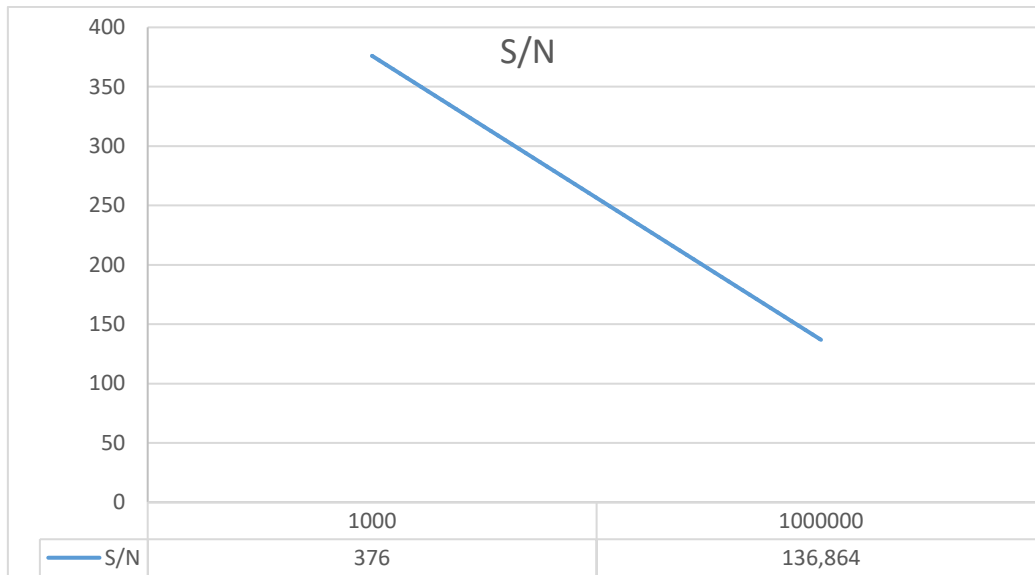


Figura 53: Desplazamiento en Y viga B.

Comprobación a fatiga.

Datos conocidos:

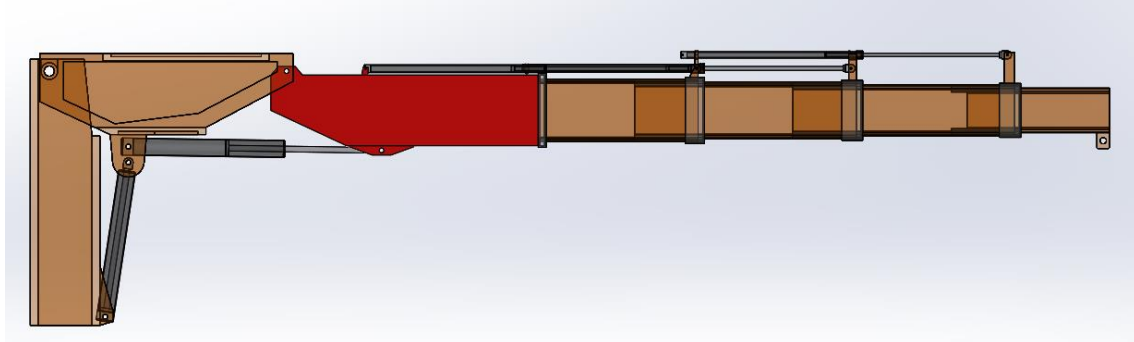
- Tensión máxima: 123,30 MPa.
- Curva S/N del acero.



Comprobamos que en este caso no alcanzamos el valor mínimo de la curva S/N, de manera que no es necesario un cálculo a fatiga para este perfil.

4- Componentes estructurales - Perfiles de sujeción.

4.1- Perfiles de sujeción – Perfil viga A2.



Este perfil es el primero del conjunto de tres perfiles que sujeta a las extensiones. Define la extensión mínima de la grúa y en su interior alojará a los perfiles extensibles cuando no sean necesarios.

Está unido a la primera extensión (viga B) mediante patines, a la viga A1 mediante pasadores y, para la compensación del momento flector, estará también unido a la viga A1 mediante un cilindro hidráulico con su correspondiente pasador.

La idea básica es que el cilindro hidráulico ejerza el momento en un punto de pivote situado en la parte superior de la viga, como representa el siguiente croquis:

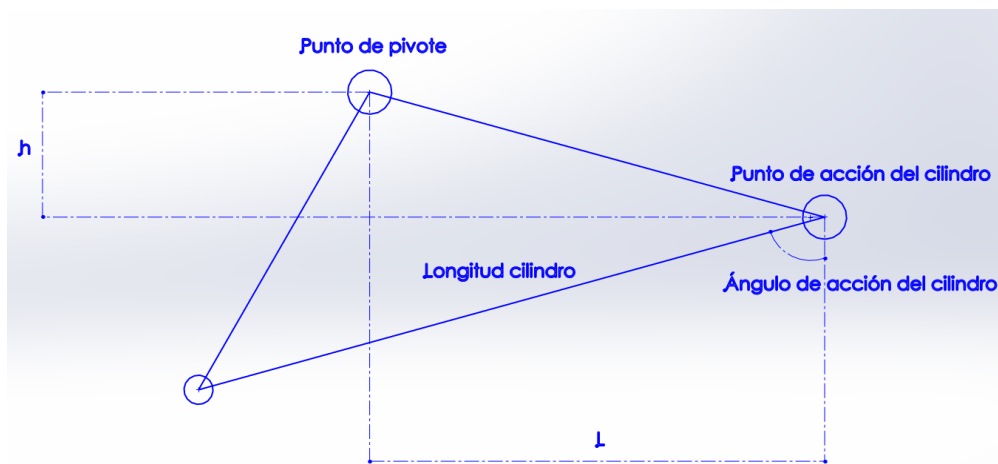


Figura 54: Croquis del cálculo básico para el cilindro hidráulico.

Se pretende que la fuerza total que tenga que ejercer el cilindro esté por debajo de las 15 toneladas. También como condición, se quiere que la distancia “L” sea la mínima posible y que el ángulo de acción del cilindro sea el mayor posible. La altura “h” estará definida en gran medida por la altura del perfil y por los radios de los pasadores, de manera que es este parámetro el que primero calcularemos.

El primer cálculo se va a realizar de manera idéntica al de los perfiles de extensión, no teniendo en cuenta más que los esfuerzos flectores y cortantes producidos por la carga y a los esfuerzos del viento. Una vez tengamos unas medidas de referencia del perfil, se añadirán las modificaciones pertinentes para los alojamientos de los pasadores y para la acción del cilindro.

Cálculo teórico de medidas principales de la viga.

Representación de los diagramas de sólido libre simplificados mediante MEFI:

Extensión 7000 mm , viga A2 primer análisis. (estado 1)

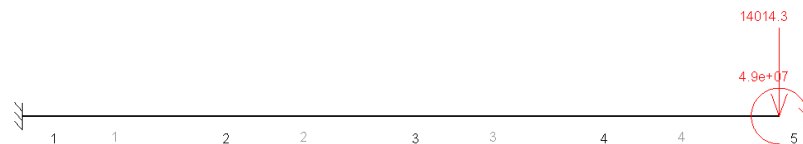


Figura 55: Representación teórica viga A2.

Para este primer dimensionamiento, se ha empotrado a la barra en un extremo y se le ha dado una longitud de 1000 mm, que será la longitud mínima que necesitará para alojar a la viga B. En la siguiente imagen se muestran dicha longitud dividida en 4 tramos:

TÍTULO Extensión 7000 mm , viga A2 primer análisis.			
PUNTOS			
%	pun	X	Y
1		0.0	0.0
2		250.0	0.0
3		500.0	0.0
4		750.0	0.0
5		1000.0	0.0

Figura 56: Longitud viga A2.

Una vez creada la barra lanzamos el cálculo de los esfuerzos.

Diagramas de esfuerzos:

Extensión 7000 mm , viga A2 primer análisis. (estado 1)

Momentos flectores

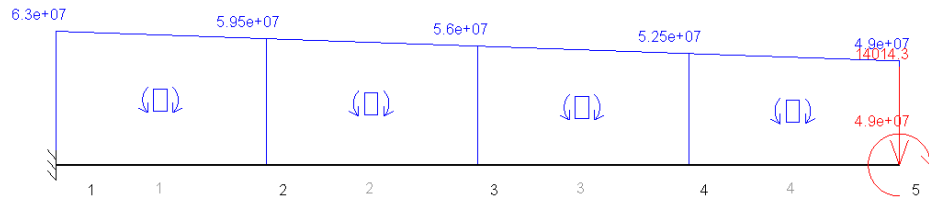


Figura 57: Diagrama de momentos viga A2.

Extensión 7000 mm , viga A2 primer análisis. (estado 1)

Esfuerzos cortantes

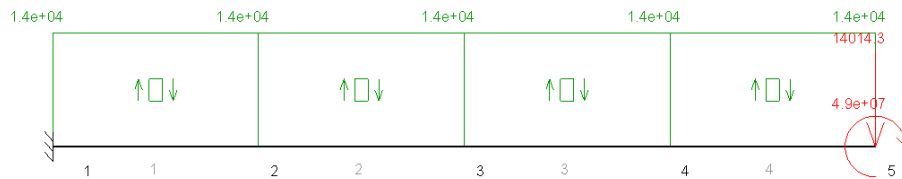


Figura 58: Diagrama de cortantes viga A2.

Módulo resistente necesario: 411,42 cm³.

Perfil teórico:

- Base mínima: $226,20 + 2 * 10,00 = 246,20$ mm.
- Altura mínima: $395,80 + 2 * 10,00 = 415,80$ mm.
- Radio esquinas (solo interior): 20,00 mm.

b (mm)	h (mm)	e (mm)	Ix (mm ⁴)	Wx (cm ³)	Iy (mm ⁴)	Wy (cm ³)
246,200	415,800	8,000	86029609,269	413,803	17114562,357	139,030

Tabla 6: Cálculo teórico perfil viga A2.

Simulación:

Para la simulación, se empotró a la viga y se le sometió a la fuerza de la gravedad ponderada por el coeficiente ψ , a la carga de diseño y al momento transmitido ponderados por el coeficiente ϕ , y a la acción del viento.

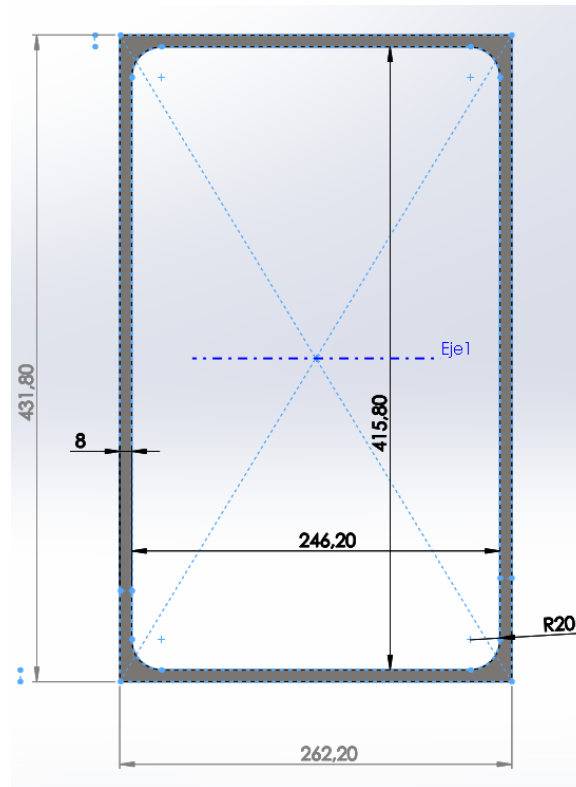


Figura 59: Sección del perfil viga A2.

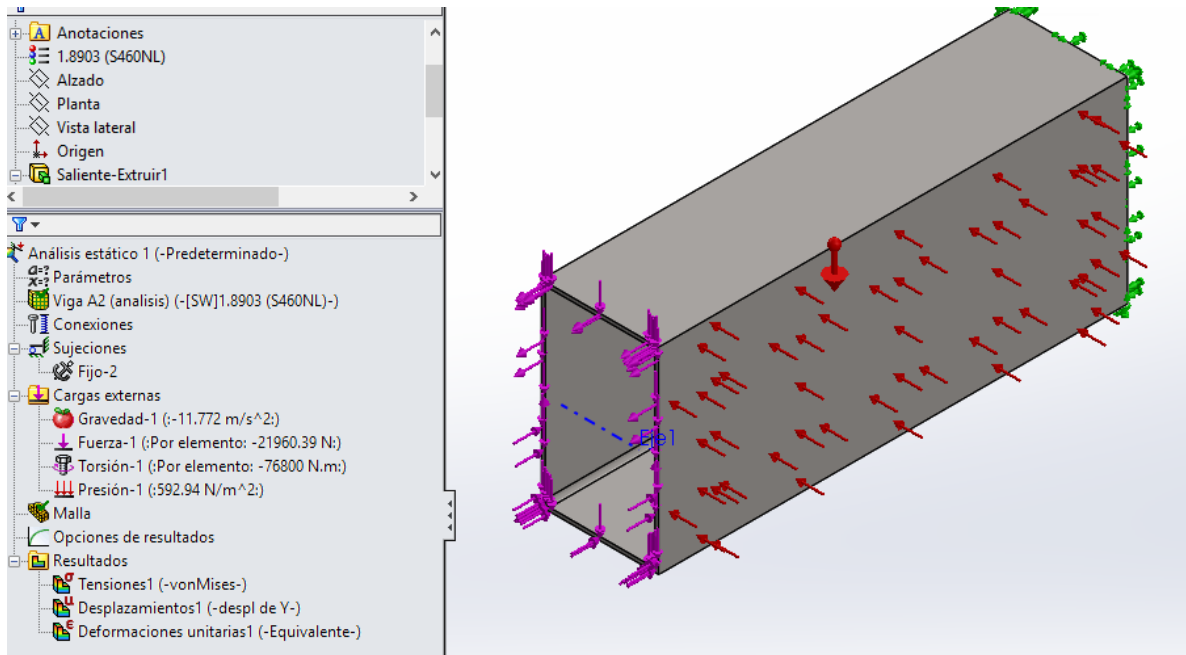


Figura 60: Esfuerzos simulación combinados viga A2.

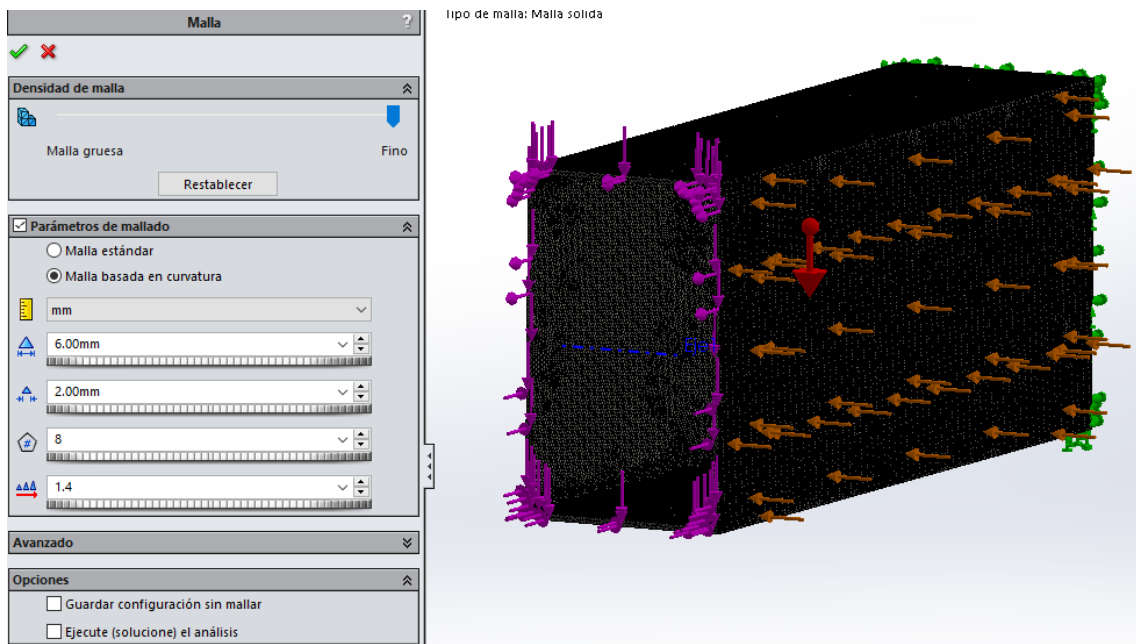


Figura 61: Mallado viga A2.

Lanzamos la simulación:

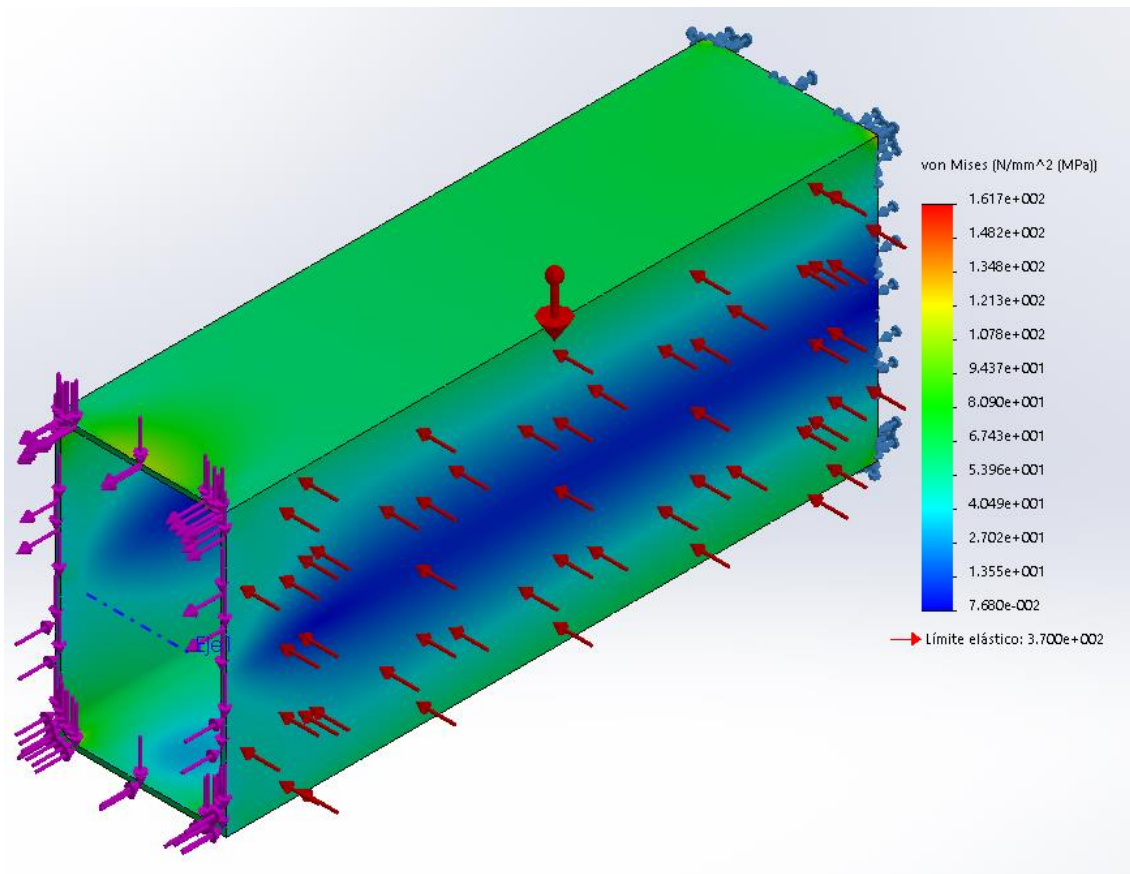


Figura 62: Tensión de Von Mises viga A2.

Superamos el límite establecido por la norma. Aumentamos el espesor a 9 mm:

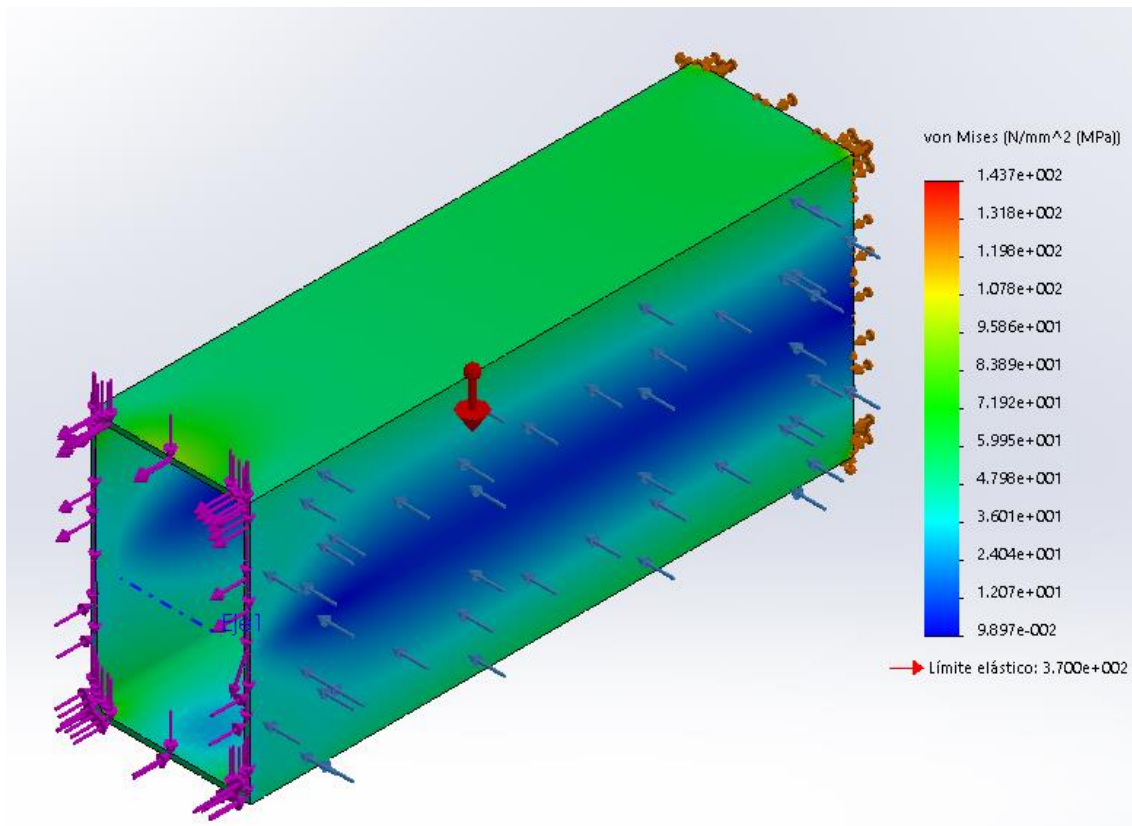


Figura 63: Tensión de Von Mises viga A2 (2).

Una vez comprobado que el valor de tensión cumple con la normativa, se procede al cálculo de la fuerza del cilindro hidráulico.

La siguiente figura representa el diagrama de sólido libre de la viga:

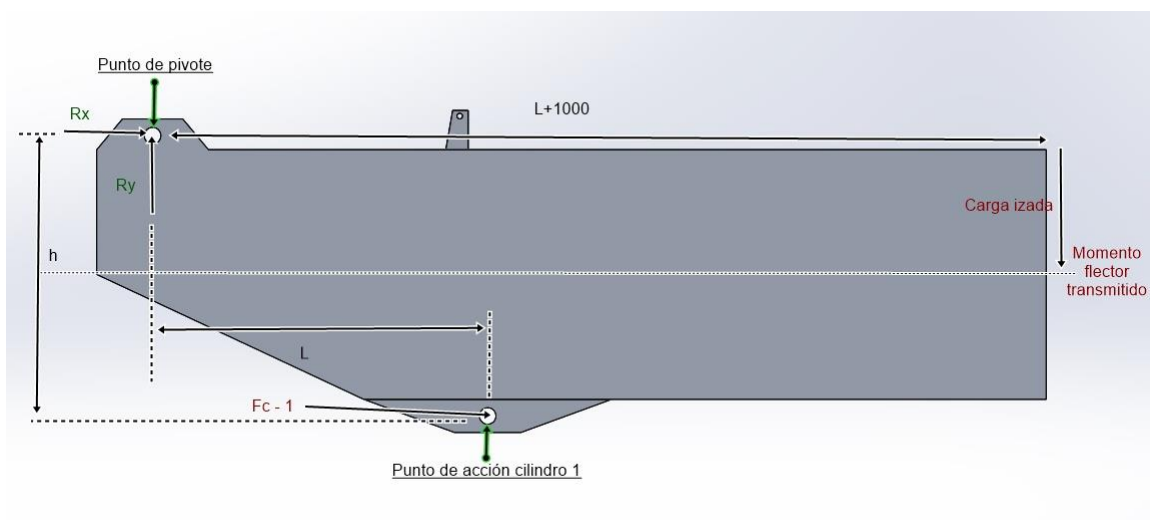


Figura 64: Diagrama sólido libre viga A2.

Se toma una altura de pivote inicial de 380 mm y se procede al cálculo de la longitud "L" y del ángulo de acción del cilindro. Para ello definimos una tabla Excel en la que variamos el ángulo desde 50 a 90° y la longitud desde 500 a 1500 mm.

Las reacciones a compensar serán las generadas por el momento flector transmitido por la viga anterior más el momento flector generado por la reacción vertical transmitida también por ese perfil. De manera que:

$$F_c = \frac{M_z + R_y * (1000 + L)}{\text{seno}(\gamma) * h + \text{cos}(\gamma) * L}$$

Ángulo gamma	Ángulo gamma (rad)	Longitud	Fc necesaria (h=380)	Fc necesaria (ton)
50,00	0,87	500,00	114321,78	11,43
50,00	0,87	600,00	105534,14	10,55
50,00	0,87	700,00	98271,01	9,83
50,00	0,87	800,00	92167,34	9,22
50,00	0,87	900,00	86966,03	8,70
50,00	0,87	1000,00	82480,73	8,25
50,00	0,87	1100,00	78573,12	7,86
50,00	0,87	1200,00	75138,34	7,51
50,00	0,87	1300,00	72095,48	7,21
50,00	0,87	1400,00	69381,07	6,94
50,00	0,87	1500,00	66944,65	6,69
60,00	1,05	500,00	120914,83	12,09
60,00	1,05	600,00	113531,84	11,35
60,00	1,05	700,00	107236,08	10,72
60,00	1,05	800,00	101803,86	10,18
60,00	1,05	900,00	97068,91	9,71
60,00	1,05	1000,00	92905,08	9,29
60,00	1,05	1100,00	89214,91	8,92
60,00	1,05	1200,00	85921,94	8,59
60,00	1,05	1300,00	82965,30	8,30
60,00	1,05	1400,00	80295,98	8,03
60,00	1,05	1500,00	77874,03	7,79
70,00	1,22	500,00	132589,86	13,26
70,00	1,22	600,00	127016,68	12,70
70,00	1,22	700,00	122082,65	12,21
70,00	1,22	800,00	117683,79	11,77
70,00	1,22	900,00	113737,50	11,37
70,00	1,22	1000,00	110177,37	11,02
70,00	1,22	1100,00	106949,34	10,69
70,00	1,22	1200,00	104009,03	10,40
70,00	1,22	1300,00	101319,61	10,13
70,00	1,22	1400,00	98850,28	9,89
70,00	1,22	1500,00	96575,08	9,66
80,00	1,40	500,00	151867,72	15,19
80,00	1,40	600,00	149283,59	14,93
80,00	1,40	700,00	146880,52	14,69
80,00	1,40	800,00	144640,12	14,46
80,00	1,40	900,00	142546,40	14,25
80,00	1,40	1000,00	140585,43	14,06
80,00	1,40	1100,00	138744,97	13,87
80,00	1,40	1200,00	137014,23	13,70
80,00	1,40	1300,00	135383,69	13,54
80,00	1,40	1400,00	133844,90	13,38
80,00	1,40	1500,00	132390,32	13,24
90,00	1,57	500,00	184255,70	18,43
90,00	1,57	600,00	187941,16	18,79
90,00	1,57	700,00	191626,52	19,16
90,00	1,57	800,00	195311,80	19,53
90,00	1,57	900,00	198996,98	19,90
90,00	1,57	1000,00	202682,08	20,27
90,00	1,57	1100,00	206367,09	20,64
90,00	1,57	1200,00	210052,00	21,01
90,00	1,57	1300,00	213736,83	21,37
90,00	1,57	1400,00	217421,56	21,74
90,00	1,57	1500,00	221106,21	22,11

Tabla 7: Iteraciones de cálculo de la fuerza del cilindro.

Se comprueba en la tabla que el ángulo que mejor cumple nuestras exigencias es el de 80° con una longitud de acción de 600 mm. Por tanto la capacidad del cilindro hidráulico será de 14,92 toneladas.

Conociendo estos datos, procedemos a calcular los pasadores:

Pasador superior – Punto de pivote:

Este pasador va a estar sometido a las siguientes solicitaciones:

- Acción del cilindro hidráulico, de valor 149283,5927 N.
- Reacción total provocada por el momento flector más la acción del cilindro.

La reacción la calculamos resolviendo el diagrama de sólido libre:

$$\sum F_x = 0 \rightarrow F_c * \text{seno}(\gamma) - R_x = 0$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow F_c * \text{coseno}(\gamma) + R_y - R_{\text{viga B}} = 0$$

$$\sum M_{z \rightarrow \text{Punto de pivote}} = 0 \rightarrow F_c * \text{seno}(\gamma) * h + F_c * \text{coseno}(\gamma) * L - R_{\text{viga B}} * (1000 + L) - M_{\text{viga B}} = 0$$

Introducimos las ecuaciones en una tabla Excel y calculamos las reacciones:

Ángulo gamma (°)	Ángulo gamma (rad)	Longitud (mm)	Fc necesaria (h=380)	Fc necesaria (ton)	Carga (N)	Rx (N)	Ry (N)	Rtotal (N)
80	1,396222222	600	149283,5927	14,92835927	14014,29	147014,5719	11914,5878	147496,582

Tabla 8: Cálculo de las reacciones en el pasador.

La reacción total, por tanto, que soporta el pasador es de 147496,582 N

Cálculo a cortante:

Por la normativa conocemos que el valor límite de la tensión a cortante sobre el pasador ha de ser de 168 MPa. Con este dato aplicamos la fórmula.

$$r_{\text{pasador}} = \sqrt{\frac{0,5 * \varphi * R_{\text{total}}}{\tau_{\text{lim}} * \pi}}$$

Siendo:

- φ el coeficiente de seguridad.
- τ_{lim} la tensión límite, de valor 168 MPa.
- R_{total} el valor de la reacción calculada dividida para 2, puesto que la unión va a ser a doble cortadura.

Operando nos da un valor de radio de 14,80 mm, por lo tanto el diámetro será de 29,60 mm.

Cálculo por aplastamiento:

Por la normativa conocemos que el valor límite de la tensión por aplastamiento sobre el pasador ha de ser de 210 MPa, si bien el valor límite en nuestra pieza tiene que ser de 153,19 Mpa. Al ser éste último valor el más desfavorable, es el que utilizaremos para el cálculo por aplastamiento.

También conocemos el dato del diámetro, calculado a cortante, de manera que calculamos directamente el espesor de la chapa:

$$b = \frac{0,5 * R_{total}}{\sigma_{lim} * \phi_{pasador}} = \frac{0,5 * 147496,582}{153,19 * 29,60} = 16,26 \text{ mm.}$$

Pasador inferior – Punto de acción del cilindro hidráulico:

Este pasador va a estar sometido a las siguientes sollicitaciones:

- Acción del cilindro hidráulico, de valor 149283,5927 N.

Cálculo a cortante:

Por la normativa conocemos que el valor límite de la tensión a cortante sobre el pasador ha de ser de 168 MPa. Con este dato aplicamos la fórmula.

$$r_{pasador} = \sqrt{\frac{0,5 * \varphi * R_{total}}{\tau_{lim} * \pi}}$$

Operando nos da un valor de radio de 14,88 mm, por tanto el diámetro será de 29,76 mm.

Cálculo por aplastamiento:

Por la normativa conocemos que el valor límite de la tensión por aplastamiento sobre el pasador ha de ser de 210 MPa, si bien el valor límite en nuestra pieza tiene que ser de 153,19 Mpa. Al ser éste último valor el más desfavorable, es el que utilizaremos para el cálculo por aplastamiento.

También conocemos el dato del diámetro, calculado a cortante, de manera que calculamos directamente el espesor de la chapa:

$$b = \frac{0,5 * R_{total}}{\sigma_{lim} * \varnothing_{pasador}} = \frac{0,5 * 149283,5927}{153,19 * 29,76} = 16,37 \text{ mm}$$

Re-diseño del perfil:

Se procede a modificar el perfil siguiendo los cálculos de los pasadores y longitudes de acción del cilindro hidráulico. Tras varias iteraciones se llega a los siguientes cambios:

- La longitud total del perfil se aumenta hasta los 1700 mm. 1000 mm de la longitud original, 600 de la longitud de acción del cilindro y 100 mm de seguridad.
- Se añaden unos apoyos soldados para la acción del cilindro. A estos apoyos se le taladran los alojamientos del pasador, de diámetro 29,60 mm y espesor 16,26 mm.
- Se añade otro apoyo en la parte superior del perfil para la unión de la viga con la A1. A este apoyo también se le añaden los alojamientos para el pasador, de diámetro 29,76 mm. La longitud en este caso, por la propia geometría de la viga, se verá aumentada hasta la anchura total de la misma, de 264,20 mm.
- Se realiza un corte lateral en el perfil debido a que la parte trasera de este influía en algunas de las posiciones (ángulos de inclinación negativos) de la grúa. El primer corte se realiza a un ángulo de 25°.

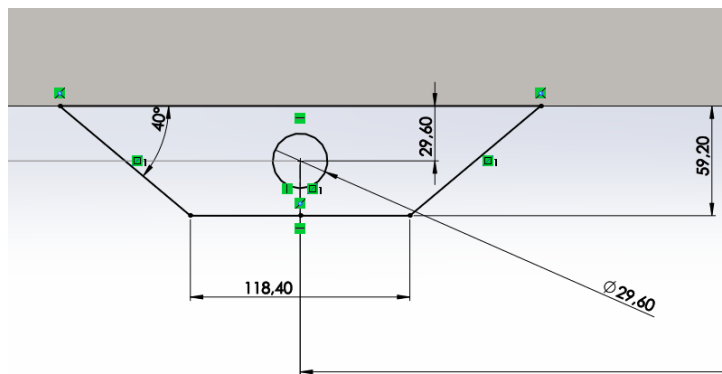


Figura 65: Boceto apoyos inferiores con alojamiento para el pasador del cilindro.

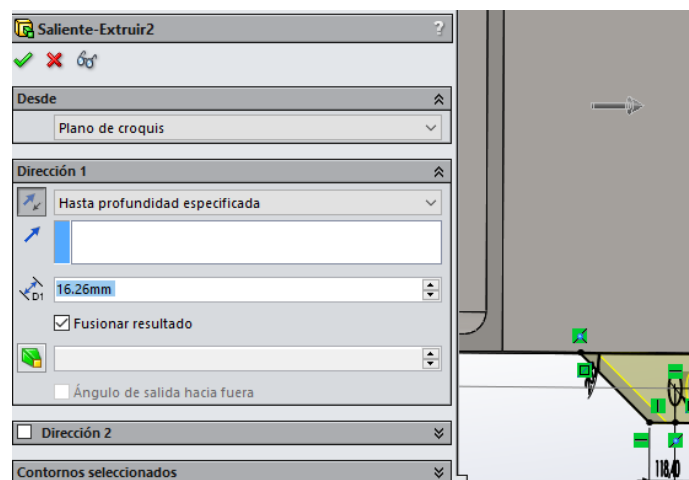


Figura 66: Extrusión apoyos inferiores.

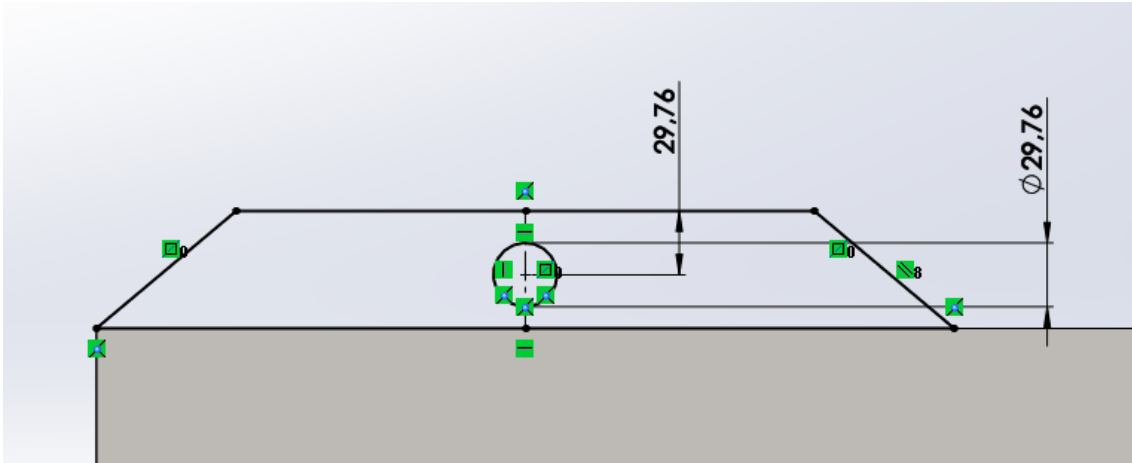


Figura 67: Boceto apoyo superior con alojamiento para pasador de la reacción.

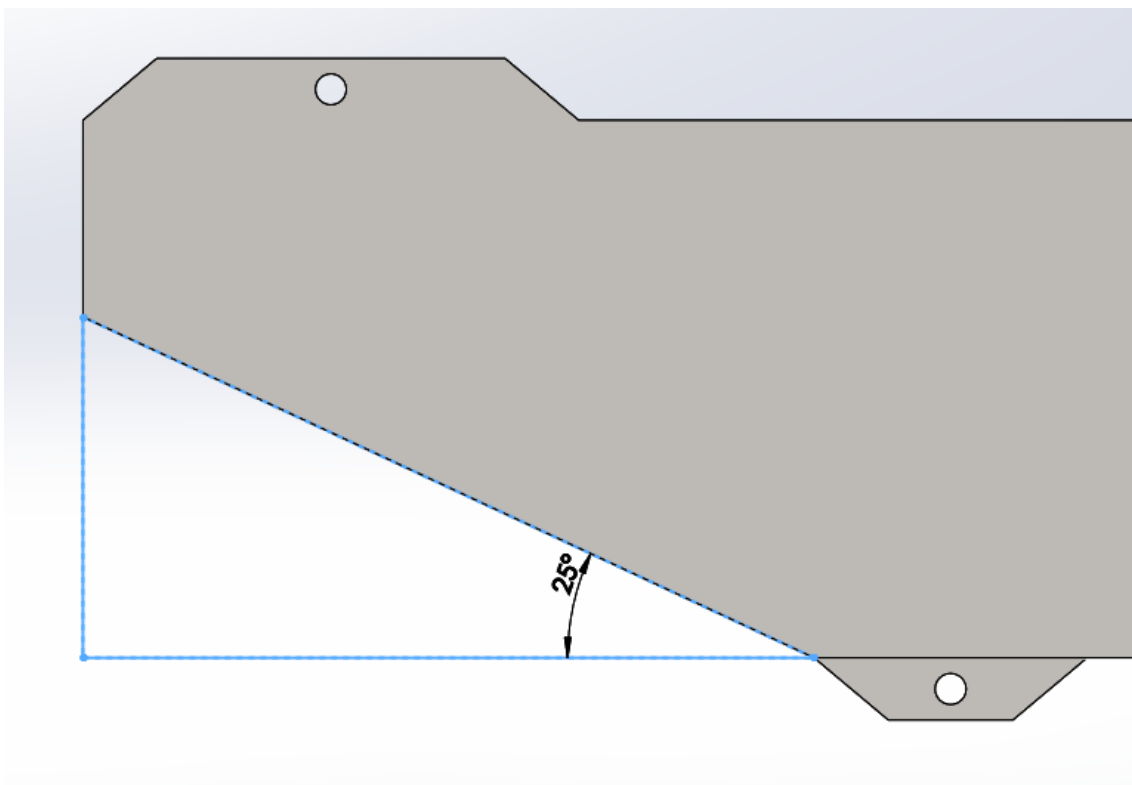


Figura 68: Corte lateral del perfil.

Por último, debido a las modificaciones mencionadas, la altura de acción del cilindro cambia a 488,36 mm:

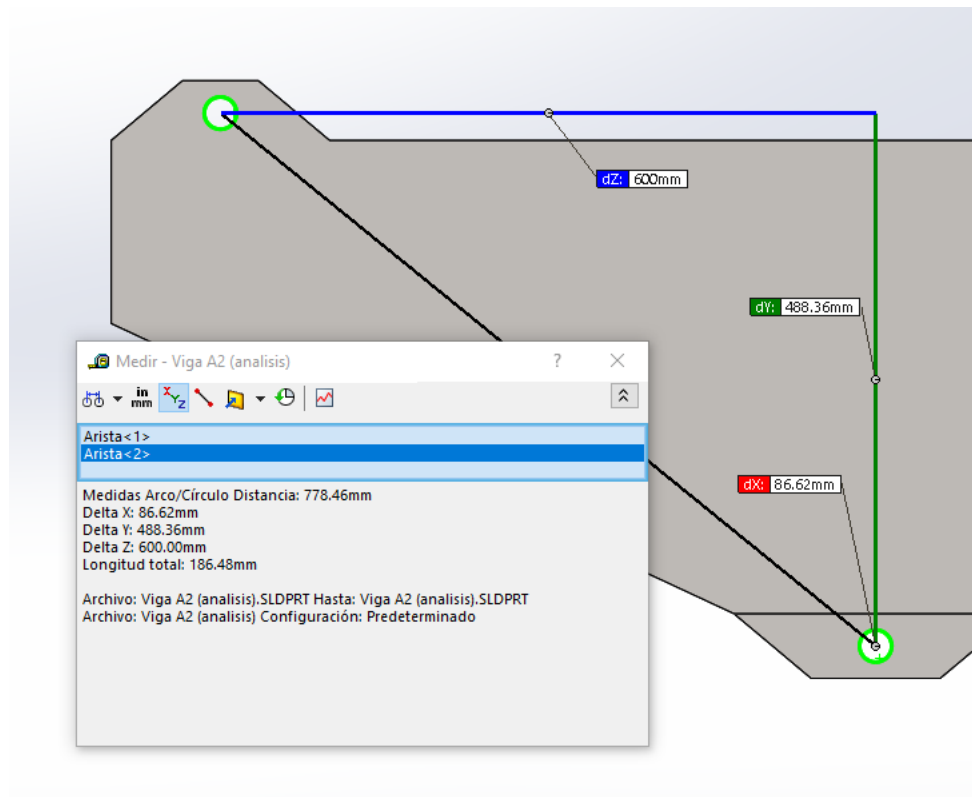


Figura 69: Nueva altura de acción del cilindro.

Lo que nos dará un ángulo mayor de acción del cilindro, en concreto de 90,94°.

Las reacciones por tanto también cambiarán:

Ángulo gamma (°)	Ángulo gamma (rad)	Longitud (mm)	Fc necesaria (h=488,36)	Fc necesaria (ton)	Carga (N)	Rx (N)	Ry (N)	Rtotal (N)
90,94	1,587155611	600	149270,4725	14,92704725	14014,29	149250,4986	-16456,1392	150154,973

Tabla 9: Nuevas reacciones en el pasador superior.

Volvemos a calcular el pasador superior:

$$r_{pasador} = \sqrt{\frac{0,5 * \varphi * R_{total}}{\tau_{lim} * \pi}} = 14,93 \text{ mm} \rightarrow \Phi_{pasador} = 29,86 \text{ mm.}$$

$$b = \frac{0,5 * \varphi * R_{total}}{\sigma_{lim} * \Phi_{pasador}} = \frac{0,5 * 1,567 * 150154,973}{153,19 * 29,86} = 25,72 \text{ mm}$$

Se procede a la simulación por EF:

Para la simulación por elementos finitos, se decidió generar una nueva pieza que representará parte del vástago del cilindro hidráulico, y unirla mediante pasador a la viga. Esta pieza se inclinará según el ángulo calculado de $90,94^\circ$. A continuación se muestra dicha pieza:

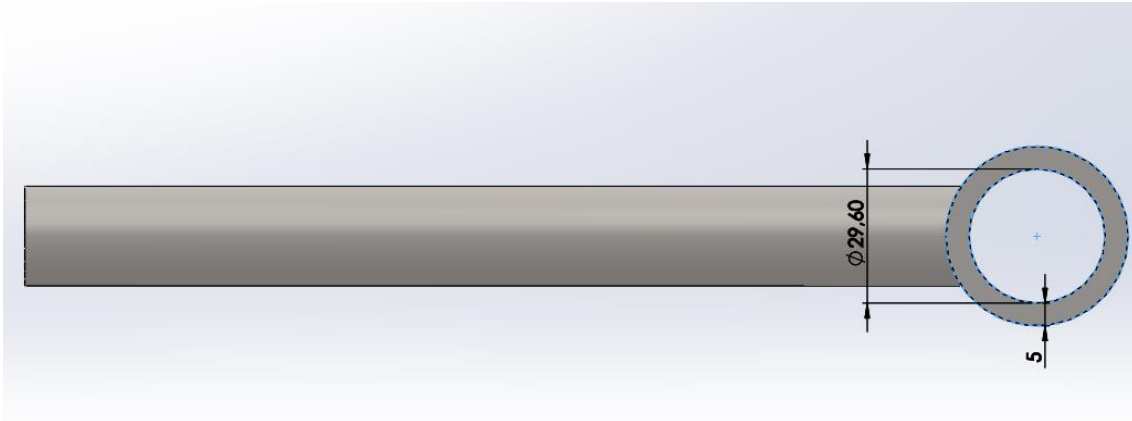


Figura 70: Pieza creada para análisis de viga A2 (1).

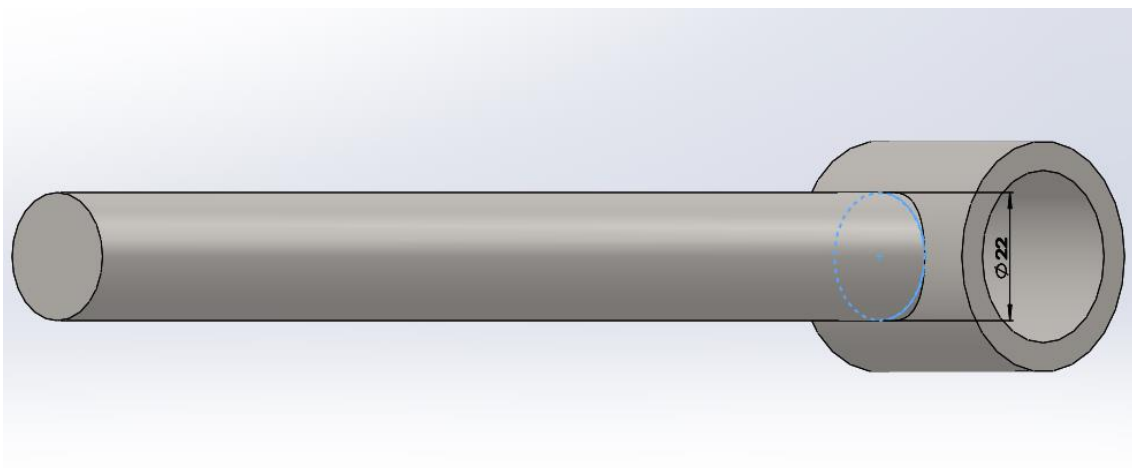


Figura 71: Pieza creada para análisis de viga A2 (1).

Excepto el diámetro del pasador, las demás medidas son irrelevantes para este análisis, ya que a esta pieza se le restringirán todos sus movimientos mediante la herramienta “sujeciones” de SolidWorks (no se le transmitirán tensiones), excepto los movimientos de la cara interior a los que se le dará condición de pasador mediante la herramienta “pasador”.

Se procede al ensamblaje del conjunto:

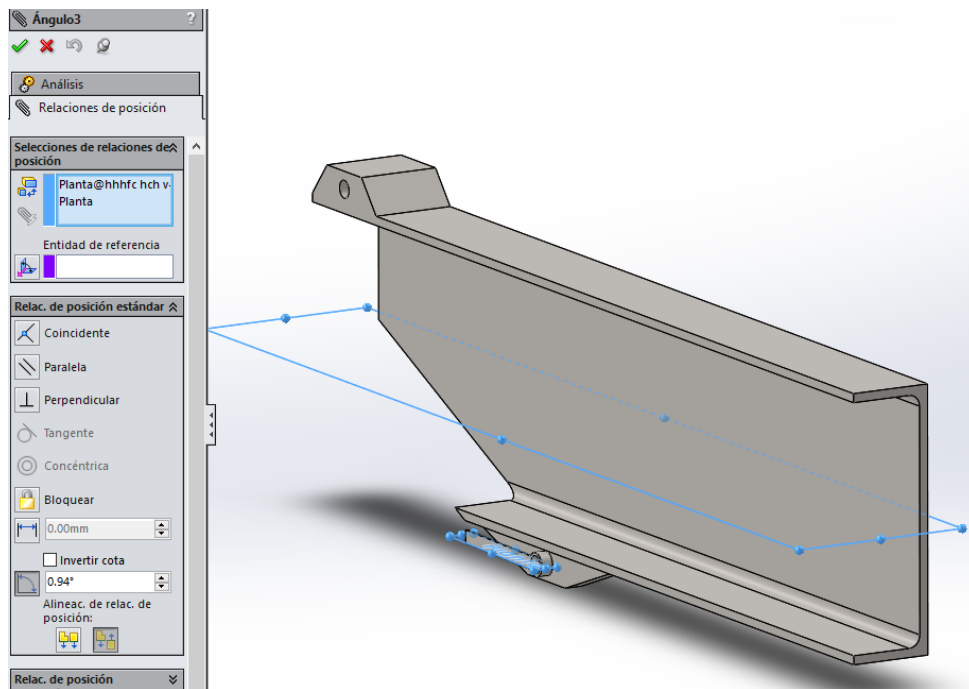


Figura 72: Corte del ensamblaje y ángulo de cilindro con respecto a la planta.

Una vez ensamblado, pasamos a la herramienta de simulation y dotamos al conjunto de las restricciones necesarias:

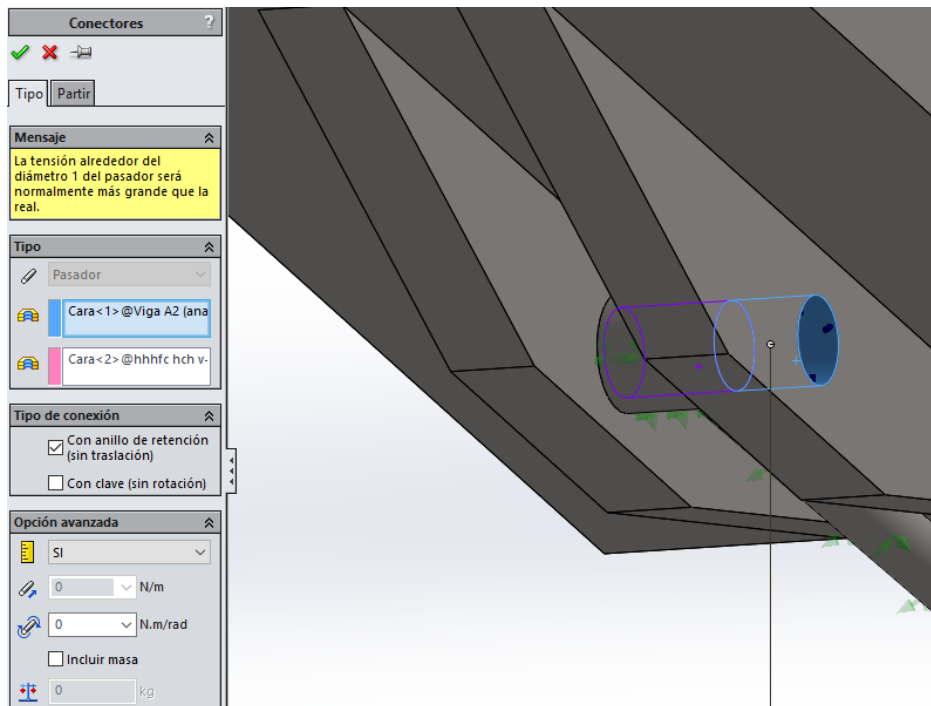


Figura 73: Condición de pasador para análisis viga A2.

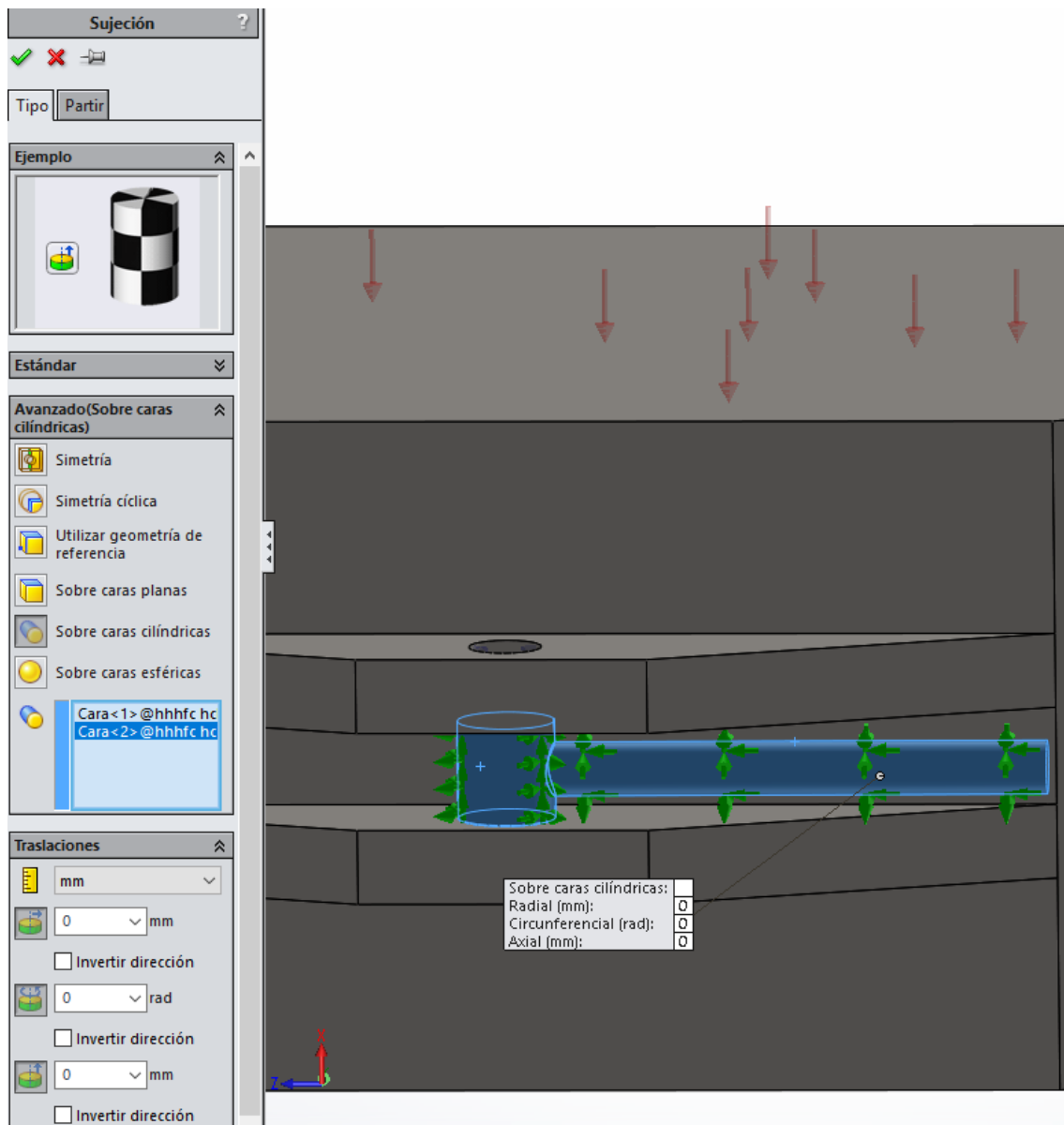


Figura 74: Sujeción pieza vástago.

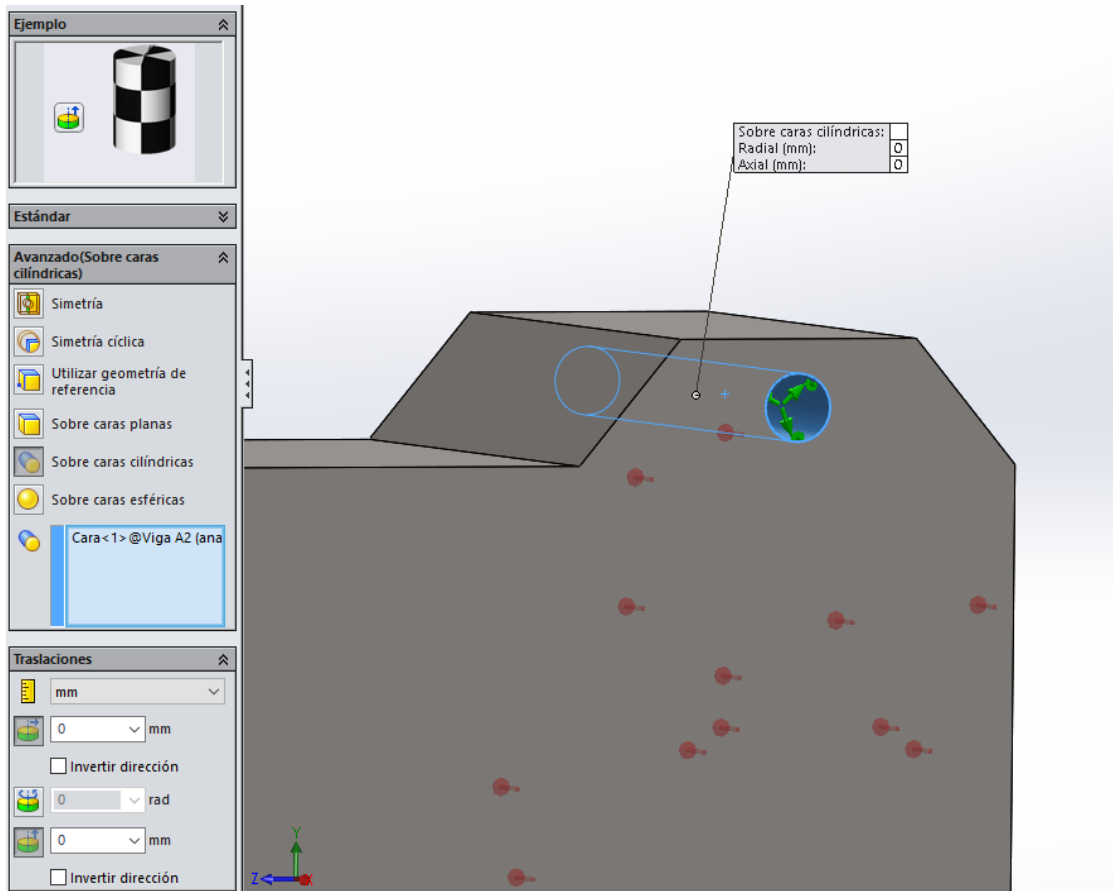


Figura 75: Sujeción pasador superior, momento liberado.

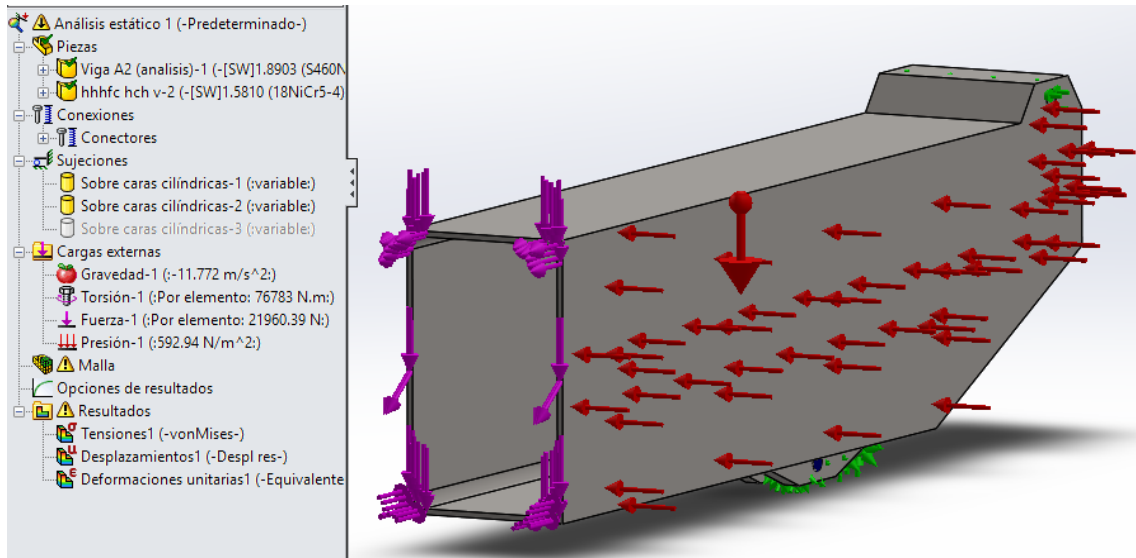


Figura 76: Esfuerzos combinados para análisis viga A2.

Mallamos:

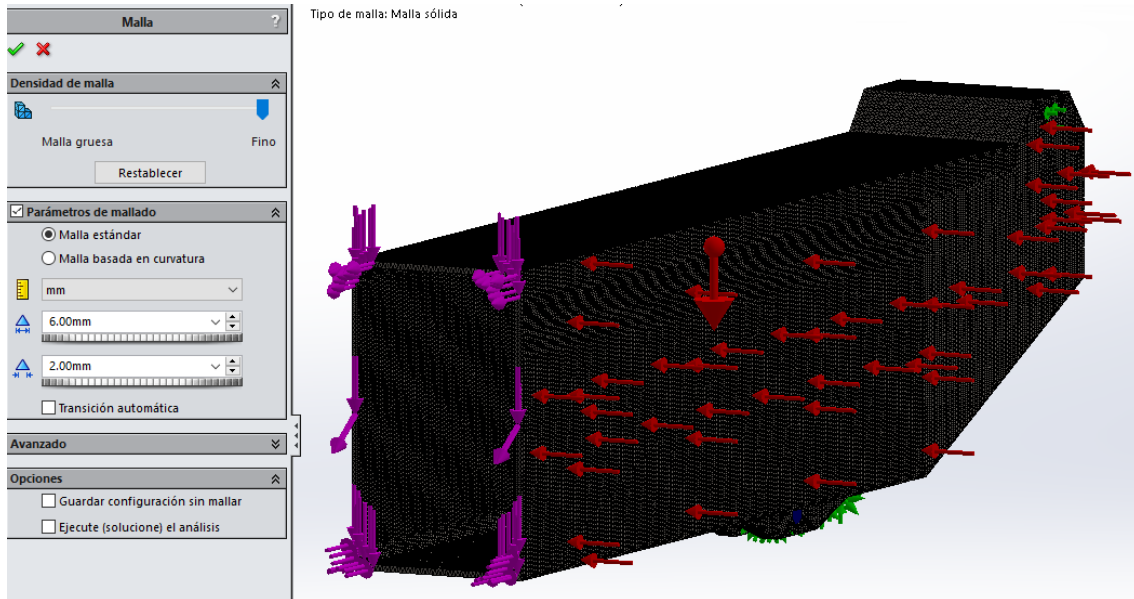


Figura 77: Mallado ensamblaje viga A2.

Lanzamos la simulación:

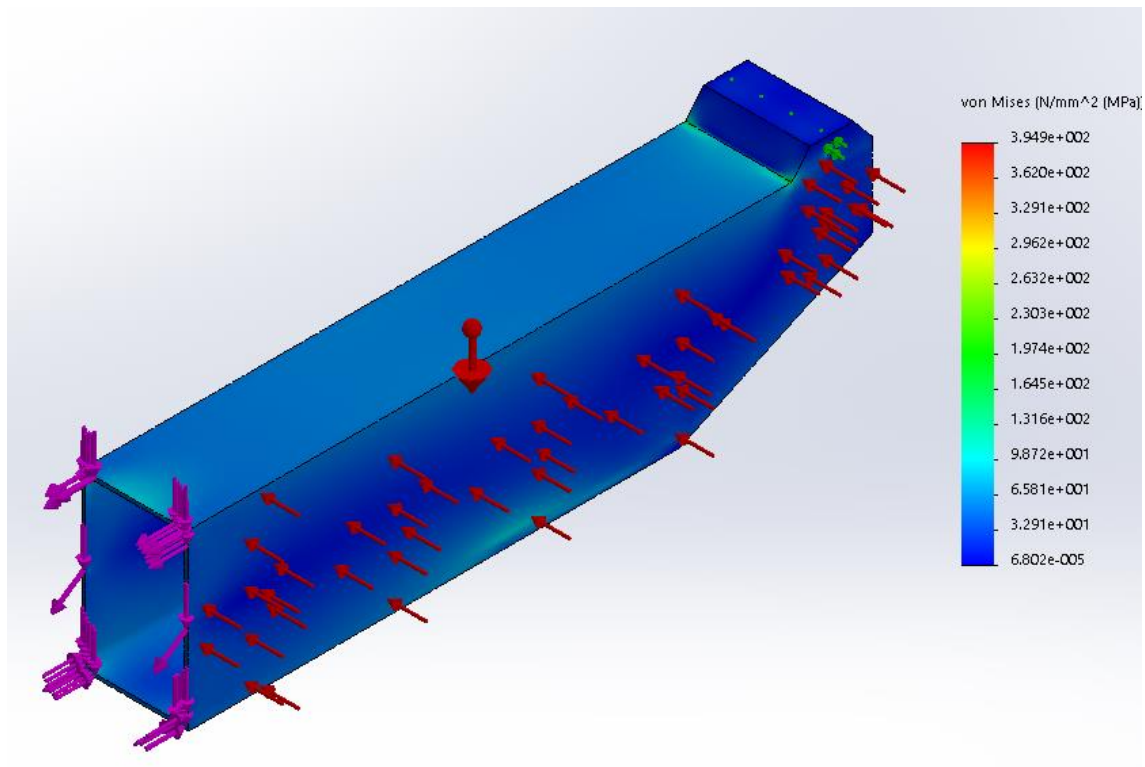


Figura 78: Tensión de Von Mises ensamblaje viga A2.

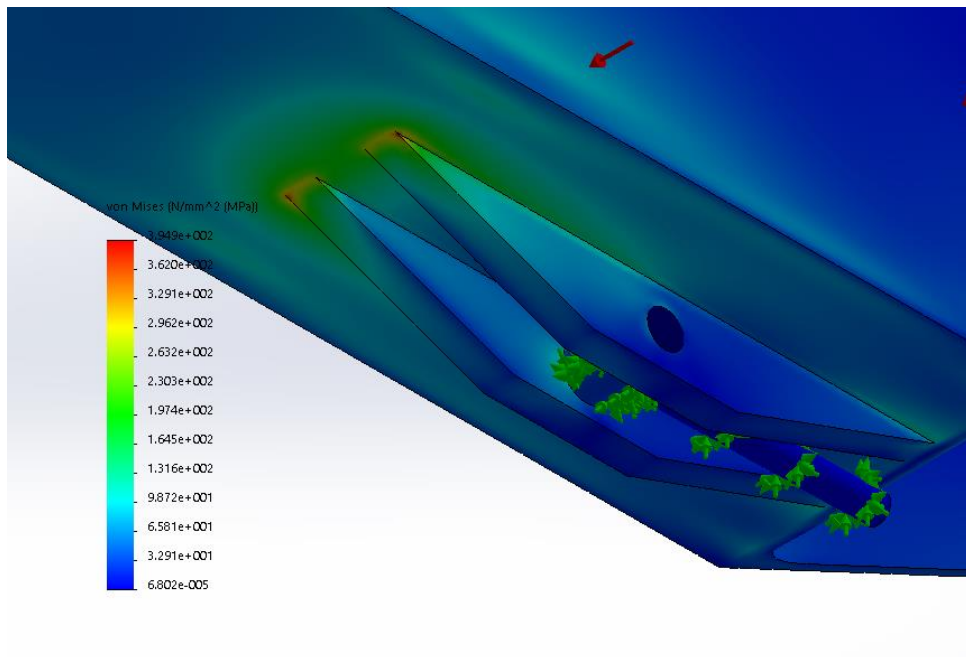


Figura 79: Máxima tensión de Von Mises ensamblaje viga A2.

Comprobamos que en la parte inferior superamos el límite establecido por la norma. Esto es debido a que se ha pasado de soportar los momentos flectores con toda la anchura de la viga a soportarlos en parte con la anchura de los dos soportes y en parte con la viga.

Aumentamos el espesor de la viga a 10 mm y la anchura de los soportes a 27,48 mm y volvemos a simular:

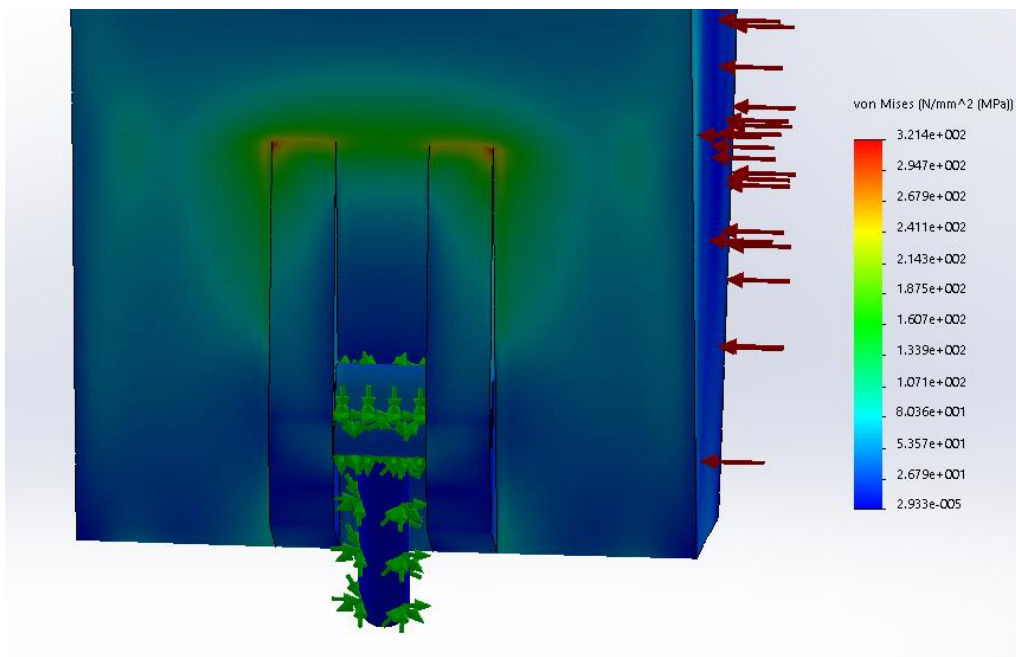


Figura 80: Máxima tensión de Von Mises ensamblaje viga A2 (1).

Aumentamos el espesor del perfil a 11 mm y la anchura de los soportes a 29,48 mm:

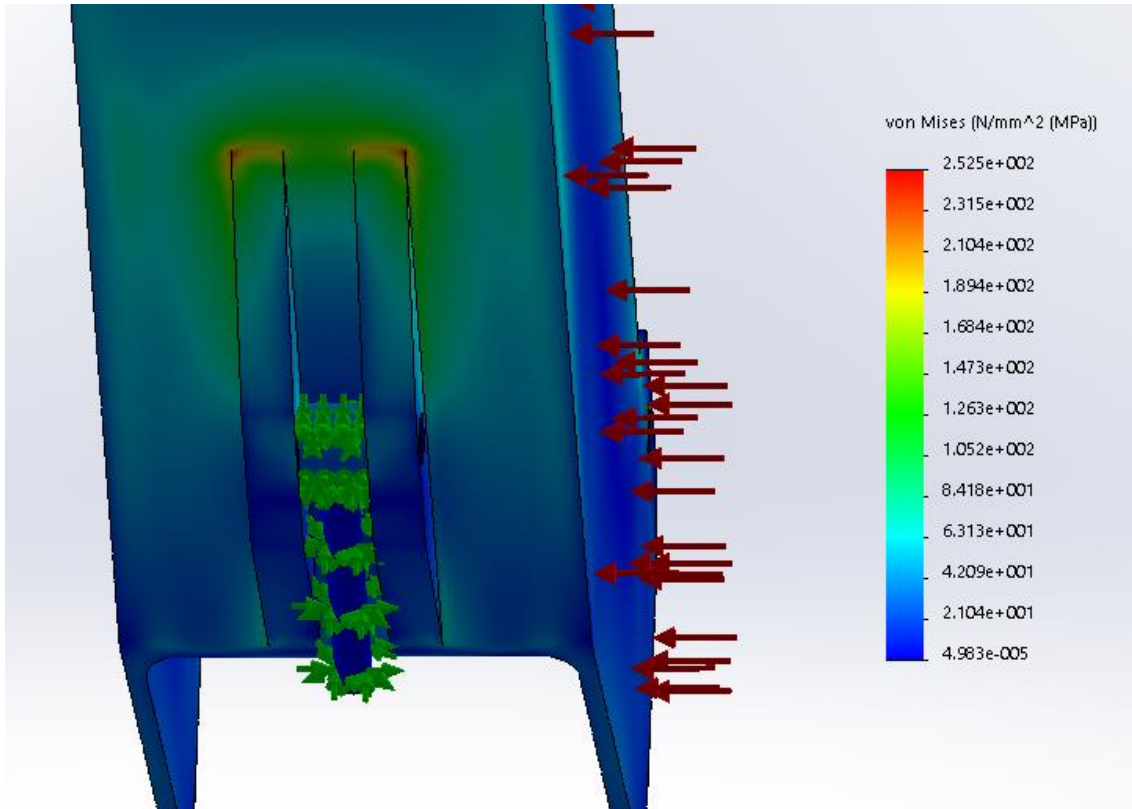


Figura 81: Máxima tensión de Von Mises ensamblaje viga A2 (2).

Aumentamos el espesor a 12 y la anchura a 31,48 mm:

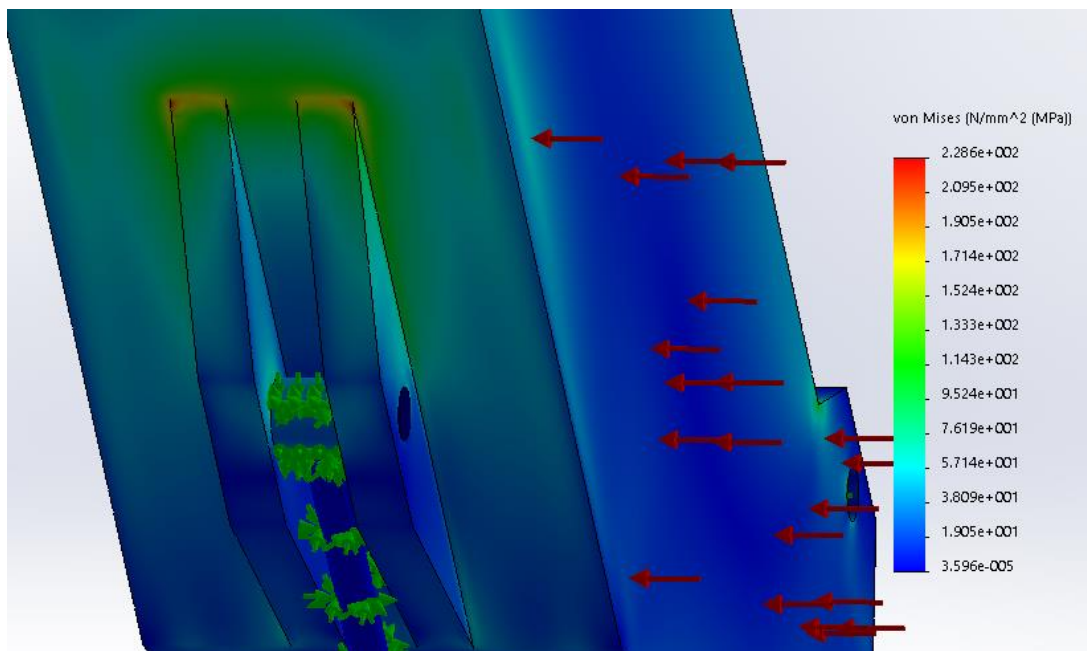


Figura 82: Máxima tensión de Von Mises ensamblaje viga A2 (3).

Realizamos 2 iteraciones más hasta aumentar el espesor del perfil a 15 mm y la anchura de los soportes a 37,48 mm. Lanzamos la simulación:

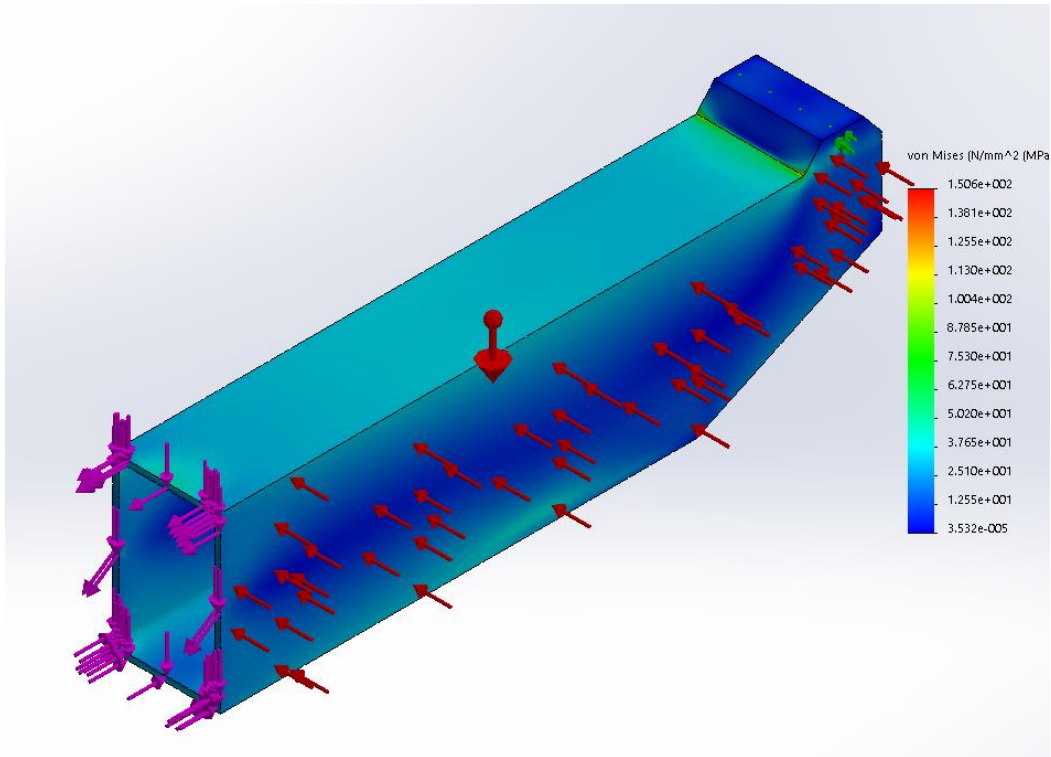


Figura 83: Tensión de Von Mises viga A2.

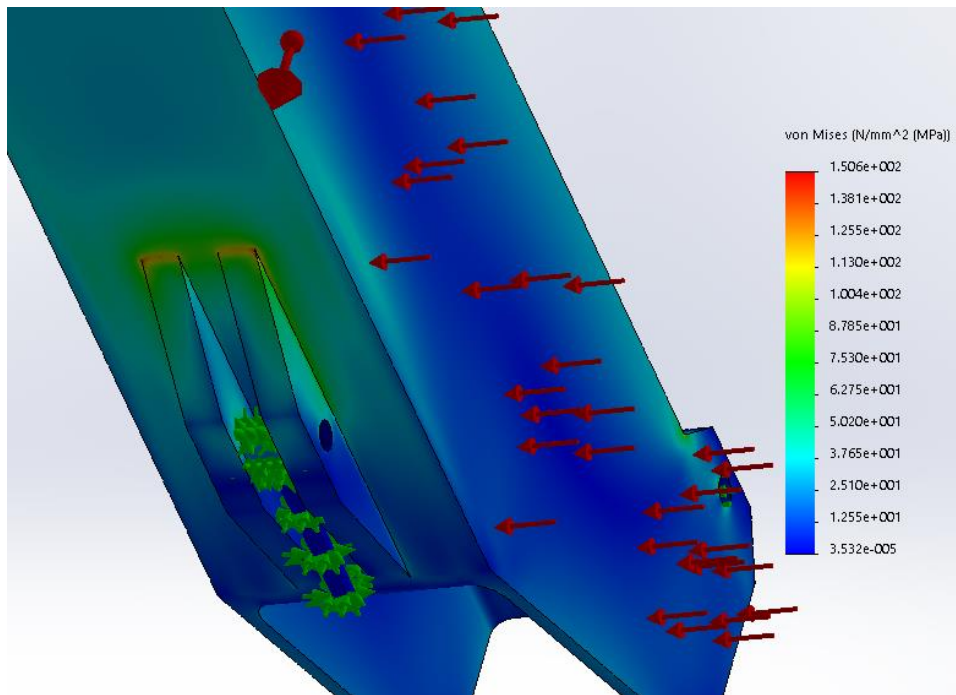


Figura 84: Tensión máxima viga A2.

Por último, calculamos la flecha:

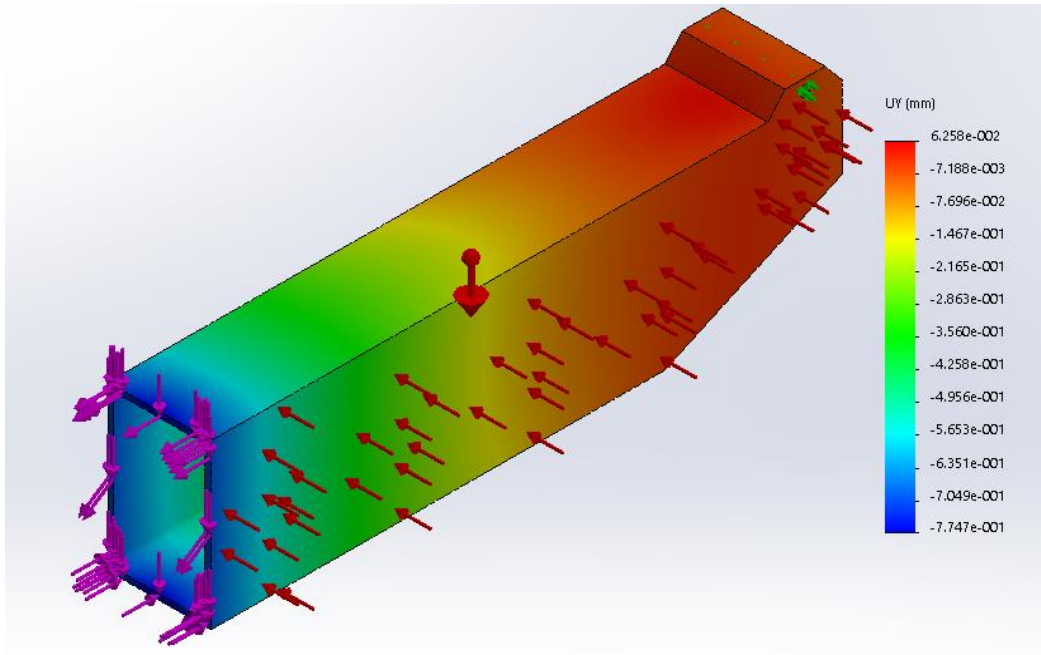


Figura 85: Desplazamiento en Y viga A2.

Comprobación a fatiga.

La comprobación a fatiga de esta viga se va a realizar directamente mediante elementos finitos:

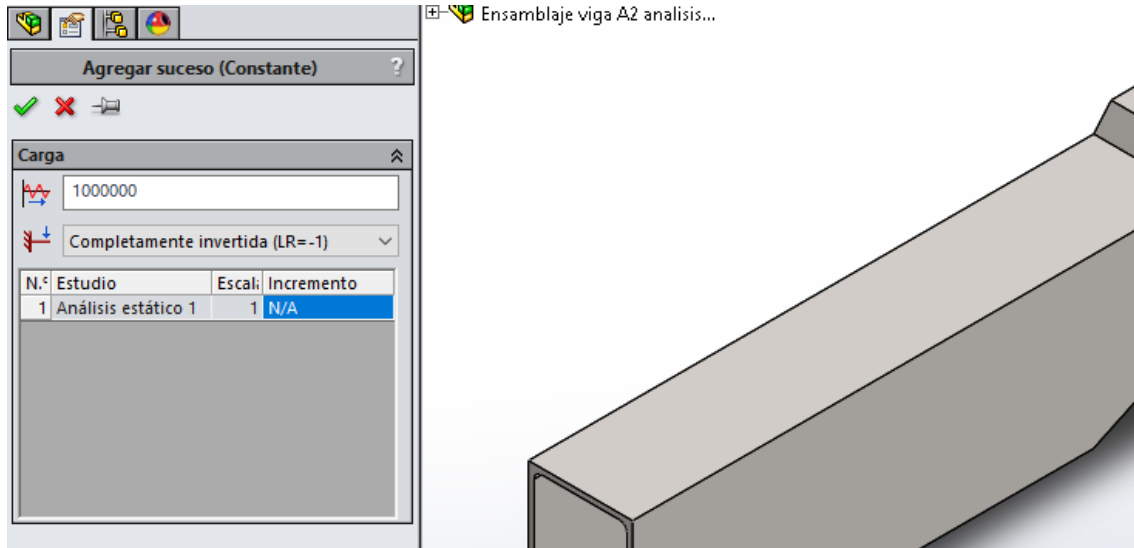


Figura 86: Definición del suceso de fatiga viga A2.

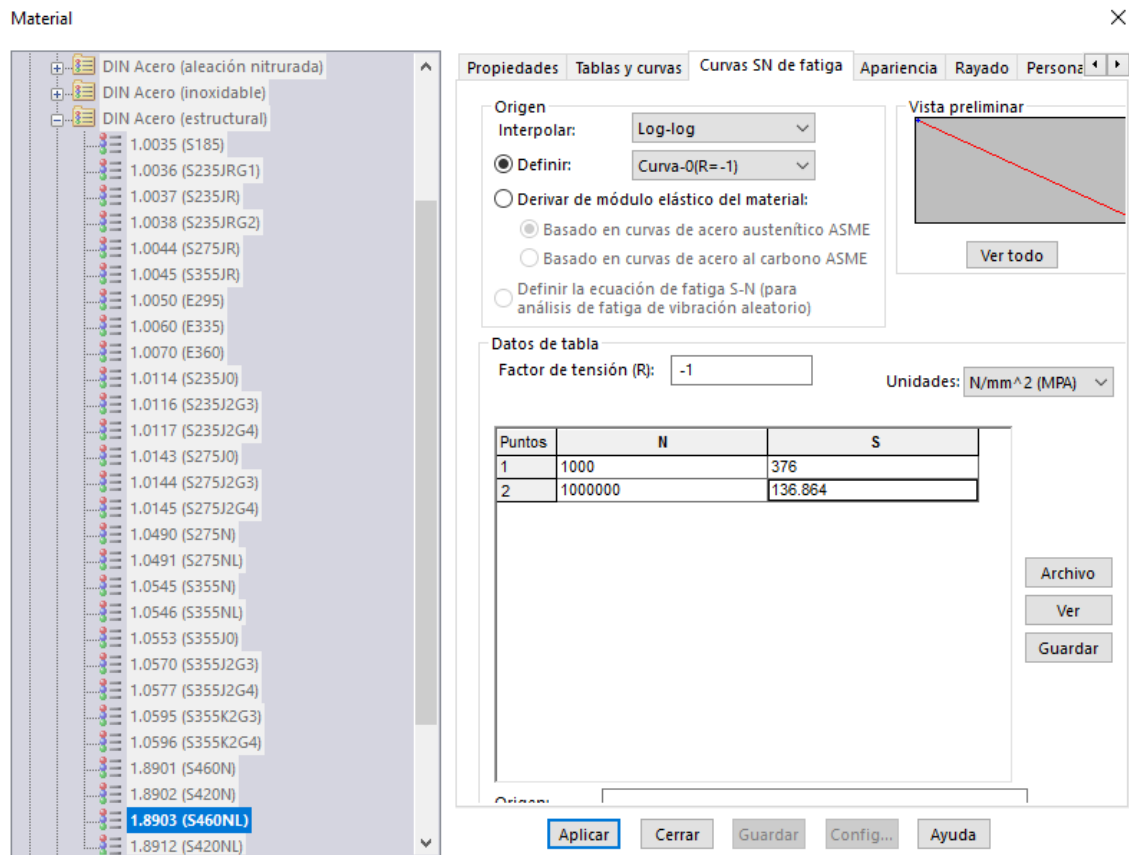


Figura 87: Definición de curva S/N del material.

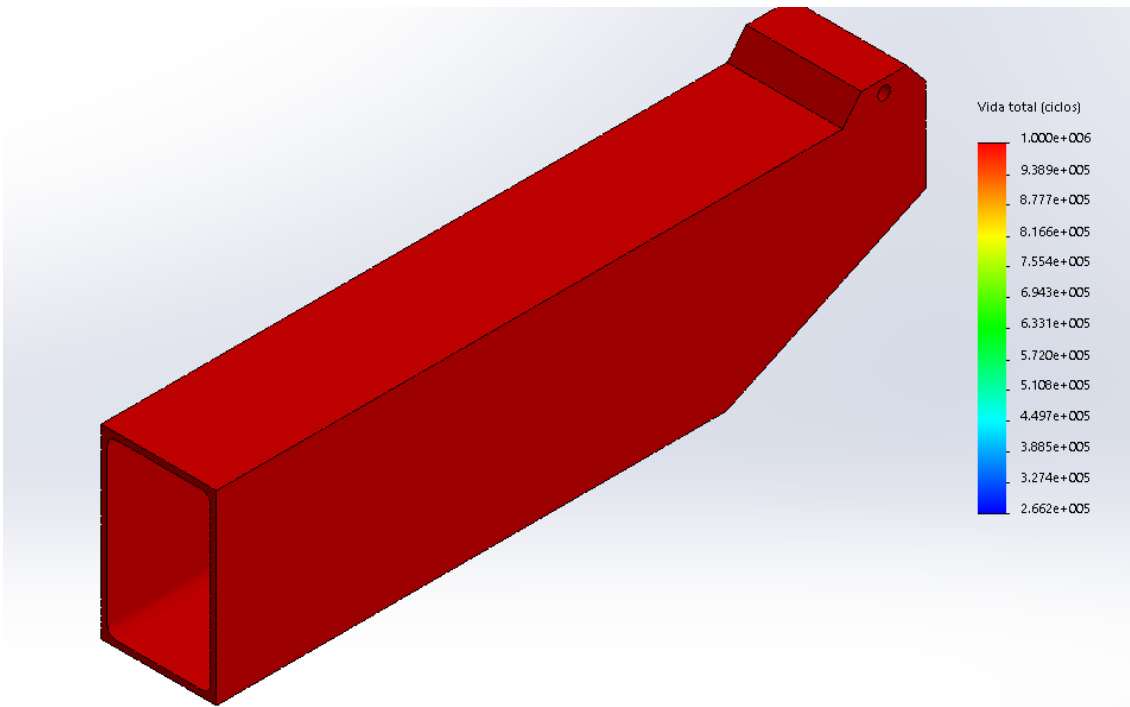


Figura 88: Vida en ciclos del perfil viga A2.

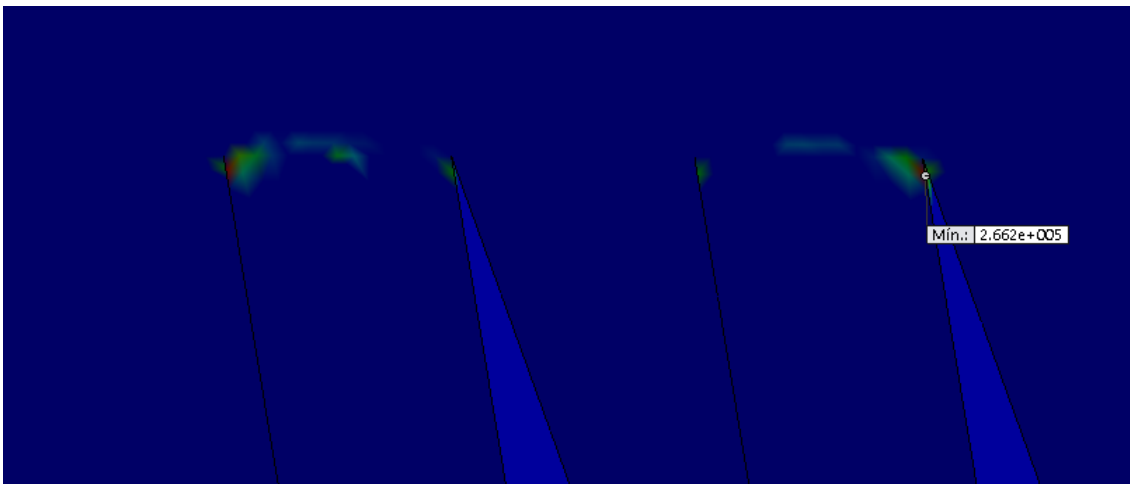
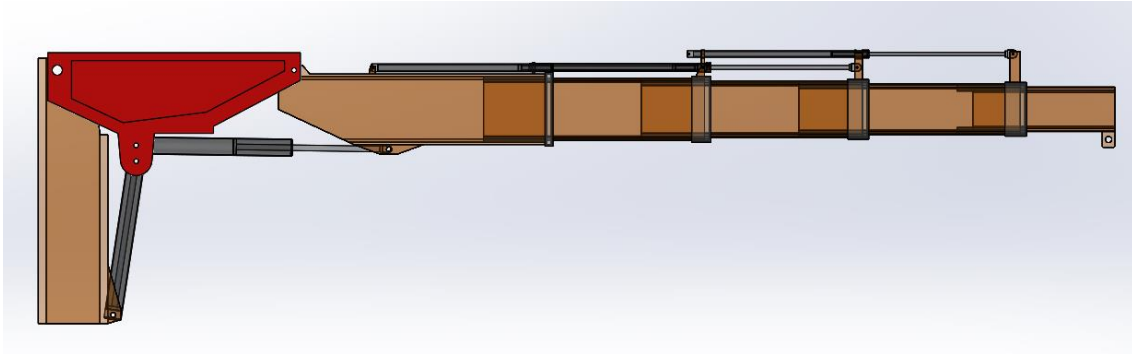


Figura 89: Vida mínima en ciclos del perfil viga A2.

4.2- Perfiles de sujeción – Perfil viga A1.



Este segundo perfil de sujeción estará sometido a las siguientes sollicitaciones:

- Peso propio.
- Reacciones transmitidas a través del pasador de unión con la viga A2.
- Fuerza del cilindro de posicionamiento 1.
- Fuerza del cilindro de posicionamiento 2.
- Reacciones de apoyo en la unión con la viga A0.

El siguiente diagrama de sólido libre representa dichas fuerzas:

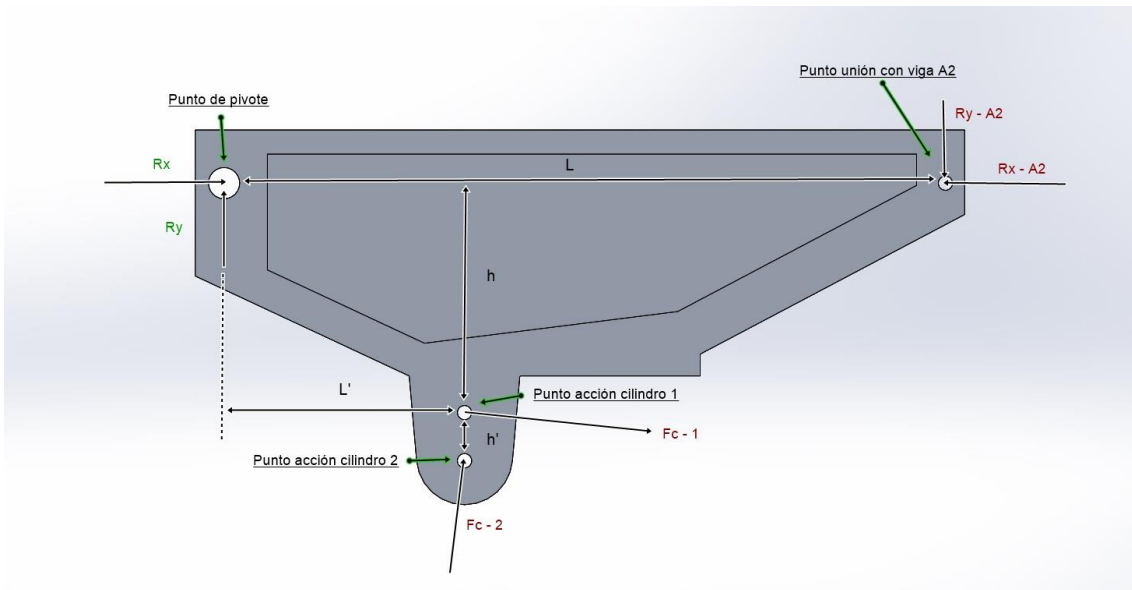


Figura 90: Diagrama sólido libre viga A2.

El diseño de este componente, al igual que el de la viga A0, se realizó de manera diferente. Se partió de una forma deseada y se adaptó esa forma a los límites establecidos por la normativa mediante la simulación por EF.

Los cálculos manuales que se realizaron fueron para los pasadores y el cilindro de posicionamiento 2.

Pasador de unión entre la viga y el cilindro 1:

Los esfuerzos a los que está sometido este pasador son idénticos a su homónimo en la viga A2 (pasador inferior), de manera que este cálculo no es necesario. Las medidas calculadas son:

- Diámetro de 29,60 mm.
- Espesor de 16,37 mm.

Pasador de unión entre viga A2 y A1:

Al igual que el anterior, las dimensiones de este pasador serán las mismas que las ya calculadas en el pasador (punto pivote) de la viga A2. Dichas dimensiones son:

- Diámetro de 29,76 mm.
- Espesor de 16,26 mm.

El primer paso fue la creación de la geometría básica de la viga. Se eligió un perfil tubo rectangular con una anchura igual a la de la viga A2, una altura dependiente de las medidas del sistema de pivote, y un espesor igual al mínimo exigido por el pasador del cilindro 1.

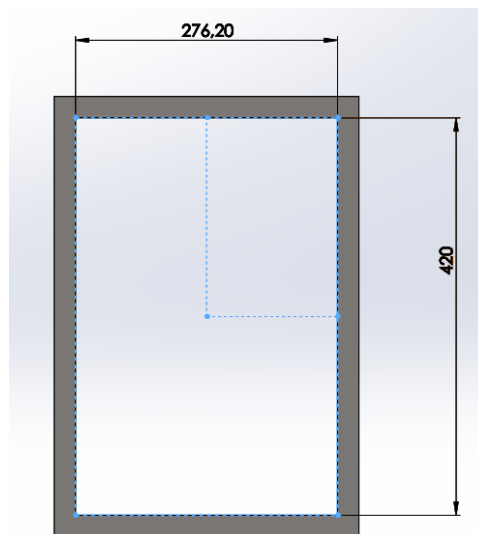


Figura 91: Primer boceto viga A1.

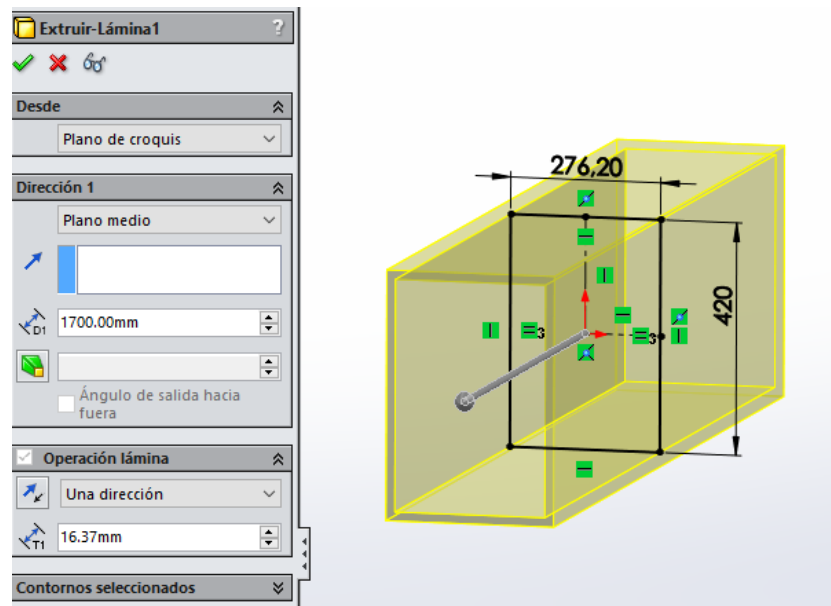


Figura 92: Extrusión primer boceto viga A1.

Se realizan los taladros para los alojamientos de los pasadores. Las medidas de los pasadores no calculados de momento se dejan de manera aleatoria hasta calcular las reacciones. Para los alojamientos inferiores, se crearon dos soportes similares a los creados para la viga A2.

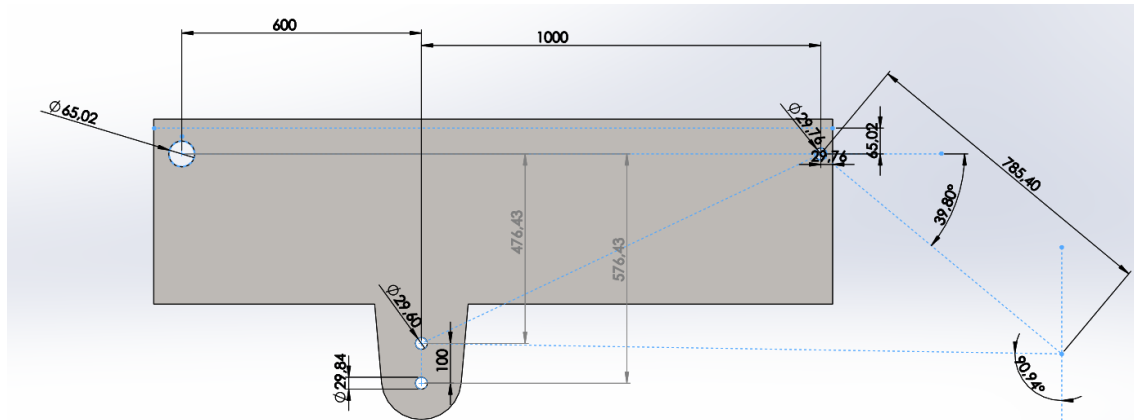


Figura 93: Alojamientos de pasadores viga A1.

Aparte, se realizaron dos cortes en la parte frontal y posterior de la viga, para facilitar los movimientos angulares de los puntos de pivote:

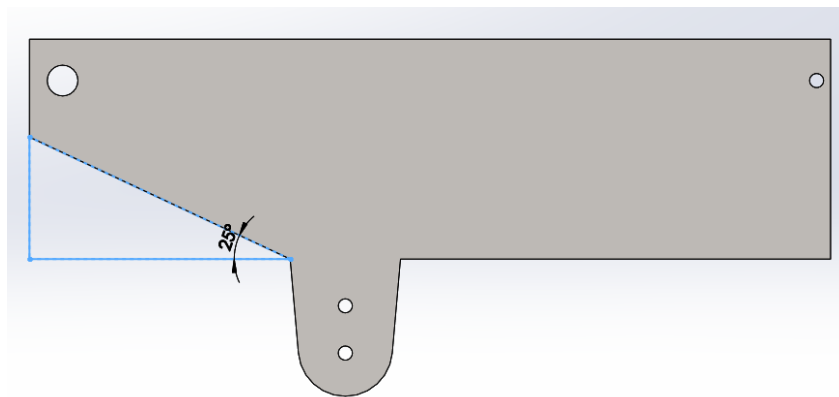


Figura 94: Corte parte posterior viga A1.

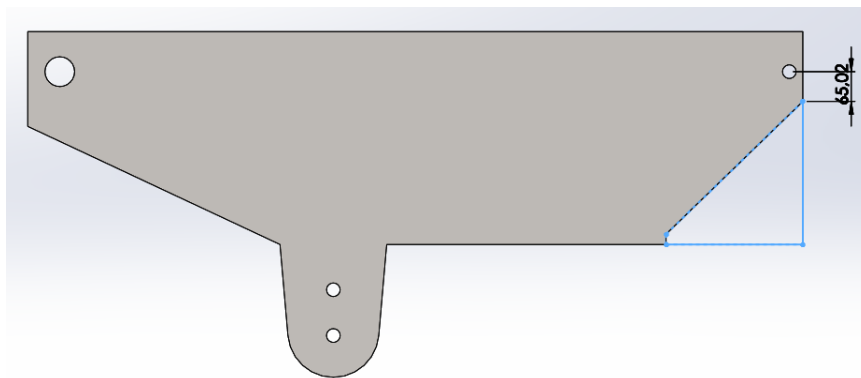


Figura 95: Corte frontal viga A1.

Con la viga básica creada, se procede al cálculo del cilindro hidráulico.

Cilindro de posicionamiento 2:

Este segundo cilindro de posicionamiento estará menos solicitado que el anterior. Estará unido a las vigas A1 y A0 mediante pasadores, que se calcularán más adelante. En la siguiente figura se muestra un croquis de acción de dicho cilindro en la viga A0:

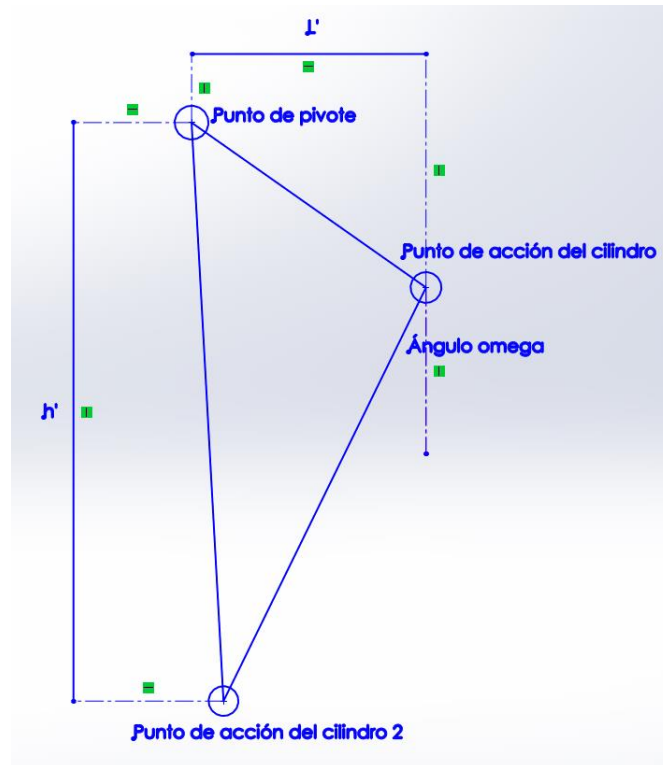


Figura 96: Esquema del triángulo formado por el cilindro 2 y los pasadores.

Resolvemos el diagrama de sólido libre:

$$\sum F_x = 0 \rightarrow R_x + F_{c2x} - F_{c1x} - R_{A2x} = 0$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow R_y + F_{c2y} - F_{c1y} - R_{A2y} = 0$$

$$\sum M_z = 0 \rightarrow F_{c2y} * L + F_{c2x} * h - F_{c1y} * L - F_{c1x} * h' - R_{A2y} * L' - R_{A2x} * h' = 0$$

Introducimos las fórmulas en una tabla Excel tomando como medidas las dadas en la creación de la viga, y calculamos la fuerza del cilindro y las reacciones en el pasador de unión entre A1 y A0 (punto de pivote).

Omega (°)	Omega (rad)	Fcil (N)	Fcil (ton)	Rx (N)	Ry (N)	Rt (N)
0	0	194032,083	19,4032083	-298501	-175127,11	346081,42
1	0,017452778	190233,633	19,0233633	-295181,06	-171299,69	341284,985
2	0,034905556	186636,803	18,6636803	-291987,66	-167618,14	336678,829
3	0,052358333	183228,238	18,3228238	-288911,85	-164072,17	332249,51
4	0,069811111	179995,783	17,9995783	-285945,5	-160652,37	327984,773
5	0,087263889	176928,359	17,6928359	-283081,13	-157350,16	323873,428
6	0,104716667	174015,848	17,4015848	-280311,92	-154157,65	319905,229
7	0,122169444	171248,988	17,1248988	-277631,61	-151067,62	316070,778
8	0,139622222	168619,294	16,8619294	-275034,41	-148073,42	312361,439
9	0,157075	166118,975	16,6118975	-272515,02	-145168,92	308769,257
10	0,174527778	163740,868	16,3740868	-270068,52	-142348,45	305286,895
11	0,191980556	161478,379	16,1478379	-267690,37	-139606,77	301907,572
12	0,209433333	159325,43	15,932543	-265376,34	-136939,02	298625,009
13	0,226886111	157276,409	15,7276409	-263122,53	-134340,69	295433,385
14	0,244338889	155326,134	15,5326134	-260925,29	-131807,58	292327,291
15	0,261791667	153469,806	15,3469806	-258781,23	-129335,78	289301,695
16	0,279244444	151702,987	15,1702987	-256687,19	-126921,64	286351,908
17	0,296697222	150021,562	15,0021562	-254640,19	-124561,74	283473,553
18	0,31415	148421,712	14,8421712	-252637,47	-122252,89	280662,54
19	0,331602778	146899,897	14,6899897	-250676,43	-119992,07	277915,039
20	0,349055556	145452,827	14,5452827	-248754,61	-117776,49	275227,461
21	0,366508333	144077,445	14,4077445	-246869,71	-115603,47	272596,435
22	0,383961111	142770,909	14,2770909	-245019,57	-113470,51	270018,792
23	0,401413889	141530,579	14,1530579	-243202,14	-111375,26	267491,549
24	0,418866667	140353,996	14,0353996	-241415,47	-109315,49	265011,893
25	0,436319444	139238,875	13,9238875	-239657,73	-107289,06	262577,169
26	0,453772222	138183,092	13,8183092	-237927,18	-105293,98	260184,865
27	0,471225	137184,67	13,718467	-236222,16	-103328,33	257832,604
28	0,488677778	136241,774	13,6241774	-234541,09	-101390,29	255518,132
29	0,506130556	135352,695	13,5352695	-232882,48	-99478,14	253239,309
30	0,523583333	134515,853	13,4515853	-231244,87	-97590,209	250994,101

Tabla 10: Iteraciones de cálculo del cilindro 2.

Se ha elegido un ángulo de acción de 17°, lo que da una fuerza del cilindro de aproximadamente 15 toneladas, prácticamente idéntica a la del cilindro 1.

A continuación calculamos los pasadores de unión con los esfuerzos calculados.

Pasador de unión entre A1 y A0 (punto de pivote):

Este pasador va a estar sometido a las siguientes solicitaciones:

- Reacción producida por los diferentes esfuerzos de la viga. Como hemos calculado en el apartado anterior, esta reacción es de 283473,553 N.

Cálculo a cortante:

Por la normativa conocemos que el valor límite de la tensión a cortante sobre el pasador ha de ser de 168 MPa. Con este dato aplicamos la fórmula.

$$r_{pasador} = \sqrt{\frac{0,5 * \varphi * R_{total}}{\tau_{lim} * \pi}}$$

Operando nos da un valor de radio de 20,51 mm, por tanto el diámetro será de 41,02 mm.

Cálculo por aplastamiento:

Por la normativa conocemos que el valor límite de la tensión por aplastamiento sobre el pasador ha de ser de 210 MPa, si bien el valor límite en nuestra pieza tiene que ser de 153,19 Mpa. Al ser éste último valor el más desfavorable, es el que utilizaremos para el cálculo por aplastamiento.

También conocemos el dato del diámetro, calculado a cortante, de manera que calculamos directamente el espesor de la chapa:

$$b = \frac{0,5 * R_{total}}{\sigma_{lim} * \varnothing_{pasador}} = \frac{0,5 * 283473,553}{153,19 * 41,02} = 22,56 \text{ mm}$$

Pasador de acción del cilindro 2:

Este pasador va a estar sometido a las siguientes sollicitaciones:

- Reacción producida por la acción del cilindro, de valor 150021,562 N.

Cálculo a cortante:

Por la normativa conocemos que el valor límite de la tensión a cortante sobre el pasador ha de ser de 168 MPa. Con este dato aplicamos la fórmula.

$$r_{pasador} = \sqrt{\frac{0,5 * \varphi * R_{total}}{\tau_{lim} * \pi}}$$

Operando nos da un valor de radio de 14,92 mm, por tanto el diámetro será de 29,84 mm.

Cálculo por aplastamiento:

Por la normativa conocemos que el valor límite de la tensión por aplastamiento sobre el pasador ha de ser de 210 MPa, si bien el valor límite en nuestra pieza tiene que ser de 153,19 Mpa. Al ser éste último valor el más desfavorable, es el que utilizaremos para el cálculo por aplastamiento.

También conocemos el dato del diámetro, calculado a cortante, de manera que calculamos directamente el espesor de la chapa:

$$b = \frac{0,5 * R_{total}}{\sigma_{lim} * \varnothing_{pasador}} = \frac{0,5 * 150021,562}{153,19 * 29,84} = 16,41 \text{ mm}$$

Con las medidas de los pasadores calculadas, modificamos la viga en SolidWorks:

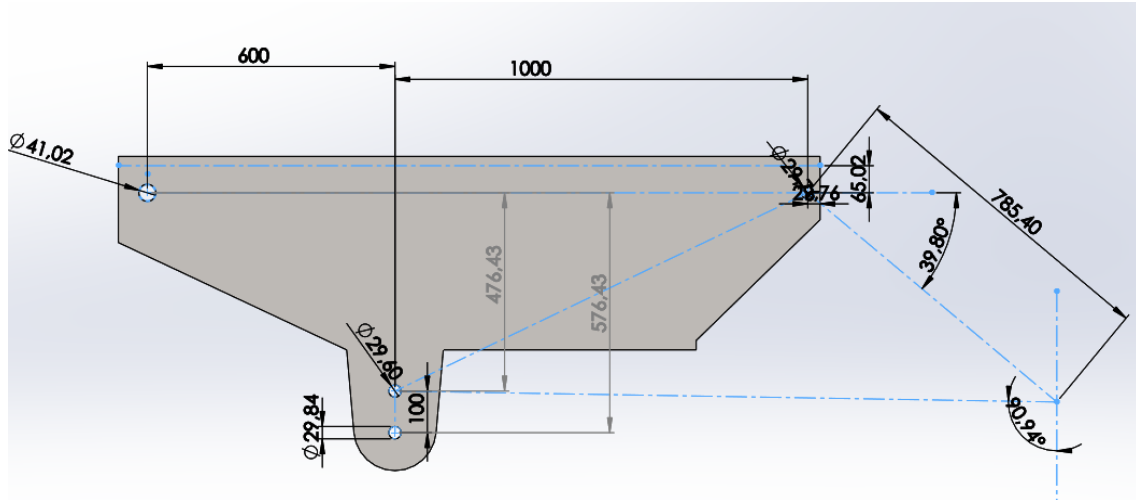


Figura 97: Nuevos alojamientos de pasadores viga A1.

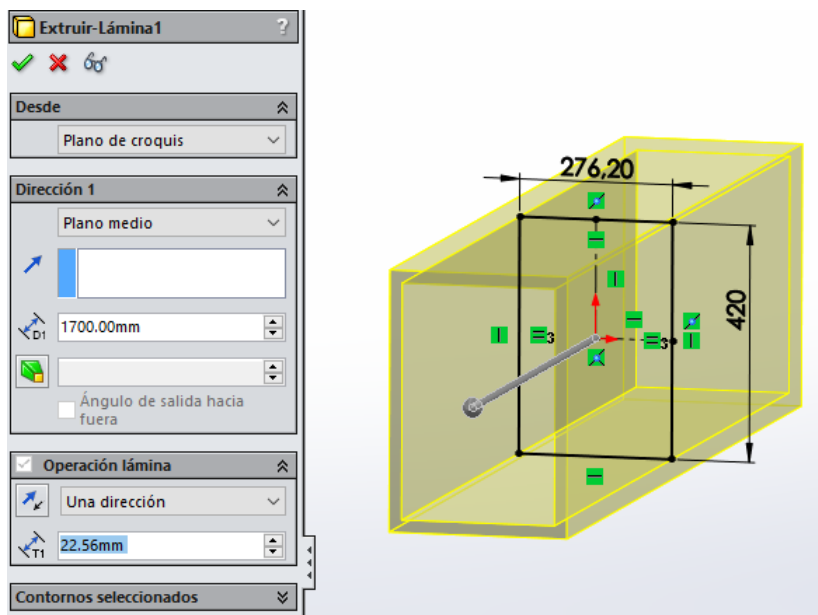


Figura 98: Nuevo espesor perfil viga A1.

Se procede con la simulación por elementos finitos:

De manera similar a la simulación de la viga anterior, se crea una nueva pieza que representará la acción del cilindro inclinado que se unirá al alojamiento del pasador mediante la herramienta “pasador”. También, al igual que en el caso de la viga A2, se le da condición de “bisagra fija” al pasador de unión entre A1 y A0.

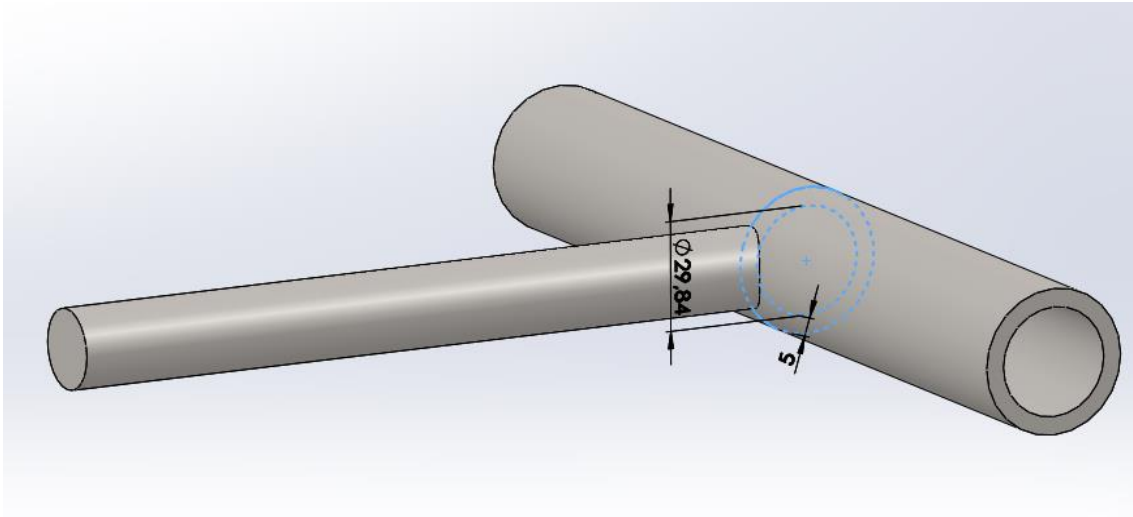


Figura 99: Pieza cilindro para simulación de viga A1.

Ensamblaje del conjunto:

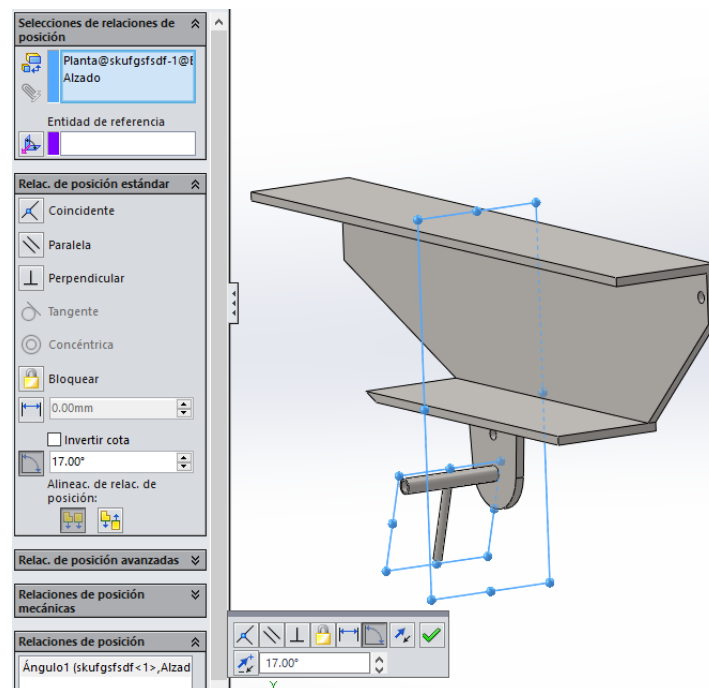


Figura 100: Ensamblaje del conjunto viga A1 y ángulo de acción del cilindro 2.

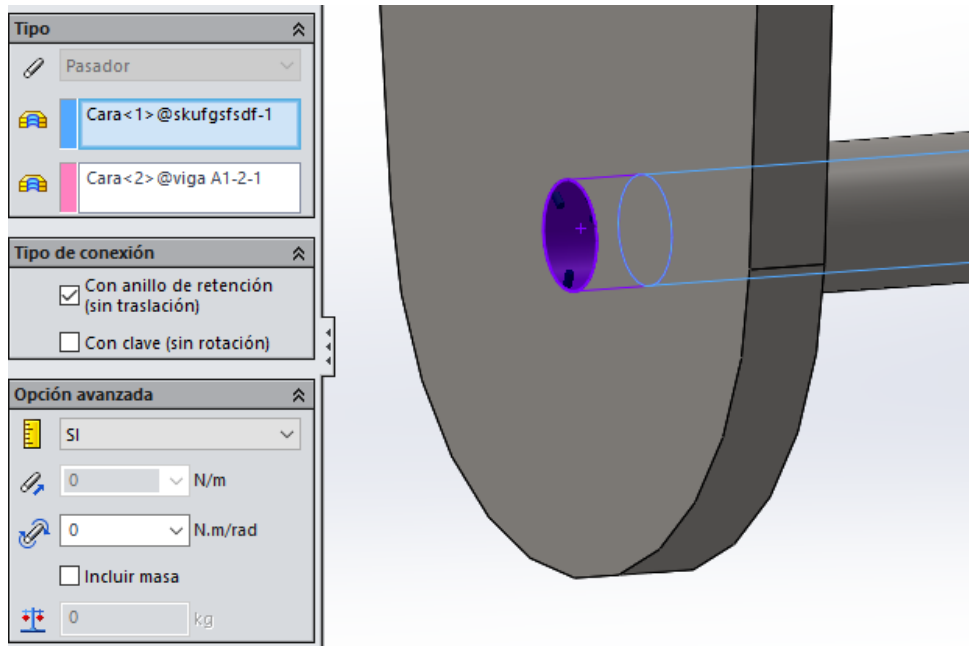


Figura 101: Condición de pasador cilindro 2.

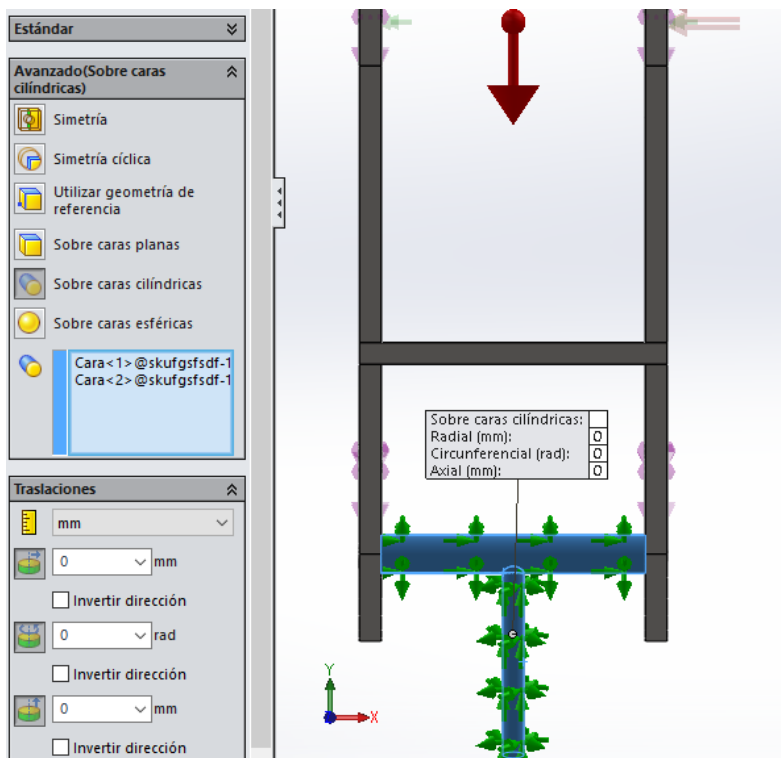


Figura 102: Sujeción pieza acción cilindro 2 y unión viga A1 con A0.

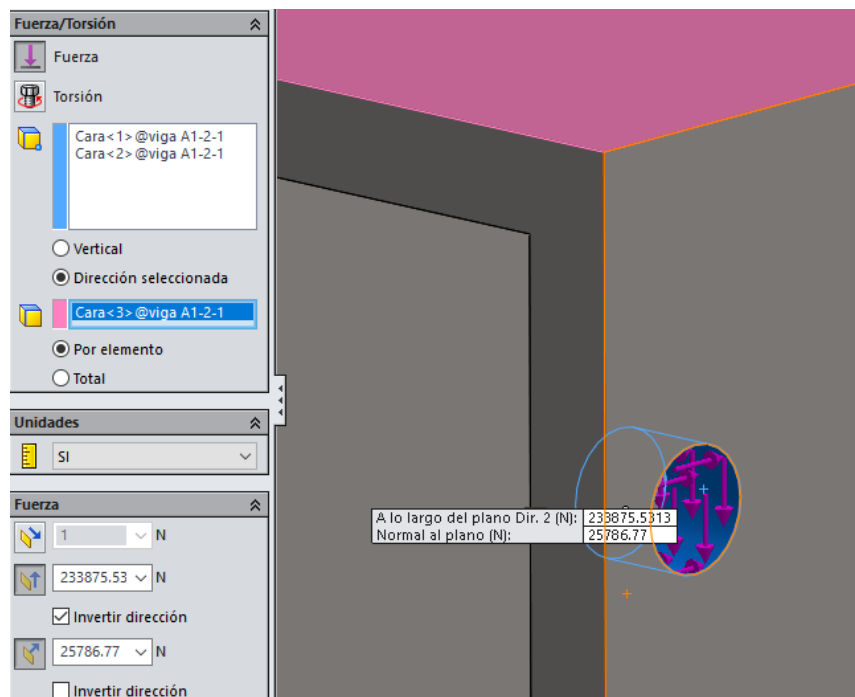


Figura 103: Esfuerzos en pasador de unión viga A1 – A2.

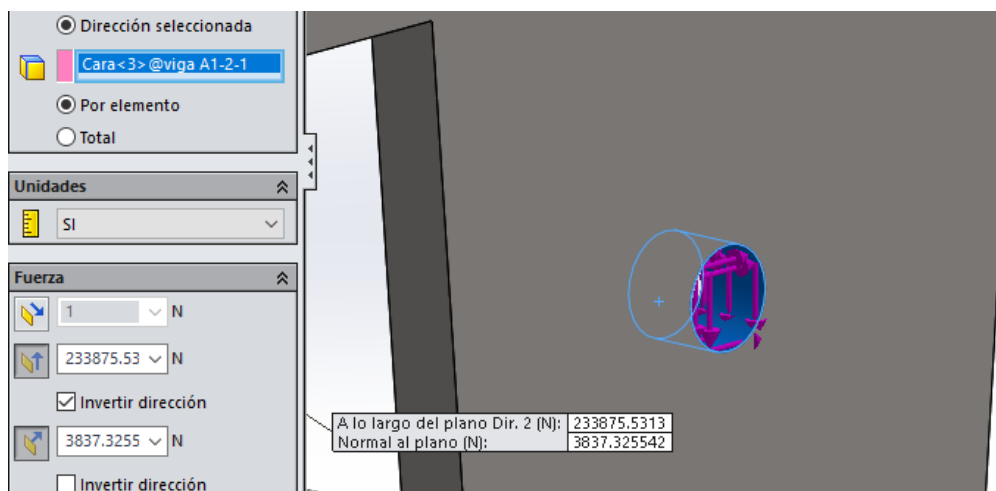


Figura 104: Esfuerzos en pasador de cilindro 2 viga A1.

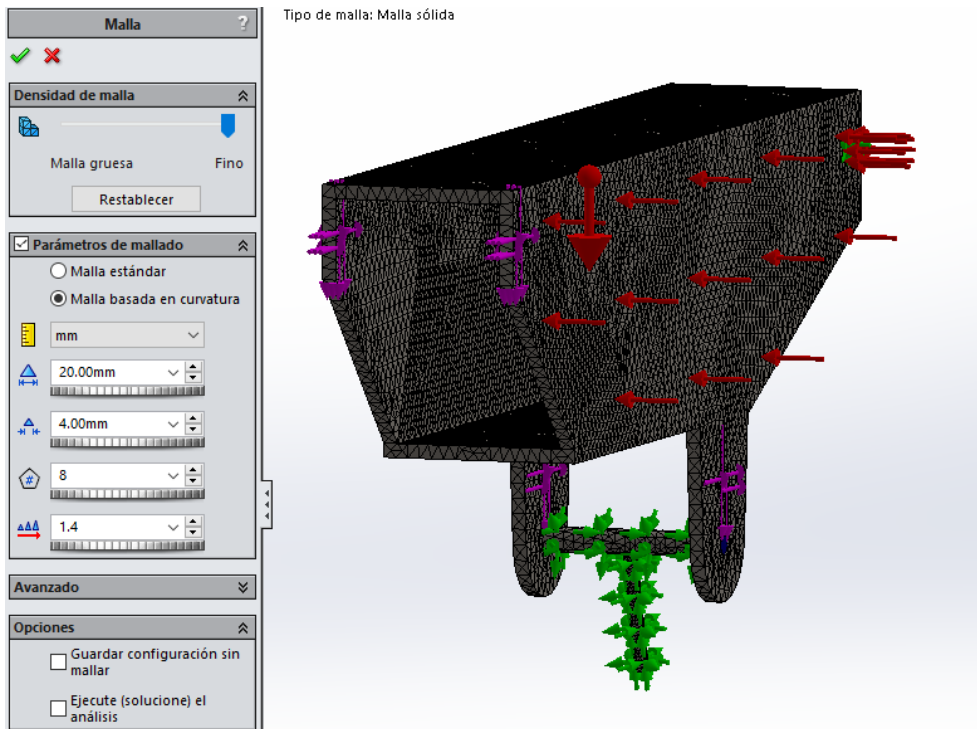


Figura 105: Mallado ensamble viga A1.

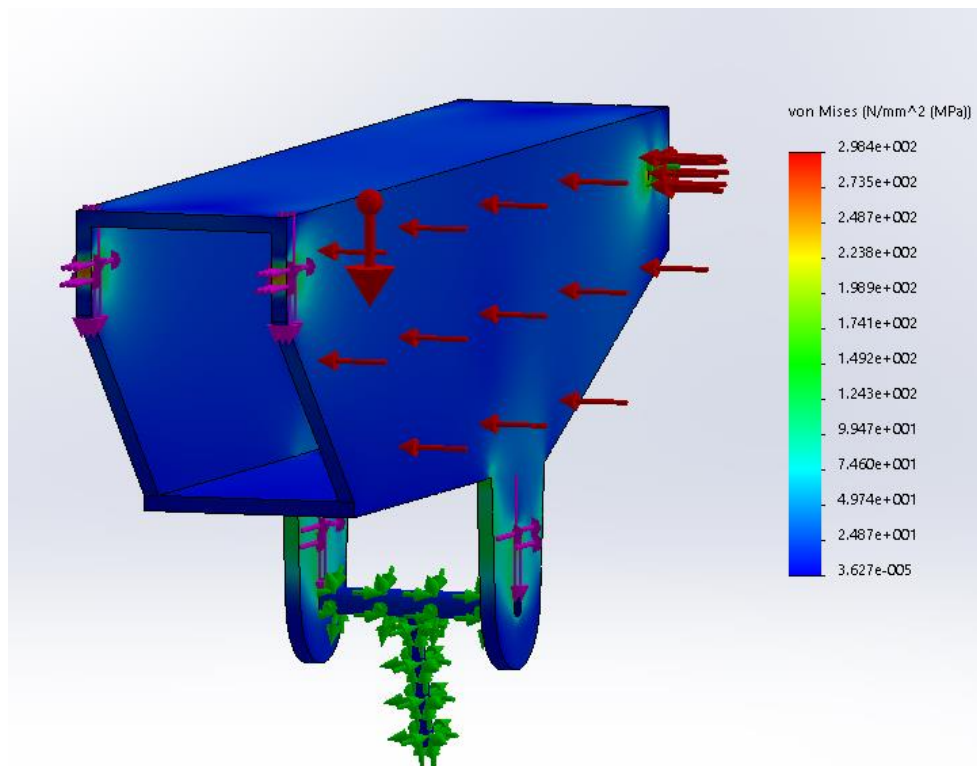


Figura 106: Tensión de Von Mises viga A1 (1).

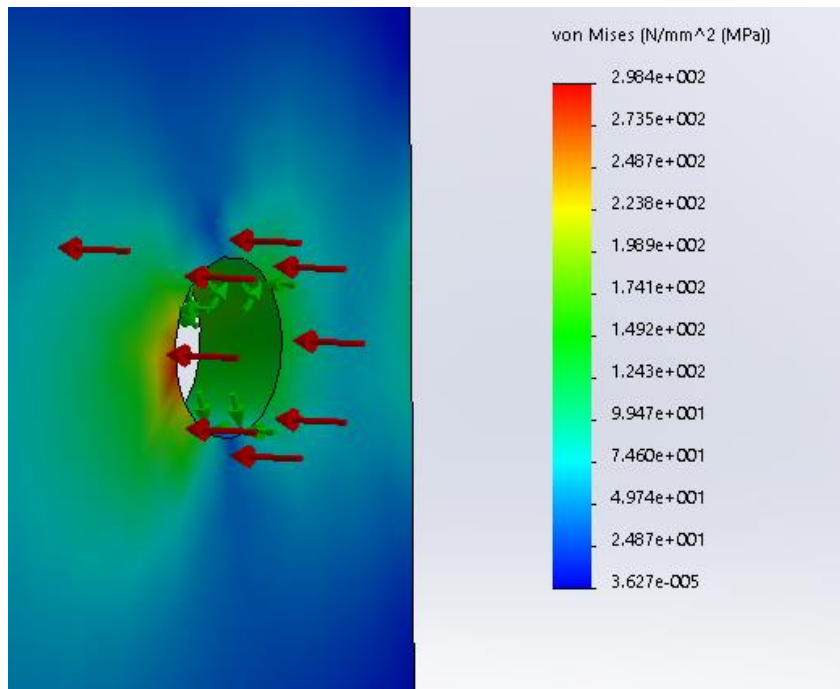


Figura 107: Tensión máxima de Von Mises viga A1.

Comprobamos que estamos por encima del límite establecido por la norma. Aumentamos el espesor a 27,56 y el diámetro del pasador de unión entre vigas a 51,02. Volvemos a simular:

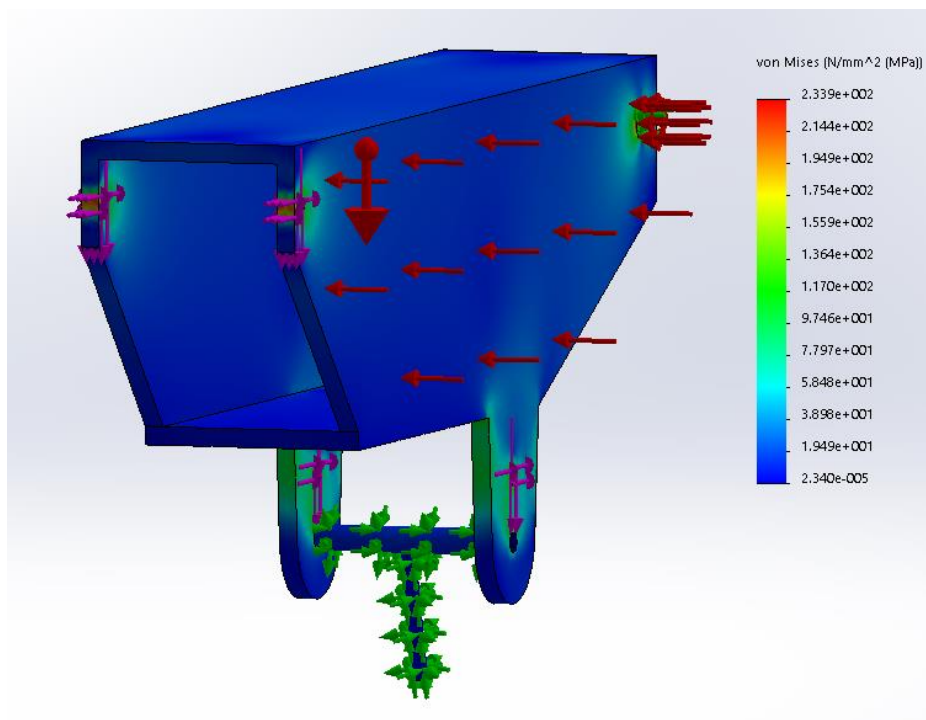


Figura 108: Tensión de Von Mises viga A1 (2).

Aumentamos el diámetro a 65,02 mm y el espesor a 37,56 mm.

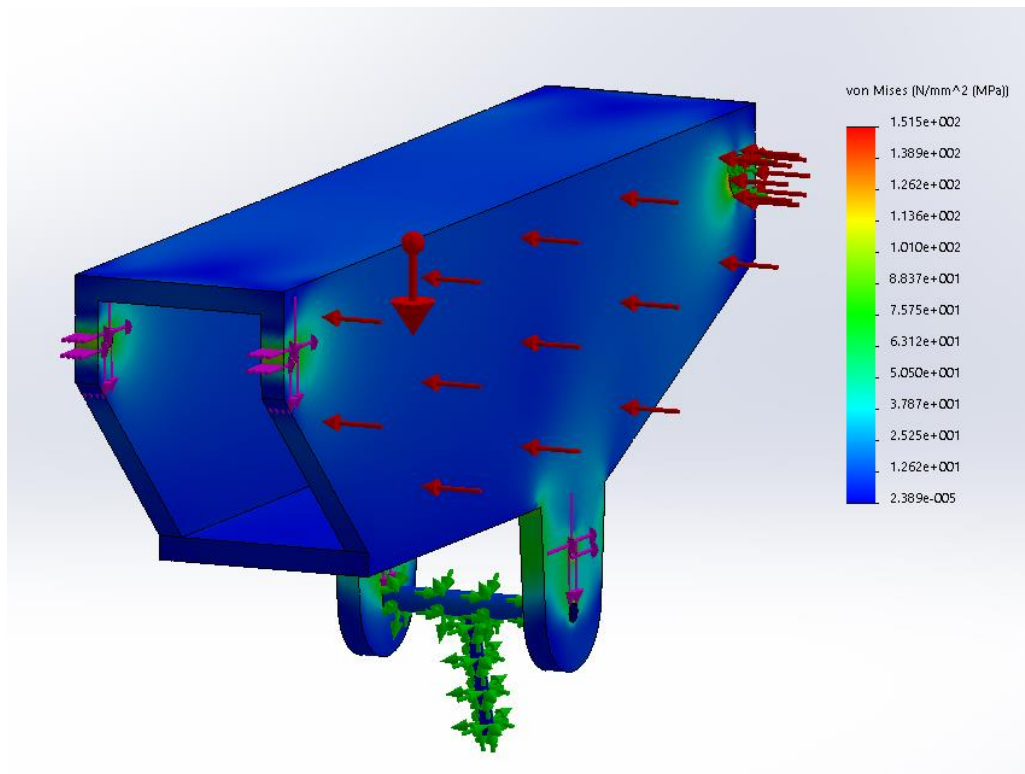


Figura 109: Tensión de Von Mises viga A1 (3).

Para reducir el peso de la viga, realizamos cortes en las partes en las que las tensiones son casi despreciables.

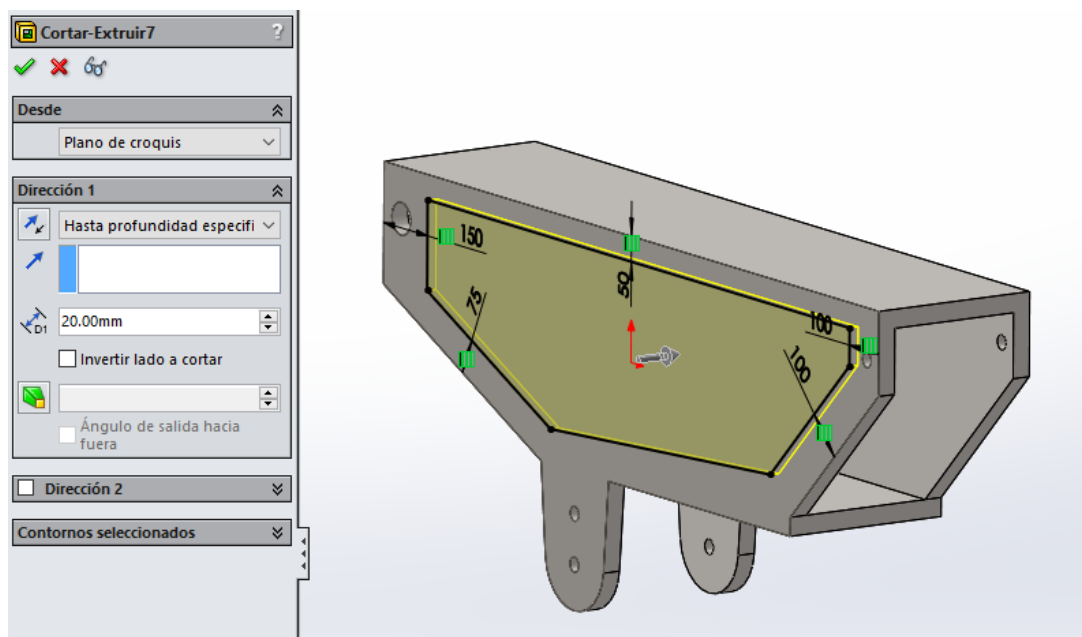


Figura 110: Vaciado lateral viga A1.

Una vez realizadas estas modificaciones, simulamos de nuevo:

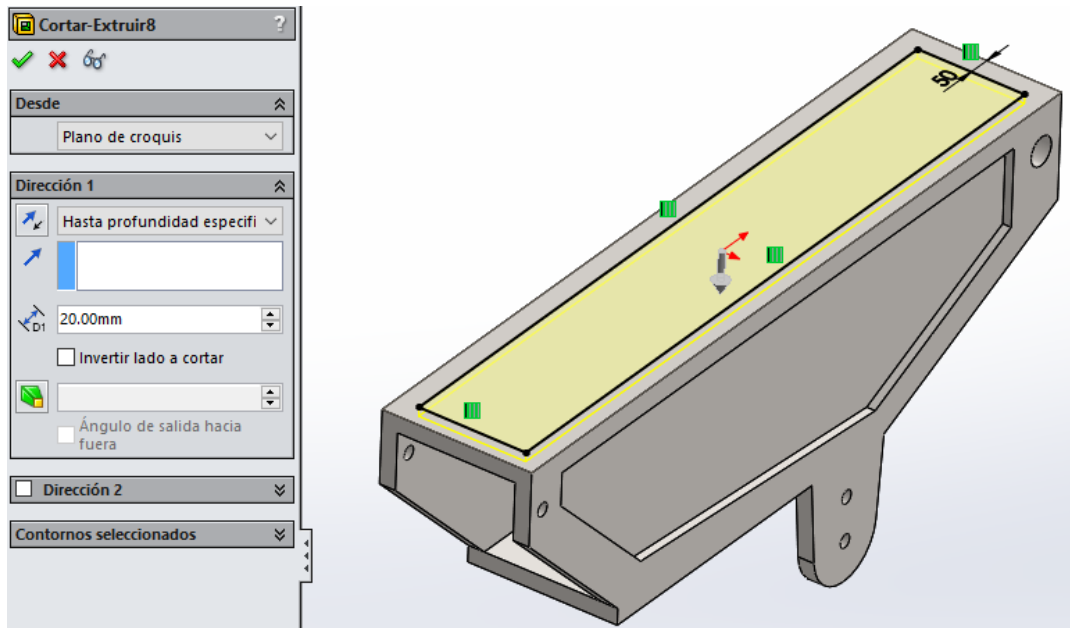


Figura 111: Vaciado superior viga A1.

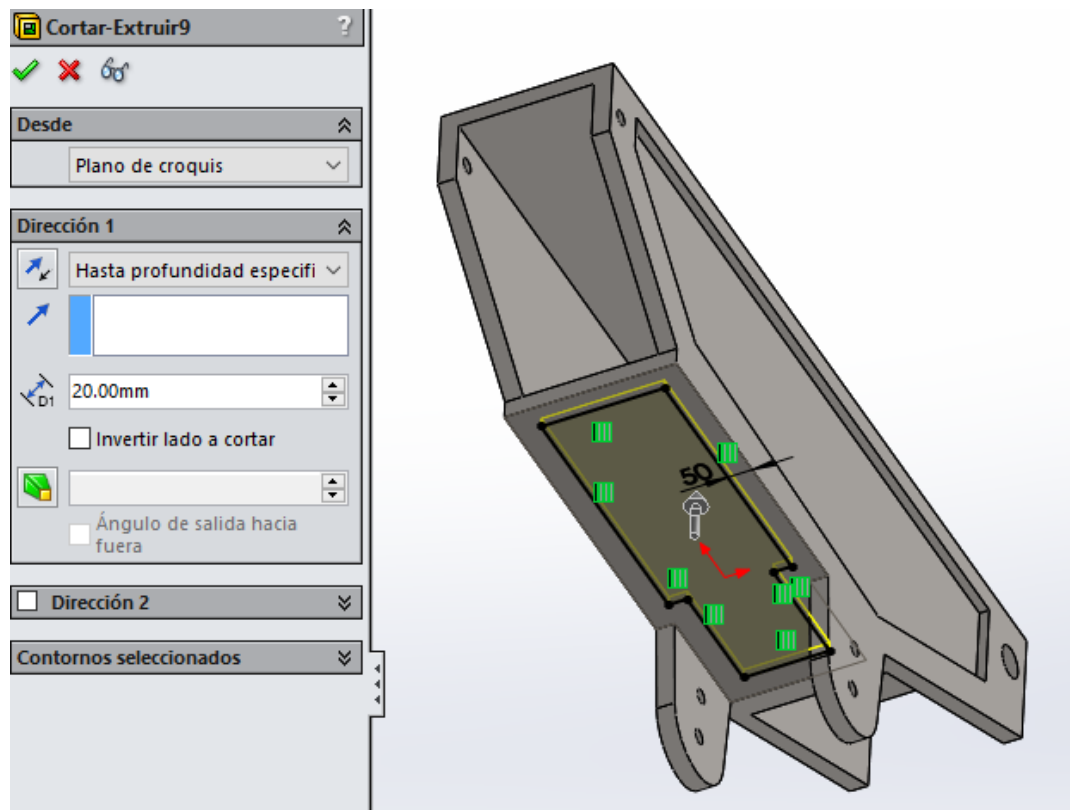


Figura 112: Vaciado inferior viga A1.

Lanzamos la simulación de nuevo:

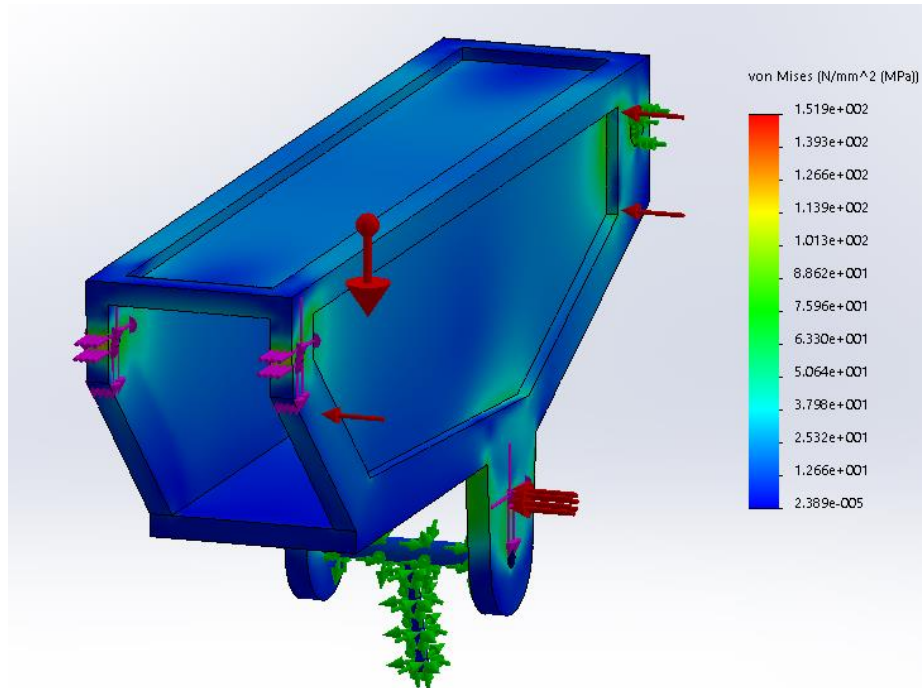


Figura 113: Tensión de Von Mises viga A1 (4).

Se añade otro corte al perfil en la parte superior-posterior, de manera que pueda pivotar sin problemas con la viga A0. Debido a este corte, es necesario aumentar el espesor a 41,56. Con estos cambios volvemos a lanzar la simulación:

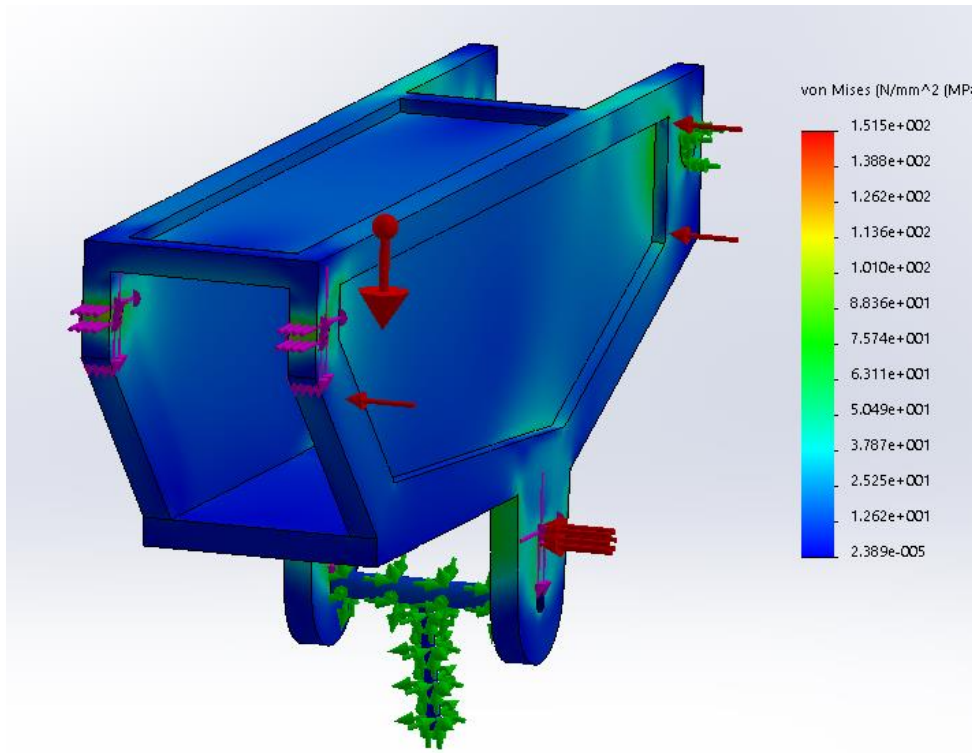


Figura 114: Tensión de Von Mises definitiva viga A1.

Calculamos los desplazamientos y comprobamos a fatiga:

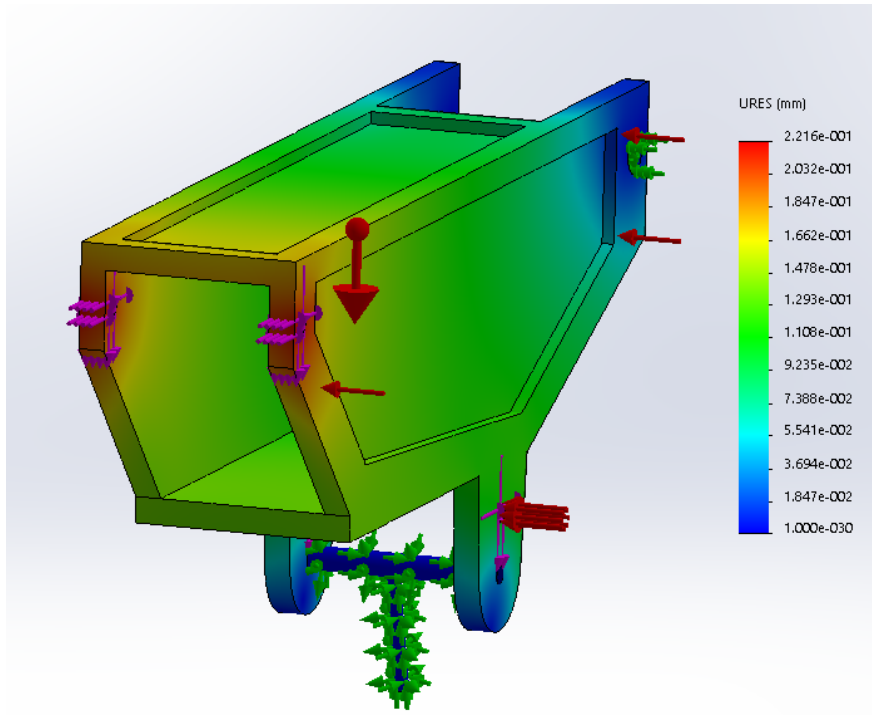


Figura 115: Desplazamientos viga A1.

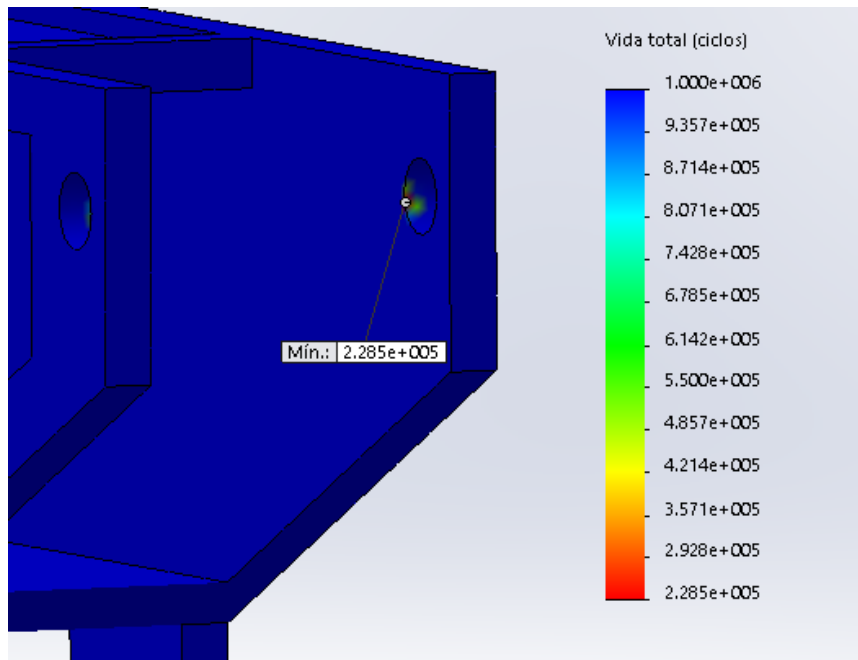
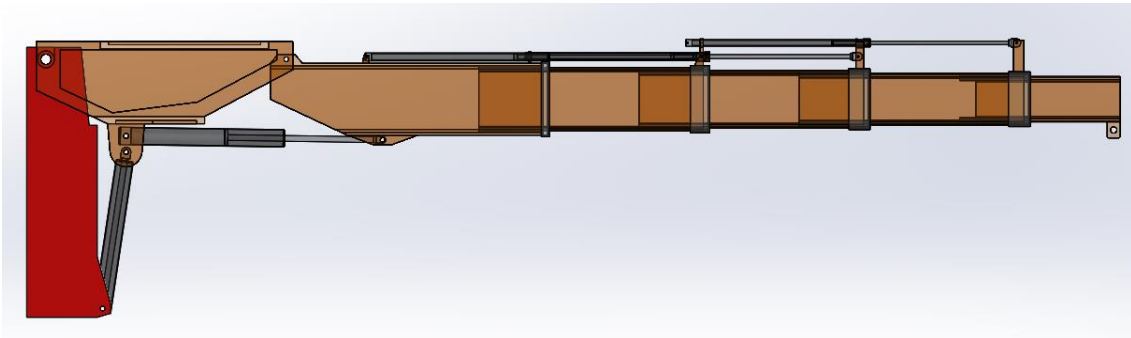


Figura 116: Vida en ciclos viga A1.

4.3- Perfiles de sujeción – Perfil viga A0.



Esta viga es la tercera y última de las vigas de sujeción. Es la base de la grúa, y va unida a la viga A1 por un pasador y el cilindro hidráulico de posicionamiento 2. Estará sometida a los siguientes esfuerzos:

- Peso propio.
- Reacción transmitida desde A1
- Esfuerzo provocado por el cilindro hidráulico.

Las medidas de los taladros de alojamiento de los pasadores son idénticas a los homólogos de la viga A1, puesto que los esfuerzos son los mismos. Refrescamos dichas medidas:

- Diámetro pasador superior: 41,02 mm, modificado a 65,02 tras la simulación de la viga A2.
- Espesor pasador superior: 22,67 mm.
- Diámetro pasador de acción del cilindro: 21,74 mm.
- Espesor pasador de acción del cilindro: 11,96 mm.

Se parte del siguiente boceto inicial:

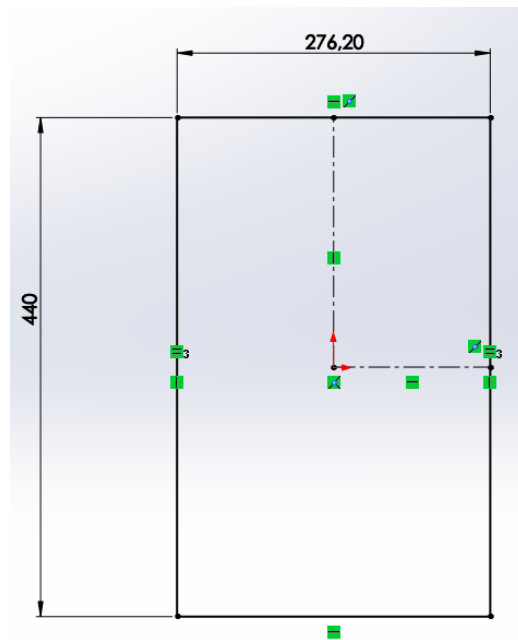


Figura 117: Boceto inicial viga A0.

Se extruye el boceto hasta los 1100 mm con un espesor de 50 mm:

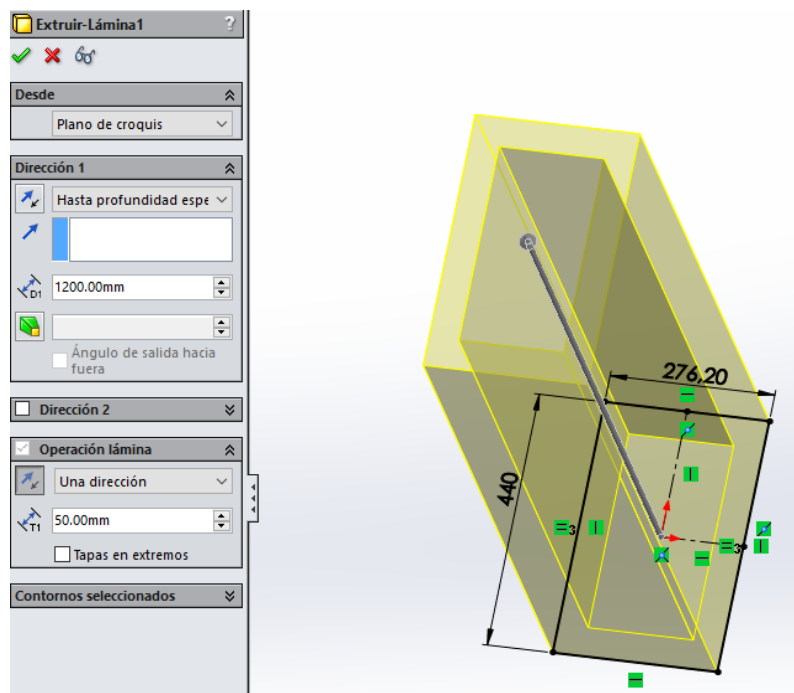


Figura 118: Extrusión boceto inicial viga A0.

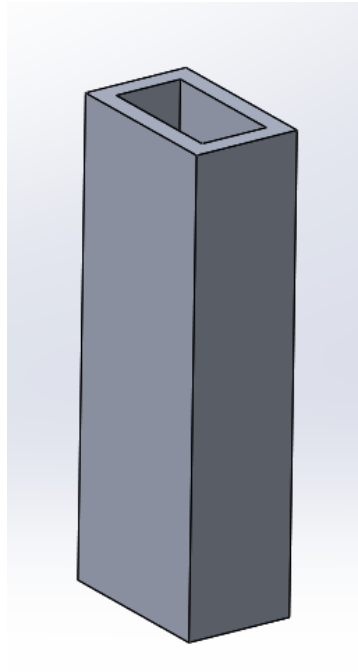


Figura 119: Vista del primer boceto extruido viga A0.

Se taladran los alojamientos para los pasadores. Se generan dos apoyos en la parte frontal del perfil para alojar al pasador del cilindro:

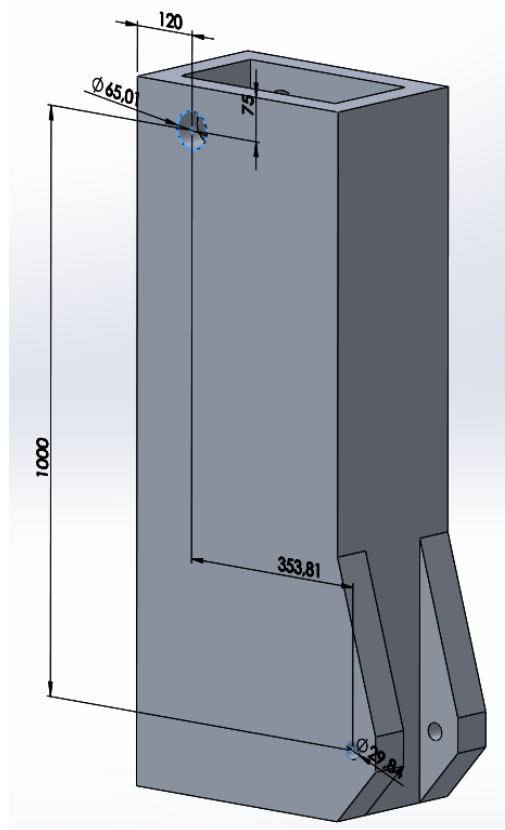


Figura 120: Taladros alojamiento pasadores viga A0.

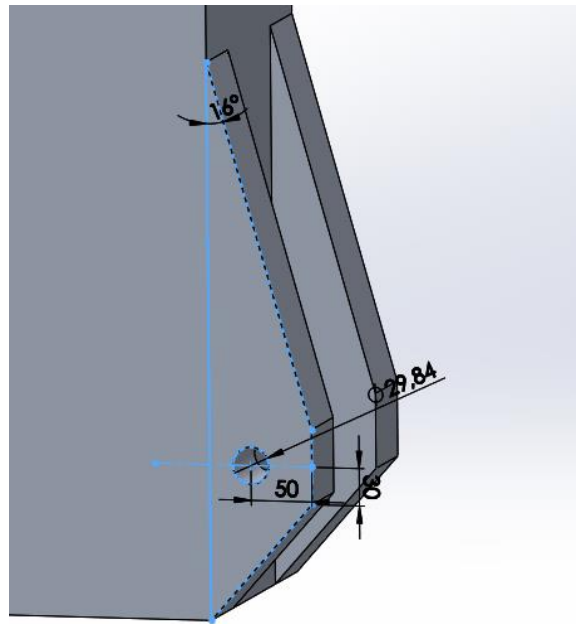


Figura 121: Soportes para pasador cilindro 2 en viga A0.

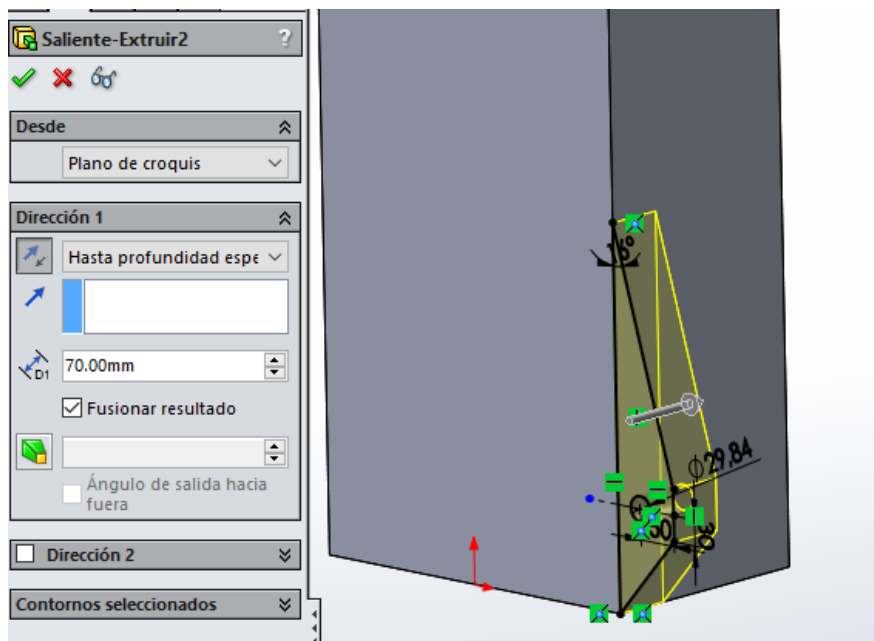


Figura 122: Espesor soportes para pasador cilindro 2 viga A0.

A continuación se realiza un corte en la parte frontal superior de 45° para que las vigas A1 y A0 no solapen en ángulos de inclinación negativos.

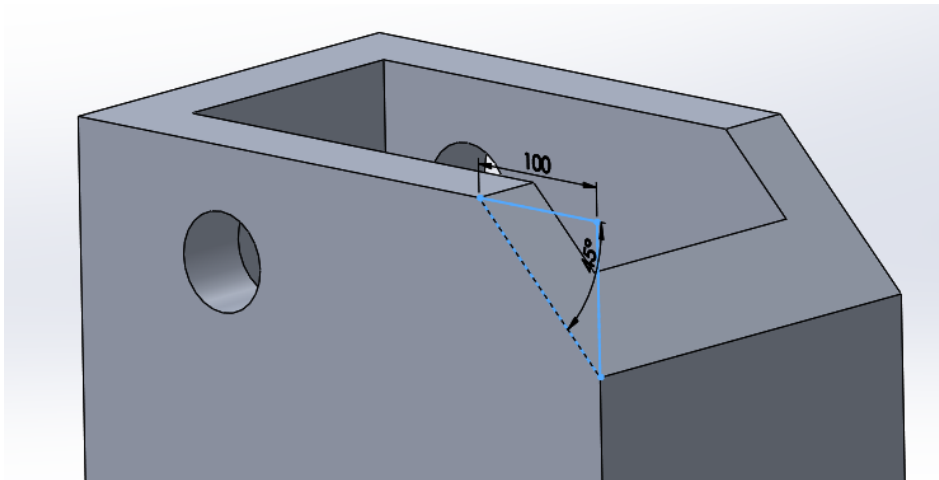


Figura 123: Corte viga A0.

Procedemos a simular la viga. Se empotra el perfil y se le aplican los esfuerzos de las reacciones transmitidas por A1 y del cilindro 2, calculados en el diseño de dicha viga:

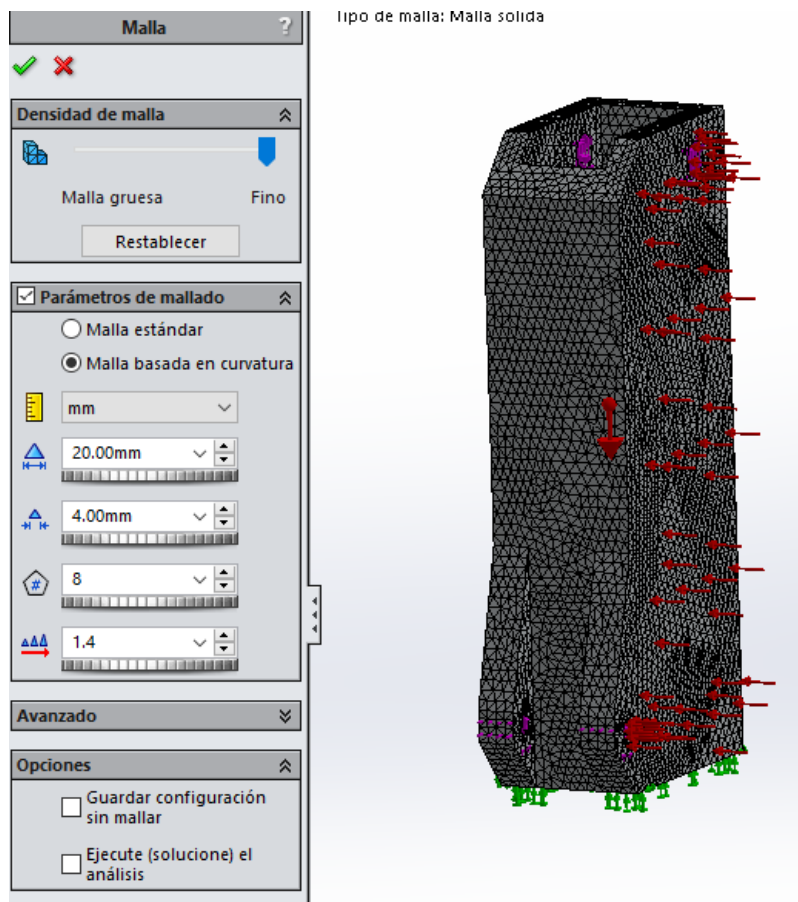


Figura 124: Mallado viga A0.

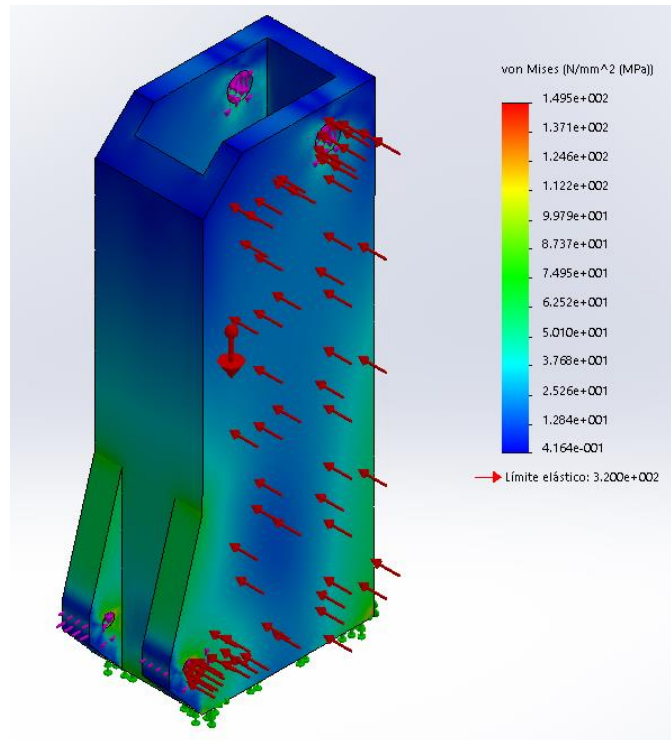


Figura 125: Tensión de Von Mises viga A0.

Comprobamos que cumplimos con el valor establecido por la norma. Calculamos los desplazamientos y simulamos a fatiga:

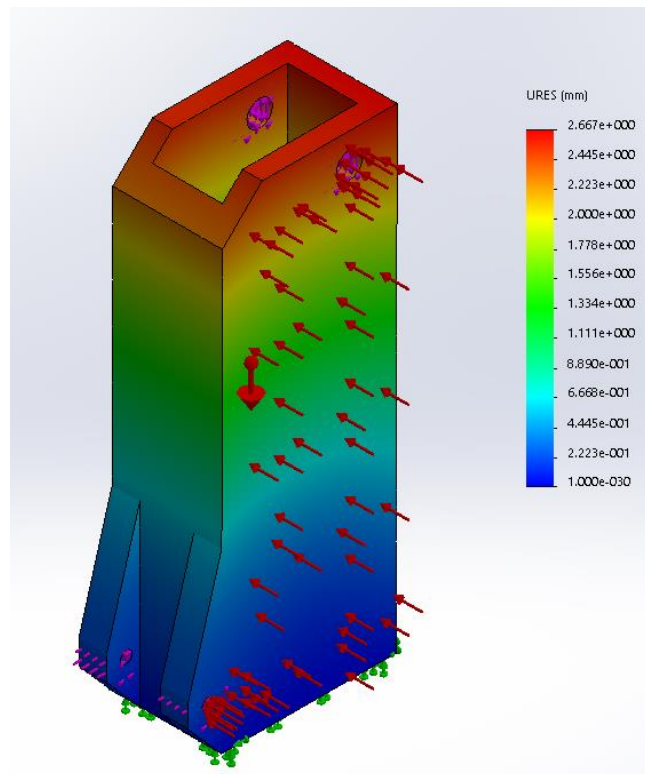


Figura 126: Desplazamientos viga A0.

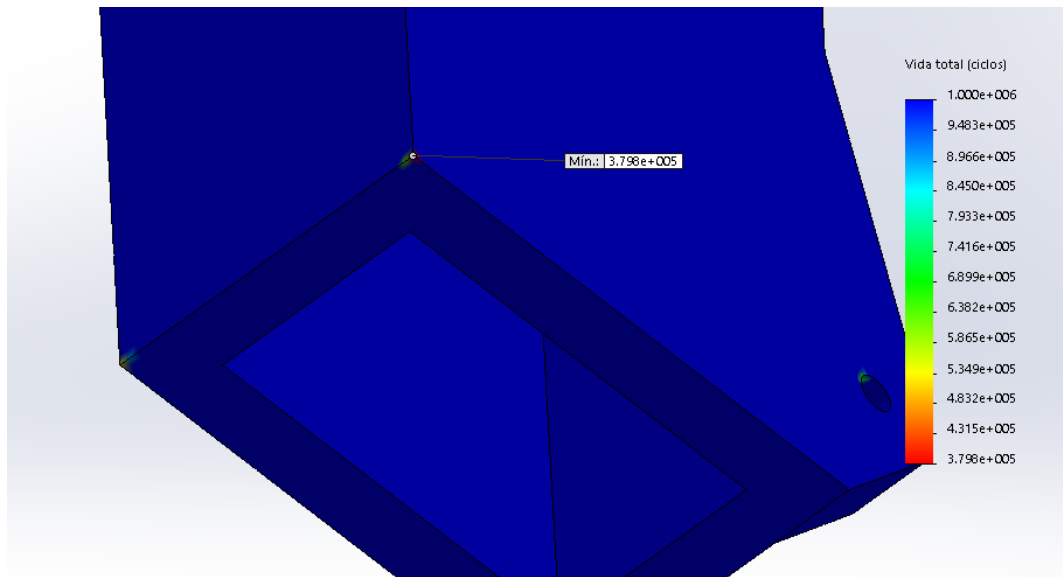


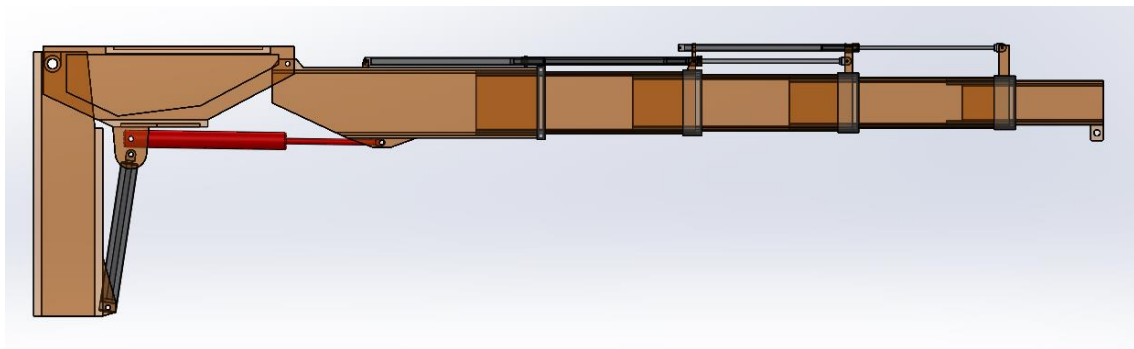
Figura 127: Vida en ciclos viga A0.

5- Cilindros de posicionamiento.

Los cilindros de posicionamiento permiten inclinar la pluma y compensan los esfuerzos generados por la carga izada. Se elige un tipo de cilindro hidráulico de simple efecto, ya que las solicitaciones a las que estará sometido sólo exigen una fuerza de expansión; de la fuerza de retroceso del cilindro se encargará la gravedad.

A continuación se exponen los cálculos realizados para la obtención del diámetro del cilindro necesario, normalización del diámetro, elección del proveedor y modelo, y comprobación del vástago a pandeo.

5.1- Cilindro de posicionamiento 1:



El primero de los cilindros hidráulicos compensa los momentos flectores generados por la carga izada y permite posicionar la pluma en inclinaciones negativas. Como se ha calculado anteriormente, la fuerza que necesita ejercer es de 149283,59 N.

Para el cálculo del diseño del pistón aplicamos la siguiente ecuación:

$$A_{pistón} = \frac{F_c * 9,81}{p}$$

Siendo “ p ” la presión del cilindro. Partimos de una presión de 200 bar. Con los datos conocidos, el área del pistón sale de 7322,36 mm². Con este dato vamos a la tabla de diámetros normalizados:

Diámetro del pistón (D = mm)	Area Pistón (mm ²)
25	491
32	804
40	1257
50	1963
63	3117
80	5027
100	7854
125	12272
160	20106
200	31416

Tabla 10: Diámetros y áreas normalizadas para cilindros hidráulicos.

Comprobamos que estamos entre un diámetro de 80 y 100 mm. Elegimos un diámetro de 100 y recalculamos la presión:

$$p = \frac{F_c * 9,81}{A_{pistón}} = 186,46 \text{ bar.}$$

Antes de calcular la longitud de pandeo, es necesario saber el factor de pandeo para el vástago.

Tipo de fijación cilindro	Esquema de montaje	Factor de pandeo (β)
Unión con vástago rígida y guiado Cilindro fijado rígidamente en parte anterior		0.5
Unión con vástago articulada y guiado Cilindro fijado rígidamente en parte anterior		0.7
Unión con vástago rígida y guiado Cilindro fijado rígidamente en parte posterior		1.0
Unión con vástago articulada y guiado Cilindro fijado mediante articulación en parte anterior		1.0

Tipo de fijación cilindro	Esquema de montaje	Factor de pandeo (β)
Unión con vástago articulada y guiado Cilindro fijado mediante articulación en parte intermedia ó rígidamente en parte posterior		1.5
Unión con vástago rígida, pero no guiado (simplemente apoyado en superficie) Cilindro fijado rígidamente		2.0
Unión con vástago articulada y guiado Cilindro fijado mediante articulación en parte posterior		2.0
Unión con vástago articulada pero no guiado (simplemente apoyado en superficie) Cilindro fijado mediante articulación en parte intermedia		3.0

Tabla 11: Factores de pandeo cilindros hidráulicos.

Nuestro caso corresponde a un factor de pandeo de 2, ya que los cilindros hidráulicos de posicionamiento están unidos mediante pasadores a las vigas, y la propia estructura “guiará” al vástago.

Mediante el croquis realizado para la viga A1 comprobamos la longitud máxima (cilindro más carrera) del cilindro hidráulico:

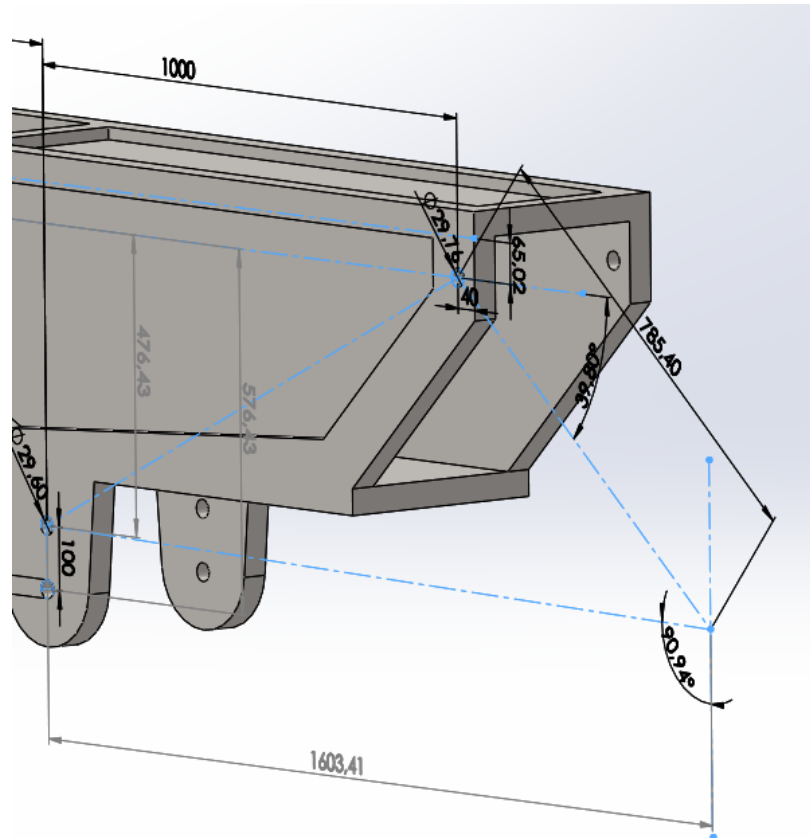


Figura 128: Longitud total cilindro hidráulico 1.

Se busca en diferentes proveedores cilindros referencias para la longitud de la carrera. En el fabricante CICROSA tomamos como referencia su serie 600. Aunque su diámetro máximo es menor al que necesitamos, las longitudes son parecidas.

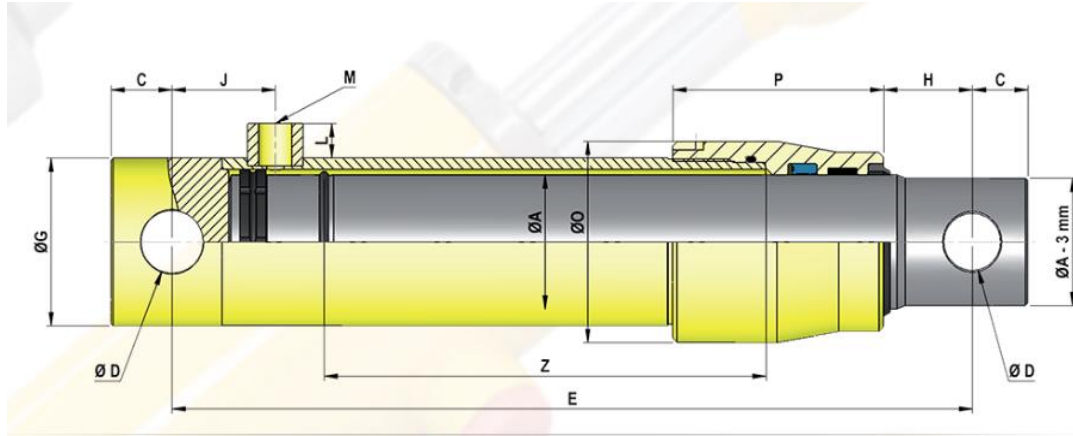


Figura 129: Esquema cilindro hidráulico CICROSA serie 600.

REF	ØA	Z Carrera Course	E	C	D	G	H	J	O	P	L	M BSP	Vol(L)	Juego Juntas	Peso(kg)
645/2	45	200	330	22	23	60	34	47	70	77	15	3/8	0.39	J645	7
645/3	45	300	430	22	23	60	34	47	70	77	15	3/8	0.59	J645	8.9
645/4	45	400	530	22	23	60	34	47	70	77	15	3/8	0.79	J645	10.9
645/5	45	550	680	22	23	60	34	47	70	77	15	3/8	1.08	J645	13.7
645/7	45	700	830	22	23	60	34	47	70	77	15	3/8	1.37	J645	16.7
650/2	50	200	360	25	25.25	65	49	50	75	80	15	3/8	0.48	J650	16.7
650/3	50	300	460	25	25.25	65	49	50	75	80	15	3/8	0.71	J650	11.2
650/4	50	400	560	25	25.25	65	49	50	75	80	15	3/8	0.95	J650	13.5
650/5	50	550	710	25	25.25	65	49	50	75	80	15	3/8	1.31	J650	16.8
650/7	50	700	860	25	25.25	65	49	50	75	80	15	3/8	1.66	J650	20.4
655/3	55	300	460	25	25.25	70	41	50	85	95	15	3/8	0.85	J655	13.6
655/5	55	550	710	25	25.25	70	41	50	85	95	15	3/8	1.56	J655	20.1
655/7	55	700	860	25	25.25	70	41	50	85	95	15	3/8	1.98	J655	24.2
660/2	60	200	360	25	25.25	75	36	50	90	95	15	3/8	0.66	J660	12.6
660/3	60	300	460	25	25.25	75	36	50	90	95	15	3/8	1	J660	15.7
660/4	60	400	560	25	25.25	75	36	50	90	95	15	3/8	1.33	J660	18.7
660/5	60	550	710	25	25.25	75	36	50	90	95	15	3/8	1.83	J660	23.3
660/7	60	700	860	25	25.25	75	36	50	90	95	15	3/8	2.32	J660	28.4
670/3	70	300	495	28	30.5	90	50	58	108	110	17	1/2	1.33	J670	25.1
670/4	70	400	595	28	30.5	90	50	58	108	110	17	1/2	1.77	J670	29.6
670/5	70	550	745	28	30.5	90	50	58	108	110	17	1/2	2.43	J670	36.5
670/7	70	700	895	28	30.5	90	50	58	108	110	17	1/2	3.09	J670	43.4

Tabla 12: Dimensiones del cilindro hidráulico CICROSA serie 600.

La longitud total más parecida es la de la referencia 670/7. La suma total da 1595 mm, menor a la que necesitamos. Añadimos 25 mm a cada una de las partes para tener la longitud de referencia de:

- Cilindro recogido: $895 + 25 = 920$ mm.
- Carrera: 725 mm.

Procedemos a diseñar el vástago a pandeo:

Primero calculamos la longitud de pandeo, que en este caso es de.

$$L_p = Z * \beta = 725 * 2 = 1450 \text{ mm.}$$

A continuación, acudimos al siguiente gráfico para calcular el diámetro del vástago:

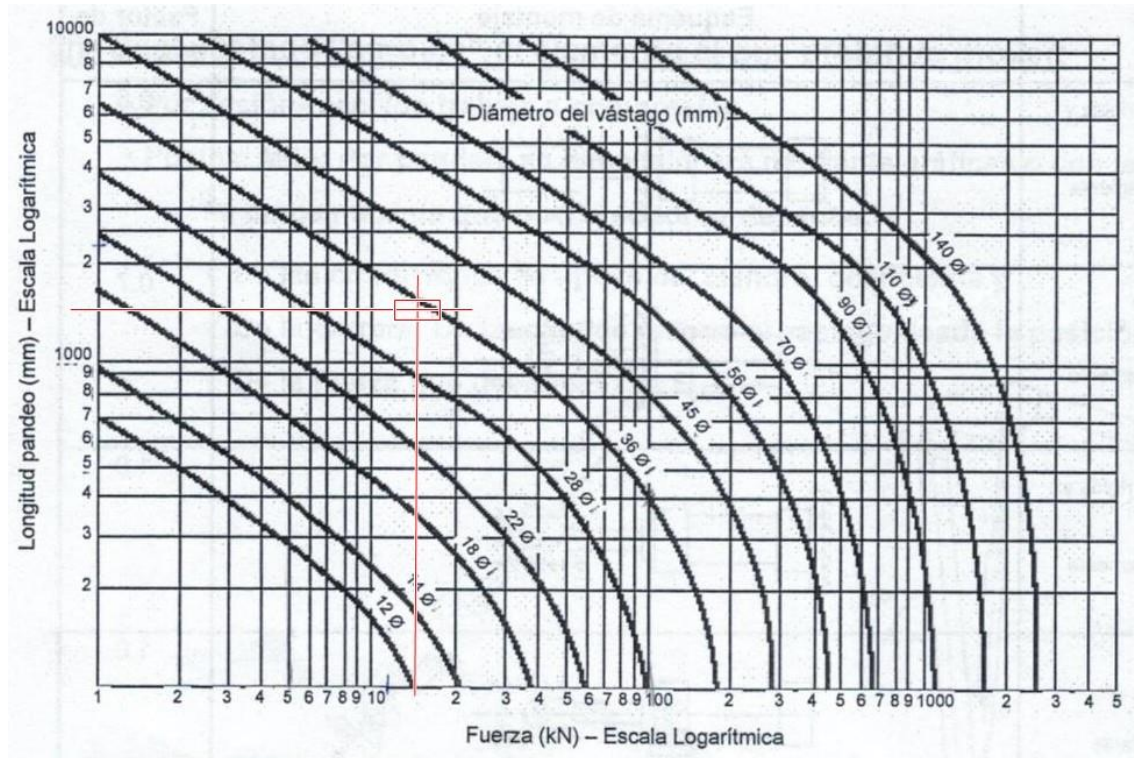


Gráfico 3: Diámetro de vástago cilindro 1.

Elegimos el diámetro inmediatamente superior, por lo que el diámetro del vástago necesario es de 36 mm.

Por último, comprobamos en un ensamblaje la inclinación mínima de la pluma:

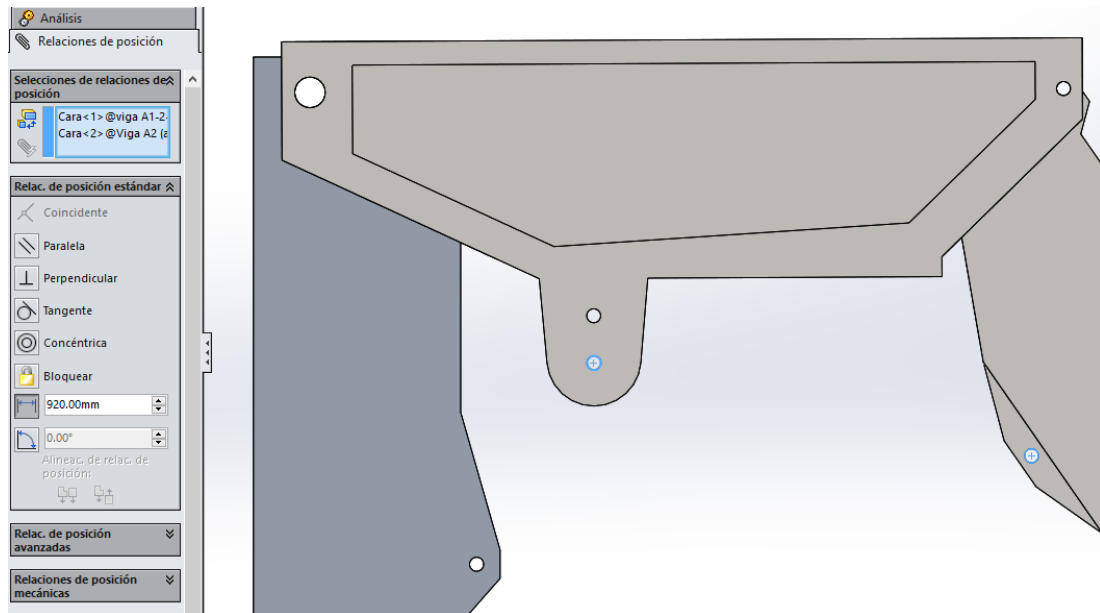


Figura 130: Posición mínima cilindro 1.

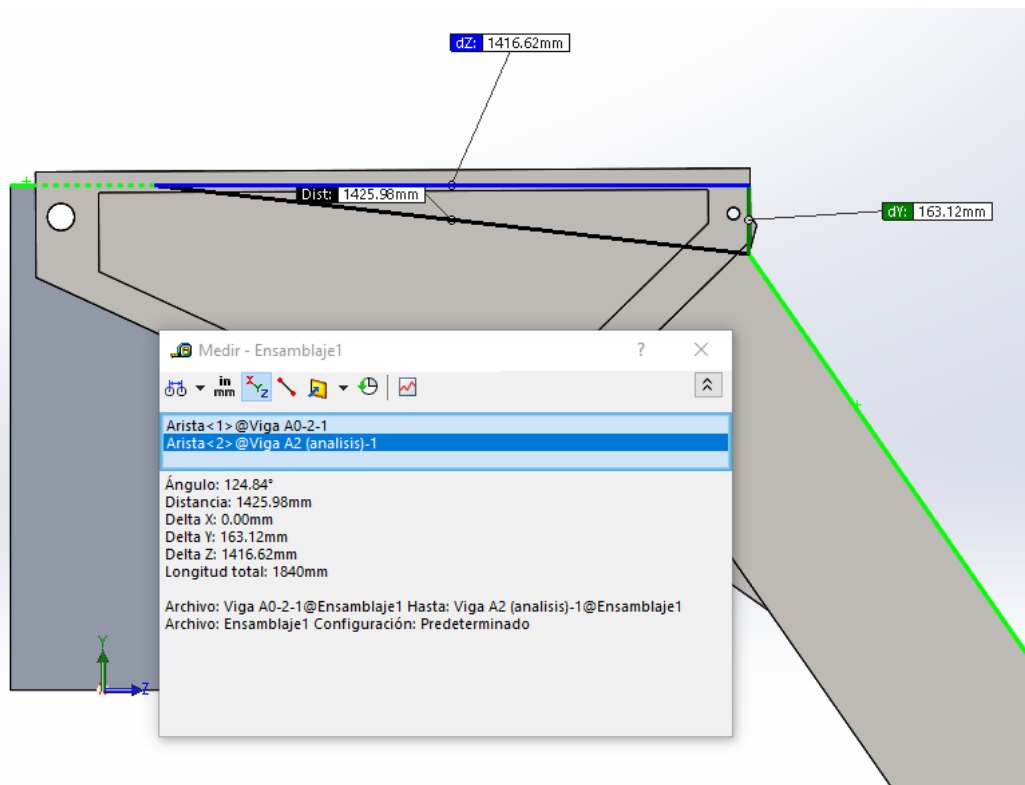
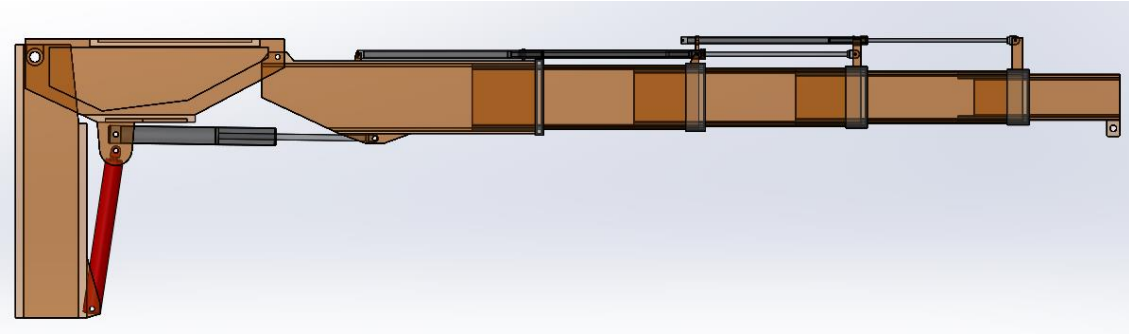


Figura 131: Inclinación mínima de la pluma.

Por tanto la inclinación mínima será de: $180 - 124,84 = 55,16^\circ$.

5.2- Cilindro de posicionamiento 2:

Este cilindro hidráulico compensa las reacciones de las vigas de sujeción, y permite a la pluma alcanzar posiciones de ángulo positivas. Como se ha calculado anteriormente la fuerza necesaria es de 150021,562 N. Comprobamos la longitud máxima del cilindro para una posición de 80°.

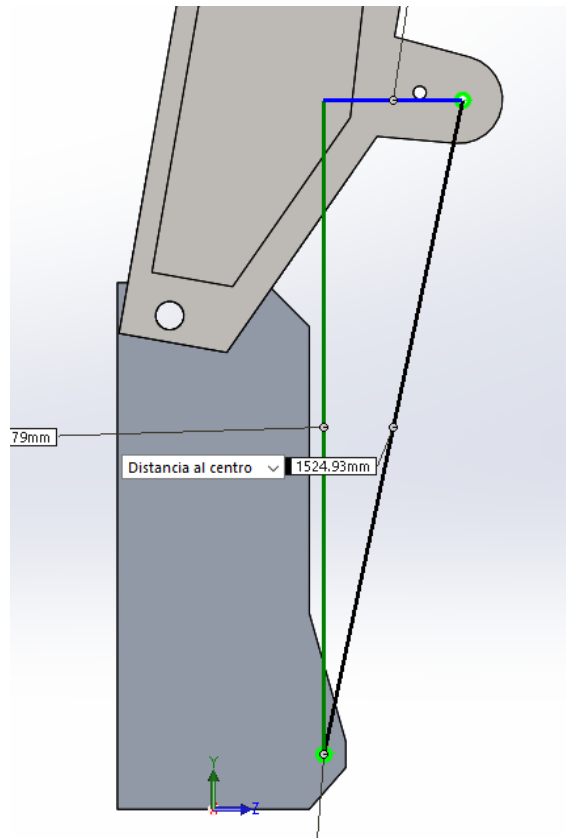


Figura 132: Longitud total cilindro hidráulico 2.

Área del pistón:

$$A_{\text{pistón}} = \frac{150021,562 * 9,81}{200} = 7358,56 \text{ mm}^2.$$

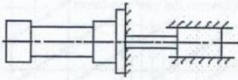
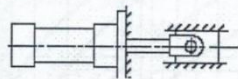
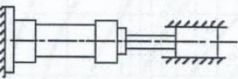
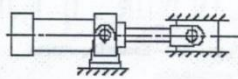
Diámetro del pistón (D = mm)	Area Pistón (mm ²)
25	491
32	804
40	1257
50	1963
63	3117
80	5027
100	7854
125	12272
160	20106
200	31416

Tabla 13: Diámetros y áreas normalizadas para cilindros hidráulicos.

Comprobamos que estamos entre un diámetro de 80 y 100 mm. Elegimos un diámetro de 100 y recalculamos la presión:

$$p = \frac{F_c * 9,81}{A_{pistón}} = 187,38 \text{ bar.}$$

Antes de calcular la longitud de pandeo, es necesario saber el factor de pandeo para el vástago.

Tipo de fijación cilindro	Esquema de montaje	Factor de pandeo (β)
Unión con vástago rígida y guiado Cilindro fijado rígidamente en parte anterior		0.5
Unión con vástago articulada y guiado Cilindro fijado rígidamente en parte anterior		0.7
Unión con vástago rígida y guiado Cilindro fijado rígidamente en parte posterior		1.0
Unión con vástago articulada y guiado Cilindro fijado mediante articulación en parte anterior		1.0

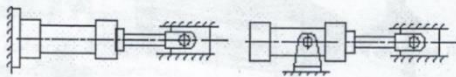
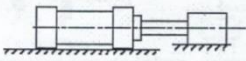
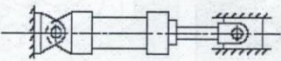
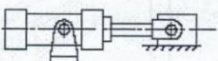
Tipo de fijación cilindro	Esquema de montaje	Factor de pandeo (β)
Unión con vástago articulada y guiado Cilindro fijado mediante articulación en parte intermedia ó rigidamente en parte posterior		1.5
Unión con vástago rígida, pero no guiado (simplemente apoyado en superficie) Cilindro fijado rigidamente		2.0
Unión con vástago articulada y guiado Cilindro fijado mediante articulación en parte posterior		2.0
Unión con vástago articulada pero no guiado (simplemente apoyado en superficie) Cilindro fijado mediante articulación en parte intermedia		3.0

Tabla 14: Factores de pandeo cilindros hidráulicos.

Nuestro caso corresponde a un factor de pandeo de 2, ya que los cilindros hidráulicos de posicionamiento están unidos mediante pasadores a las vigas, y la propia estructura los “guiará”.

De nuevo, tomamos como referencia de longitud la serie 600 de CICROSA.

REF	ØA	Z Carrera Course	E	C	D	G	H	J	O	P	L	M BSP	Vol(L)	Juego Juntas	Peso(kg)
645/2	45	200	330	22	23	60	34	47	70	77	15	3/8	0.39	J645	7
645/3	45	300	430	22	23	60	34	47	70	77	15	3/8	0.59	J645	8.9
645/4	45	400	530	22	23	60	34	47	70	77	15	3/8	0.79	J645	10.9
645/5	45	550	680	22	23	60	34	47	70	77	15	3/8	1.08	J645	13.7
645/7	45	700	830	22	23	60	34	47	70	77	15	3/8	1.37	J645	16.7
650/2	50	200	360	25	25.25	65	49	50	75	80	15	3/8	0.48	J650	16.7
650/3	50	300	460	25	25.25	65	49	50	75	80	15	3/8	0.71	J650	11.2
650/4	50	400	560	25	25.25	65	49	50	75	80	15	3/8	0.95	J650	13.5
650/5	50	550	710	25	25.25	65	49	50	75	80	15	3/8	1.31	J650	16.8
650/7	50	700	860	25	25.25	65	49	50	75	80	15	3/8	1.66	J650	20.4
655/3	55	300	460	25	25.25	70	41	50	85	95	15	3/8	0.85	J655	13.6
655/5	55	550	710	25	25.25	70	41	50	85	95	15	3/8	1.56	J655	20.1
655/7	55	700	860	25	25.25	70	41	50	85	95	15	3/8	1.98	J655	24.2
660/2	60	200	360	25	25.25	75	36	50	90	95	15	3/8	0.66	J660	12.6
660/3	60	300	460	25	25.25	75	36	50	90	95	15	3/8	1	J660	15.7
660/4	60	400	560	25	25.25	75	36	50	90	95	15	3/8	1.33	J660	18.7
660/5	60	550	710	25	25.25	75	36	50	90	95	15	3/8	1.83	J660	23.3
660/7	60	700	860	25	25.25	75	36	50	90	95	15	3/8	2.32	J660	28.4
670/3	70	300	495	28	30.5	90	50	58	108	110	17	1/2	1.33	J670	25.1
670/4	70	400	595	28	30.5	90	50	58	108	110	17	1/2	1.77	J670	29.6
670/5	70	550	745	28	30.5	90	50	58	108	110	17	1/2	2.43	J670	36.5
670/7	70	700	895	28	30.5	90	50	58	108	110	17	1/2	3.09	J670	43.4

Tabla 15: Dimensiones del cilindro hidráulico CICROSA serie 600.

La longitud total más parecida es la de la referencia 670/7. La suma total da 1595 mm, que se ajusta a nuestras necesidades. De manera que las longitudes principales del cilindro serán:

- Cilindro recogido: 985 mm.
- Carrera: 700 mm.

Procedemos al cálculo por pandeo del vástago:

Primero calculamos la longitud de pandeo, que en este caso es de.

$$L_p = Z * \beta = 700 * 2 = 1400 \text{ mm.}$$

A continuación, acudimos al siguiente gráfico para calcular el diámetro del vástago:

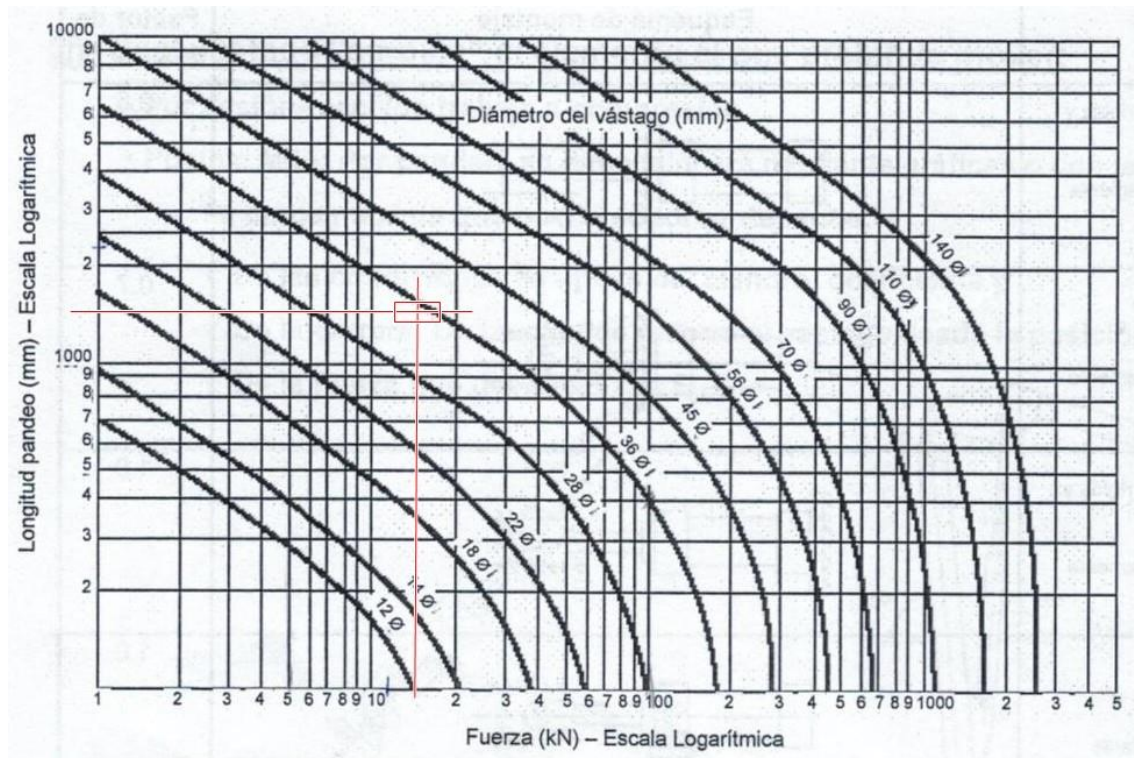


Gráfico 5: Diámetro de vástago.

Elegimos el diámetro inmediatamente superior, por lo que el diámetro del vástago necesario es de 36 mm.

Comprobamos ahora la posición mínima de la pluma con el cilindro recogido:

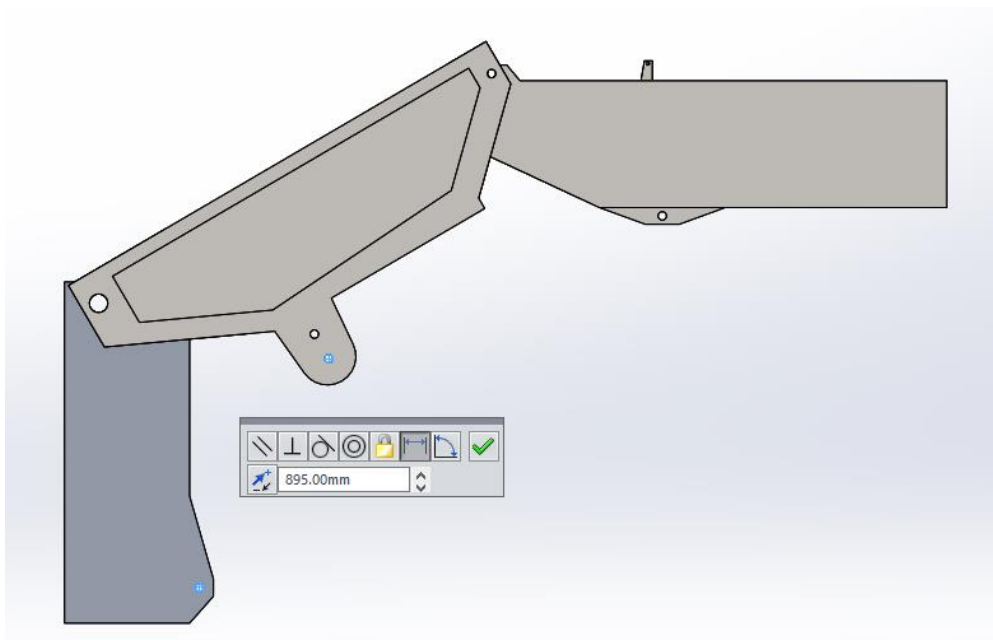


Figura 133: Posición recogida cilindro 2.

Sin embargo, como comprobamos en la siguiente figura, esta posición mínima del cilindro 2 ha variado la inclinación mínima de la pluma a -35° y la inclinación de la viga A1 a 33° .

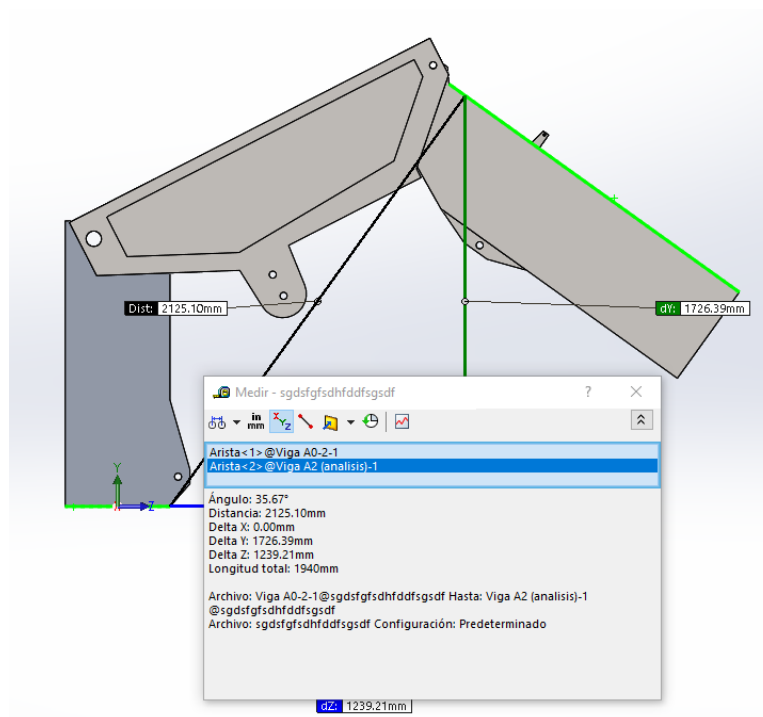


Figura 134: Nueva inclinación mínima de la pluma.

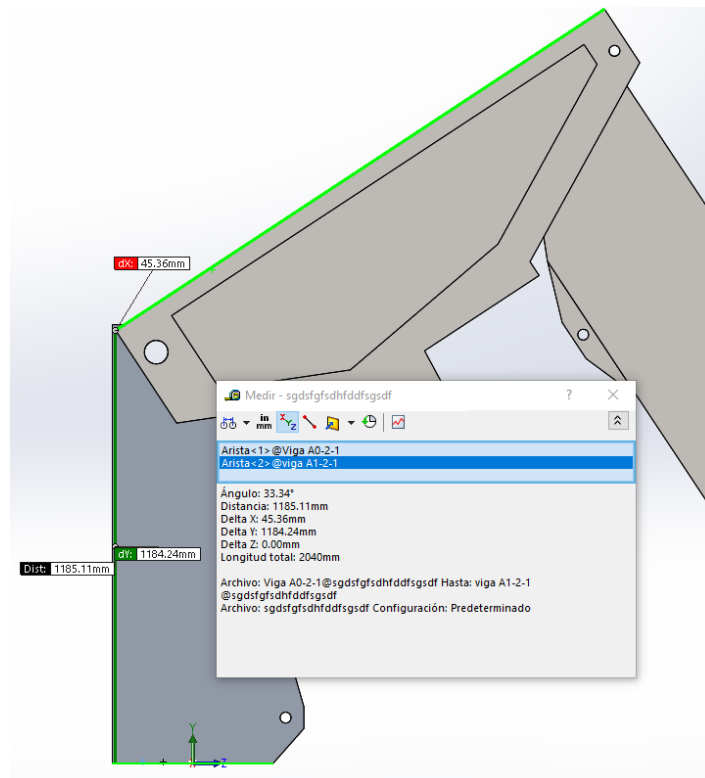


Figura 135: Nueva inclinación viga A1.

Procedemos a realizar los cambios necesarios para revertir la situación de inclinación de la viga A1 y restaurar la inclinación mínima de la pluma de 57° .

5.3- Modificación viga A1:

Se modifica de la siguiente manera:

- Se añaden refuerzos al pasador de unión entre la viga A1 y A0. Estos pasadores tienen un radio exterior de +20 mm con respecto al original y se extruyen hasta los 30 mm. Estos refuerzos obligarán a modificar la viga A0, como se mostrará en el apartado siguiente.
- Se realiza un nuevo corte en la parte frontal superior de la viga para no solapar las vigas en las inclinaciones más negativas.
- Se aumenta el espesor a 45,36 mm.
- Se aumenta el espesor de los soportes a 55,36 mm.

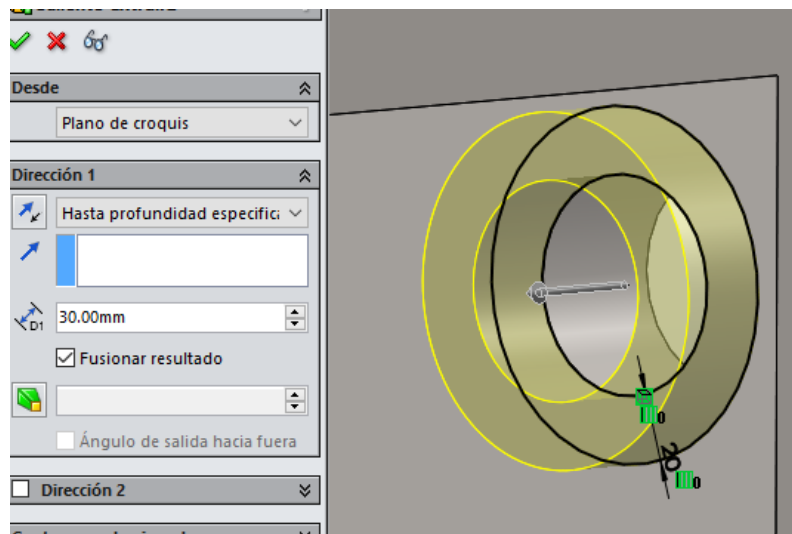


Figura 136: Refuerzos pasador viga A1.

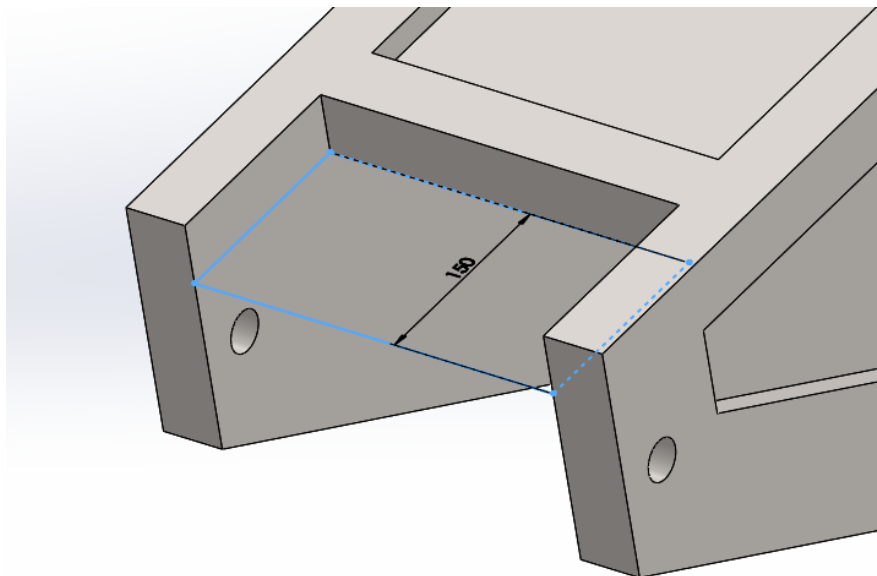


Figura 137: Corte superior viga A1.

Una vez modificada la viga, se procede con la simulación:

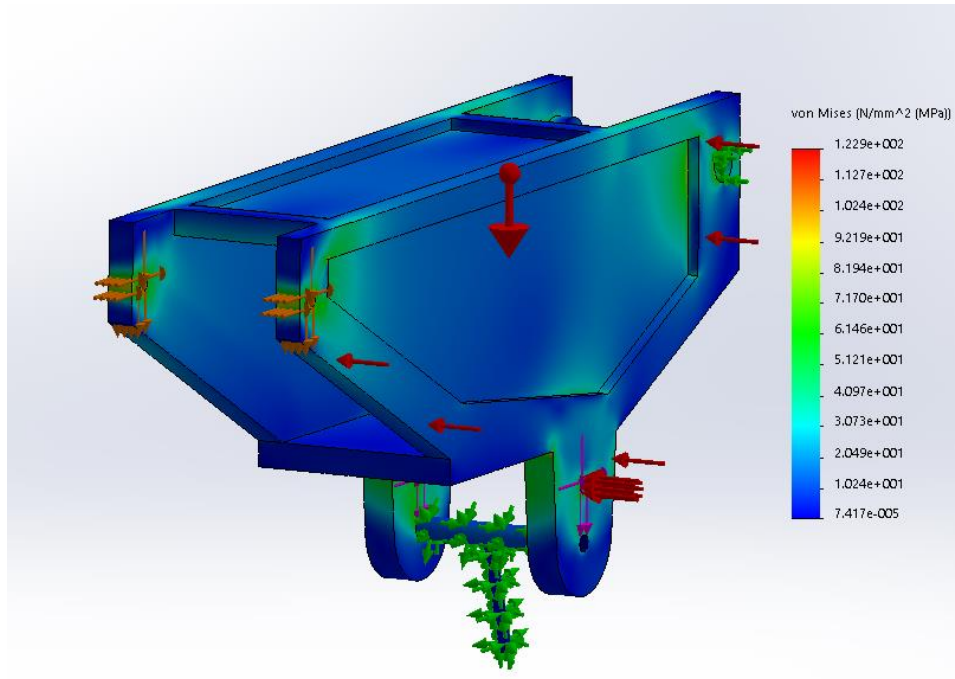


Figura 138: Tensión de Von Mises viga A1 modificada.

5.4- Modificación viga A0:

A continuación se modifica la viga A0 de la siguiente manera:

- Se reduce el espesor en la parte del pasador de unión entre la viga A0 y la A1. Se reduce 30 mm por cada lado, pues ese es el espesor de los refuerzos comentados en el apartado anterior.
- Se añade un refuerzo en la parte del pasador de unión, de manera que se distribuya más uniformemente la fuerza de reacción superior en la viga.
- Por último se aumenta la altura de la viga, de manera que consigamos la longitud mínima necesaria para el cilindro 2. En la situación actual, esa distancia es de 450 mm y necesitamos que sea 982 mm. Por tanto aumentamos la altura en 532 mm.
- Se aumenta la altura del corte superior de la viga para evitar el solapamiento con la viga A1.

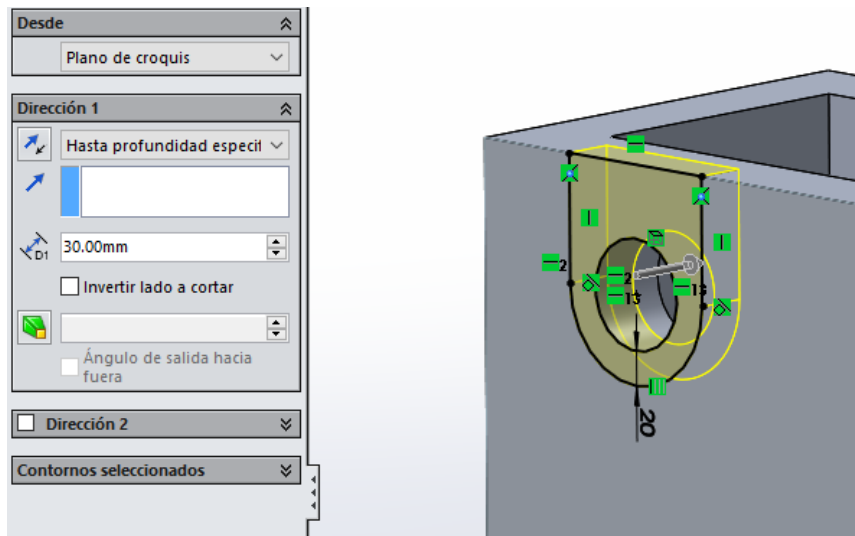


Figura 139: Modificación espesor en pasador de unión viga A0.

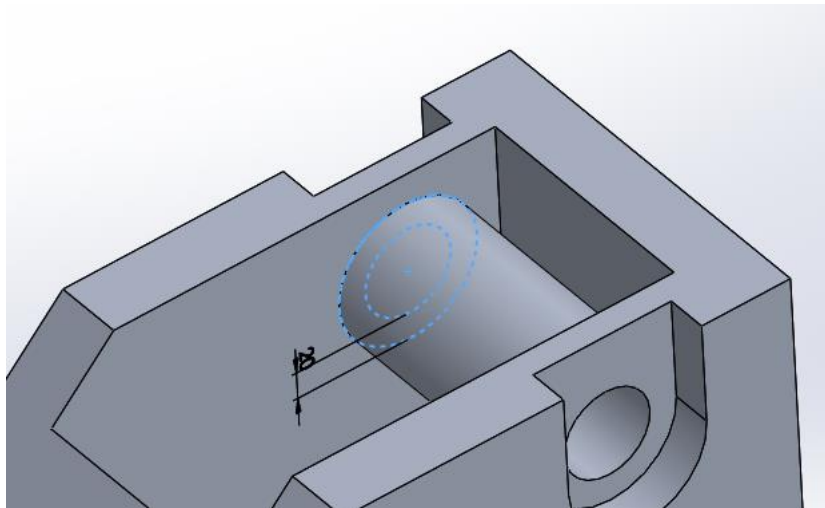


Figura 140: Refuerzo pasador de unión viga A0.

Procedemos con la simulación:

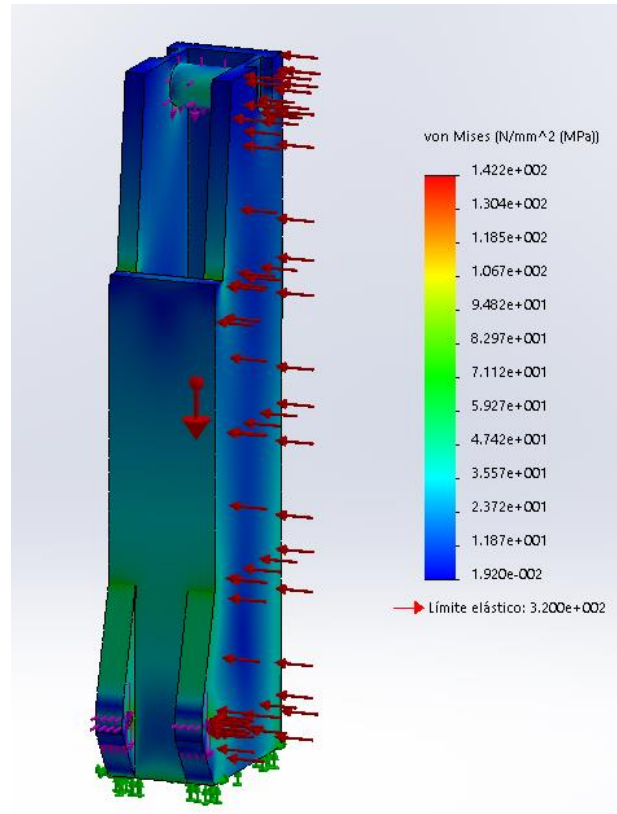
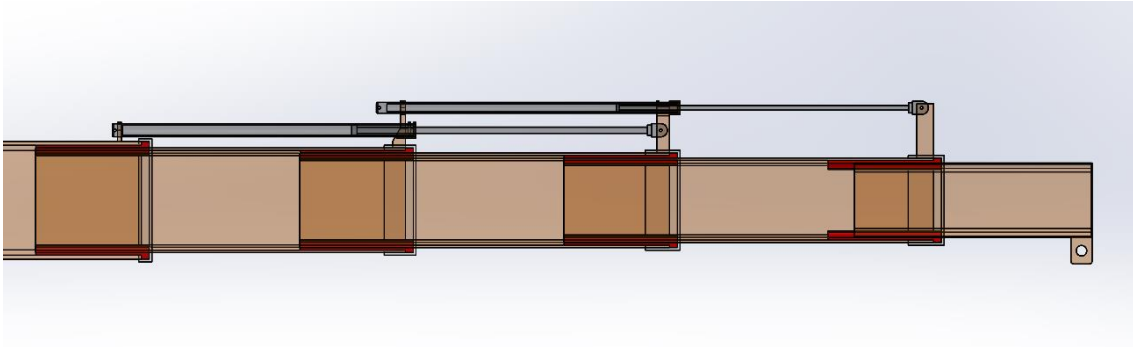


Figura 141: Tensión de Von Mises viga A0 modificada.

6- Patines de deslizamiento.



Los patines sobre los que deslizan los perfiles se diseñaron teniendo en cuenta la forma de las esquinas de las vigas y el espesor máximo de las mismas. Ese espesor máximo es de 9 mm (vigas B, C, D), al que se le añadió 1 mm de margen. La longitud de los patines equivale a la longitud de la viga que sujeta al resto, en este caso esa longitud es de 420 mm.

El material que se eligió para estos patines es el mismo que para los perfiles, ya que la norma es muy clara acerca de que todos los componentes estructurales de la grúa han de ser fabricados en un acero St 52-3 o similar. Lo que sí se buscará es maneras de mejorar el acabado superficial de las zonas de contacto, de manera que se reduzca el rozamiento.

El modo de sujeción de los patines es mediante tornillos unidos al perfil frontal de las vigas.

En las siguientes figuras se muestra un boceto del patín que sujeta a la viga B y va acoplado a la viga A2.

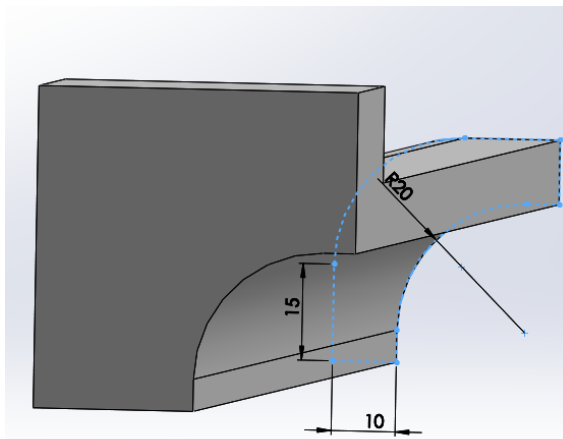


Figura 142: Boceto patín de sujeción viga B (1).

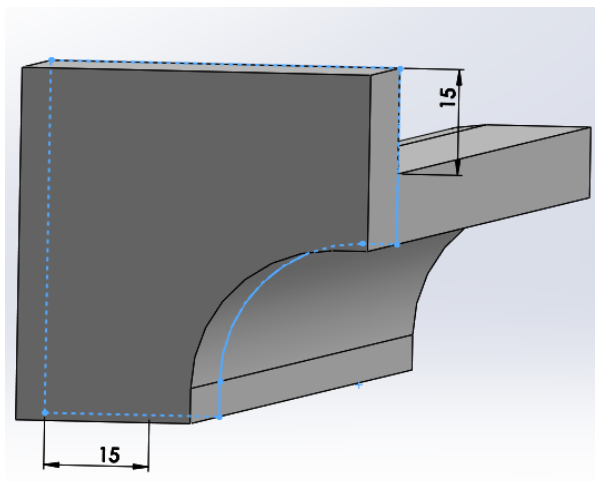


Figura 143: Boceto patín de sujeción viga B (2).

Se comprobó la resistencia de los patines mediante una simulación por elementos finitos. Se tomó la situación más desfavorable, es decir, la sujeción de la viga B mediante la viga A2:

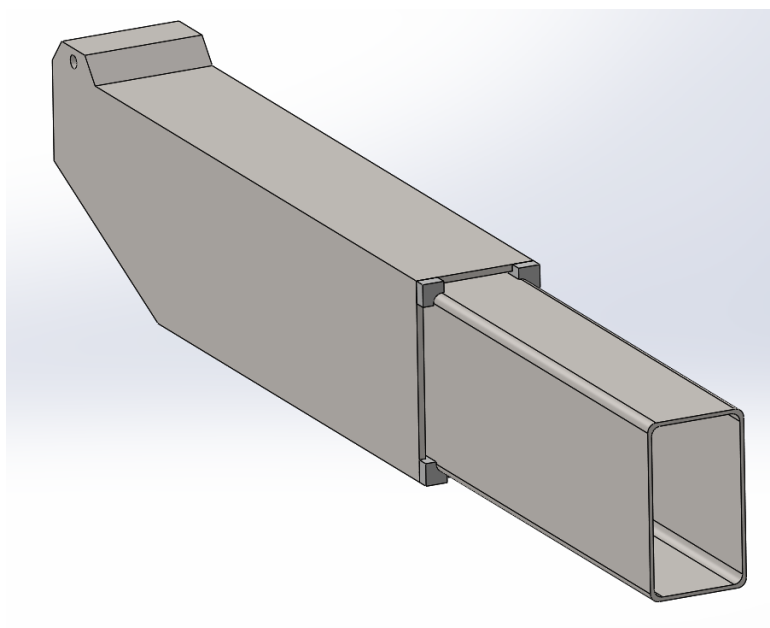


Figura 144: Ensamblaje patines viga B.

Se procedió a someter a la viga B a los mismos esfuerzos que los tomados en su diseño, y se le dio al conjunto las mismas condiciones de pasador y sujeción que las tomadas en el análisis de la viga A2. Con ello, se procedió al mallado y a la comprobación de resultados:

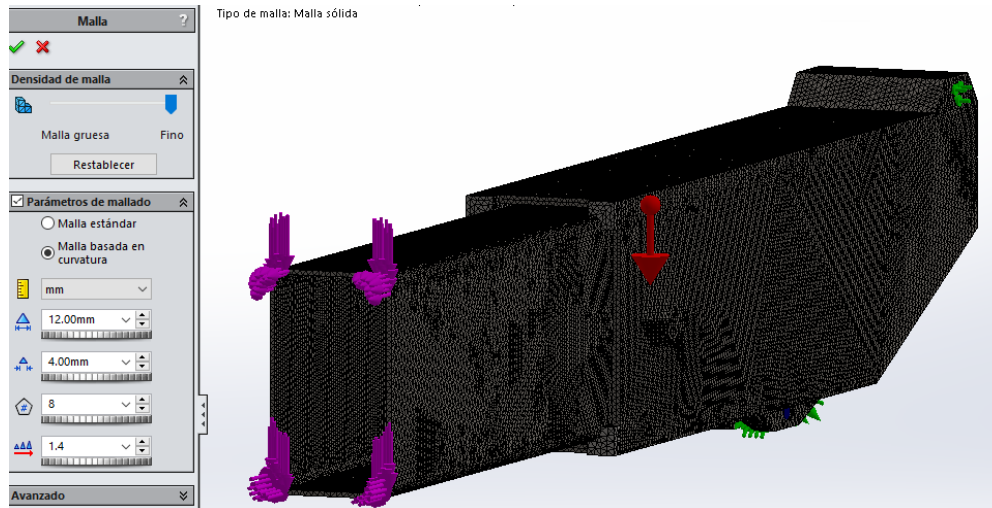


Figura 145: Mallado ensamblaje para análisis de patines.

Se puede comprobar que el tamaño de elementos es el doble que en los análisis individuales. La razón de este aumento es la de agilizar la simulación. Se lanza el análisis:

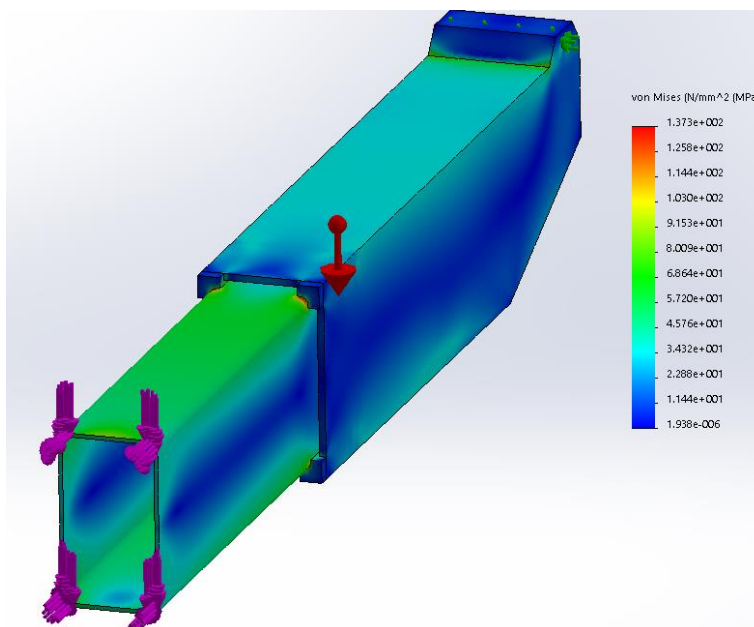


Figura 146: Tensión de Von Mises ensamblaje patines viga B.

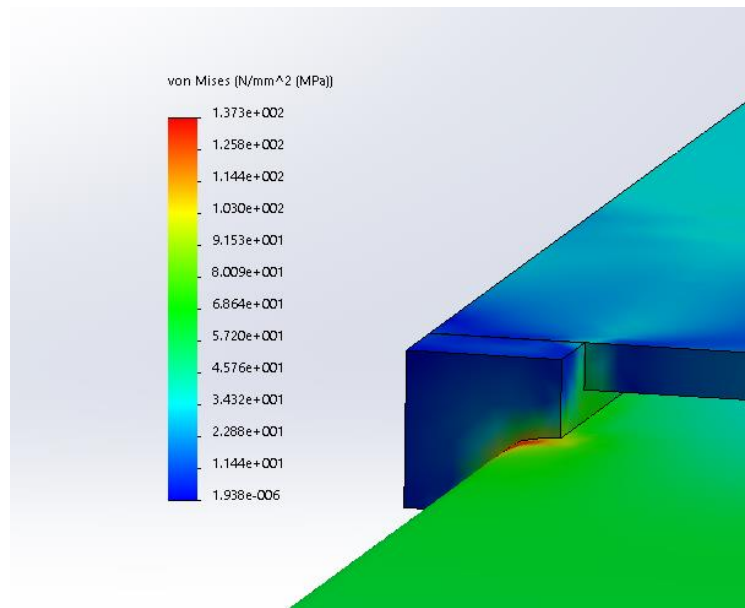
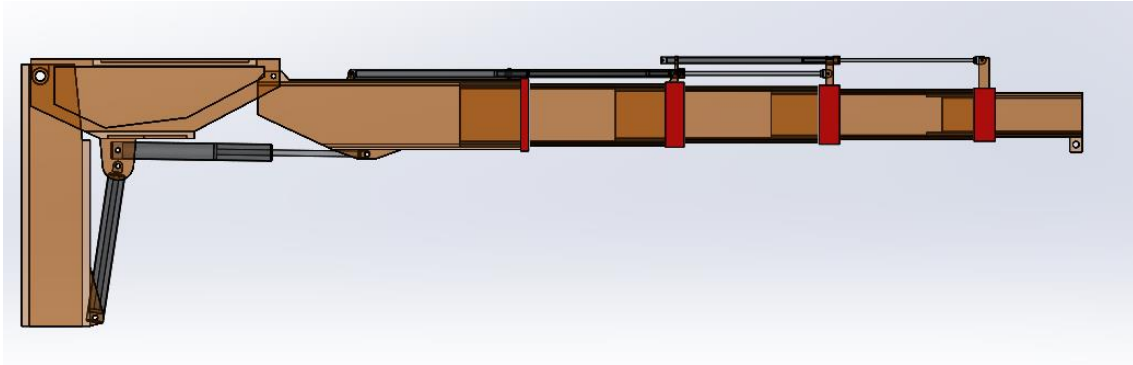


Figura 147: Tensión de Von Mises ensamblaje patines viga B (1).

Hemos comprobado por tanto que los patines soportan los esfuerzos generados por las cargas de izado.

7- Tapas.



Las tapas se diseñaron con el único propósito de adaptarse a la geometría de los extremos de las vigas. Al no ser un componente estructural de la grúa, se puede fabricar en una aleación de aluminio para reducir el peso. Se pone como ejemplo la tapa de la viga A2:

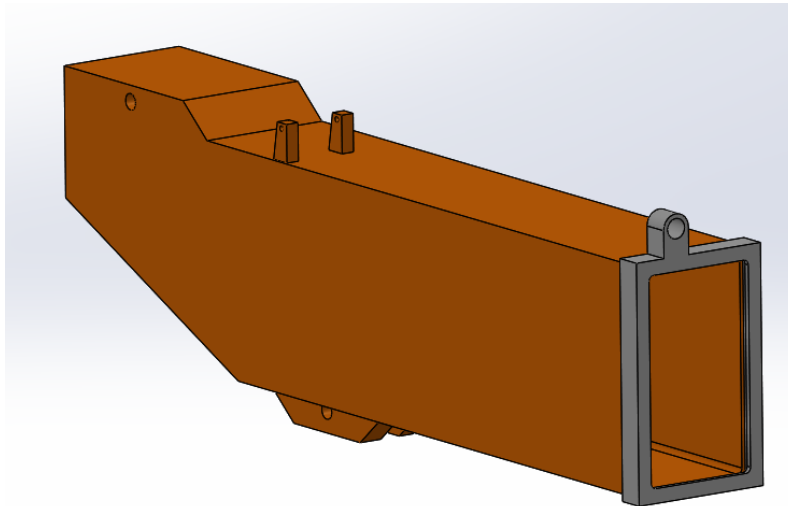


Figura 148: Tapa viga A2.

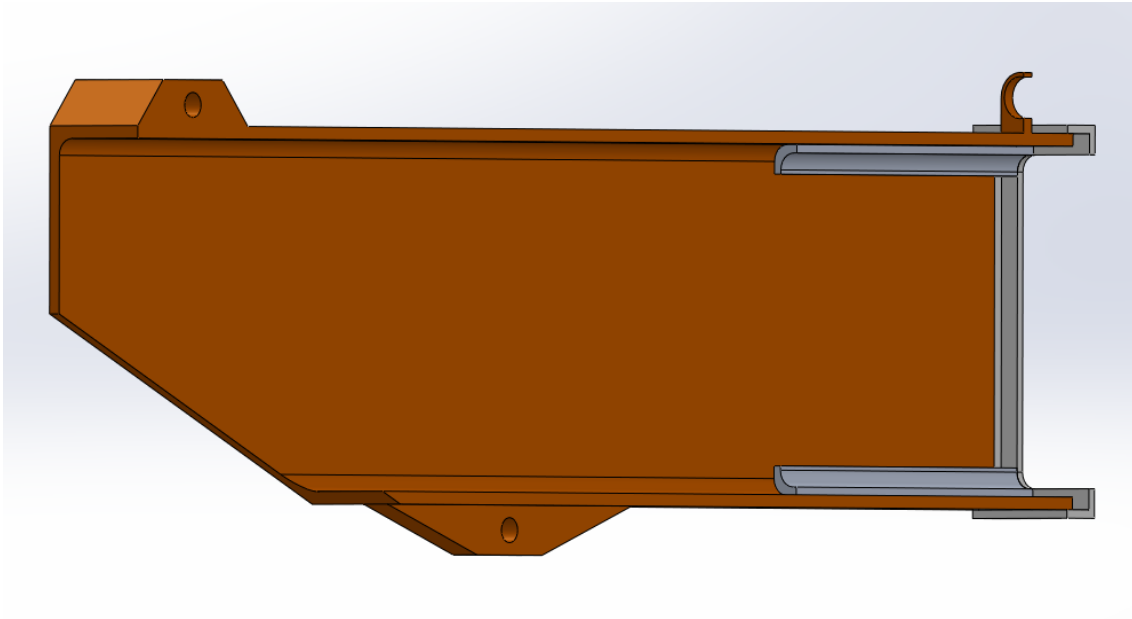


Figura 149: Detalle – corte tapa viga A2 con patines.

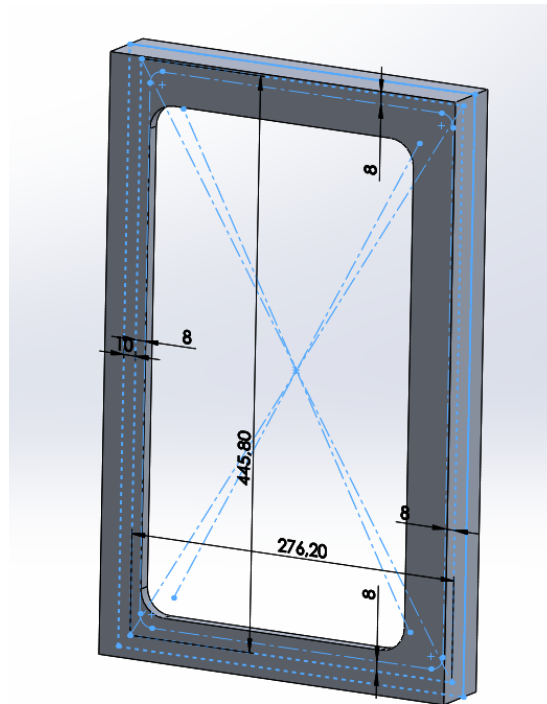


Figura 150: Croquis tapa viga A2 (1).

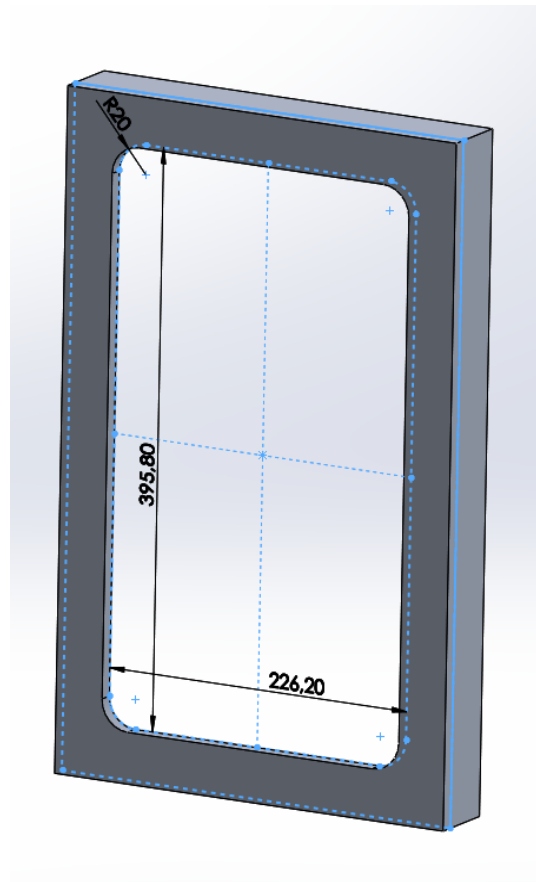
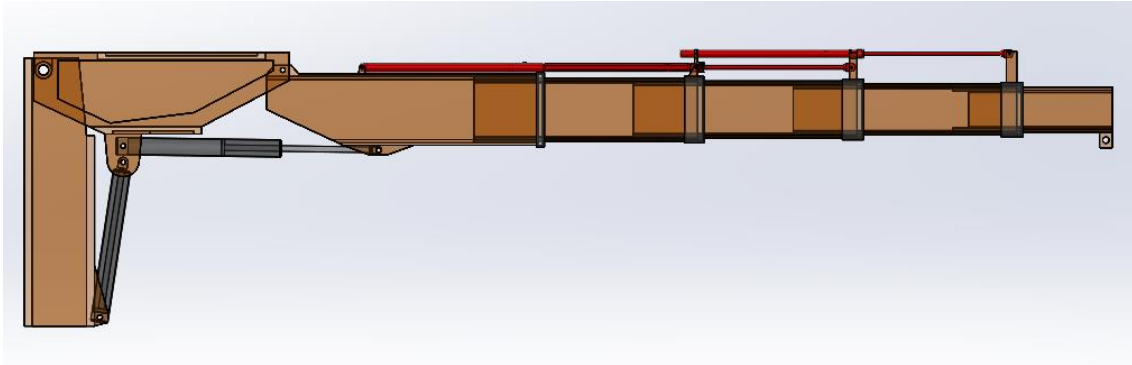


Figura 151: Croquis tapa viga A2 (2).

6- Cilindros de extensión.



Estos cilindros de extensión son los que se van a encargar de mover los perfiles que permiten variar la longitud de la grúa. Estarán posicionados en la parte superior de dichos perfiles, y la fuerza que necesiten dependerá, obviamente, del peso que soporte cada cilindro a mover, así como del ángulo de inclinación de la pluma.

Coeficiente de rozamiento:

La posición más desfavorable para los cilindros se dará para un ángulo de inclinación de la pluma de 80° y el momento más desfavorable será justo en el instante del inicio del movimiento, cuando el perfil esté a punto de moverse.

Antes de proceder con el cálculo de los cilindros, comprobamos los coeficientes de rozamiento que se darán entre cada perfil y los patines. Ambos serán fabricados en acero, de manera que el contacto será Acero – acero. La referencia del coeficiente de rozamiento se ha obtenido del “*Prontuario de máquinas de N. Larburu*”.

Máquinas simples	COEFICIENTES DE ROZAMIENTO				TABLA 7 . 4	
	MATERIALES EN ROZAMIENTO					
	Estático		Dinámico			
	Seco	Lubricado	Seco	Lubricado		
Acero sobre acero	0,15	0,10	0,10	0,09-0,08		
Acero sobre fundición de hierro	0,19	0,10	0,18	0,08-0,05		
Acero sobre bronce	0,19	0,10	0,18	0,08-0,05		
Acero sobre antifricción				0,04		
Acero sobre madera dura	0,6-0,5	0,10	0,4	0,08		
Acero sobre hielo	0,026		0,015			
Fundición sobre fundición (hierro)	0,20	0,16	0,14	0,10		
Fundición sobre bronce	0,20	0,16	0,18	0,08		
Fundición sobre madera dura	0,6	0,10	0,5	0,10		
Bronce sobre bronce	0,20	0,11	0,19	0,06		
Revestimiento de freno sobre acero	0,4		0,1			
Correa de cuero sobre fundición	0,4		0,3			
Correa de cuero sobre madera	0,5		0,4			
Neumáticos sobre calzada (hormigonada, asfaltada)		0,75—0,65				
Neumáticos sobre calzada empedrada (seca)		0,6				
Neumáticos sobre calzada mojada		0,3—0,1				
Cojinetes de máquinas (rodaduras)		0,1		0,06—0,03		
Rodamientos de bolas y de rodillos				0,003—0,001		

Tabla 16: Coeficientes de rozamiento.

La grúa del presente proyecto deberá de incorporar un sistema de lubricamiento de los patines de manera que podamos asegurar un coeficiente de fricción de 0,10.

Cálculo de los esfuerzos:

En cada una de las extensiones, los cilindros hidráulicos tendrán que compensar la fuerza ejercida por:

- Peso propio de las extensiones restantes.
- Carga elevada.
- Rozamiento provocado por el peso propio y por la carga elevada.

A continuación se muestra el diagrama de sólido libre:

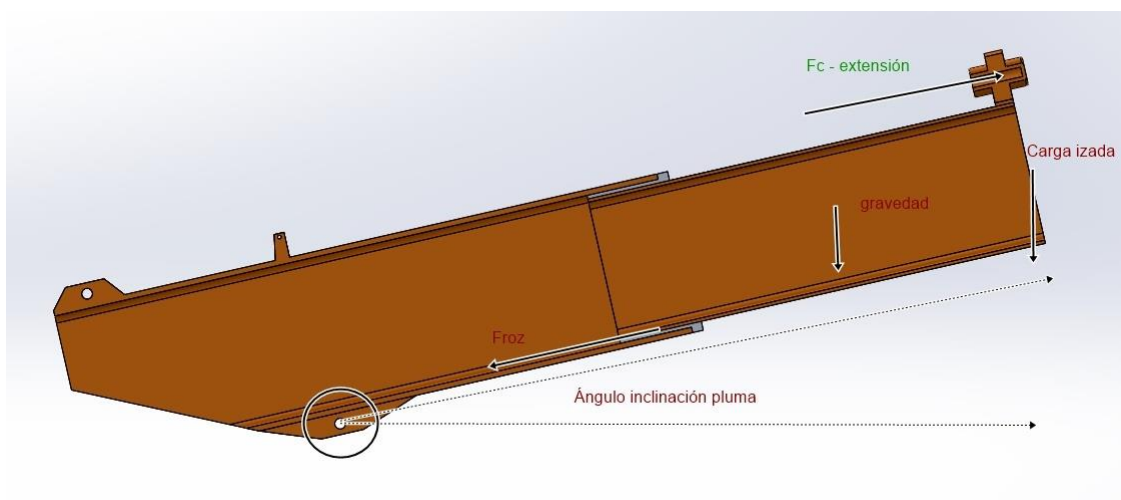


Figura 152: Diagrama sólido libre cilindros extensión.

Si resolvemos el diagrama:

$$\sum F_x = 0 \rightarrow F_c - g * (m + P) * \text{sen}(\alpha) - F_{\text{roz}} = 0$$

Siendo

$$F_{\text{roz}} = \mu_e * g * (m + P) * \text{cos}(\alpha)$$

Por tanto tenemos que:

$$F_c = g * (m + P) * (\mu_e * \text{cos}(\alpha) + \text{sen}(\alpha))$$

Creamos una tabla Excel con la ecuación y calculamos los esfuerzos iterando hasta llegar a un valor de 80° de inclinación de la pluma.

Viga	Peso (Kg)
B	108,00
C	101,00
D	85,00
E	24,00
Coef roz	0,10
Carga	Peso (Kg)
B	2222,22
C	1818,18
D	1538,46
E	1428,57

Tabla 17: Resumen de pesos, cargas y coeficiente de rozamiento.

Ángulo alpha (º)	Ángulo alpha (rad)	F. Cilindro A-B (N)	F. Cilindro B-C (N)	F. Cilindro C-D (N)
80,00	1,40	24973,62	19939,61	16196,64

Tabla 18: Fuerza del cilindro necesaria para las 3 extensiones a 80º de inclinación.

Las fuerzas de cálculo para los cilindros serán entonces:

- Primera extensión: 2,50 toneladas (24973,62 N).
- Segunda extensión: 2,00 toneladas (19939,61 N).
- Tercera extensión: 1,62 toneladas (16196,64 N).

A continuación vamos a calcular las dimensiones de los cilindros, aplicando las fórmulas que ya conocemos:

$$A_{pistón} = \frac{F_c * 9,81}{p}$$

Y para la fuerza de retroceso necesaria, una vez conocidos el pistón y el vástago:

$$F_r = \frac{p * \frac{\pi * (\Phi_{cil} - \Phi_{vast})}{4}}{9,81}$$

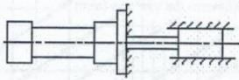
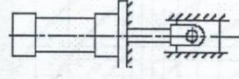
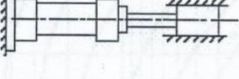
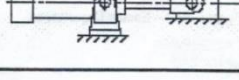
En la siguiente tabla está resumido el cálculo de los cilindros:

Cilindro	Fuerza (N)	A cil (mm2)	A normalizada (mm2)	D normalizado (mm)	p recalculada (bar)
1	24973,62	1224,96	1257,00	40,00	194,90
2	19939,61	978,04	1257,00	40,00	155,61
3	16196,64	794,45	804,00	32,00	197,62

Tabla 19: Cálculo diámetro y presión de los cilindros.

A continuación procedemos a calcular los vástagos a pandeo.

Antes de calcular la longitud de pandeo, es necesario saber el factor de pandeo para el vástago.

Tipo de fijación cilindro	Esquema de montaje	Factor de pandeo (β)
Unión con vástago rígida y guiado Cilindro fijado rígidamente en parte anterior		0.5
Unión con vástago articulada y guiado Cilindro fijado rígidamente en parte anterior		0.7
Unión con vástago rígida y guiado Cilindro fijado rígidamente en parte posterior		1.0
Unión con vástago articulada y guiado Cilindro fijado mediante articulación en parte anterior		1.0

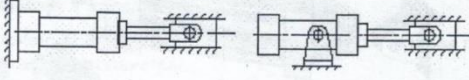
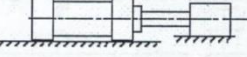
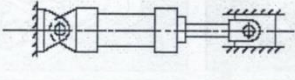
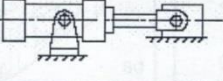
Tipo de fijación cilindro	Esquema de montaje	Factor de pandeo (β)
Unión con vástago articulada y guiado Cilindro fijado mediante articulación en parte intermedia ó rígidamente en parte posterior		1.5
Unión con vástago rígida, pero no guiado (simplemente apoyado en superficie) Cilindro fijado rígidamente		2.0
Unión con vástago articulada y guiado Cilindro fijado mediante articulación en parte posterior		2.0
Unión con vástago articulada pero no guiado (simplemente apoyado en superficie) Cilindro fijado mediante articulación en parte intermedia		3.0

Tabla 20: Factores de pandeo cilindros hidráulicos.

Este caso pertenece a un factor de pandeo de 1,5 ya que las sujeciones de nuestros cilindros son idénticas a las mostradas en la figura, si bien el direccionamiento de los mismos vendrá dado por la misma estructura.

Consultamos el gráfico de dimensionamiento del vástago:

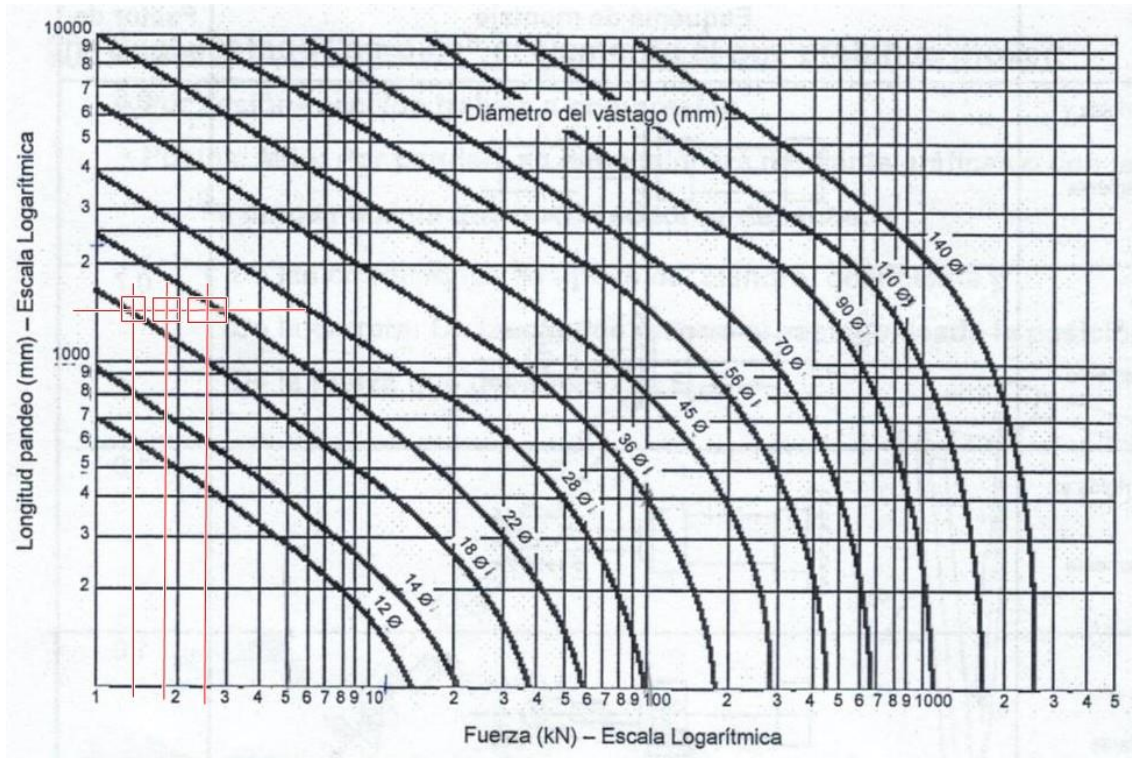


Gráfico 6: Dimensionado vástago cilindros de extensión.

Comprobamos que para los 3 casos es necesario un diámetro de vástago de 22 mm. Se resumen los cálculos en la siguiente tabla:

Z (mm)	Coef pandeo	Lp (mm)	D vast (mm)	F retroceso (N)	Cilindro
1000,00	1,50	1500,00	22,00	5055,55	1
1000,00	1,50	1500,00	22,00	4036,49	2
1000,00	1,50	1500,00	22,00	1582,14	3

Tabla 21: Dimensionado vástago cilindros de extensión y fuerza de retroceso.

Con los valores calculamos elegimos un cilindro del catálogo de CICROSA serie 700:

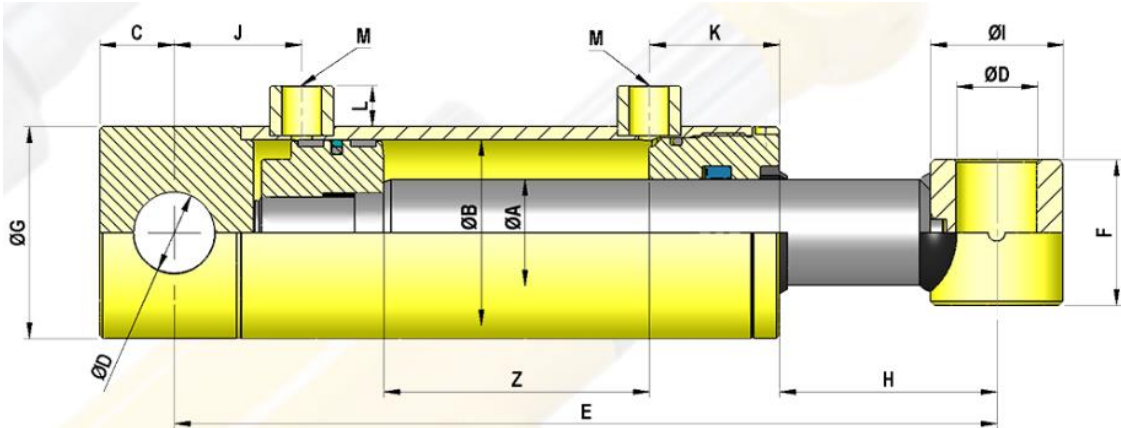


Figura 153: Esquema cilindro de doble efecto CICROSA serie 700.



Cilindros estándar de doble efecto [Serie 700]

Double acting standard cylinders [Series 700] / Vérins standard double effet [Série 700]

REF.	Ø A	Ø B	Z CARRERA STROKE	E	C	D	F	G	H	I	J	K	L	M	Vol. (L)	Peso Weight (Kg.)
700/05			50	205											0,04	1,7
700/10			100	255											0,08	2,0
700/15			150	305											0,12	2,3
700/20			200	355											0,16	2,6
700/250			250	405											0,20	2,9
700/30			300	455											0,24	3,2
700/350	20	32	350	505	16	16,2	35	40	28	30	47	35	9,5	1/4	0,28	3,4
700/400			400	555											0,32	3,6
700/500			500	655											0,40	4,2
700/600			600	755											0,48	4,8
700/700			700	855											0,56	5,3
700/900			900	1055											0,72	6,8
700/1000			1000	1155											0,80	7,2
701/1			100	270											0,13	2,9
701/150			150	320											0,19	3,4
701/2			200	370											0,25	3,8
701/250			250	420											0,31	4,4
701/3			300	470											0,38	4,7
701/350			350	520											0,44	5,3
701/4	25	40	400	570	17,5	20,25	40	50	64,5	35	38,5	40	15	3/8	0,50	5,7
701/450			450	620											0,57	6,2
701/5			500	670											0,63	6,6
701/600			600	770											0,75	7,6
701/700			700	870											0,88	8,6
701/800			800	970											1,01	9,5
701/900			900	1070											1,13	10,5
701/1000			1000	1170											1,26	11,4

Tabla 23: Ángulos de inclinación acordes con las limitaciones del proveedor.

Elegimos para los cilindros 1 y 2 la referencia 701/1000 y para el cilindro 3 la referencia 700/1000. Comprobamos la fuerza de empuje y tracción:

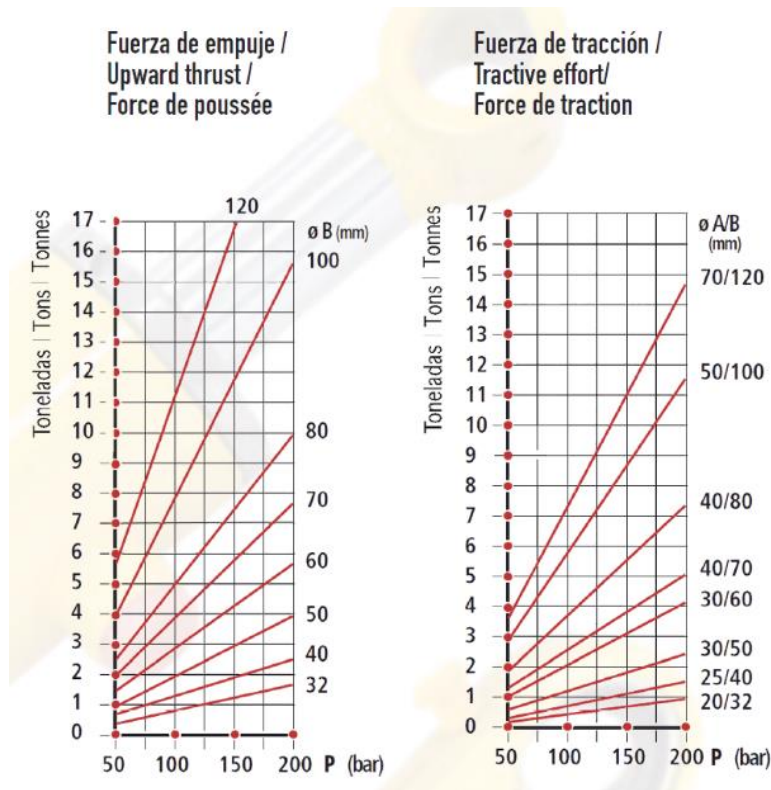


Figura 154: Gráficos de fuerzas máximas CICROSA serie 700.

Vemos que para unos diámetros de pistón y vástago de 40/25 tenemos una fuerza de tracción de aproximadamente 1,5 toneladas o 15000 N. Para los diámetros de 32/20 dicha fuerza es de aproximadamente 1 tonelada o 10000 N. Pasamos a calcular el ángulo de inclinación negativo que podremos compensar con estos cilindros:

Ángulo alpha (°)	Ángulo alpha (rad)	F. Cilindro A-B (N)	F. Cilindro B-C (N)	F. Cilindro C-D (N)
28,00	0,49	13898,99	11097,33	9014,19
29,00	0,51	14260,45	11385,93	9248,62
30,00	0,52	14617,56	11671,05	9480,22
31,00	0,54	14970,22	11952,63	9708,94
32,00	0,56	15318,33	12230,56	9934,70

Tabla 24: Ángulo de inclinación negativo por limitaciones del proveedor.

Comprobamos que el último ángulo que cumple con las condiciones de fuerza de tracción es el de 31°. De manera que ese valor es el límite de inclinación negativo de la pluma con respecto a la viga A1.

Con los ángulos de inclinación calculados y comprobados, pasamos a comprobar las alturas máximas y mínimas que la grúa podrá alcanzar en su extensión máxima:

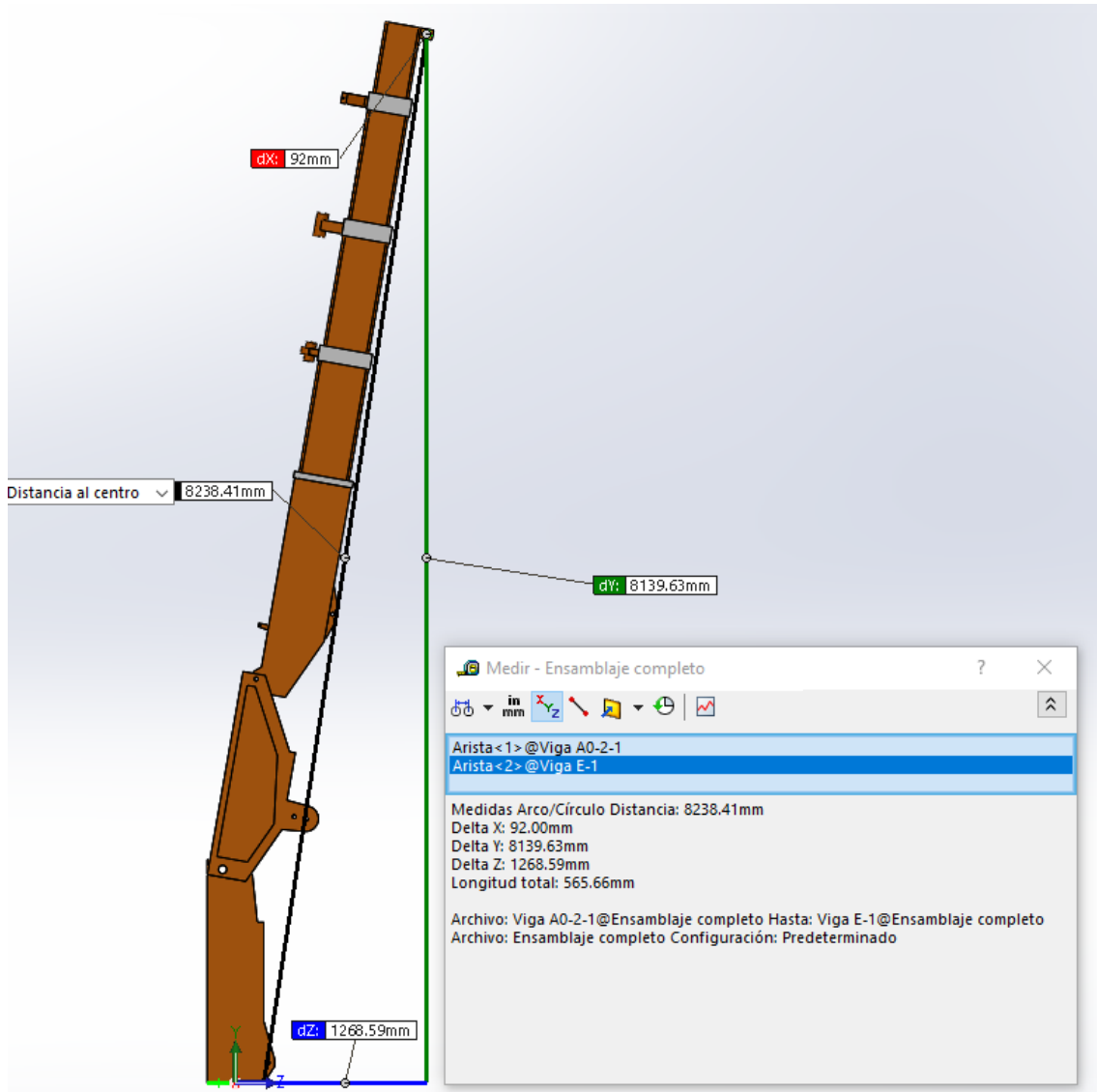


Figura 155: Alcance inclinación máxima.

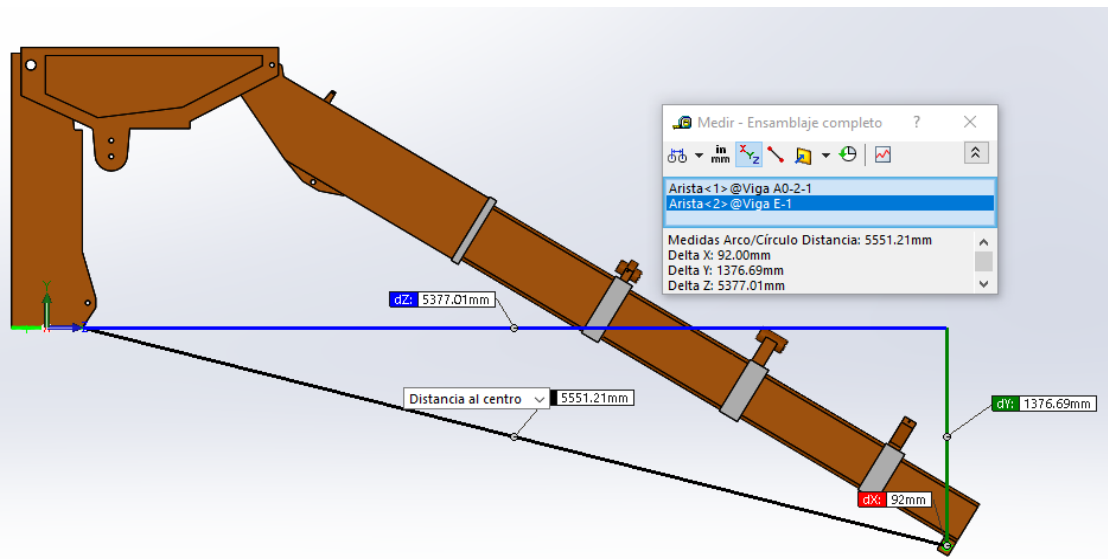


Figura 156: Alcance inclinación mínima.

A continuación procedemos con el cálculo de los soportes sobre los que actuarán los cilindros hidráulicos de extensión:

Los cilindros de extensión actuarán a través de unos pasadores sobre unas piezas de base cuadrangular soldadas a los perfiles. Se intentará que estas piezas tengan la menor altura posible para que la fuerza de los cilindros no cree un momento flector demasiado grande. El diseño se va a realizar teniendo en cuenta la fuerza máxima que ejercerán los cilindros; esto es, para un ángulo de 80°.

De nuevo utilizamos las fórmulas de cálculo a cortante del pasador y por aplastamiento de la chapa. Se muestra la tabla resumen de los cálculos:

Pasadores			
Cilindro	Fuerza (N)	D a cortante (mm)	Longitud por aplastamiento (mm)
1	24973,62	8,61	14,83
2	19939,61	7,69	13,25
3	16196,64	6,93	11,95

Tabla 25: Cálculo de pasadores.

Para el cálculo de las piezas soldadas, la altura variará con respecto al perfil. Será la suma de la mitad del diámetro del cilindro, más las diferencias de altura entre un perfil y el siguiente (espesor del perfil y espesor de los patines):

$$h = \frac{\varnothing_{cil}}{2} + e_{perfil} + e_{patines}$$

Se diseñan los soportes para los cilindros en SolidWorks. Una vez se comprueben las alturas se modificarán los parámetros de resistencia. Se redondea el diámetro de todos los pasadores a 10 mm y se le da a los soportes anchuras individuales de 15 mm. A continuación comprobamos las alturas de acción de los cilindros:

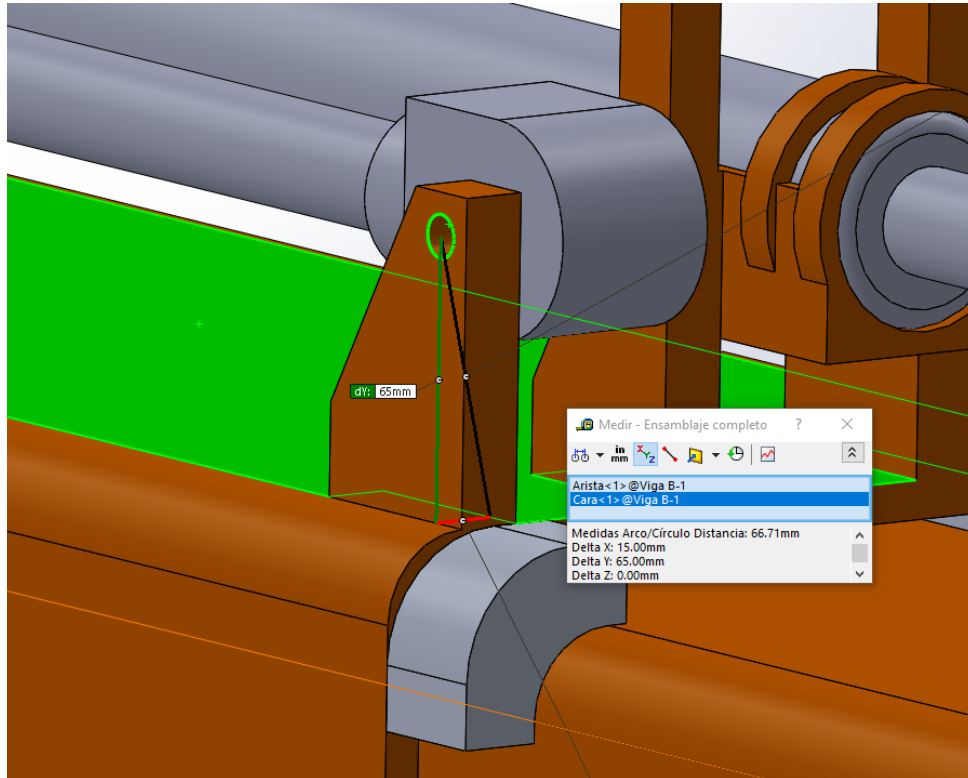


Figura 157: Altura de acción cilindro de extensión 1.

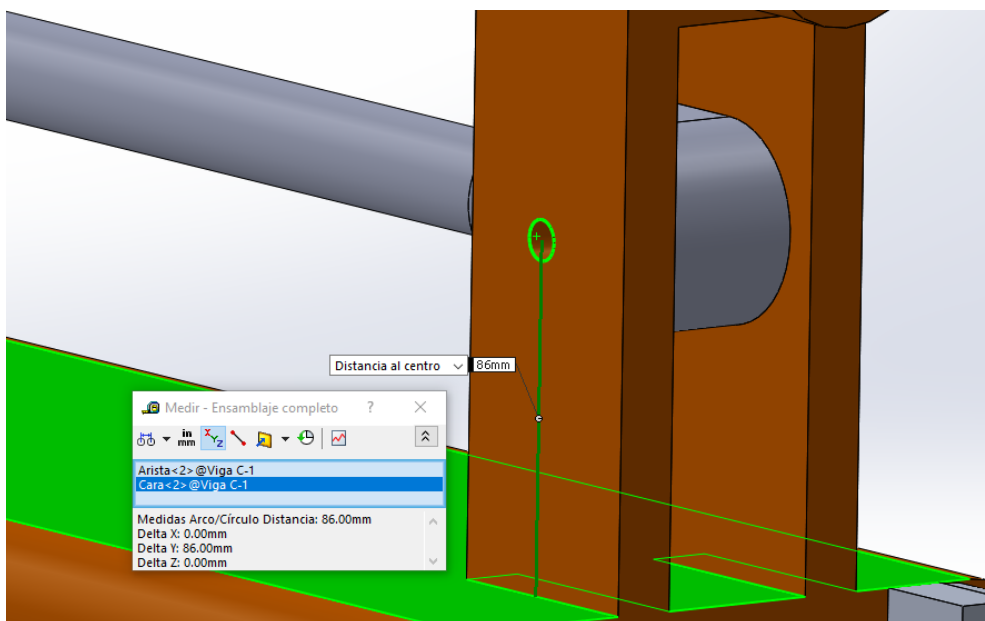


Figura 158: Altura de acción cilindro de extensión 2.

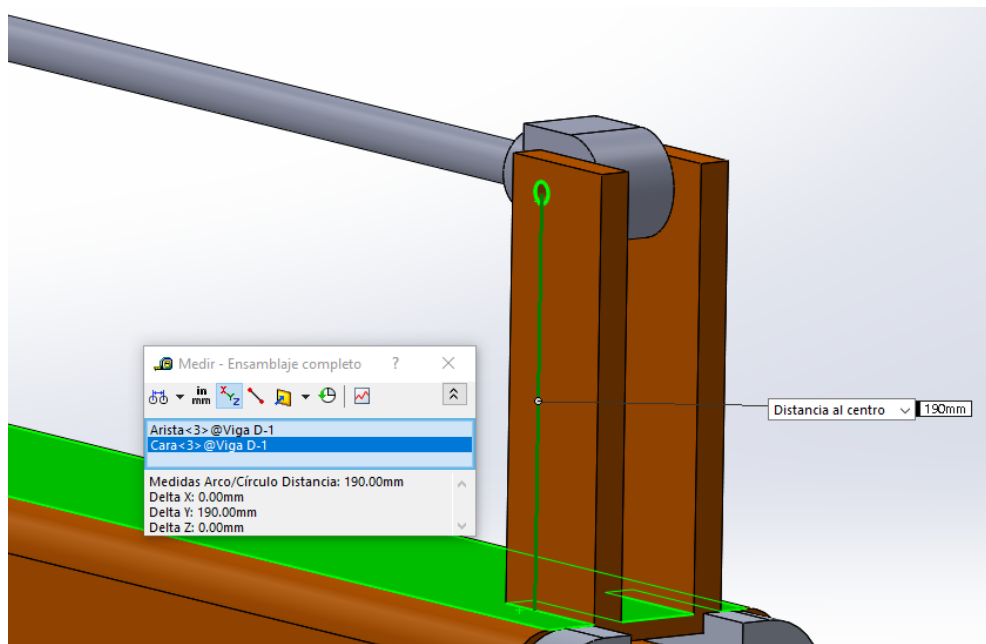


Figura 159: Altura de acción cilindro de extensión 3.

El momento flector ejercido por el cilindro hidráulico a una altura “h” tendrán que compensarlo los perfiles de unión a la viga. En este caso los perfiles serán rectangulares. Aplicando las fórmulas de resistencia ya mencionadas calculamos W_x para cada uno de los cilindros:

Cilindro	Fuerza (N)	h (mm)	M (N*mm)	W_x (mm ³)
1	24973,62	65,00	811642,67	5299,31
2	19939,61	86,00	857403,26	5598,09
3	16196,64	190,00	1538681,25	10046,23

Tabla 26: Cálculo de soportes de extensión.

Y con los datos de inercia podemos calcular los parámetros del perfil. Como se ha dicho, se ha tomado como ancho de referencia 15 mm (incógnita “b”), de manera que podemos calcular la profundidad (“a”):

$$W_x = \frac{2 * I}{a} = \frac{2 * \frac{1}{12} * b * a^3}{a} = \frac{1}{6} * b * a^2 \rightarrow a = \sqrt{\frac{6 * W_x}{b}}$$

Que para cada uno de los cilindros da el valor siguiente:

b (mm)	a (mm)	Cilindro
15,00	46,04	1
15,00	47,32	2
15,00	63,39	3

Tabla 27: Cálculo soportes de extensión (1).

Por último se procede a modificar los valores de profundidad de los soportes:

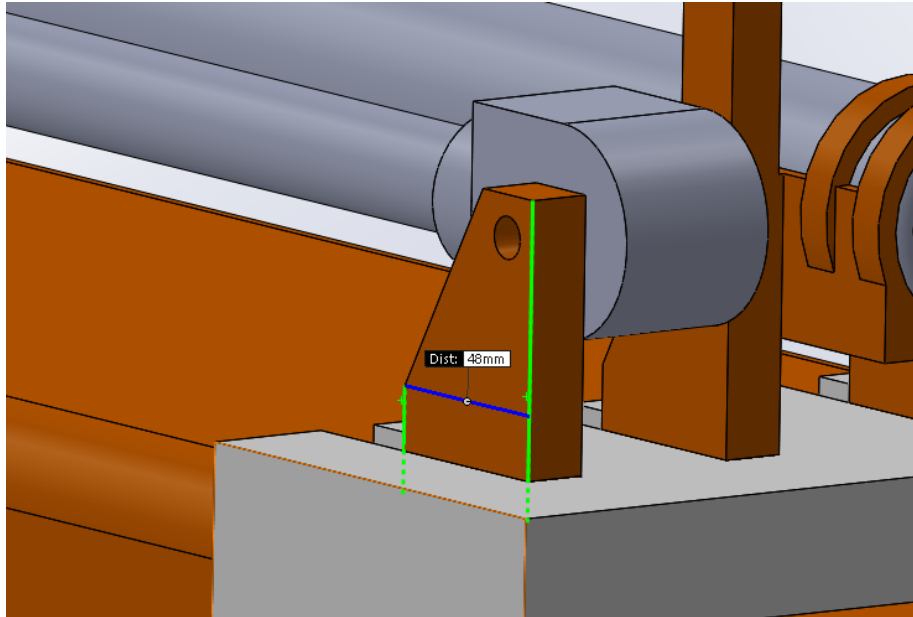


Figura 160: Profundidad soporte cilindro de extensión 1.

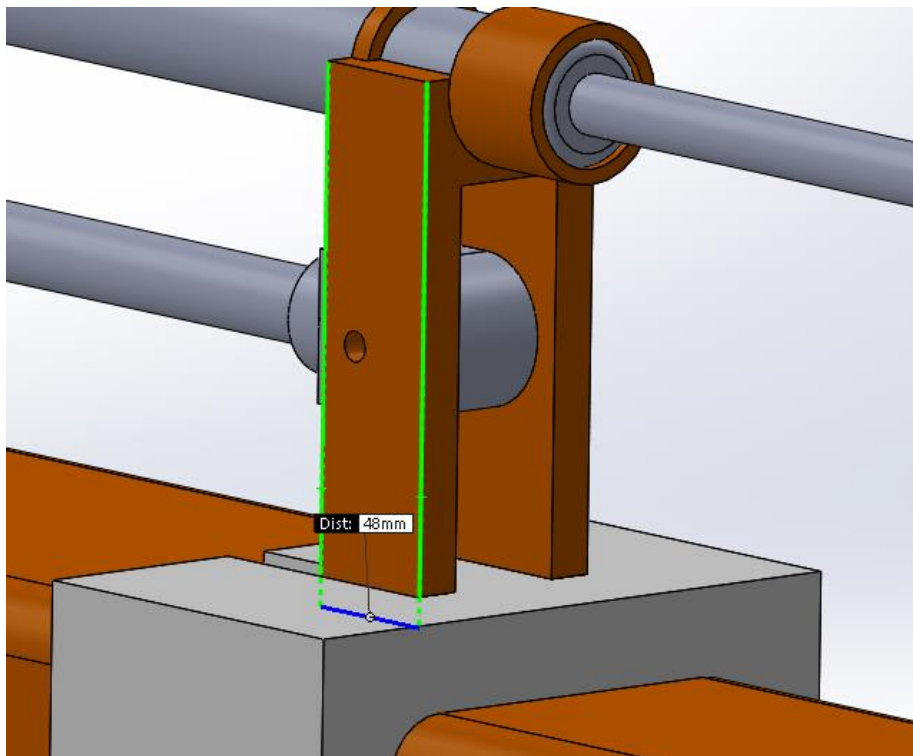


Figura 161: Profundidad soporte cilindro de extensión 2.

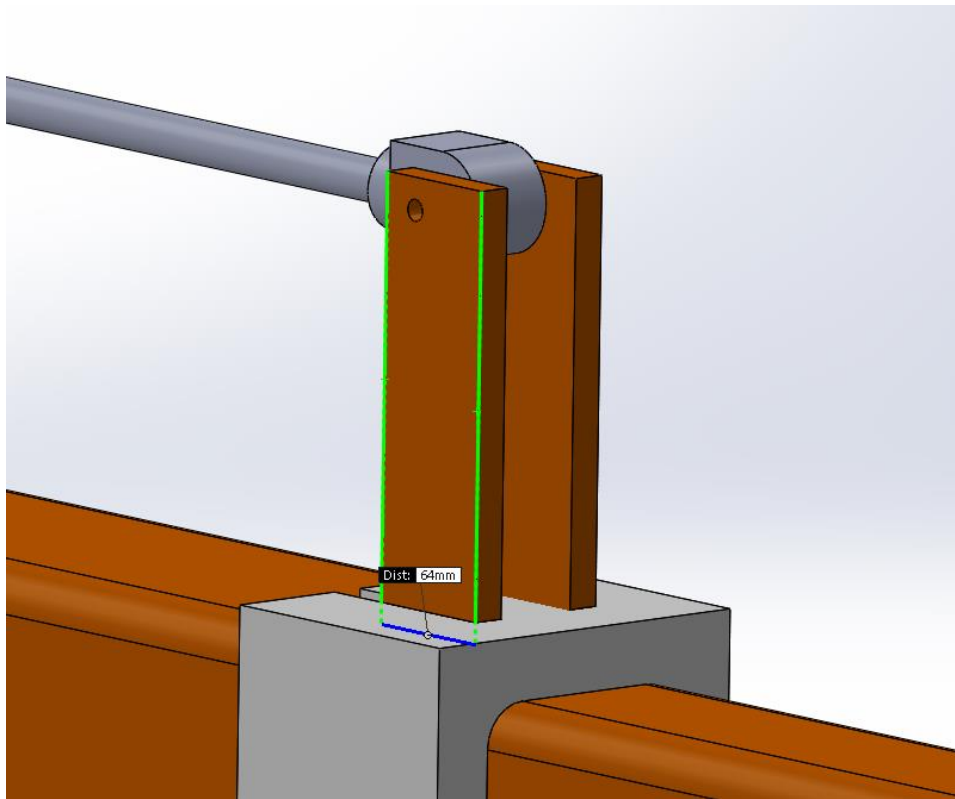


Figura 162: Profundidad soporte cilindro de extensión 3.

9- Medidas principales de la grúa.

Una vez terminado el diseño resistente de los componentes de la grúa, se ensambla el conjunto para comprobar sus medidas principales y ángulos de inclinación.

9.1- Longitudes principales:

A continuación se muestran las medidas de altura, anchura y extensión mínima y máxima:

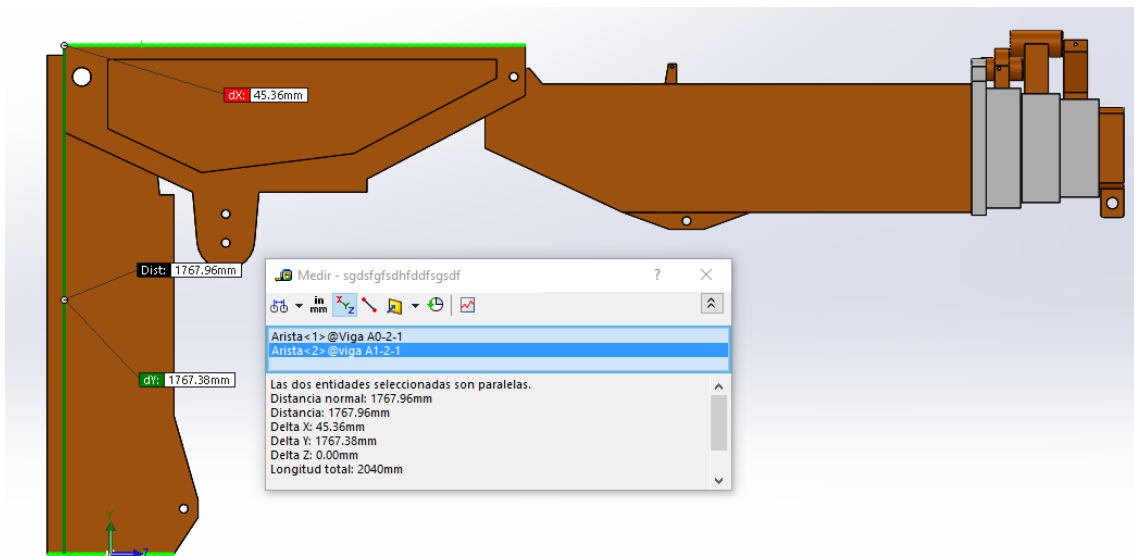


Figura 163: Altura de la grúa.

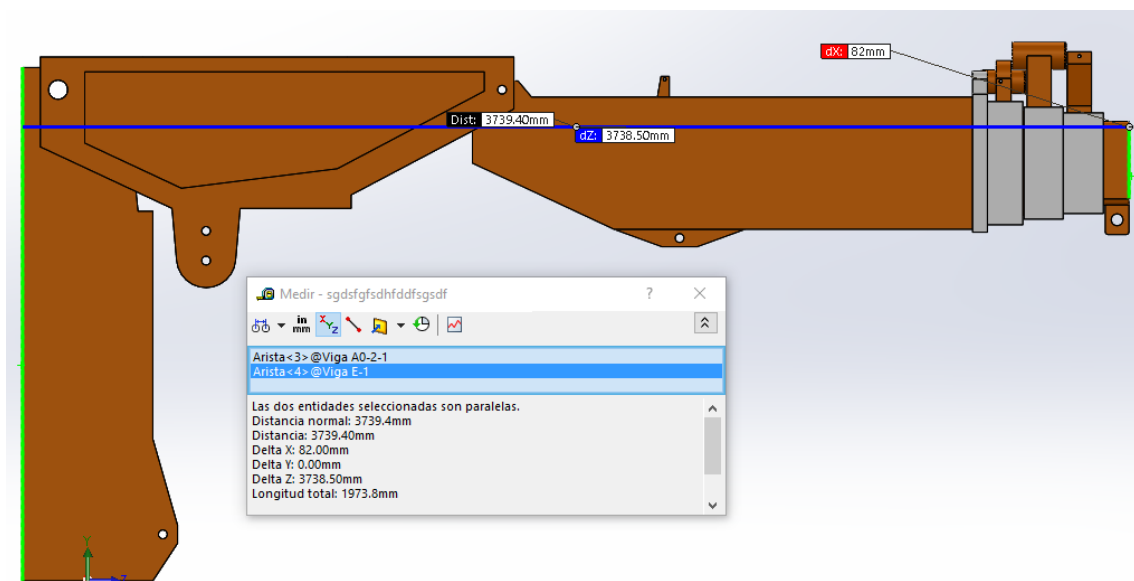


Figura 164: Extensión mínima de la grúa.

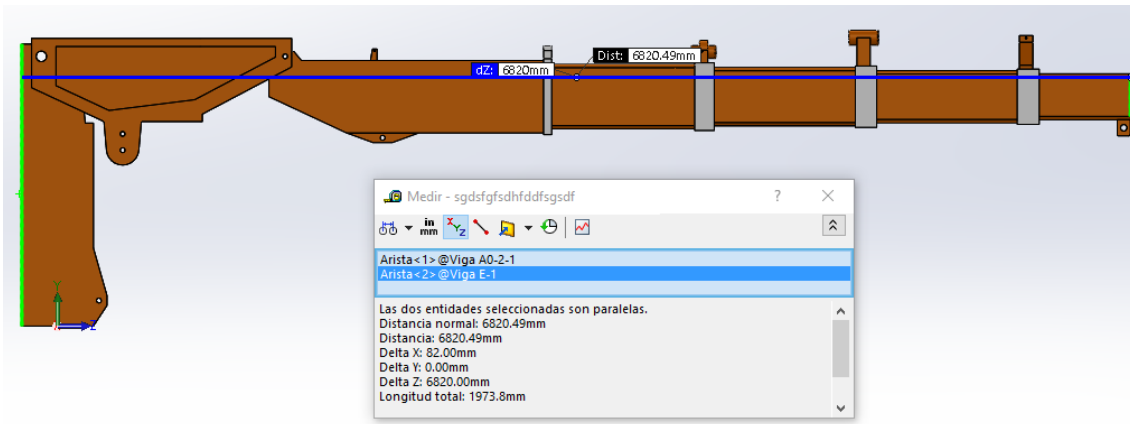


Figura 165: Extensión máxima de la grúa.

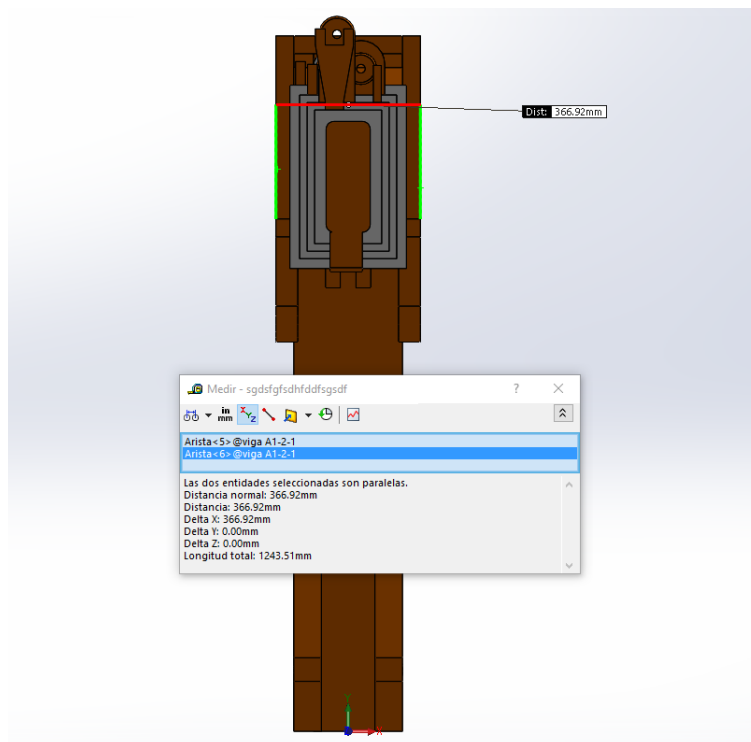


Figura 166: Anchura de la grúa.

9.2 Extensiones:

En este apartado se muestran las 4 extensiones de la grúa y su alcance. Las longitudes mínima y de la última extensión (máxima) no se van a mostrar de nuevo:

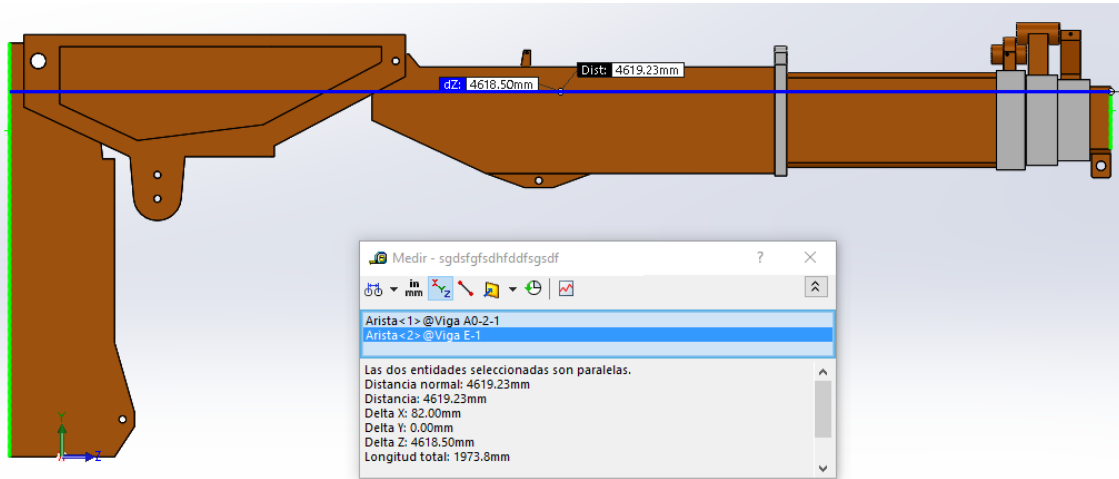


Figura 167: Longitud primera extensión.

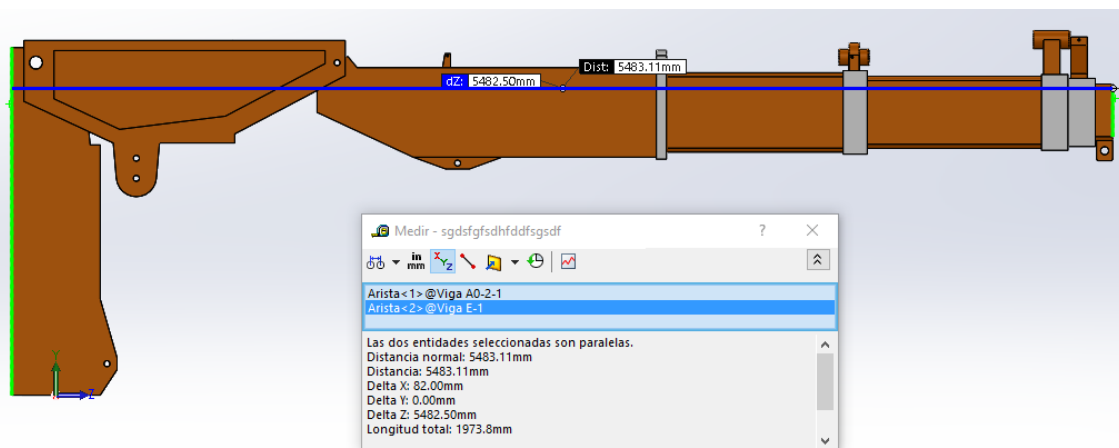


Figura 168: Longitud segunda extensión.

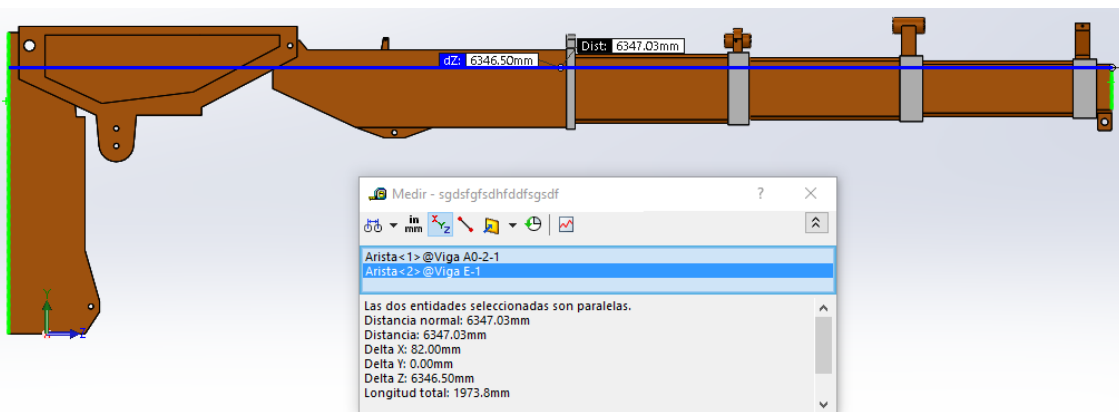


Figura 169: Longitud tercera extensión.

9.3 Peso y centro de gravedad:

A continuación se muestra el peso total del conjunto estructural y los centros de gravedad en la posición máxima y mínima. Para ello se crea un nuevo sistema de coordenadas en la parte inferior de la grúa:

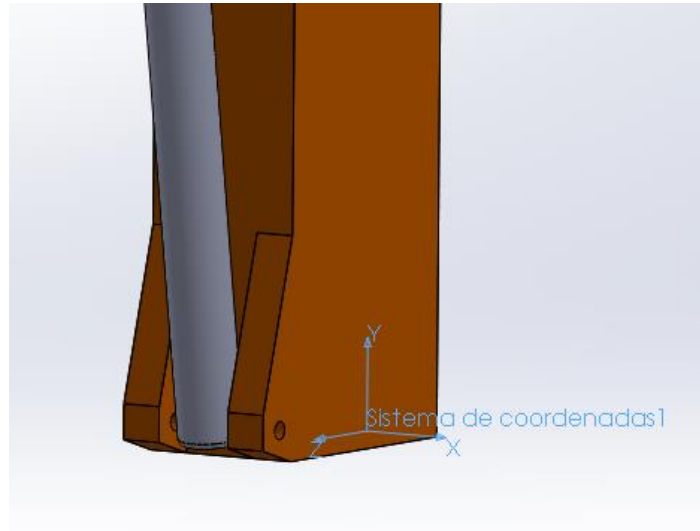


Figura 170: Nuevo sistema de coordenadas.

Propiedades físicas

Ensamblaje completo.SLDASM

Reemplazar las propiedades de masa... Recalcular

Incluir sólidos/componentes ocultos

Crear operación de centro de masa

Mostrar masa de cordón de soldadura

Informar de valores de coordenadas relativos a: Sistema de coordenadas1

Propiedades de masa de Ensamblaje completo
Configuración: Predeterminado
Sistema de coordenadas: Sistema de coordenadas1

Masa = 682939.20 gramos

Volumen = 264529821.22 milímetros cúbicos

Área de superficie = 28261358.12 milímetros cuadrados

Centro de masa: (milímetros)
X = -0.13
Y = 1159.16
Z = 1267.87

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)
Medido desde el centro de masa.
Ix = (0.00, 0.16, 0.98) Iy = 11652330409.97
Iy = (0.00, -0.98, 0.16) Iz = 980288320398.15
Iz = (1.00, 0.00, 0.00) Px = 1080243876161.74

Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)
Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas
Lxx = 1080243857796.28 Lyy = -36604825.66 Lzz = -121723671.1
Lxy = -36604825.66 Lyy = 950803799668.74 Lyz = 1568386458
Lxz = -121723671.91 Lzy = 156838645808.80 Lzz = 1460078695

Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)
Medido desde el sistema de coordenadas de salida.
lxx = 3095703239758.82 lyy = -140109561.92 lzz = -234935129.1
lxy = -140109561.92 lyy = 204862520254.05 lyz = 1160533127.4
lzx = -234935129.64 lzy = 1160533127450.85 lzz = 1063645854.4

Ayuda Imprimir... Copiar al portapapeles

Figura 171: Peso de la grúa y centro de gravedad en posición de mínima extensión.

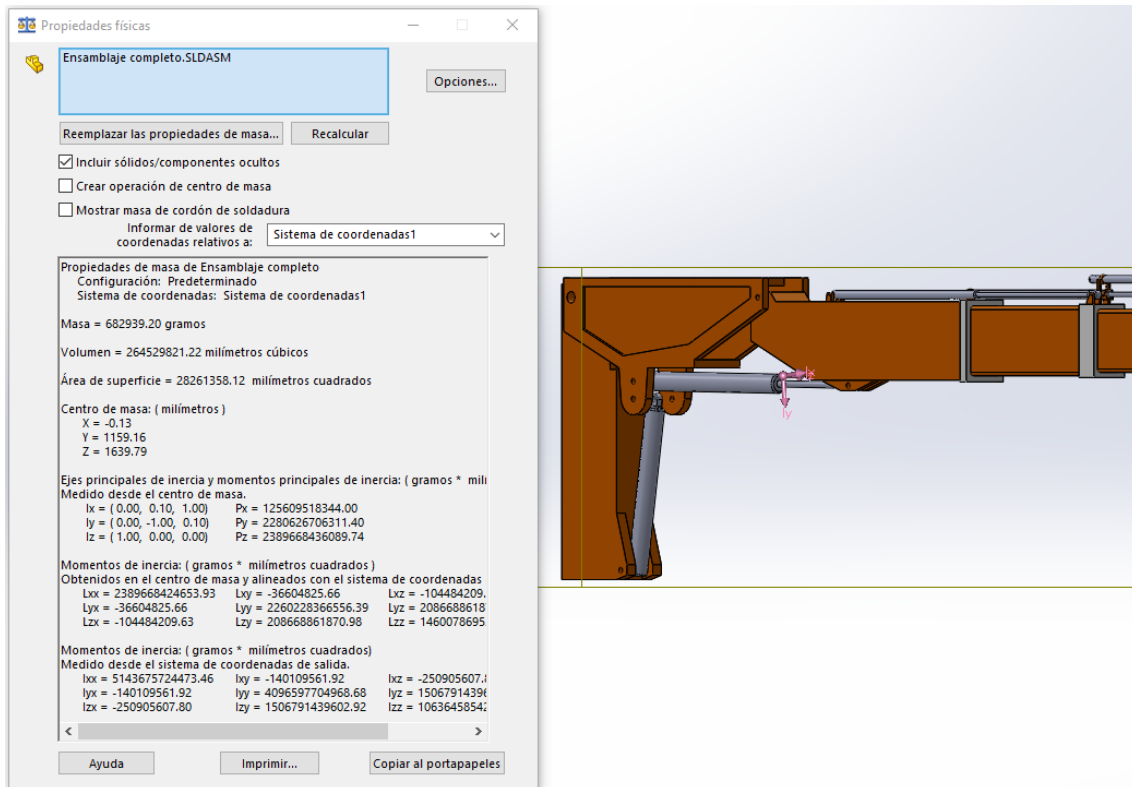


Figura 172: Centro de gravedad en posición de máxima extensión.

10- Conclusiones.

Mediante el diseño mecánico y por simulación de elementos finitos, se ha logrado crear una grúa en la que todos sus componentes estructurales cumplen con los límites establecidos por la norma. El próximo paso consistiría en el diseño del circuito hidráulico y eléctrico.

Las medidas finales de la grúa son parecidas a las de las grúas presentes en la industria, si bien el peso final está por encima de dichas grúas. En una siguiente fase de diseño resistente se deberá de revisar todos los componentes para encontrar posibles vías de vaciado, de manera que se reduzca dicho peso. También sería interesante buscar materiales que cumplan con los requerimientos de la norma pero cuya densidad sea menor, como podría ser una aleación de aluminio. En la siguiente figura se muestra el peso que tendría la grúa si estuviese fabricada en dicho material:

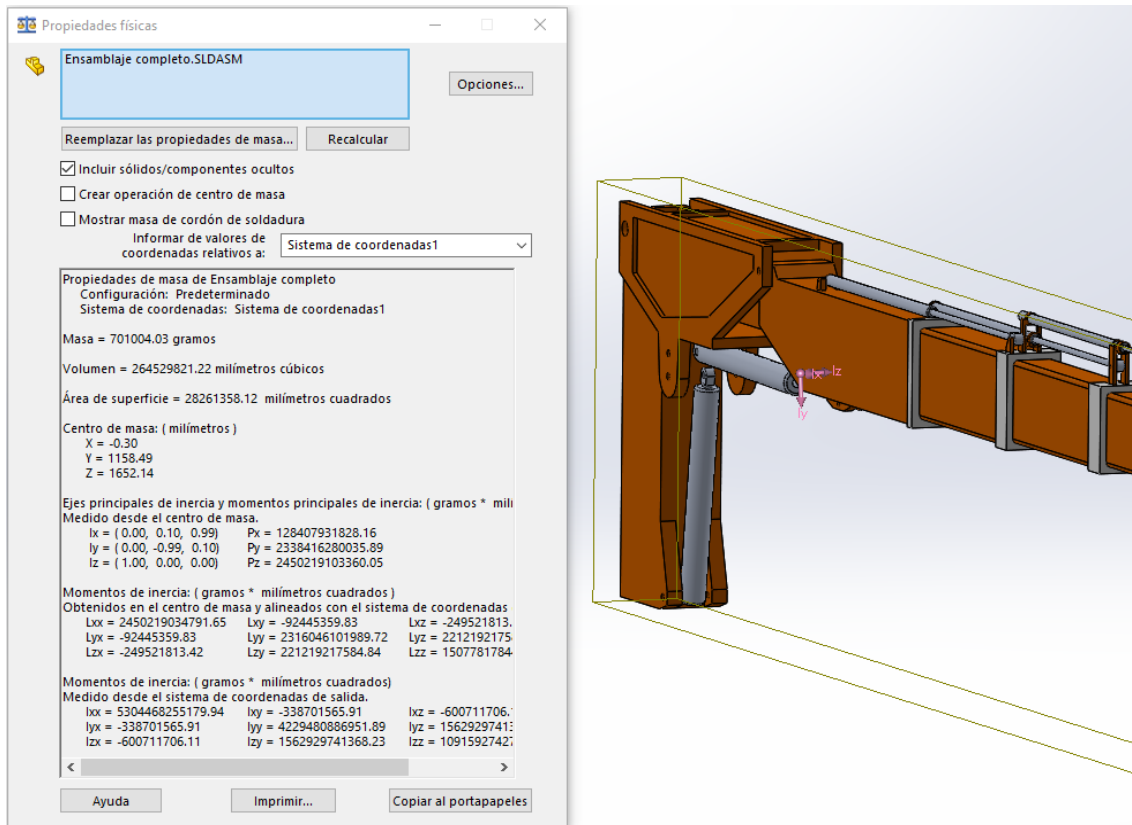


Figura 173: Peso de la grúa con aleación de aluminio.

Como se puede apreciar en la figura, disminuiríamos el peso drásticamente.

Con estas puntualizaciones, terminan los cálculos justificativos de la grúa del presente proyecto.

ANEXO III: Optimización de la grúa.

1- Introducción.

Una vez completado el diseño general de la grúa, se procede a optimizar los parámetros de los componentes buscando las siguientes mejoras:

- Reducción de peso.
- Fabricación de los componentes.
- Homogeneidad de espesores.

Para ello se comprobará componente a componentes los aspectos a mejorar, y por último se realizará un análisis del conjunto para comprobar el ratio de mejora conseguido.

2- Datos de partida.

A continuación se resumen los parámetros a mejorar que se han calculado en el anexo anterior:

- Peso total (acero): 2654 kg
- Peso total (aleación de aluminio): 701 kg.
- Espesores máximos: 50 mm y mínimo 4 mm.
- Radios de plegado no homogéneos en viga E, A2, A1 y A0.

Partimos del ensamblaje mostrado en el anexo anterior. Se realiza un análisis de tensiones y desplazamientos.

Para este análisis, se generan dos piezas que simularán a los cilindros hidráulicos; estas piezas tendrán un diámetro de 36 mm, el mismo diámetro de los vástagos de dichos cilindros. Si bien la simulación no será 100% real debido a la diferencia de tensiones entre estas piezas y los cilindros reales, se acercará bastante.

Procedemos a la simulación de las tensiones primero:

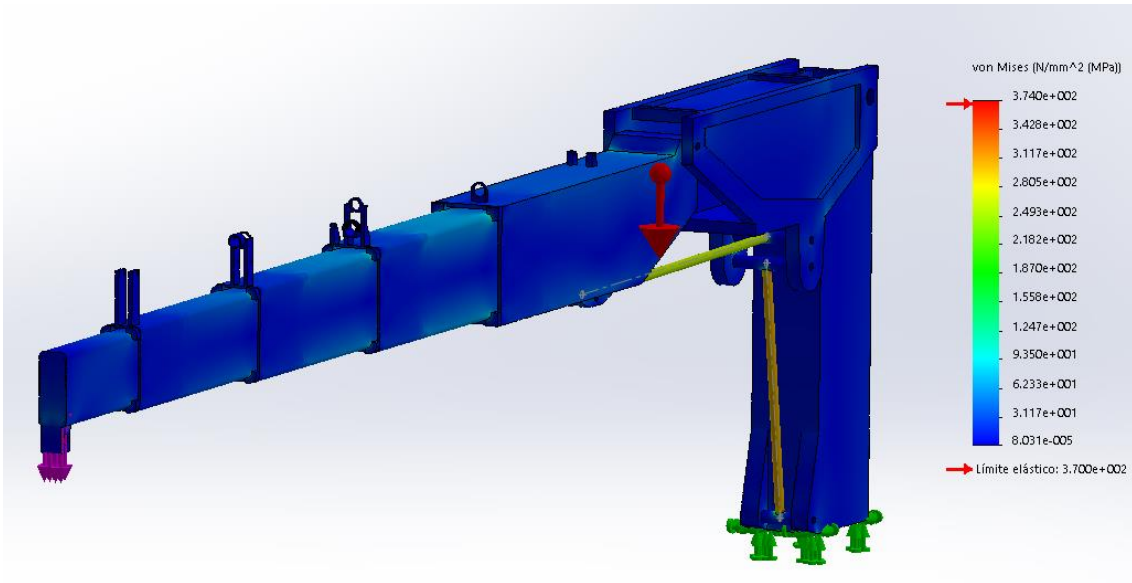


Figura 1: Tensiones simulación completa real (1).

Procedemos a comprobar que las tensiones más altas no pertenecen a las vigas:

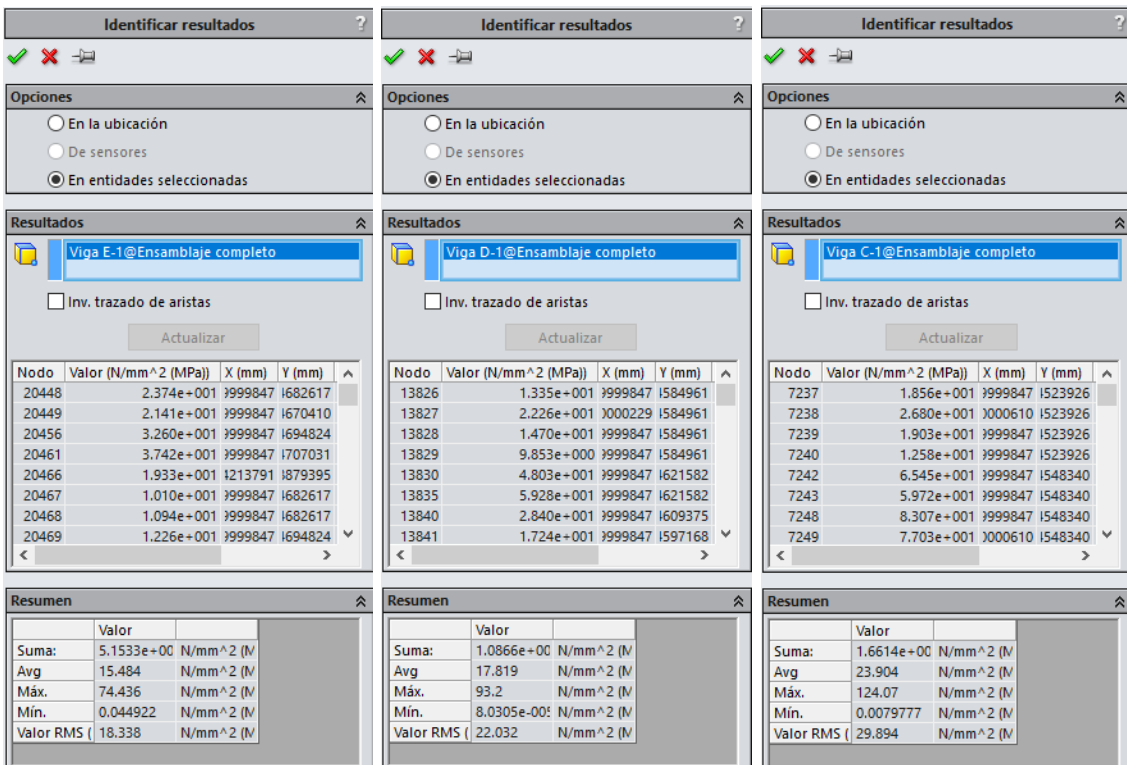


Figura 2: Comprobación vigas E, D, C.

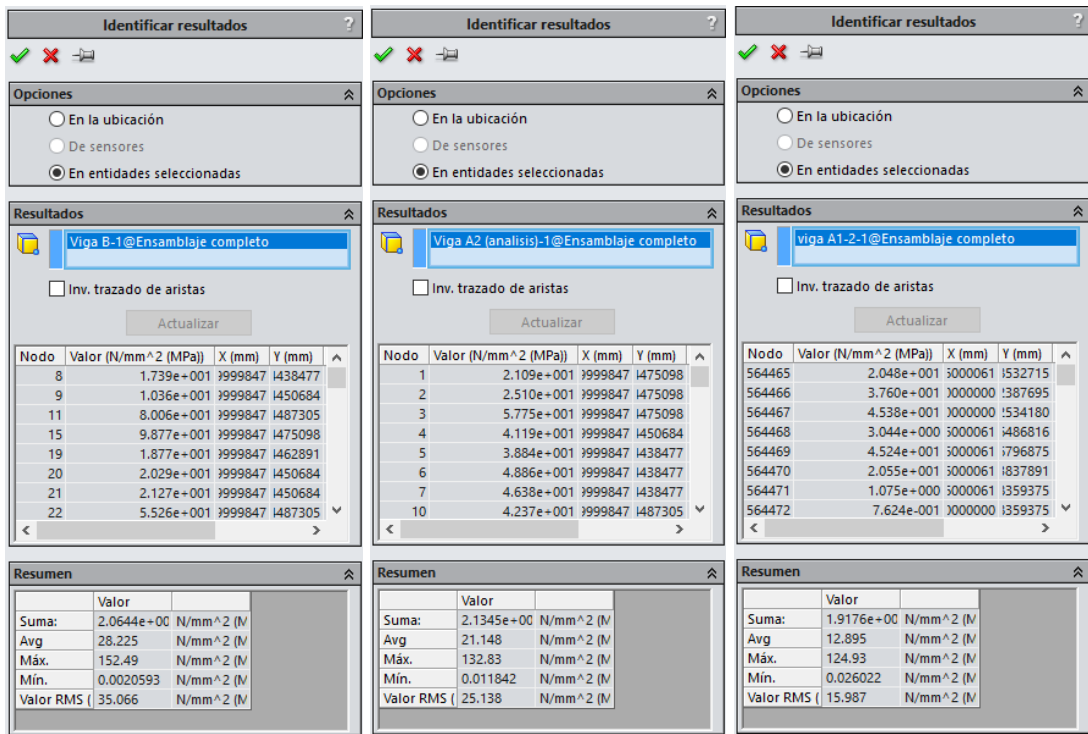


Figura 3: Comprobación vigas B, A2 y A1.

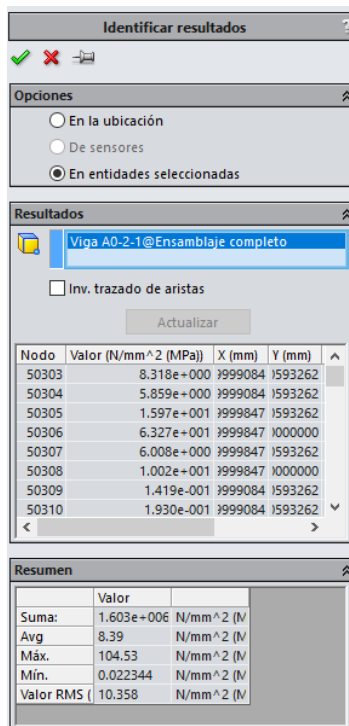


Figura 4: Comprobación viga A0.

Una vez comprobadas que las tensiones máximas pertenecen, en efecto, a las piezas que simulan a los cilindros, pasamos a calcular las flechas máximas. Primero para el acero:

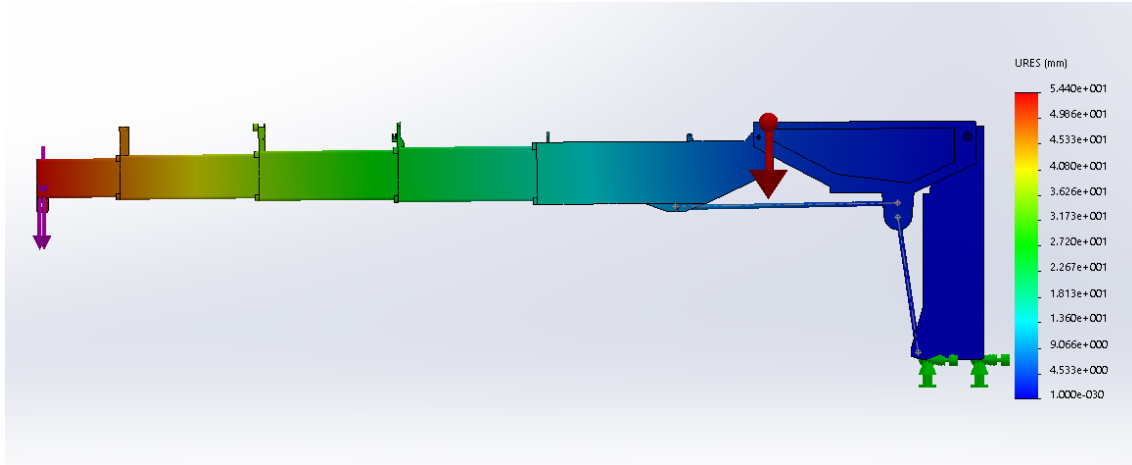


Figura 5: Desplazamiento máximo acero.

Y a continuación para la aleación de aluminio:

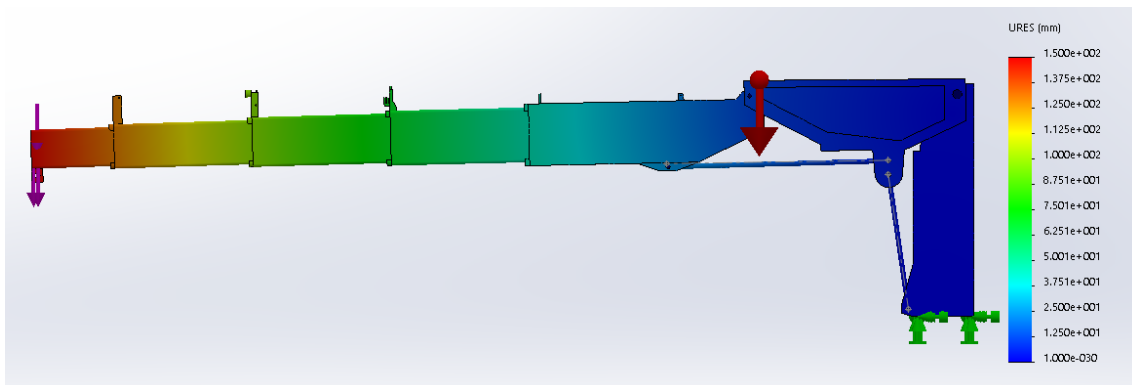


Figura 6: Desplazamiento máximo aluminio.

Se puede observar que, como es lógico, los desplazamientos en la aleación de aluminio son mucho mayores que en el acero.

3- Optimización.

3.1- Optimización viga E.

Partimos del siguiente perfil:

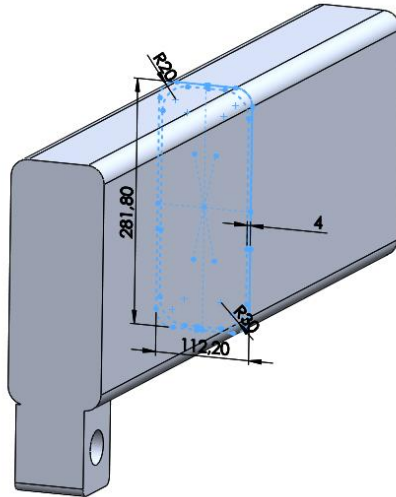


Figura 7: Perfil inicial viga E.

En este perfil hay dos aspectos principales a mejorar:

- Radios interior y exterior diferentes.
- Espesor diferente al de las demás vigas de extensión.

Procedemos a cambiar el espesor a 9 mm e igualar los radios a 20 mm:

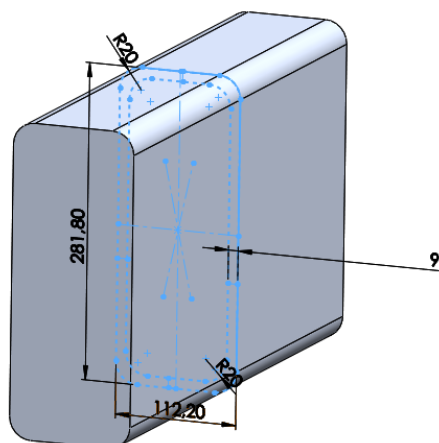


Figura 8: Modificación viga E (1).

Con esta modificación hemos aumentado el peso de la viga de 18 kg a 31 kg, es decir, un 72%. Para reducir este aumento de peso, se siguen las líneas generadas por las tensiones para comprobar las partes de la viga que requieren menor resistencia:

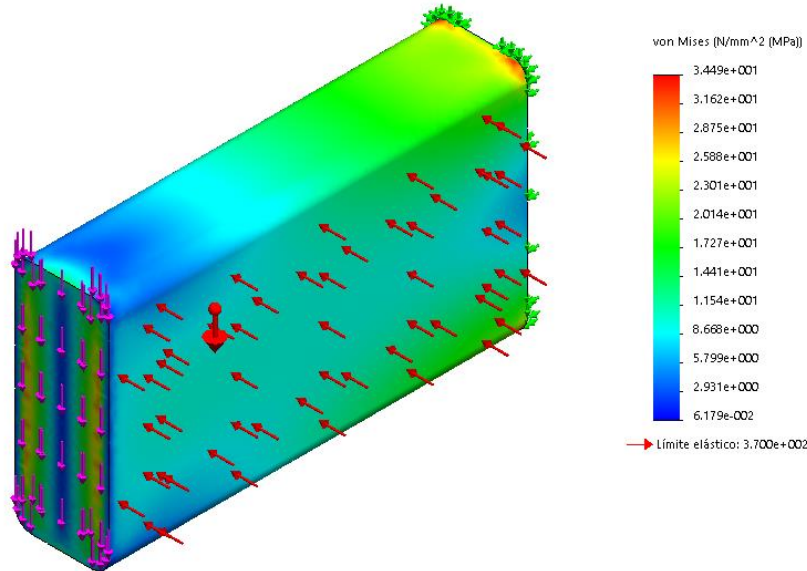


Figura 9: Modificación tensiones en viga E.

Comprobamos que las mayores tensiones se ejercen en la parte del empotramiento de la viga, de manera que se procede a realizar vaciados en las 4 caras. Los vaciados serán de la mitad del espesor para empezar:

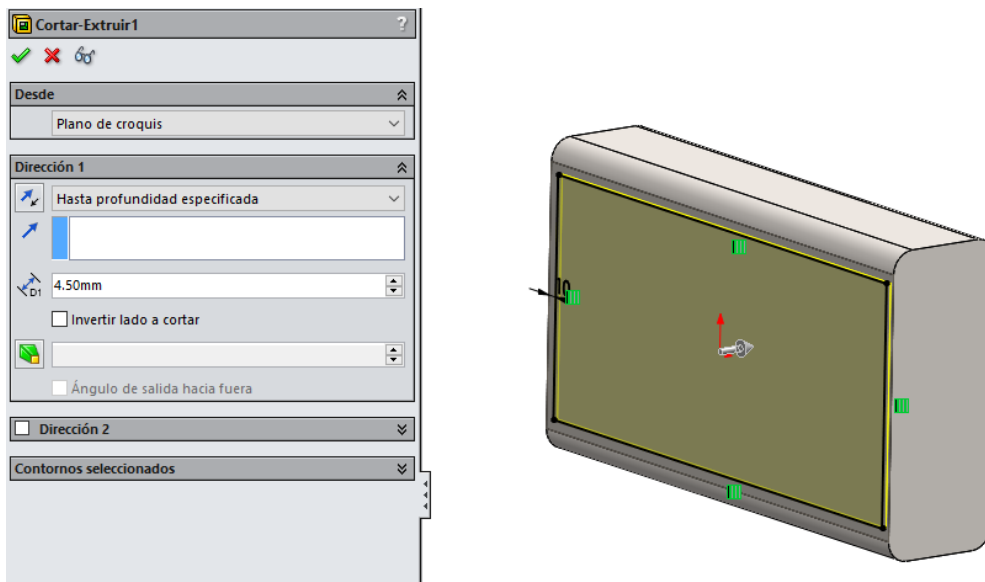


Figura 10: Primer vaciado viga E.

Comprobamos las nuevas tensiones:

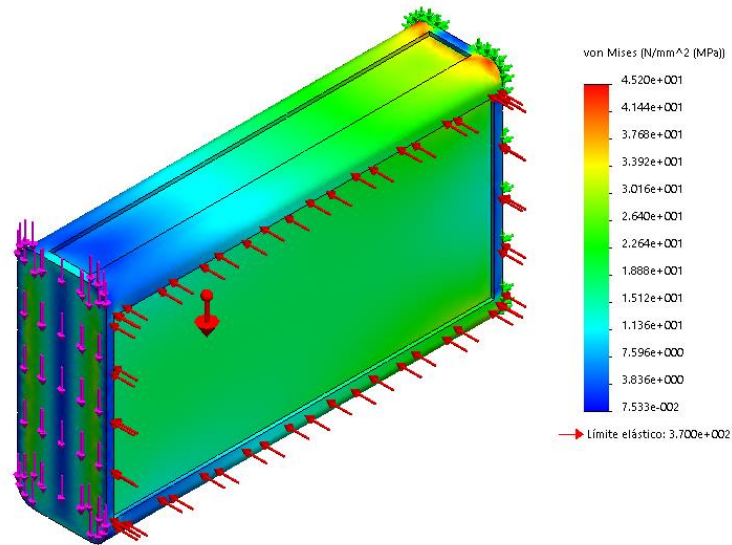


Figura 11: Modificación tensiones viga E (1).

Ampliamos la superficie de vaciado de 10 mm de equidistancia a 5, y la profundidad del vaciado a 7 mm:

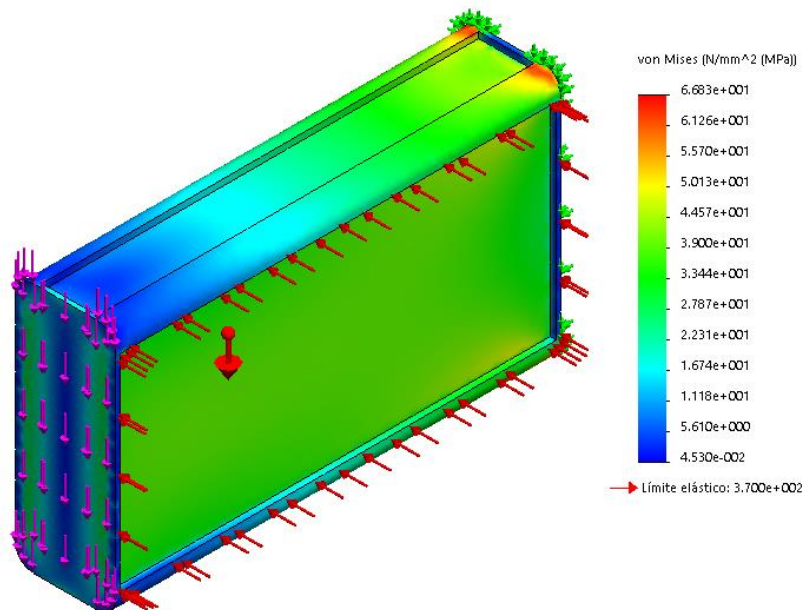


Figura 12: Modificación de tensiones viga E (2).

Maximizamos el vaciado reduciendo la equidistancia a 1 mm y la profundidad a 8 mm:

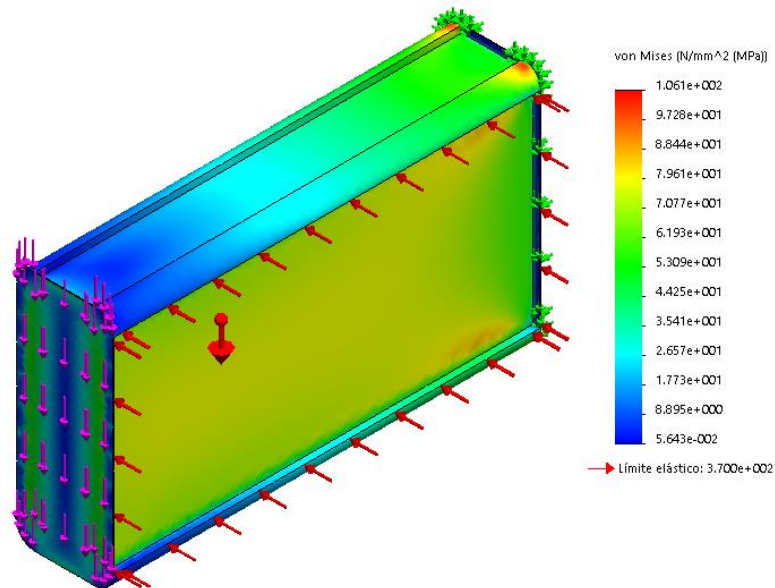


Figura 13: Modificación de tensiones viga E (3).

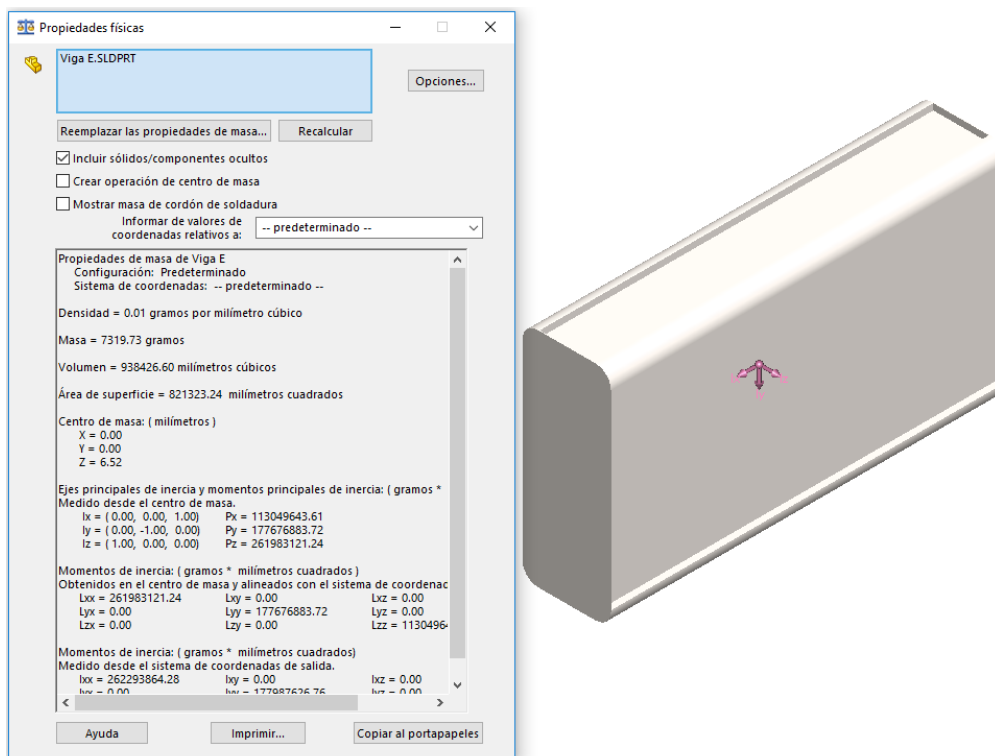


Figura 14: Modificación de peso viga E.

Comprobamos que, si bien no hemos logrado ajustar del todo las tensiones, hemos logrado reducir el peso de 18 kg a 7,3 kg, que equivale a una reducción del 59,44%. Si bien estos datos son para un análisis con una longitud de 500 mm, son extrapolables a la longitud total de la viga final.

3.2- Optimización viga D.

Partimos del siguiente perfil:

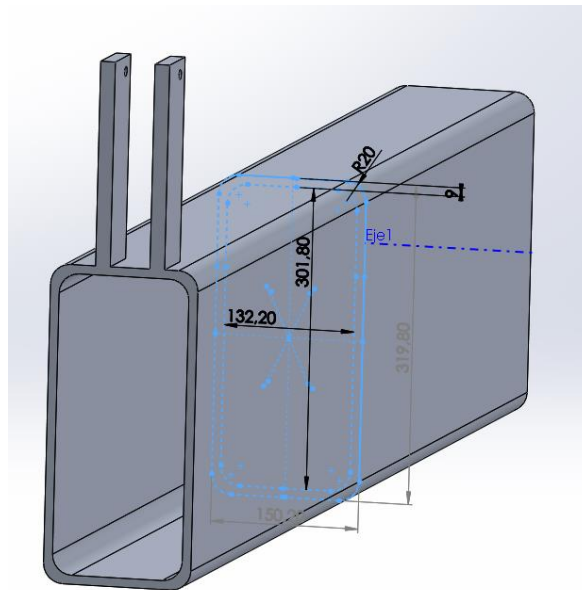


Figura 15: Perfil inicial viga D.

En este perfil la mejora posible es la reducción del peso. Partimos de un peso de análisis (longitud 1000 mm) de 63,46 kg. Analizamos primero las tensiones:

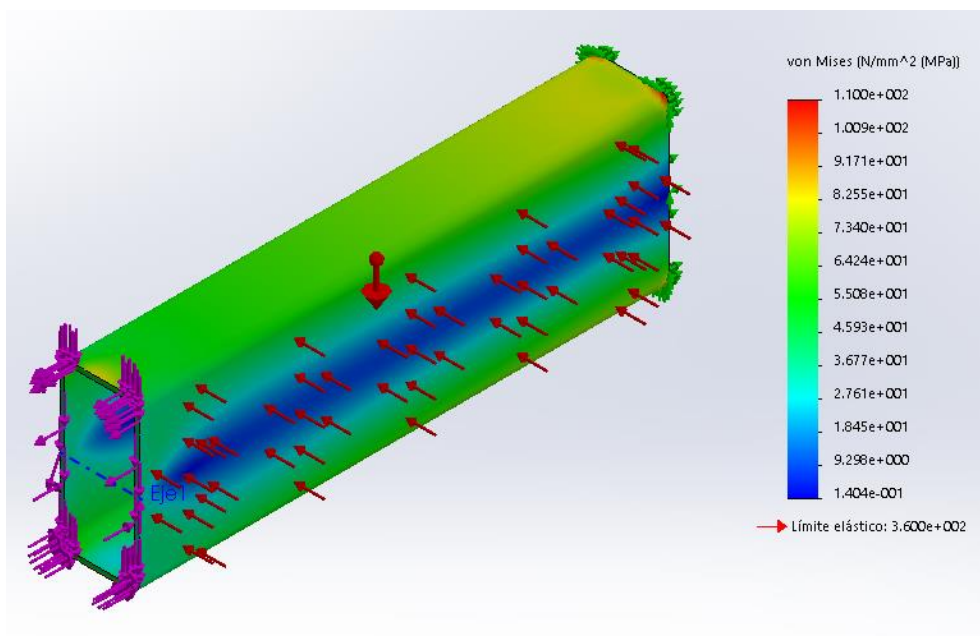


Figura 16: Tensiones iniciales viga D.

Se procede con los vaciados. Se comienza con un vaciado de 4,5 mm de espesor y una equidistancia con los vértices de 10 mm:

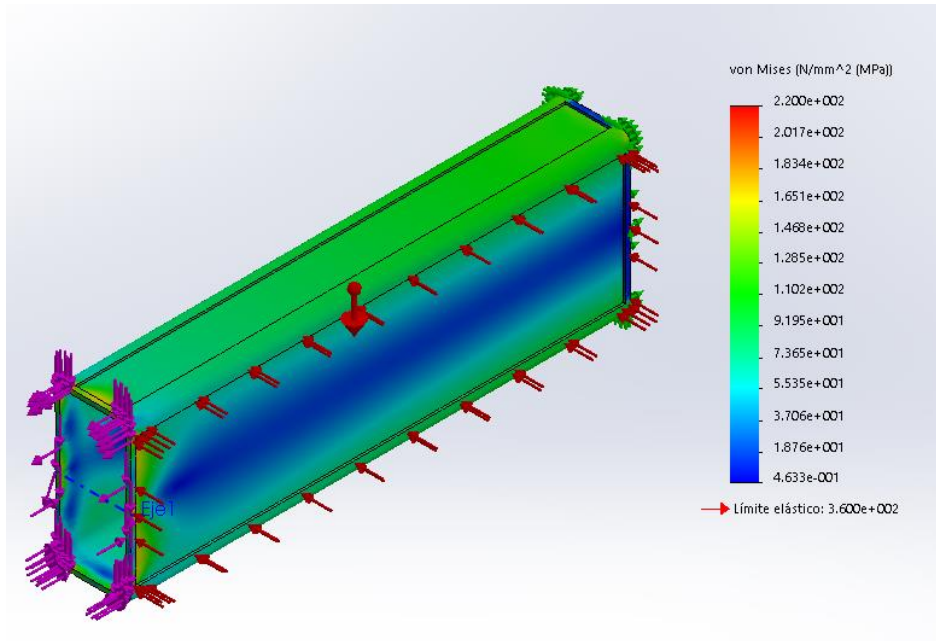


Figura 17: Modificación de tensiones viga D (1).

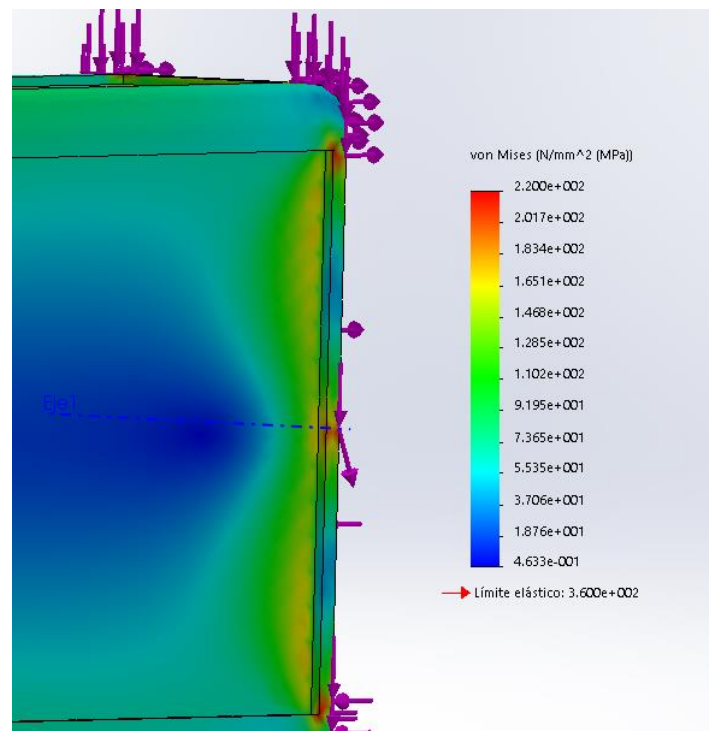


Figura 18: Tensiones máximas en modificación viga D (1).

Comprobamos que las tensiones se concentran en una parte muy específica de la viga, de manera que procedemos a aumentar la equidistancia en esa zona. También comprobamos que en el resto de la viga podemos aumentar el espesor de vaciado, de manera que lo aumentamos a 7 mm:

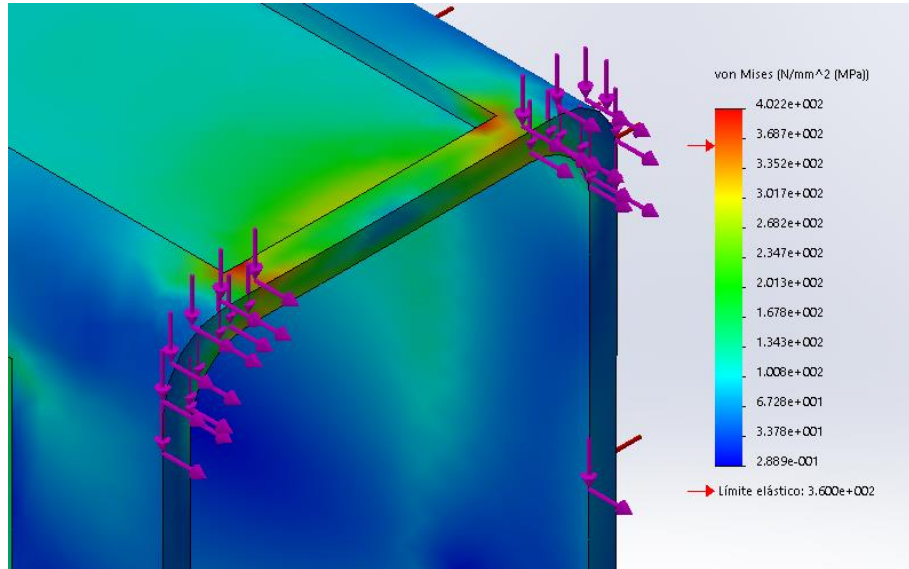


Figura 19: Tensiones máximas en modificación viga D (2).

Se ve como las tensiones se han trasladado a otra zona concreta. Procedemos a homogeneizar esta zona con su homónima lateral y volvemos a simular:

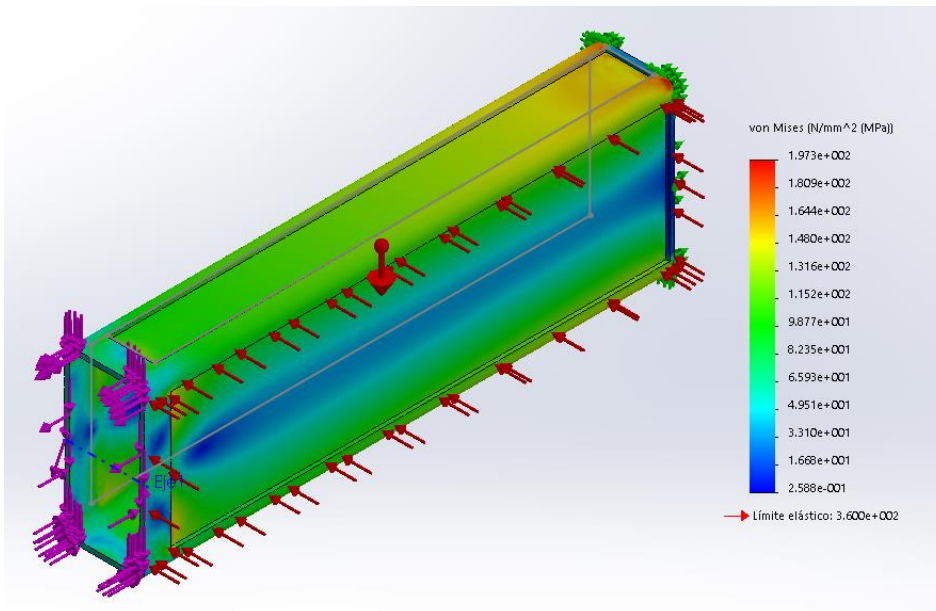


Figura 20: Modificación de tensiones viga D (2).

Vemos que hemos vuelto a estabilizar las tensiones en donde queríamos, sin embargo se comprueba que en la zona central la viga prácticamente no trabaja. Se procede a realizar un vaciado en esa zona para cambiar esto.

Se reduce el espesor de vaciado a 4,5 mm, se crea el vaciado en la zona central, y se vuelve a simular:

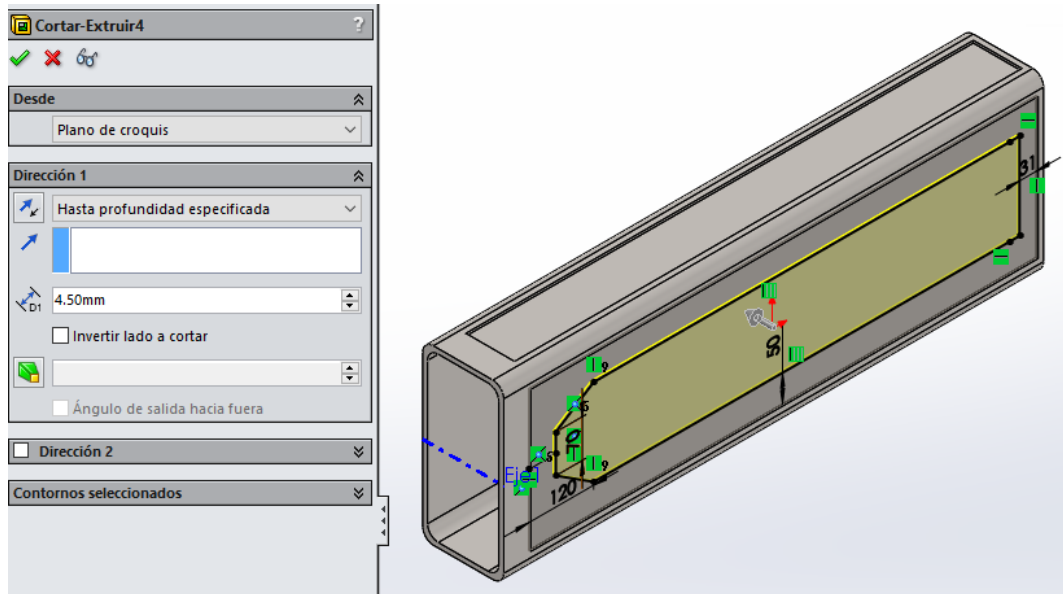


Figura 21: Vaciado central viga D.

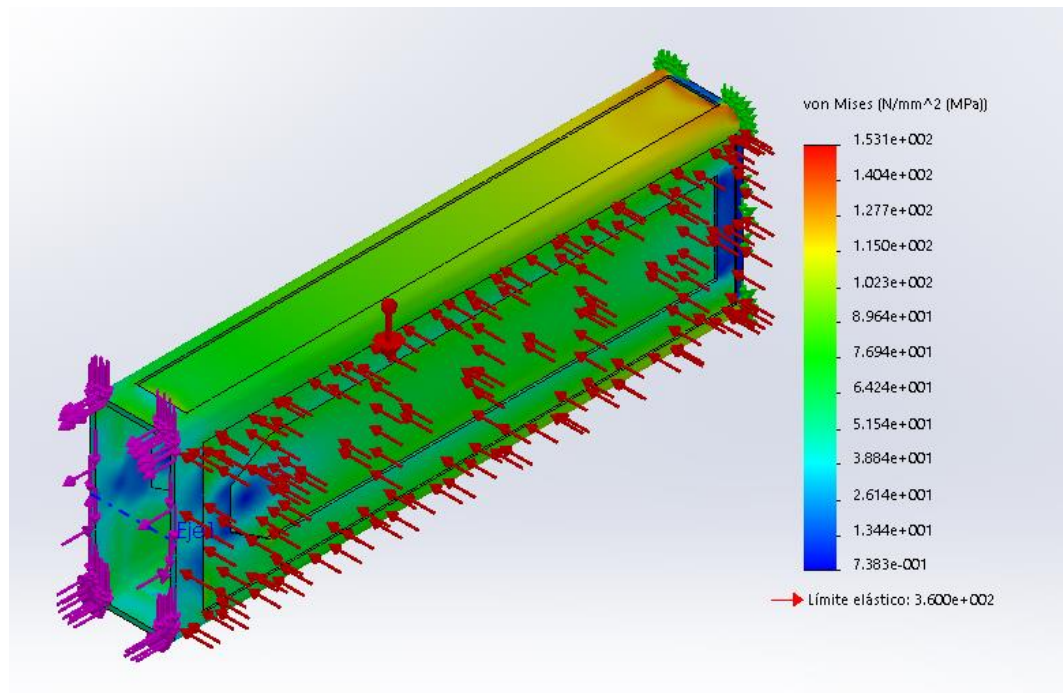


Figura 22: Modificación de tensiones viga D (3).

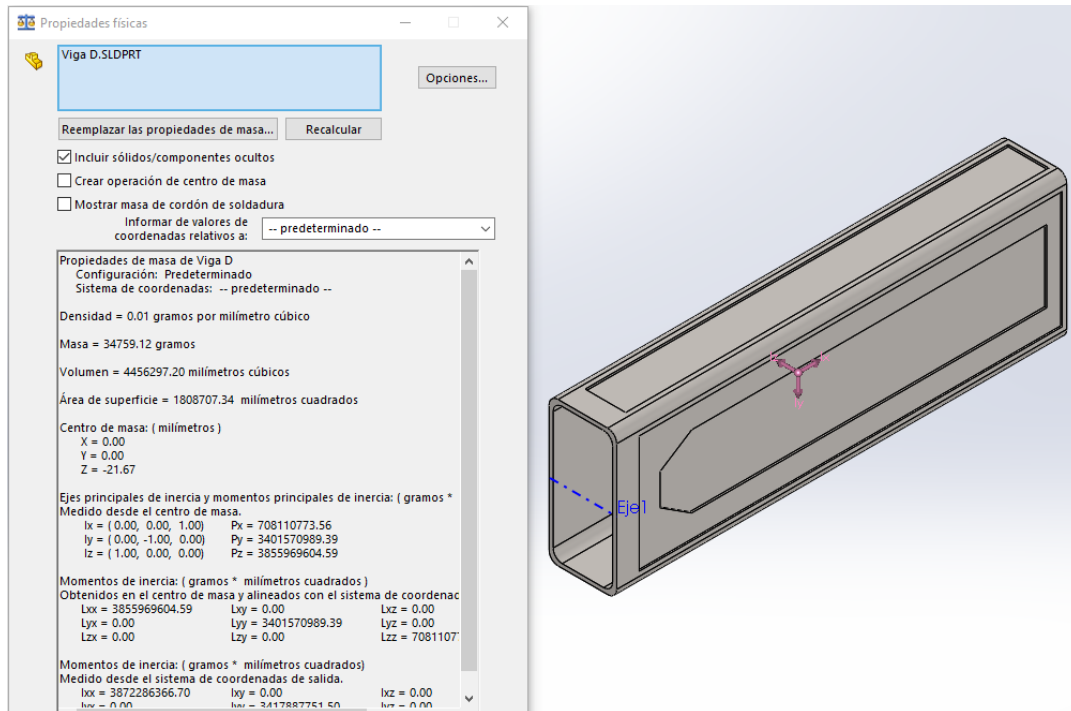


Figura 23: Modificación de peso viga D.

Hemos logrado ajustar las tensiones, lograr que toda la viga trabaje y hemos reducido el peso de la viga de los 63,46 kg a 34,76 kg, lo que equivale a una reducción de peso del 45,22%.

3.3- Optimización viga C.

Partimos del siguiente perfil:

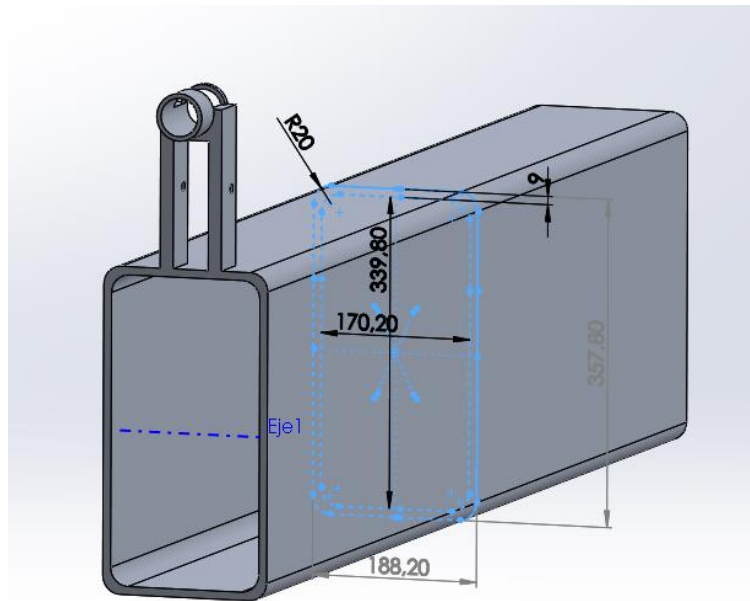


Figura 24: Perfil inicial viga C.

En este perfil la mejora posible es la reducción del peso. Partimos de un peso de análisis (longitud 1000 mm) de 74,13 kg. Analizamos primero las tensiones:

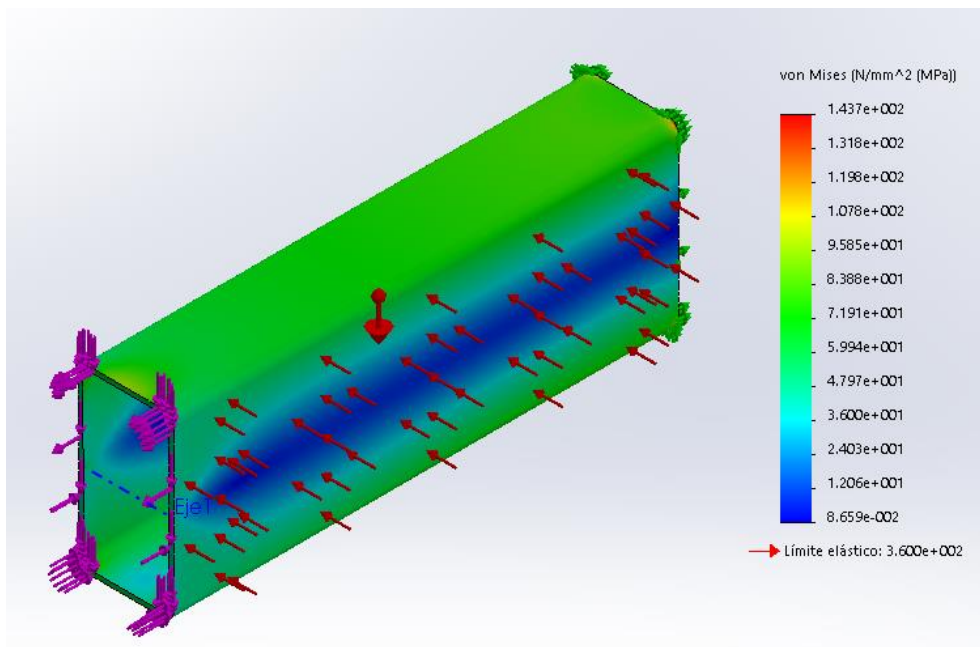


Figura 25: Tensiones iniciales viga C.

Procedemos a un primer vaciado con equidistancia de 10 mm y profundidad 4,5 mm:

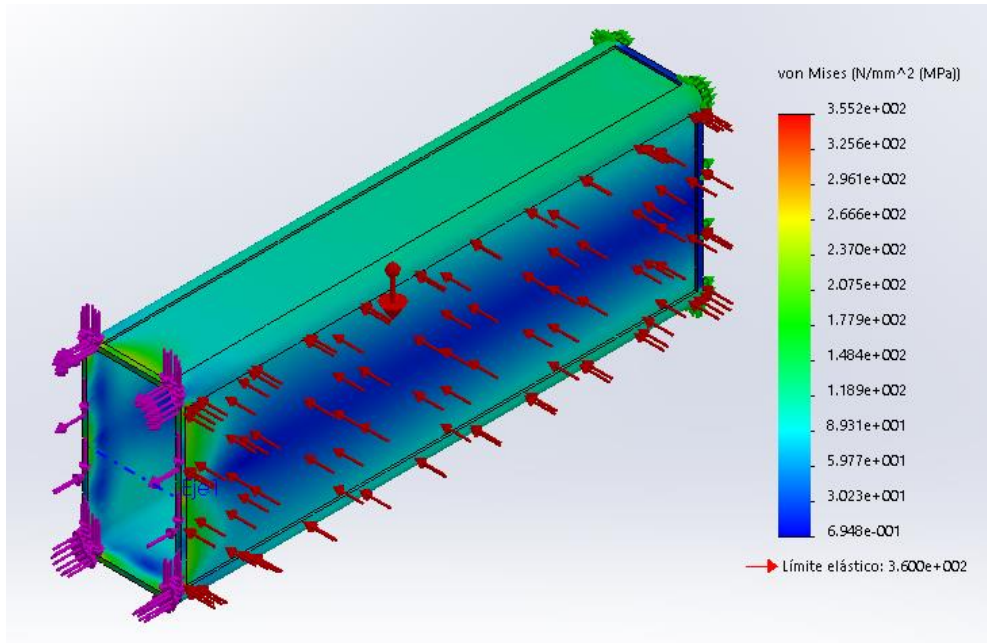


Figura 26: Modificación de tensiones viga C (1).

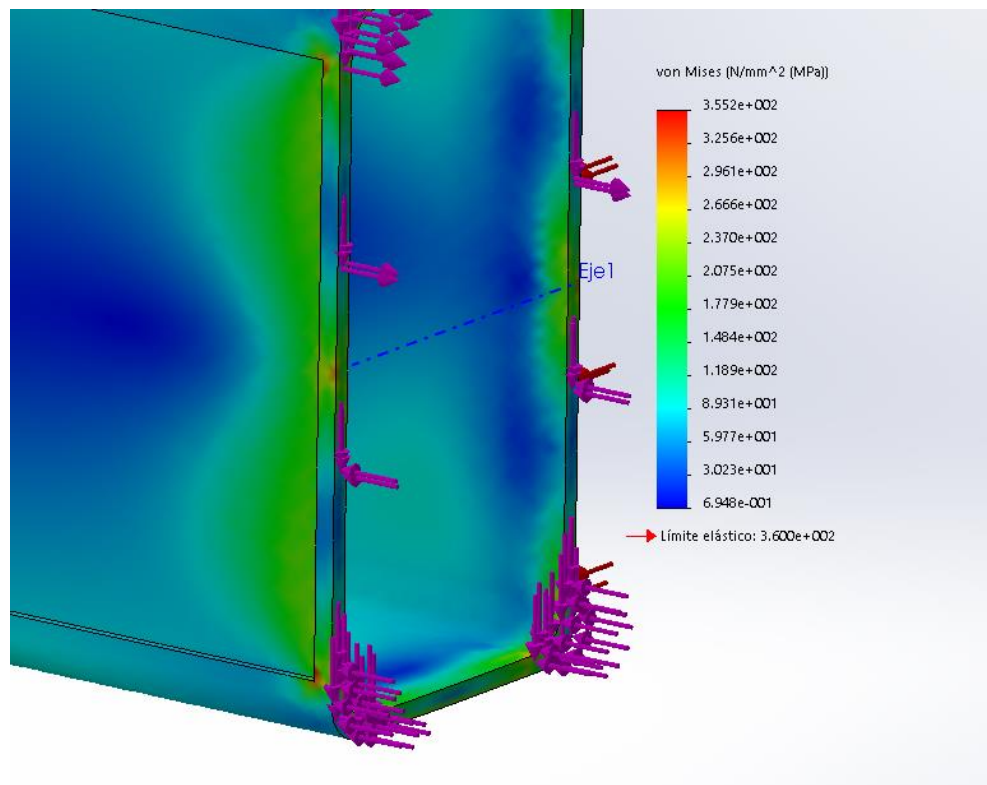


Figura 27: Tensiones máximas en modificación viga C (2).

Reforzamos la zona de las tensiones máximas y volvemos a analizar:

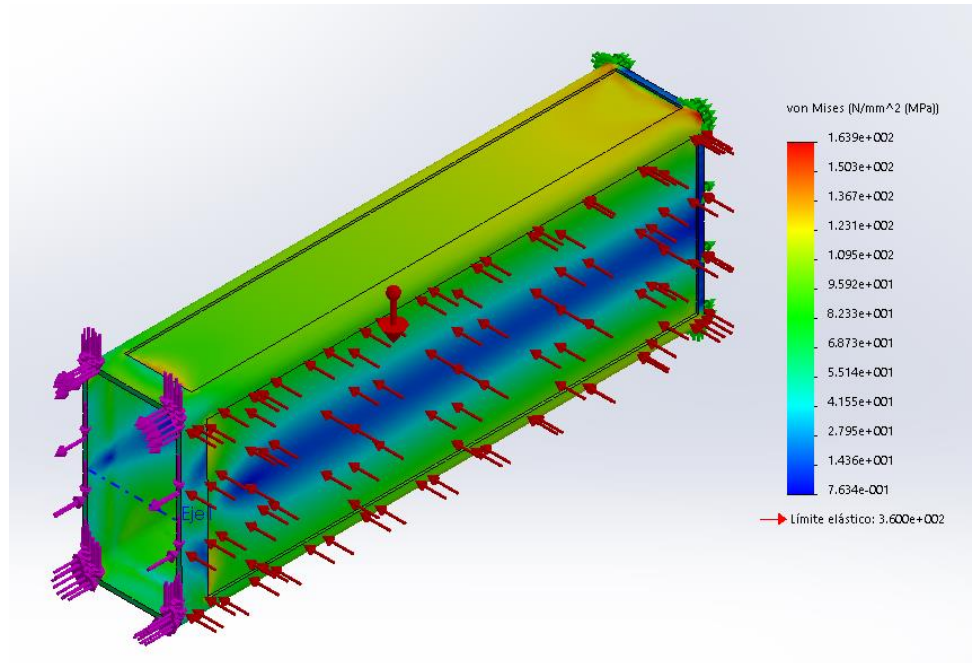


Figura 28: Modificación de tensiones viga C (2).

Vemos que no es suficiente con el refuerzo de manera que hay que disminuir el espesor de vaciado. Sin embargo comprobamos que la zona central que prácticamente no trabaja, de manera que se procede a realizar un vaciado siguiendo el mapa de tensiones. Por tanto, se disminuye la profundidad de vaciado general a 3,5 mm y se crea el vaciado en la parte central de 4,5 mm:

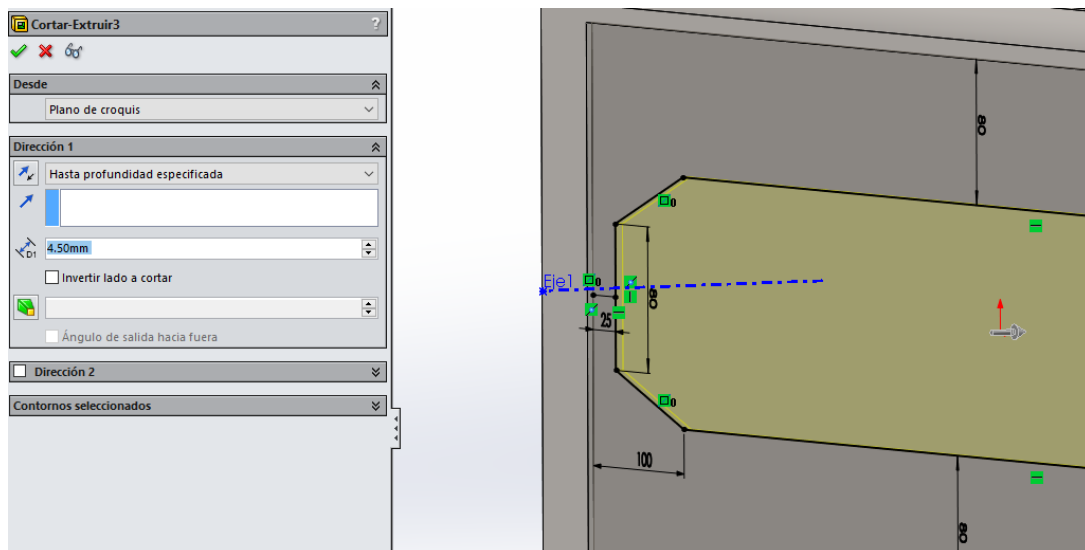


Figura 29: Vaciado interior viga C.

Comprobamos las tensiones:

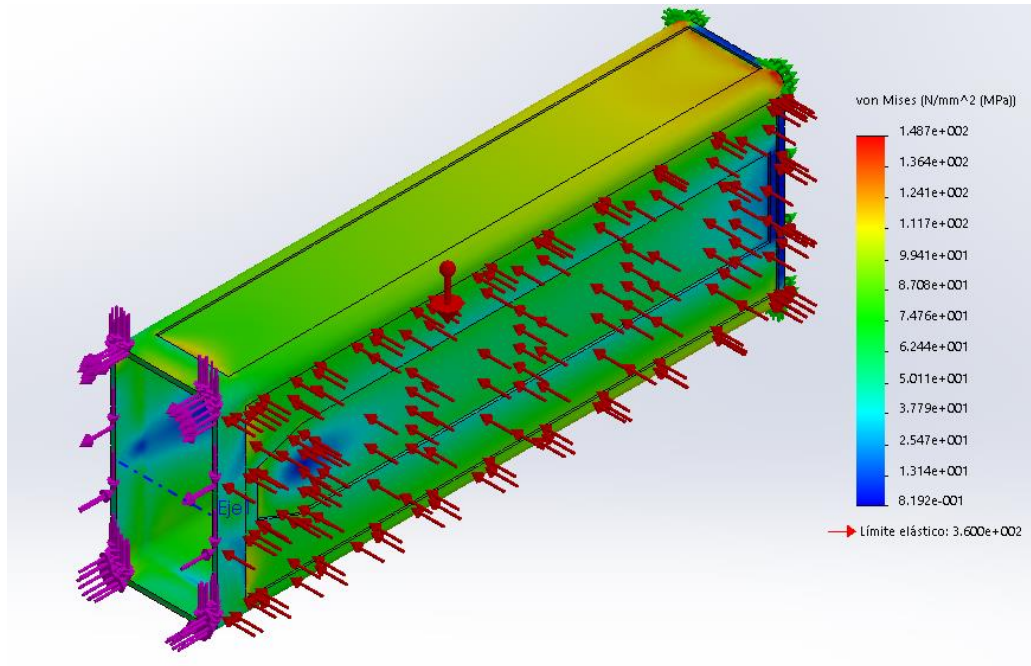


Figura 30: Modificación de tensiones viga C (3).

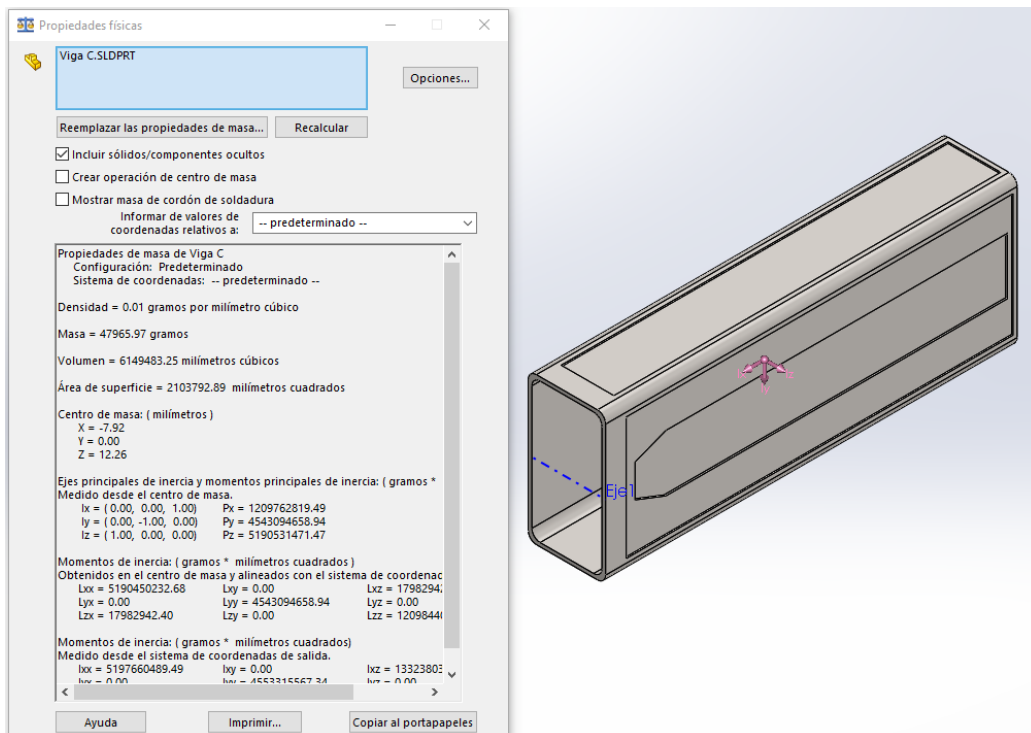


Figura 31: Modificación de peso viga C.

Hemos logrado que prácticamente toda la viga trabaje y hemos reducido el peso de 74,13 kg a 47,96 kg, una reducción del 35,30%.

3.4- Optimización viga B.

Se parte del siguiente perfil:

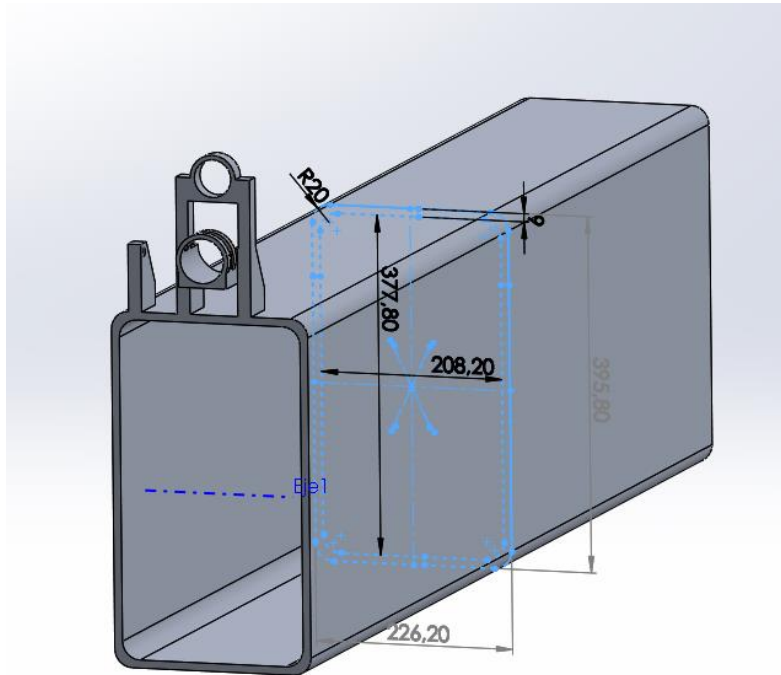


Figura 32: Perfil inicial viga B.

En este perfil la mejora posible es la reducción del peso. Partimos de un peso de análisis (longitud 1000 mm) de 118,72 kg. Analizamos primero las tensiones:

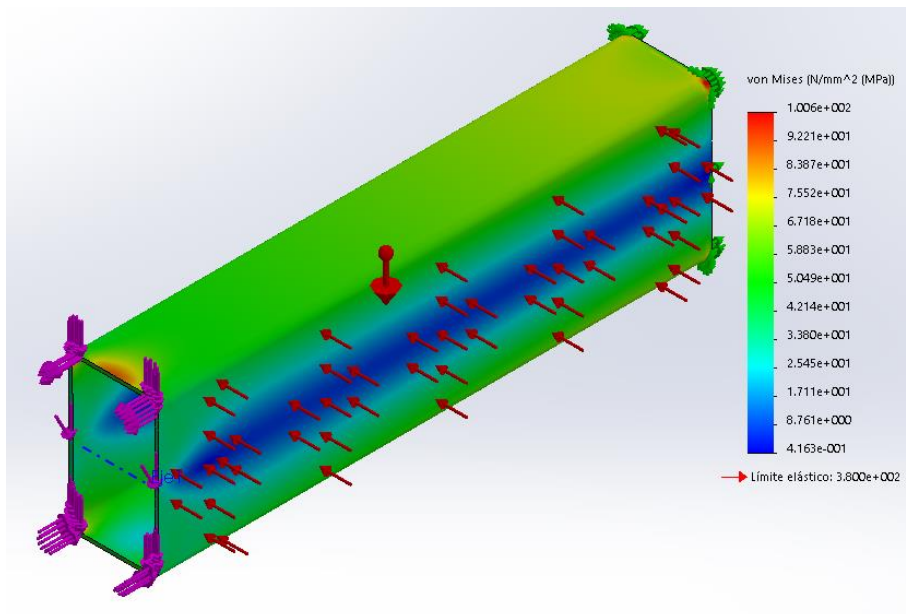


Figura 33: Tensiones iniciales viga B.

Al igual que en las vigas anteriores, procedemos a un vaciado general de 3,5 mm y a uno central de 3,5 mm. Se ha seguido el mismo proceso que en las vigas D y C, y el resultado final es el siguiente:

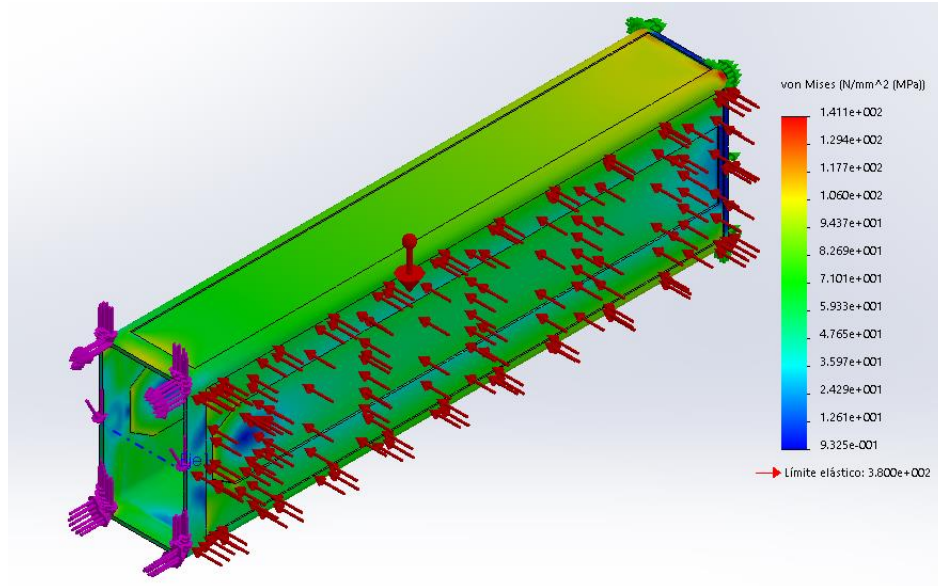


Figura 34: Modificación de tensiones viga B.

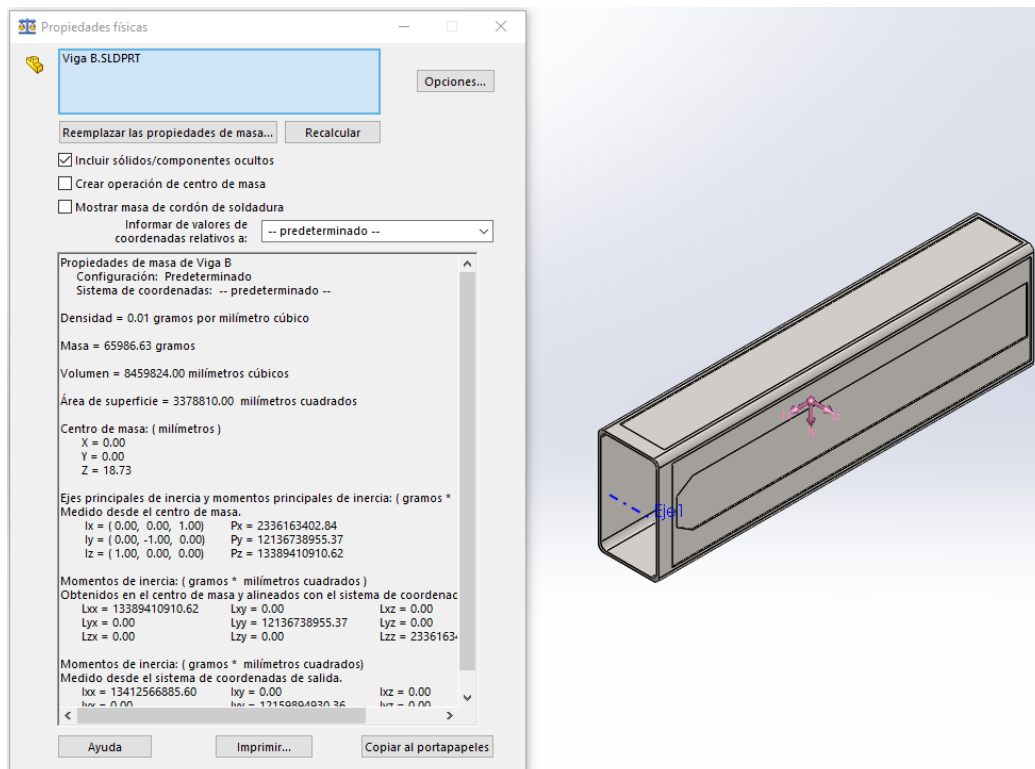


Figura 35: Modificación de peso viga B.

De nuevo hemos logrado que toda la viga trabaje, hemos ajustado las tensiones y hemos reducido el peso de 118,72 kg a 65,86 kg, una reducción del 44,52%.

3.5- Optimización viga A2.

Se parte del siguiente perfil:

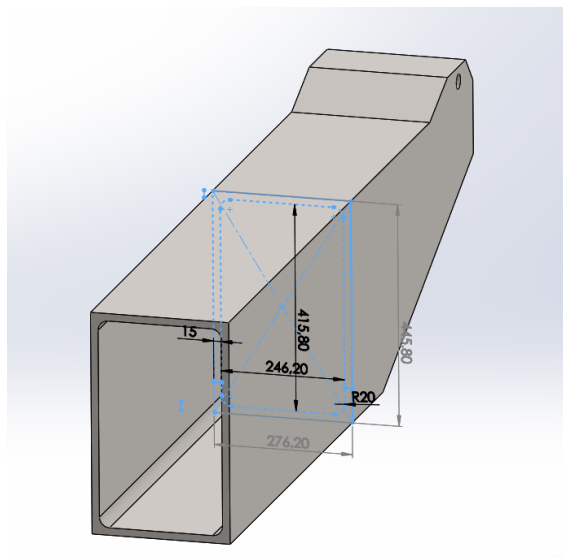


Figura 36: Perfil inicial viga A2.

Se resumen las mejoras posibles en este perfil:

- Mejora de peso propio: Se parte de un peso de 273,30 kg.
- Redondeo parte exterior, para facilitar la fabricación del perfil.
- Homogeneizar espesor a 9 mm, en concordancia con el resto de vigas.

Se parte de las siguientes tensiones:

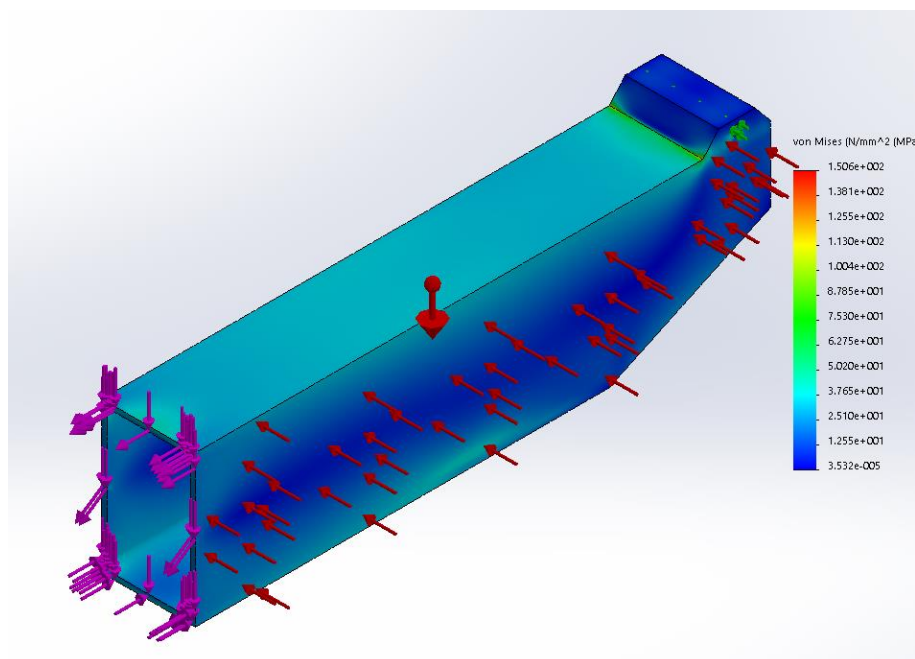


Figura 37: Tensión inicial viga A2.

Se procede a realizar los vaciados inferior, superior y laterales. Para los vaciados inferior y superior se tomó una profundidad de 3,5 y 4,5 mm, respectivamente; para los laterales, sin embargo, esa profundidad fue de 7 mm. También se redujo el espesor general del perfil a 9 mm y se realizó el redondeo de la parte exterior del mismo, de 20 mm:

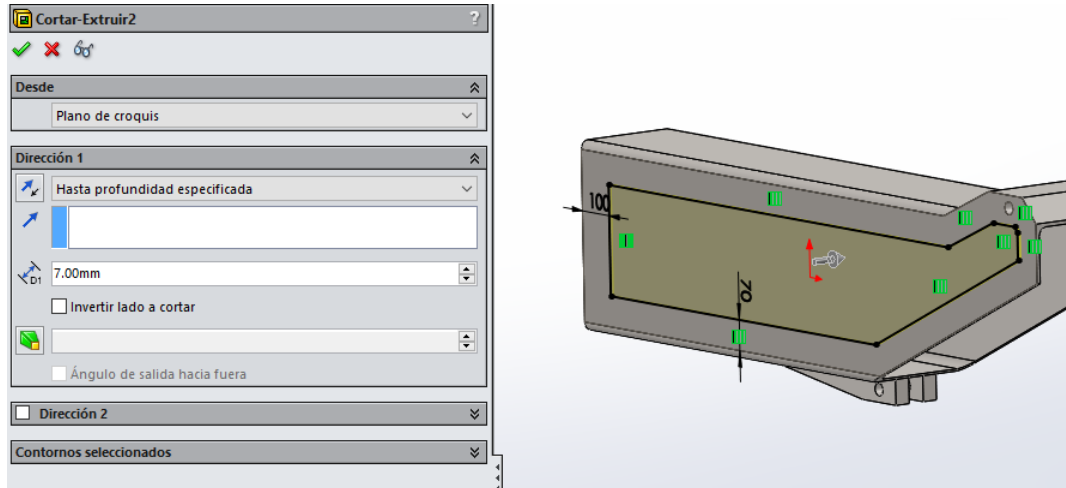


Figura 38: Vaciado lateral viga A2.

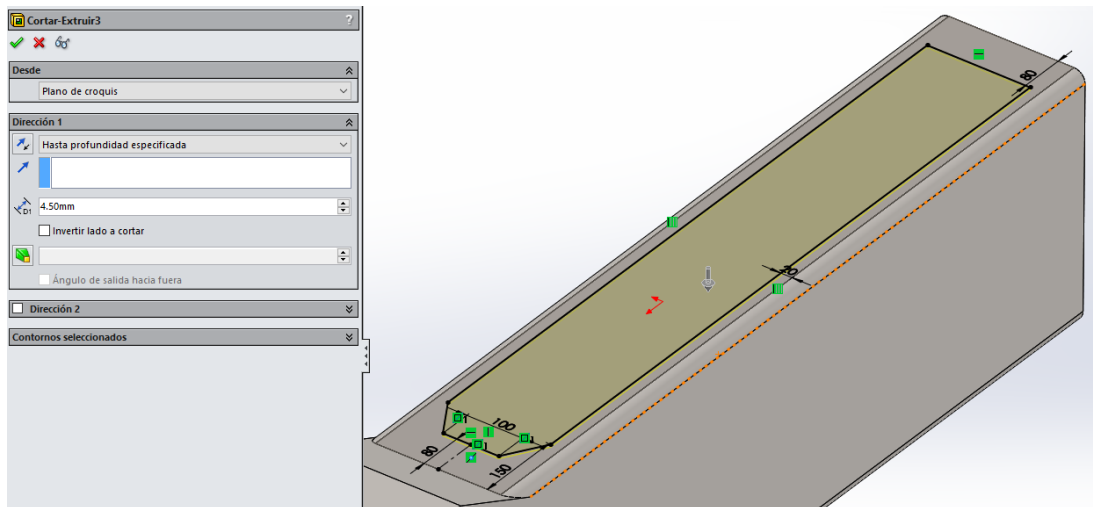


Figura 39: Vaciado superior viga A2.

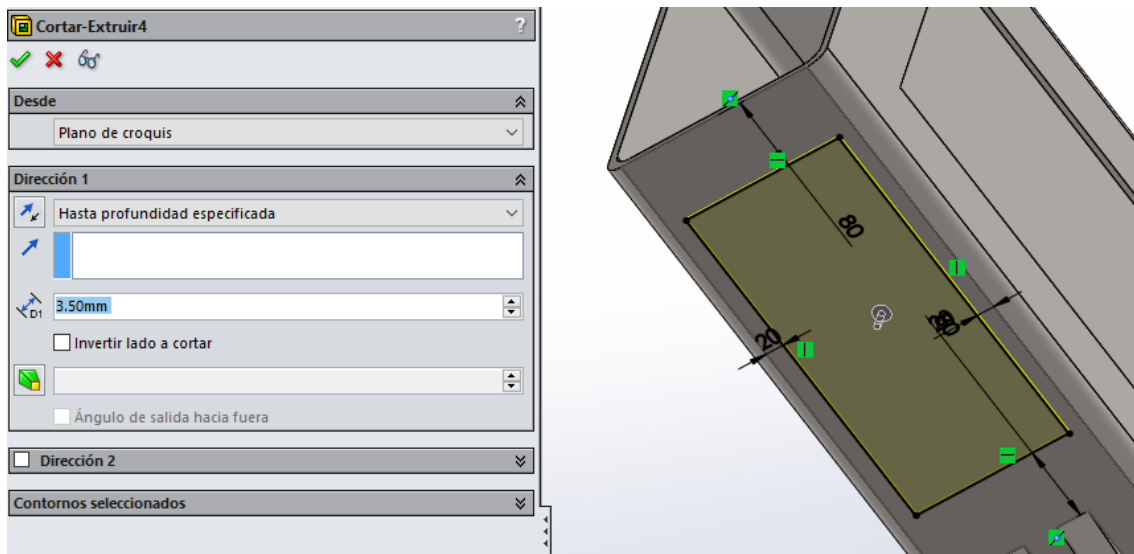


Figura 40: Vaciado inferior viga A2.

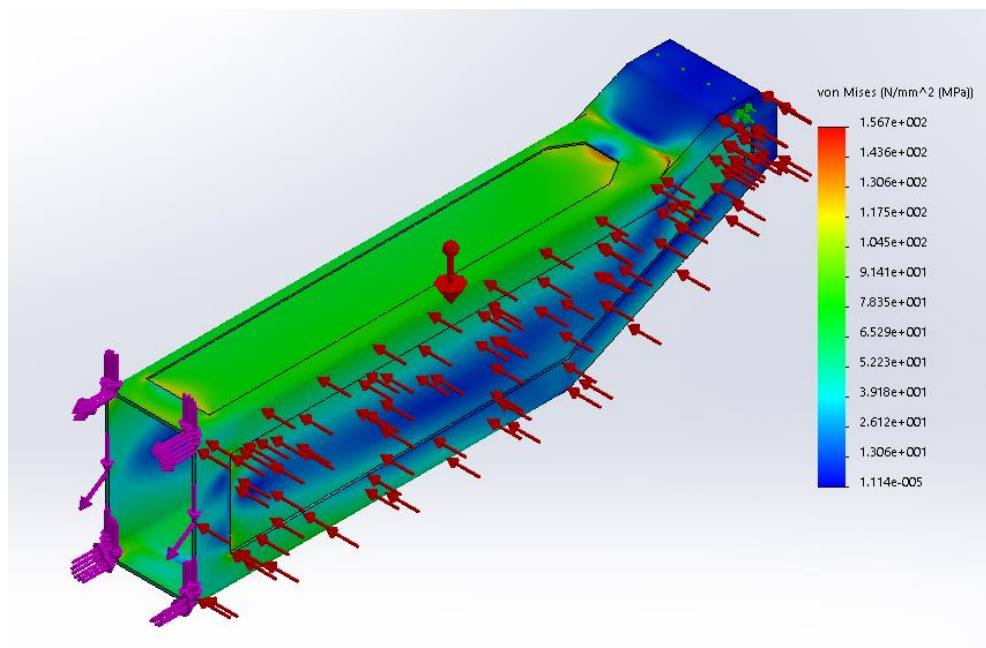


Figura 41: Modificación de tensiones viga A2 (1).

Reducimos el vaciado de la parte superior a 3,5 mm de profundidad.

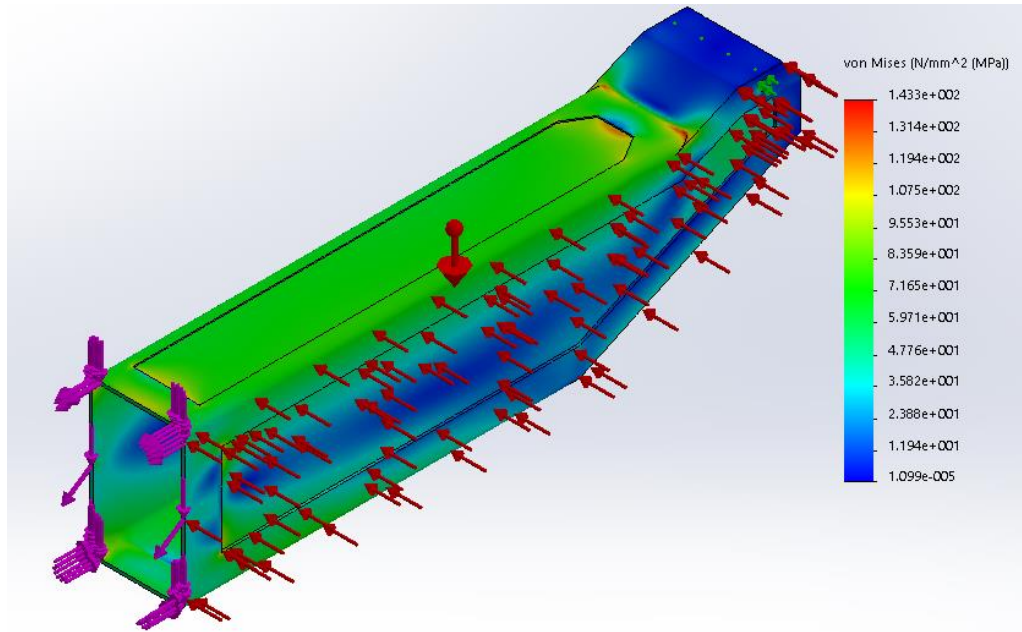


Figura 42: Modificación de tensiones viga A2 (2).

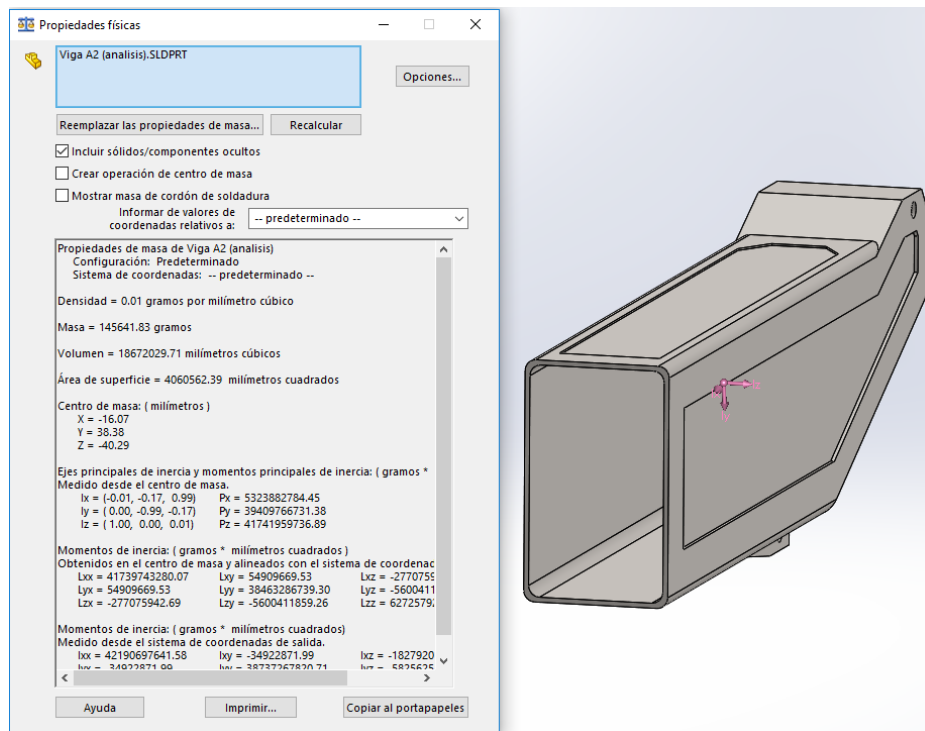


Figura 43: Modificación de peso viga A2.

Hemos logrado que gran parte de la viga trabaje, hemos solucionado los problemas que presentaba la viga, y hemos reducido el peso de 273,30 kg a 186,70 kg, una reducción del 31,68%.

3.6 Optimización viga A1.

Partimos del siguiente perfil:

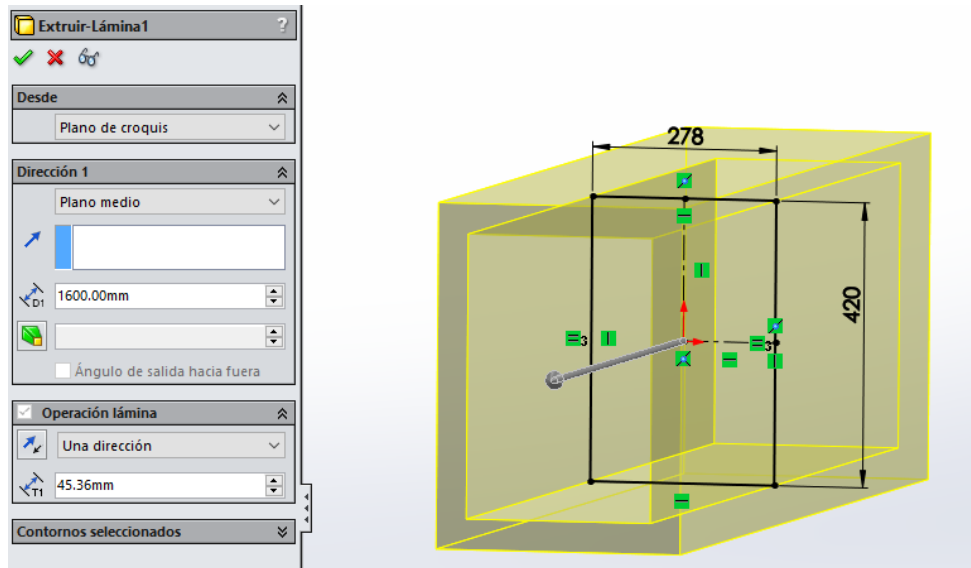


Figura 44: Perfil inicial viga A1.

Se resumen las mejoras posibles en este perfil:

- Mejora de peso propio: Se parte de un peso de 503,43 kg.
- Redondeo parte exterior e interior, para facilitar la fabricación del perfil.
- Homogeneizar espesor a 9 mm, en concordancia con el resto de vigas.

En primer lugar, se redujo el espesor a 9 mm, se redondeó la parte exterior e interior del perfil y se modificó el punto de acción del cilindro 2:

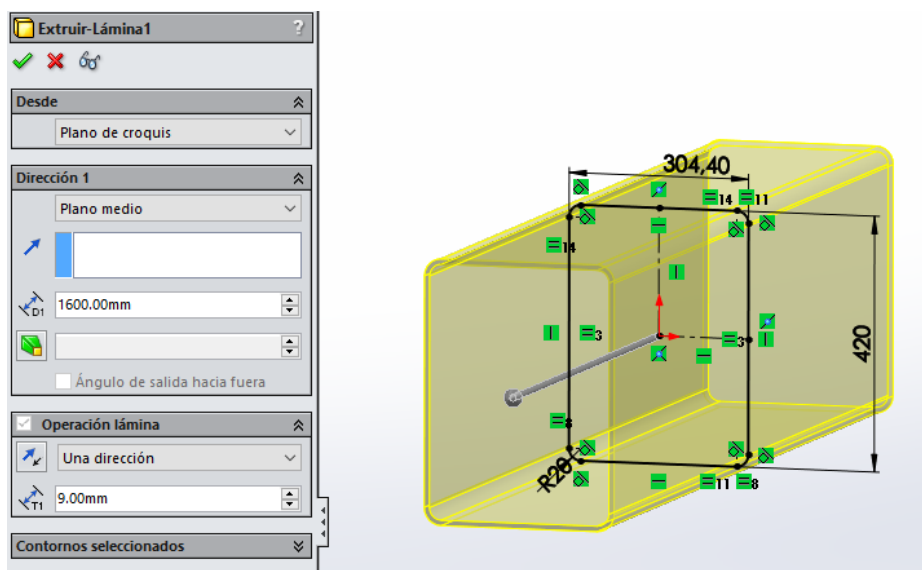


Figura 45: Modificación espesor viga A1.

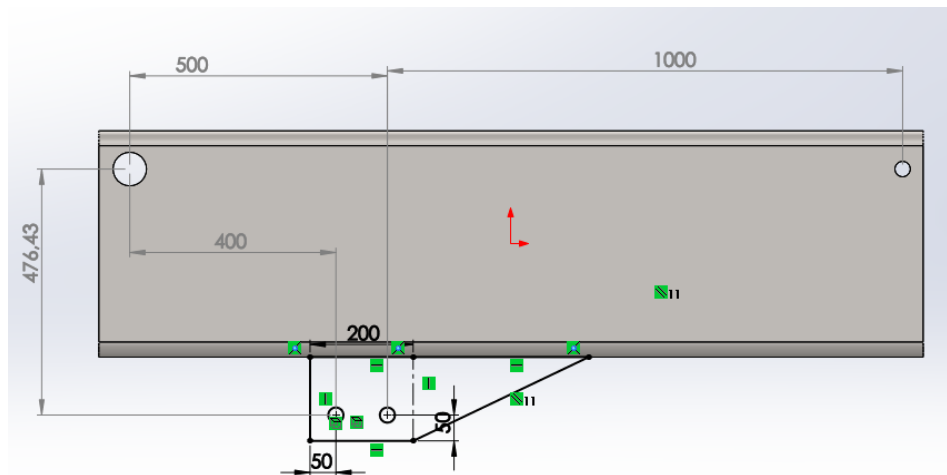


Figura 46: Modificación distancia de acción cilindro 2 viga A1.

Debido a este cambio, se recalculó tanto el ángulo de inclinación del cilindro para una posición de viga horizontal, como la fuerza del mismo:

Omega (°)	Omega (rad)	Fcil (N)	Fcil (ton)	Rx (N)	Ry (N)	Rt (N)
0	0	242540,104	24,2540104	-298501	-223635,13	372981,925
1	0,017452778	237636,658	23,7636658	-294353,79	-218695,49	366704,064
2	0,034905556	232997,112	23,2997112	-290369,75	-213950,21	360678,925
3	0,052358333	228603,556	22,8603556	-286537,16	-209385,31	354888,367
4	0,069811111	224439,727	22,4439727	-282845,33	-204988,06	349315,886
5	0,087263889	220490,824	22,0490824	-279284,52	-200746,86	343946,431
6	0,104716667	216743,354	21,6743354	-275845,81	-196651,11	338766,247
7	0,122169444	213184,988	21,3184988	-272521,05	-192691,06	333762,736
8	0,139622222	209804,445	20,9804445	-269302,72	-188857,79	328924,335
9	0,157075	206591,386	20,6591386	-266183,93	-185143,08	324240,41
10	0,174527778	203536,315	20,3536315	-263158,32	-181539,35	319701,166
11	0,191980556	200630,505	20,0630505	-260220,01	-178039,6	315297,56
12	0,209433333	197865,917	19,7865917	-257363,56	-174637,35	311021,228
13	0,226886111	195235,141	19,5235141	-254583,92	-171326,6	306864,424
14	0,244338889	192731,338	19,2731338	-251876,41	-168101,75	302819,96
15	0,261791667	190348,186	19,0348186	-249236,68	-164957,63	298881,154
16	0,279244444	188079,838	18,8079838	-246660,66	-161889,4	295041,787
17	0,296697222	185920,88	18,592088	-244144,55	-158892,52	291296,059
18	0,31415	183866,293	18,3866293	-241684,81	-155962,79	287638,554
19	0,331602778	181911,422	18,1911422	-239278,11	-153096,23	284064,204
20	0,349055556	180051,948	18,0051948	-236921,35	-150289,15	280568,265
21	0,366508333	178283,859	17,8283859	-234611,58	-147538,04	277146,286
22	0,383961111	176603,425	17,6603425	-232346,04	-144839,62	273794,082
23	0,401413889	175007,182	17,5007182	-230122,15	-142190,79	270507,72
24	0,418866667	173491,906	17,3491906	-227937,44	-139588,64	267283,491
25	0,436319444	172054,602	17,2054602	-225789,59	-137030,39	264117,899
26	0,453772222	170692,481	17,0692481	-223676,39	-134513,41	261007,637
27	0,471225	169402,952	16,9402952	-221595,76	-132035,23	257949,577
28	0,488677778	168183,603	16,8183603	-219545,72	-129593,47	254940,758
29	0,506130556	167032,196	16,7032196	-217524,36	-127185,88	251978,367
30	0,523583333	165946,649	16,5946649	-215529,89	-124810,32	249059,732

Tabla 1: Modificación fuerza e inclinación cilindro 2.

Como se puede observar en la tabla anterior, se modifica el valor de la fuerza de empuje necesaria a 16,94 toneladas; las reacciones en los pasadores se verán modificadas también. A continuación se elige el nuevo diámetro de pistón y vástago y se re-calculan los pasadores:

Área del pistón:

$$A_{pistón} = \frac{169402,952 * 9,81}{200} = 8309,21 \text{ mm}^2.$$

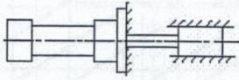
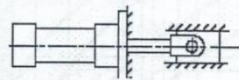
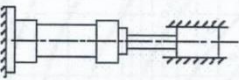
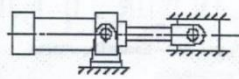
Diámetro del pistón (D = mm)	Area Pistón (mm ²)
25	491
32	804
40	1257
50	1963
63	3117
80	5027
100	7854
125	12272
160	20106
200	31416

Tabla 2: Diámetros y áreas normalizadas para cilindros hidráulicos.

Comprobamos que estamos entre un diámetro de 100 y 125 mm. Elegimos un diámetro de 125 y recalculamos la presión:

$$p = \frac{F_c * 9,81}{A_{pistón}} = 135.42 \text{ bar}.$$

Antes de calcular la longitud de pandeo, es necesario saber el factor de pandeo para el vástago.

Tipo de fijación cilindro	Esquema de montaje	Factor de pandeo (β)
Unión con vástago rígida y guiado Cilindro fijado rígidamente en parte anterior		0.5
Unión con vástago articulada y guiado Cilindro fijado rígidamente en parte anterior		0.7
Unión con vástago rígida y guiado Cilindro fijado rígidamente en parte posterior		1.0
Unión con vástago articulada y guiado Cilindro fijado mediante articulación en parte anterior		1.0

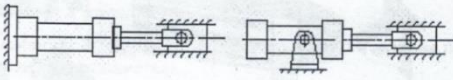
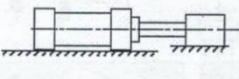
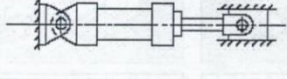
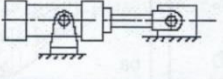
Tipo de fijación cilindro	Esquema de montaje	Factor de pandeo (β)
Unión con vástago articulada y guiado Cilindro fijado mediante articulación en parte intermedia ó rígidamente en parte posterior		1.5
Unión con vástago rígida, pero no guiado (simplemente apoyado en superficie) Cilindro fijado rígidamente		2.0
Unión con vástago articulada y guiado Cilindro fijado mediante articulación en parte posterior		2.0
Unión con vástago articulada pero no guiado (simplemente apoyado en superficie) Cilindro fijado mediante articulación en parte intermedia		3.0

Tabla 3: Factores de pandeo cilindros hidráulicos.

Nuestro caso sigue correspondiendo a un factor de pandeo de 2, ya que los cilindros hidráulicos de posicionamiento están unidos mediante pasadores a las vigas, y la propia estructura los “guiará”.

Será necesario aumentar la longitud del cilindro recogido y de la carrera, además del ángulo de inclinación máxima, al verse modificada la distancia de acción y la inclinación. Se comprueban las dimensiones del vástago en el catálogo del proveedor:

707/400			400	670																4,52	54,6
707/5			500	770																5,65	60,0
707/700			700	970																7,91	73,2
707/800	70	120	800	1070	40	40,5	80	140	55	80	65	82	17	1/2						9,05	80,0
707/10			1000	1270																11,31	90,0

Tabla 4: Diámetros de vástago y pistón CICROSA.

Tomamos la referencia de los diámetros del proveedor. Re-calculamos la presión del cilindro:

$$p = \frac{F_c * 9,81}{\pi * \left(\frac{D_{pistón}}{2}\right)^2} = 146,94 \text{ bar.}$$

A continuación re-calculamos los diámetros de los pasadores y el espesor de la chapa:

Pasador de unión entre A1 y A0 (punto de pivote):

Este pasador va a estar sometido a las siguientes solicitaciones:

- Reacción producida por los diferentes esfuerzos de la viga. Como hemos calculado en el apartado anterior, esta reacción es de 257949,577 N.

Cálculo a cortante:

Por la normativa conocemos que el valor límite de la tensión a cortante sobre el pasador ha de ser de 168 MPa. Con este dato aplicamos la fórmula.

$$r_{pasador} = \sqrt{\frac{0,5 * \varphi * R_{total}}{\tau_{lím} * \pi}}$$

Operando nos da un valor de radio de 19,57 mm, por tanto el diámetro será de 39,14 mm.

Cálculo por aplastamiento:

Por la normativa conocemos que el valor límite de la tensión por aplastamiento sobre el pasador ha de ser de 210 MPa, si bien el valor límite en nuestra pieza tiene que ser de 153,19 Mpa. Al ser éste último valor el más desfavorable, es el que utilizaremos para el cálculo por aplastamiento.

También conocemos el dato del diámetro, calculado a cortante, de manera que calculamos directamente el espesor de la chapa:

$$b = \frac{0,5 * R_{total}}{\sigma_{lim} * \phi_{pasador}} = \frac{0,5 * 257949,577}{153,19 * 39,14} = 21,51 \text{ mm}$$

Pasador de acción del cilindro 2:

Este pasador va a estar sometido a las siguientes sollicitaciones:

- Reacción producida por la acción del cilindro, de valor 169402,952 N.

Cálculo a cortante:

Por la normativa conocemos que el valor límite de la tensión a cortante sobre el pasador ha de ser de 168 MPa. Con este dato aplicamos la fórmula.

$$r_{pasador} = \sqrt{\frac{0,5 * \varphi * R_{total}}{\tau_{lim} * \pi}}$$

Operando nos da un valor de radio de 15,85 mm, por tanto el diámetro será de 31,70 mm.

Cálculo por aplastamiento:

Por la normativa conocemos que el valor límite de la tensión por aplastamiento sobre el pasador ha de ser de 210 MPa, si bien el valor límite en nuestra pieza tiene que ser de 153,19 Mpa. Al ser éste último valor el más desfavorable, es el que utilizaremos para el cálculo por aplastamiento.

También conocemos el dato del diámetro, calculado a cortante, de manera que calculamos directamente el espesor de la chapa:

$$b = \frac{0,5 * R_{total}}{\sigma_{lim} * \phi_{pasador}} = \frac{0,5 * 169402,952}{153,19 * 31,70} = 17,44 \text{ mm}$$

Prosiguiendo con la modificación de la viga, se eliminan los cortes superiores, ya que el redondeo del perfil ha aumentado el espacio entre los pasadores y la parte superior. Los cortes laterales, sin embargo, se mantienen:

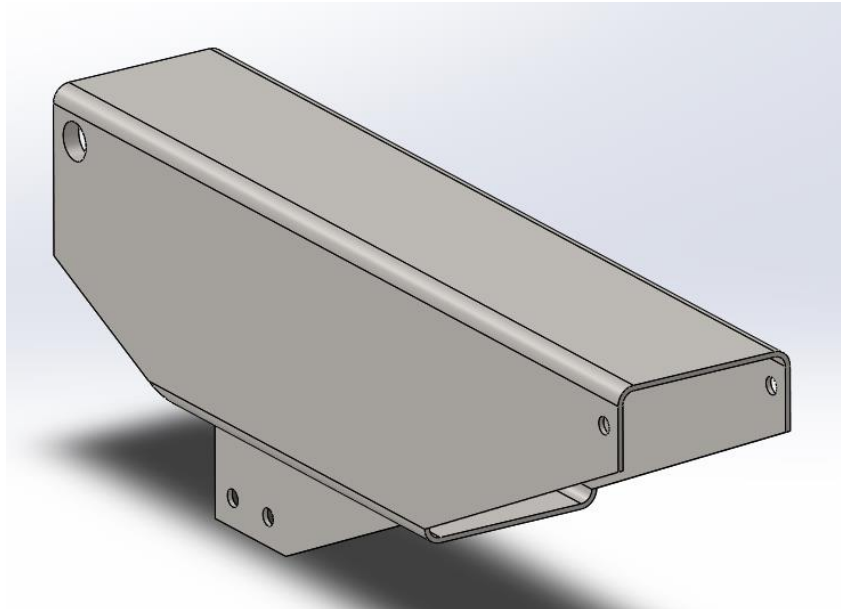


Figura 47: Modificación cortes viga A1.

Comprobamos las tensiones:

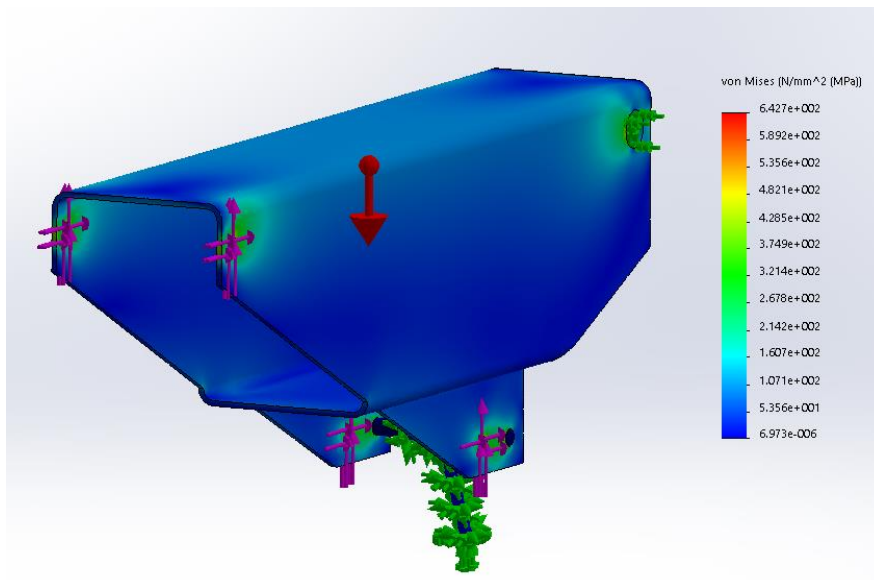


Figura 48: Modificación tensiones viga A1 (1).

Se observa en el mapa de tensiones que las fuerzas de compresión son demasiado grandes para que los taladros las soporten. Se procede a reforzar dichas zonas, así como la parte superior de la viga:

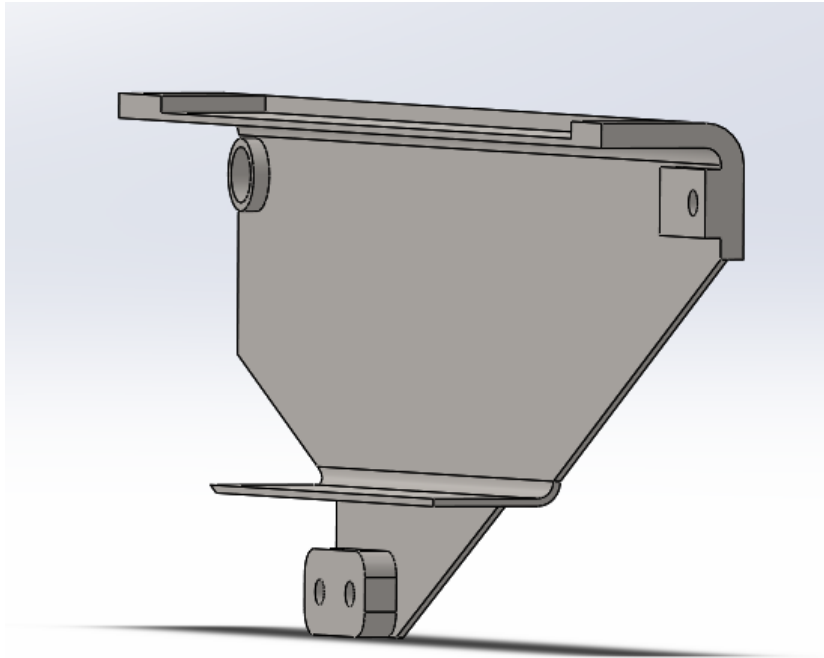


Figura 49: Refuerzos en pasadores viga A1.

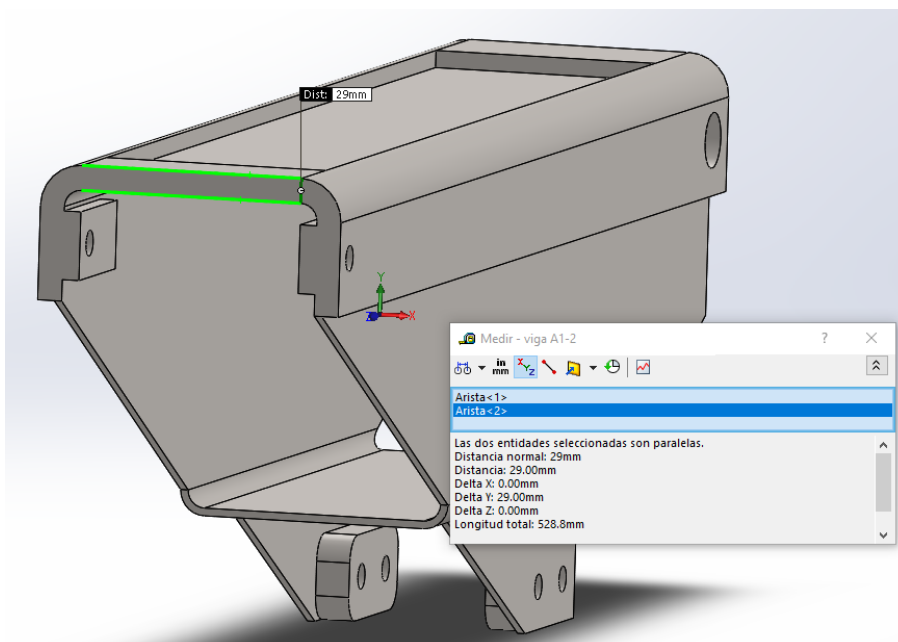


Figura 50: Refuerzo parte superior viga A1.

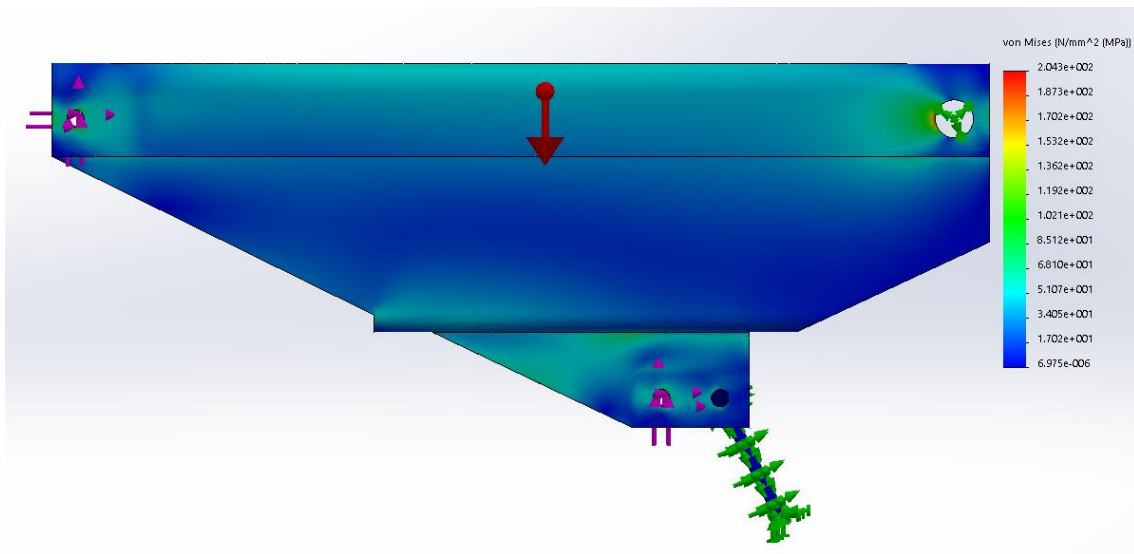


Figura 51: Modificación tensiones viga A1 (2).

Comprobamos que las tensiones en el pasador superior son aun altas y procedemos a reforzar más la zona siguiendo el mapa de tensiones:

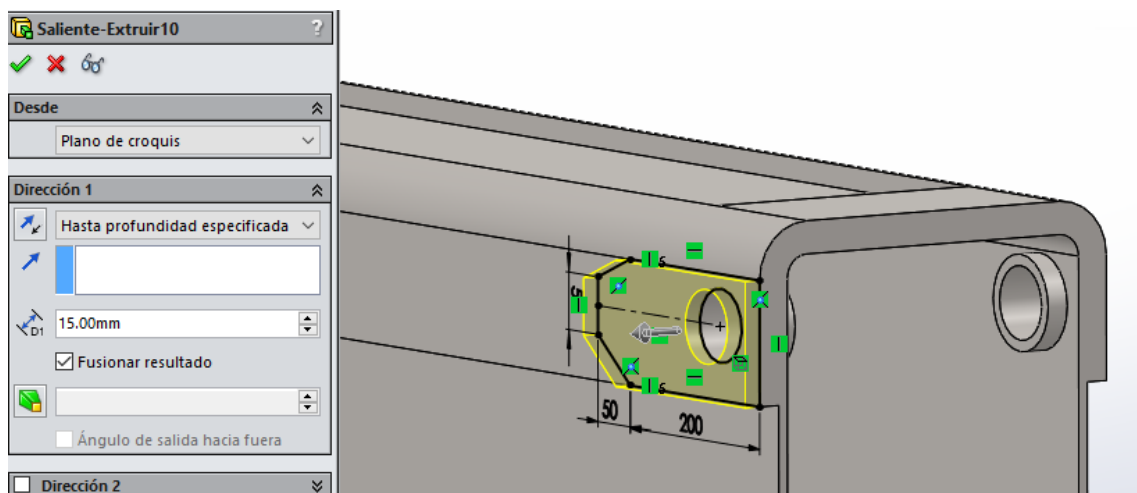


Figura 52: Refuerzo adicional parte superior viga A1.

Volvemos a simular:

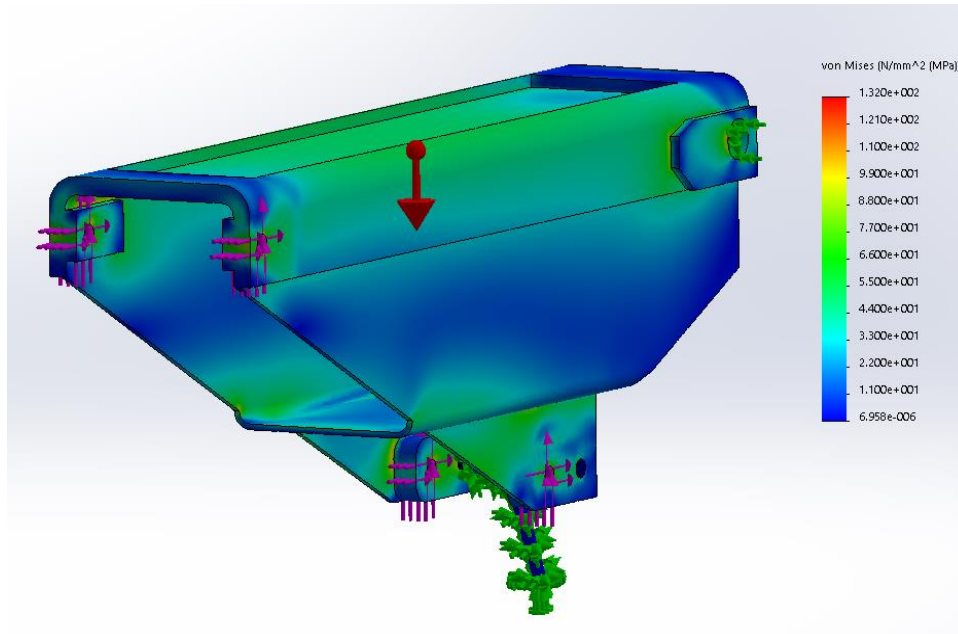


Figura 53: Modificación de tensiones viga A1 (3).

Cumplido el límite de tensiones, procedemos a aligerar la viga con vaciados. Se realiza un vaciado en la parte de refuerzo superior y otros dos en las caras laterales. El primero tiene una profundidad de 25 mm y los otros de 4,5 mm.

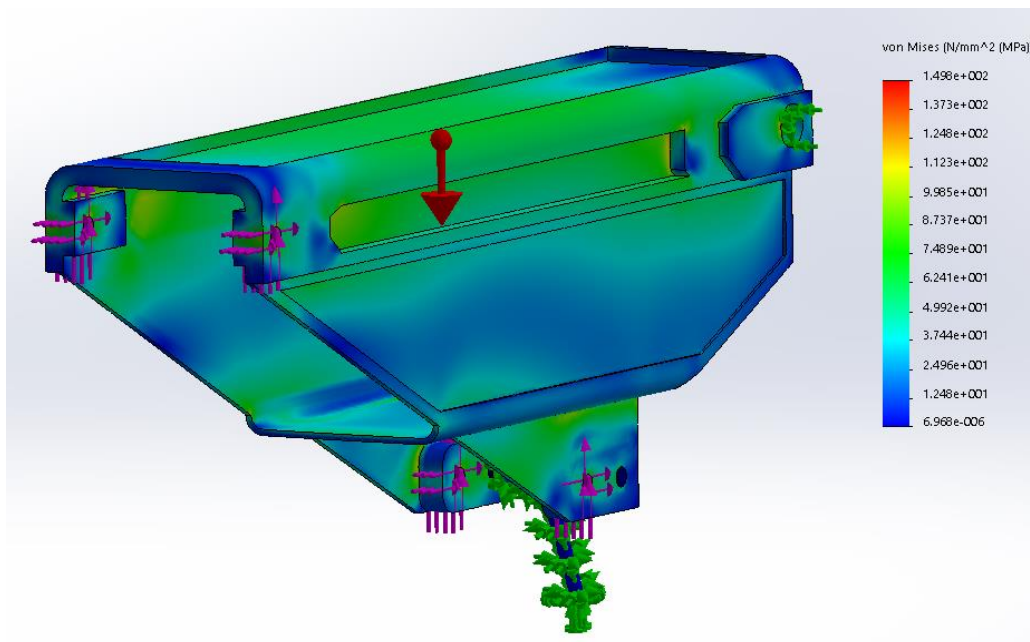


Figura 54: Modificación de tensiones viga A1 (4).

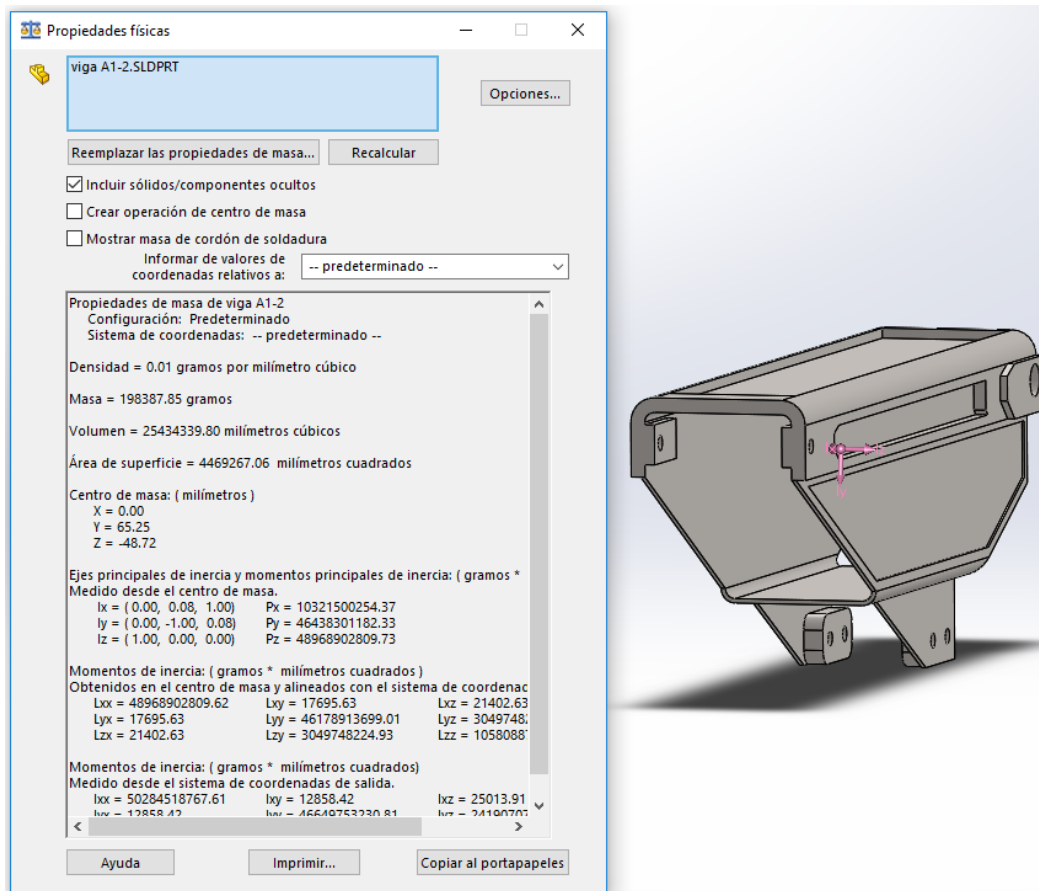


Figura 55: Modificación de peso viga A1.

Hemos conseguido que la gran mayoría de la viga trabaje y hemos reducido el peso de 503,43 kg a 198,39 kg, una reducción del 60,59%.

3.7- Re-diseño y optimización viga A0.

En el caso de la viga A0, se opta por el re-diseño entero, debido a su elevado peso (800 kg) y a la falta de concordancia de esta viga en particular con las mismas vigas de otras grúas en la industria.

Debemos de tener en cuenta que esta viga va a permanecer inmóvil, de manera que no será necesario aplicarle el coeficiente de seguridad por elevación de la pluma. Si se tendrá en cuenta el de peso propio, como es lógico.

Se parte del siguiente perfil, al que se le da un espesor de 18 mm:

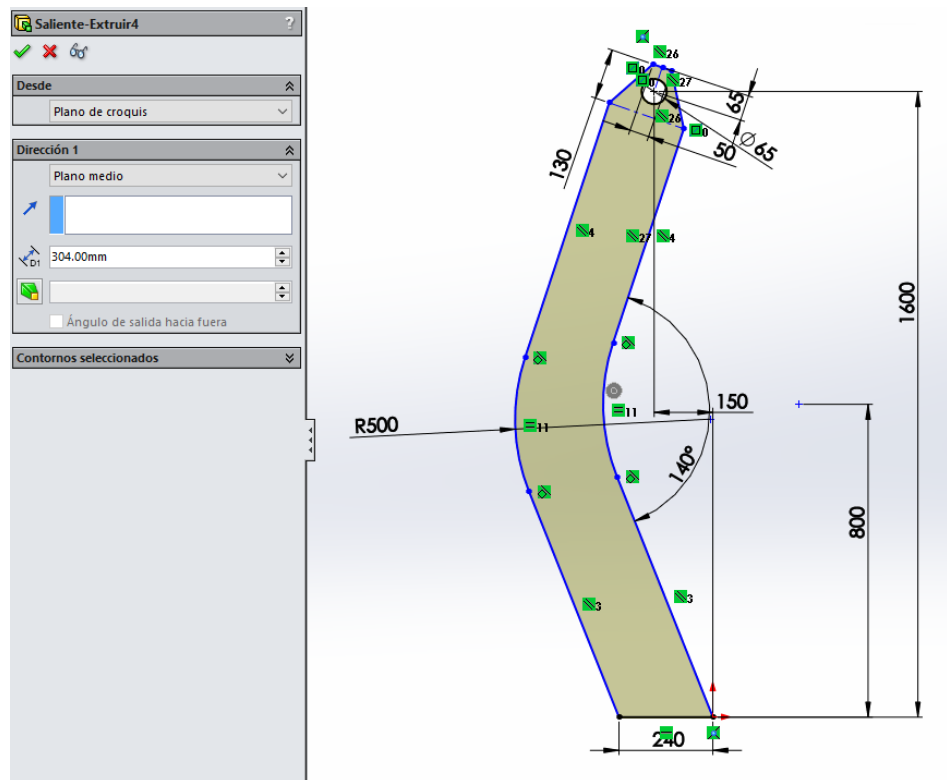


Figura 56: Re-diseño viga A0 (1).

Se añaden los soportes para el ensamblaje del cilindro hidráulico. Estos estarán unidos a la parte superior de la viga, de manera que aumentemos la resistencia en el eje Z:

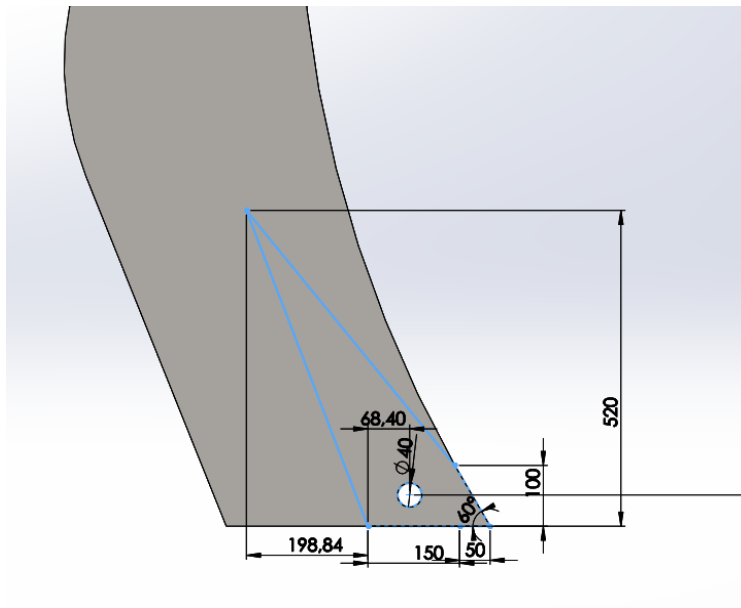


Figura 57: Soportes pasador cilindro 2 viga A0.

Se añaden los redondeos a la viga, de 20 mm. Los soportes se dejan como están, puesto que se soldarán a la estructura principal. Se procede con la simulación:

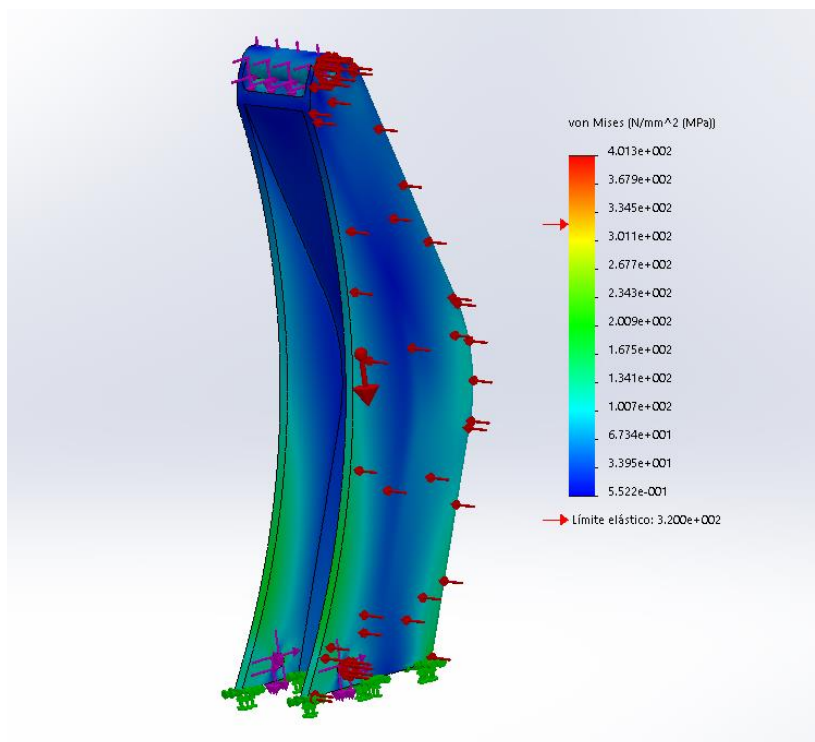


Figura 58: Modificación tensiones viga A0 (1).

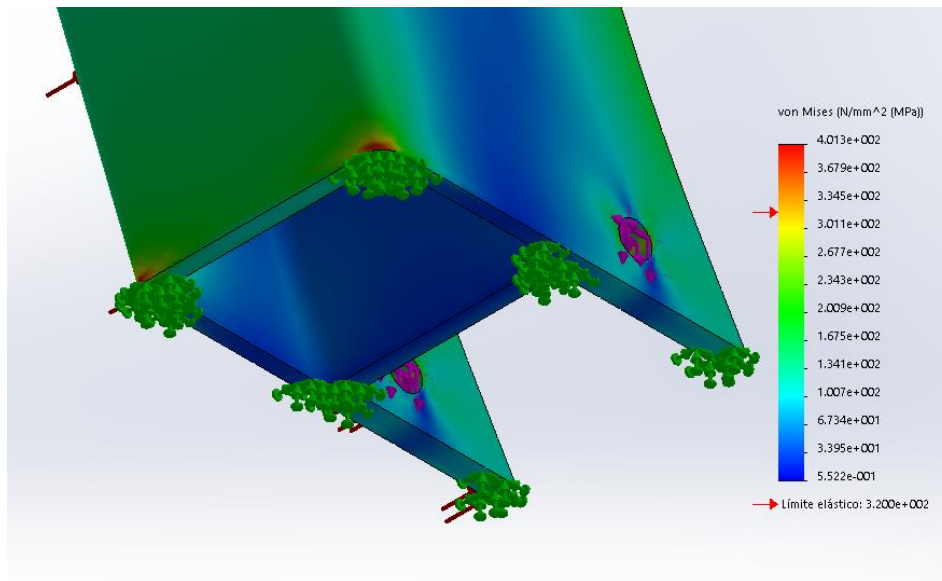


Figura 59: Modificación tensiones máximas viga A0.

Comprobamos que hay una concentración grande de tensiones en la parte de apoyo de la viga. Se procede a añadir un refuerzo que distribuya mejor las tensiones a lo largo de la parte posterior de la viga:

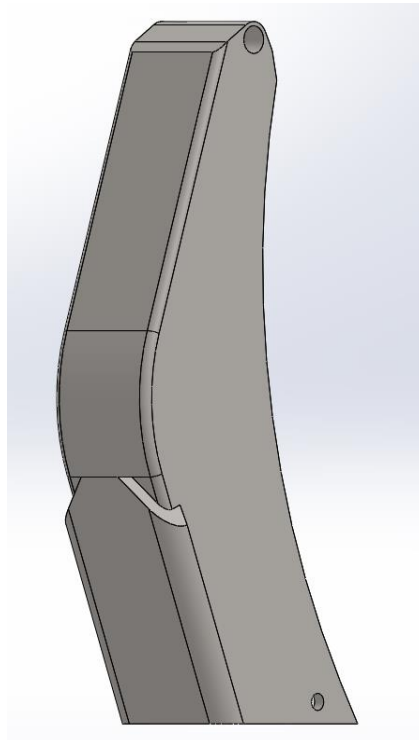


Figura 60: Refuerzo parte posterior viga A0.

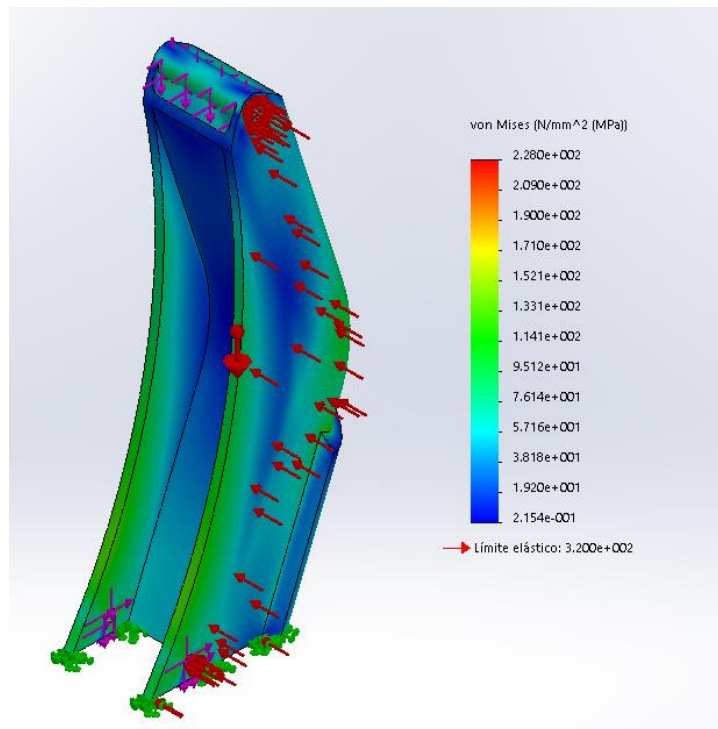


Figura 61: Modificación de tensiones viga A0 (2).

Al no ser necesario tener en cuenta el coeficiente de seguridad por el movimiento de la pluma, la tensión límite es la original establecida por la normativa, de 240 MPa. Comprobamos que no superamos ese límite, de manera que procedemos con el aligerado de la viga:

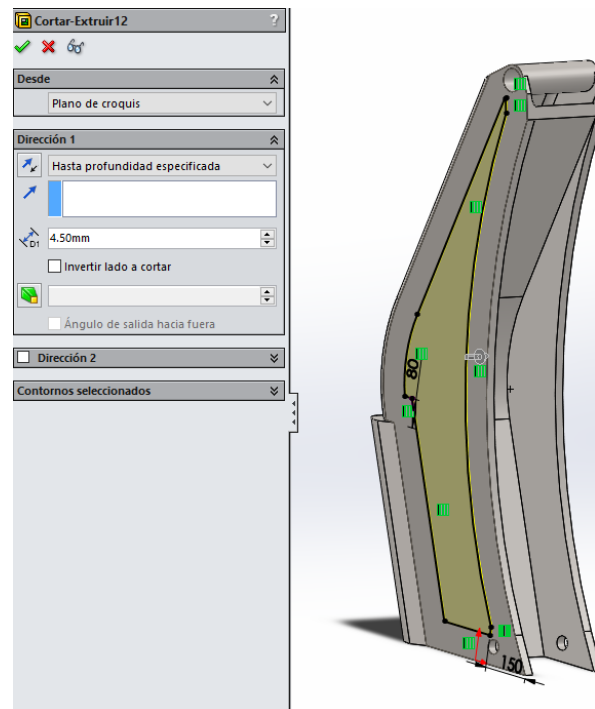


Figura 62: Vaciado lateral viga A0.

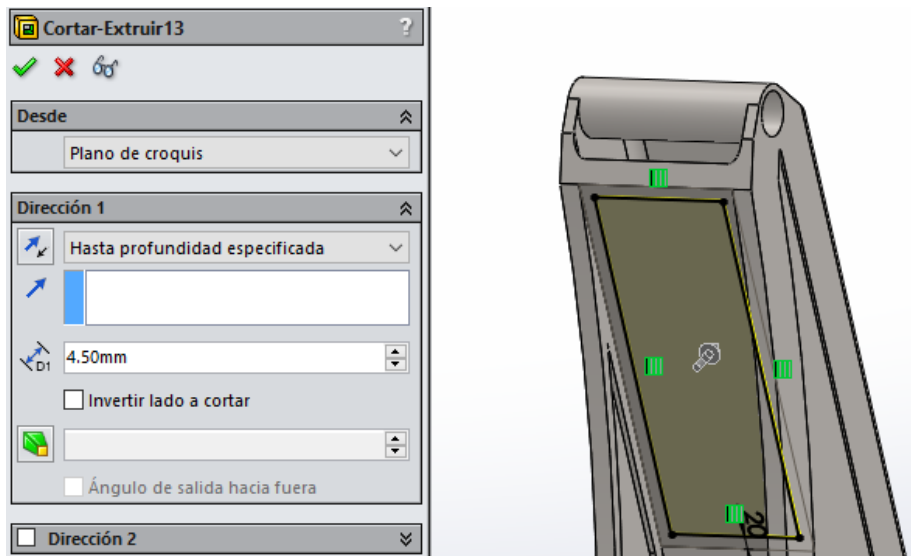


Figura 63: Vaciado frontal viga A0 (1).

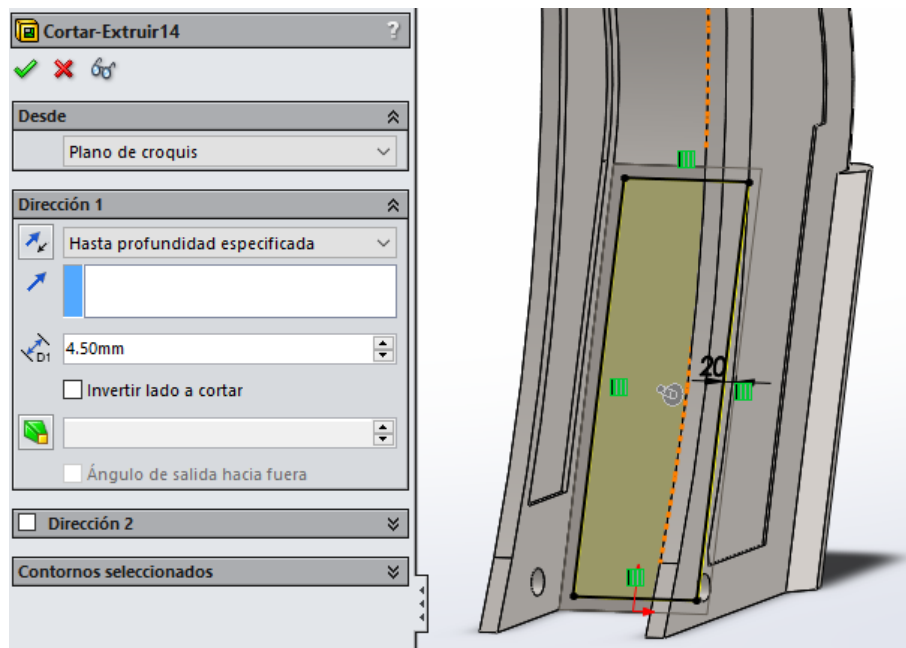


Figura 64: Vaciado frontal viga A0 (2).

Simulamos de nuevo:

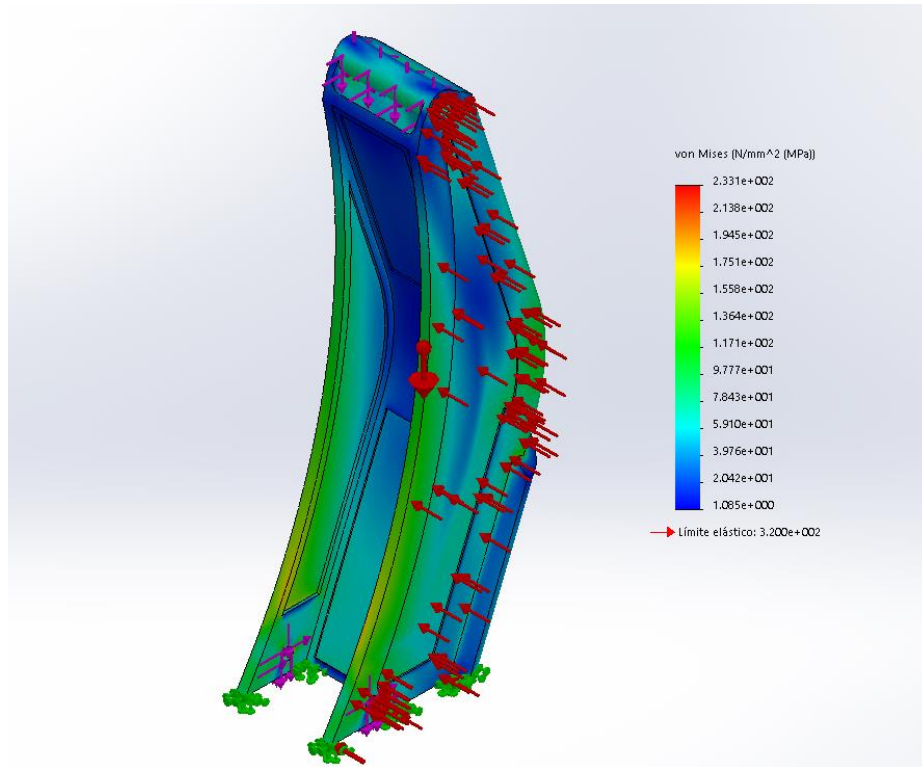


Figura 65: Modificación de tensiones viga A0 (3).

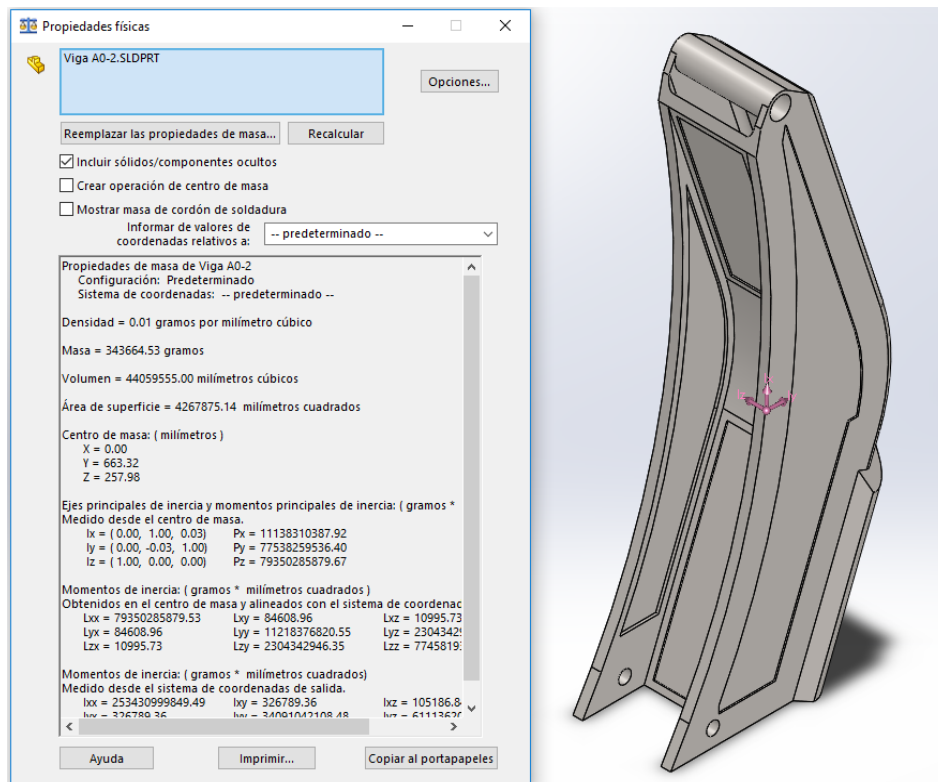


Figura 66: Modificación peso viga A0.

Hemos ajustado casi a la perfección las tensiones de la viga, hemos logrado que gran parte de ella trabaje y hemos reducido su peso de los 800 kg de la versión anterior a los 343,67 de la versión actual; una reducción del 57,04%.

4- Datos finales de la grúa.

Se vuelve a ensamblar la grúa con las vigas optimizadas y se compara el peso total y la flecha máxima en la pluma tomando como material acero:

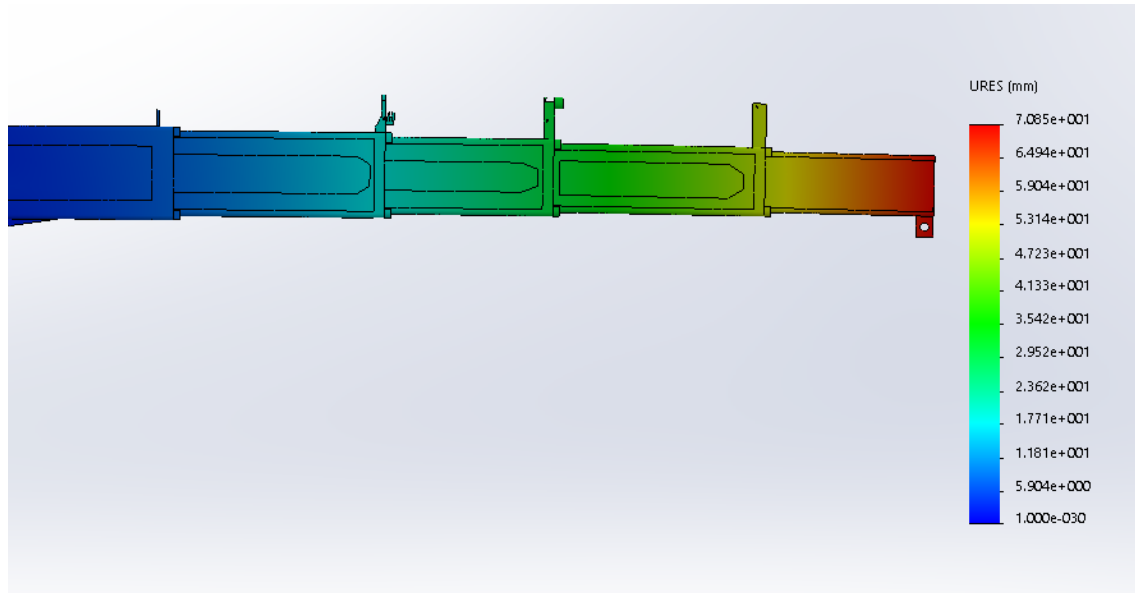


Figura 67: Modificación de flecha máxima grúa completa.

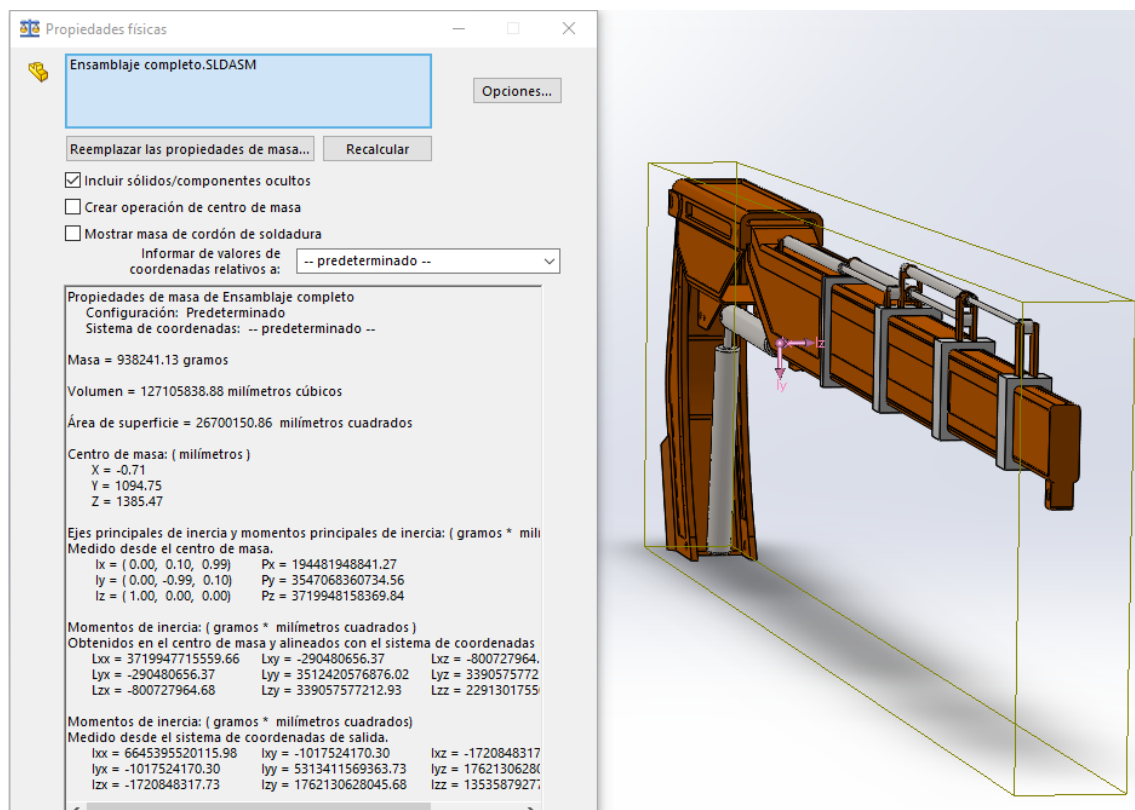


Figura 68: Modificación de peso grúa completa.

Hemos logrado reducir el peso total de la grúa de 2654 kg a 938,24 kg. Esto equivale a una reducción del 64,65%.

Pasamos a mostrar los nuevos centros de gravedad de la grúa:

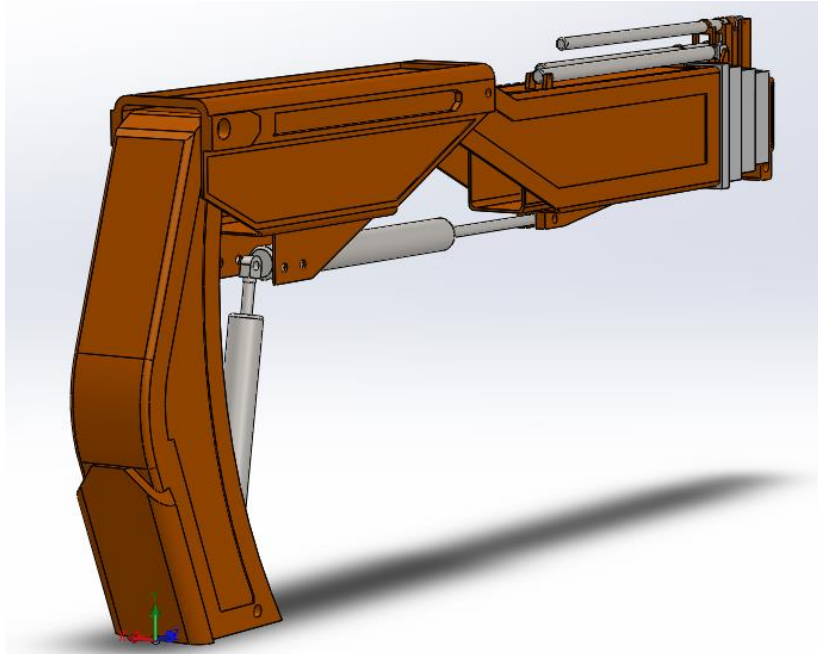


Figura 69: Sistema de coordenadas.

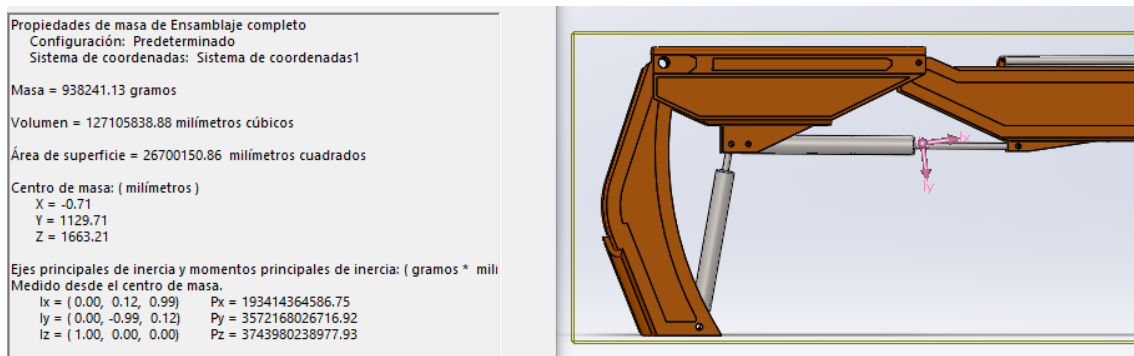


Figura 70: Modificación centro de masas en posición extendida.

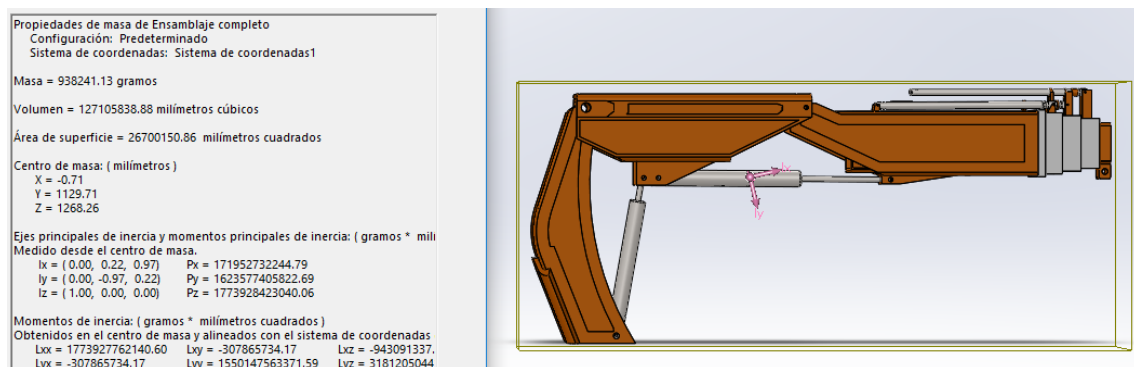


Figura 71: Modificación centro de masas en posición recogida.