

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
TRABAJO FIN DE GRADO

***DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE
NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE
AERONÁUTICO***

Alumno/Alumna: Mazo, Uyarra, Pablo

Director/Directora (1): Iriondo, Plaza, Edurne

Director/Directora (2): Girot, Mata, Franck

Curso: 2018 - 2019

Fecha: Bilbao, 18, Julio, 2019



ÍNDICE DE CONTENIDO

MEMORIA

RESUMEN	1
LABURPENA	2
ABSTRACT	3
1. INTRODUCCIÓN	4
2. CONTEXTO	6
3. OBJETIVOS	8
3.1. Alcance	8
4. BENEFICIOS	9
5. ESTADO DEL ARTE	9
5.1. Utillajes actuales de ensamblaje	11
5.2. Utillaje de ensamblaje reconfigurable <i>low-cost</i>	12
5.3. Dispositivo de sujeción universal <i>TORRESTOOL</i>	13
5.4. Utillajes para mecanizado de perfiles de aluminio curvados.....	14
5.5. Utillajes reconfigurables <i>DEMAT</i>	16
5.6. Concepto <i>jigless</i> o “sin utillaje”.....	16
5.7. Soluciones desarrolladas en el proyecto AERO3NAK	17
5.8. Nuevos diseños de utillaje / arquitecturas de geometrías complejas	19
5.9. Diseño tecnológico de los nudos.....	22
5.9.1. Sistema <i>ORTZ</i> para la construcción de mallas espaciales	22
5.9.2. Sistema <i>SEO</i> para la construcción de mallas espaciales	23
5.9.3. Nudo del sistema <i>ONDDI</i>	24
5.9.4. Nudo de la patente EP 0 310 478 A1	25
6. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA	26
6.1. Descripción del utillaje flexible diseñado	26
6.1.1. Conjunto de apoyo	27
6.1.2. Columna.....	28
6.1.2.1. Definición del número de actuadores y de su posición	29
6.1.2.2. Disposición de las barras y los nudos.....	31
6.1.2.3. Descripción de las barras	32



6.1.2.4. Nudos.....	36
6.1.2.5. Unión entre nudos y actuadores	36
6.1.3. Sistema de amarre.....	37
6.2. Dimensionamiento de los componentes	38
6.2.1. Soporte	39
6.2.2. Brazos	39
6.2.3. Tubos.....	40
6.2.4. Conos	41
6.2.5. Nudos	41
6.2.6. Tapas	42
6.2.7. Espárragos	43
6.2.8. Pletinas	43
6.2.9. Machón de unión	44
6.2.10. Cono de unión para las barras de composite	44
6.2.11. Elementos comerciales.....	45

METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO

7. FASES SEGUIDAS EN EL PROYECTO.....	48
7.1. Proceso de diseño de la estructura	48
7.1.1. Primera solución	50
7.1.2. Segunda solución	51
7.1.3. Tercera solución	52
7.1.4. Cuarta solución	53
7.2. Fases del proyecto	55
8. DIAGRAMA DE GANTT.....	55
9. CÁLCULOS	57
9.1. Simulación cinemática.....	57
9.1.1. Cálculo de la longitud final de los actuadores	58
9.1.2. Trayectoria de movimiento de los nudos.....	61
9.1.3. Posiciones iniciales y finales de los nudos	61
9.1.4. Centros de curvatura de la trayectoria de los nudos.....	63



9.2. Diseño de los nudos.....	66
9.2.1. Conceptos	66
9.2.2. Diseño CAD.....	70
9.2.3. Dimensionamiento	74
9.3. Curvatura máxima alcanzable por la columna.....	77
9.3.1. Ángulo mínimo entre barras	77
9.3.2. Ángulo de giro máximo del perno	78
9.3.3. Relación entre ángulos	80
9.3.4. Cálculo del radio mínimo alcanzable	83
9.4. Cálculo estático aproximado de la estructura	86
9.4.1. Columna en posición recta.....	86
9.4.1.1. Hipótesis 1: 200 kg entre tres columnas.....	87
9.4.1.2. Hipótesis 2: 444,44 kg entre tres columnas	90
9.4.1.3. Hipótesis 3: hipótesis 2 + 910 N de taladro	92
9.4.1.3.1. Hipótesis 3.1.....	92
9.4.1.3.2. Hipótesis 3.2.....	95
9.4.1.3.3. Hipótesis 3.3.....	98
9.4.2. Columna adoptando un radio de 1,85 m.....	101
9.4.2.1. Hipótesis 1: 200 kg entre tres columnas	101
9.4.2.2. Hipótesis 2: 444,44 kg entre tres columnas	104
9.4.2.3. Hipótesis 3: hipótesis 2 + 910 N de taladro	107
9.4.2.3.1. Hipótesis 3.1.....	107
9.4.2.3.2. Hipótesis 3.2.....	110
9.4.2.3.3. Hipótesis 3.3.....	113
9.4.3. Tensiones en los actuadores.....	116
9.4.4. Fuerzas y deformaciones máximas	117
9.4.5. Tensiones	118
9.4.6. Análisis de la unión de rótula	118
9.4.6.1. Preprocesado	119
9.4.6.1.1. Modelo	119
9.4.6.1.2. Mallado	120
9.4.6.1.3. Contactos.....	121



9.4.6.1.4. Condiciones de contorno.....	122
9.4.6.2. Resultados	122
9.4.6.2.1. Tensiones	122
9.4.6.2.2. Deformaciones.....	125
9.4.6.2.3. Reacción en la superficie empotrada	126

ASPECTOS ECONÓMICOS

10. PRESUPUESTO.....	127
10.1. Objeto.....	127
10.2. Presupuesto de ejecución material	127
10.2.1. Elementos comerciales.....	127
10.2.2. Elementos no comerciales.....	128
10.2.3. Presupuesto de mano de obra	129
10.2.4. Presupuesto de ejecución material.....	129
10.3. Presupuesto de ejecución por contrata	129
10.4. Presupuesto total.....	130
10.5. Presupuesto de la solución con tubos de composite	130

CONCLUSIONES

11. CONCLUSIONES.....	131
11.1. Futuras líneas de trabajo	132

BIBLIOGRAFÍA

12. BIBLIOGRAFÍA.....	133
------------------------------	------------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Montaje tradicional en <i>Aciturri</i> de un <i>Elevator</i> para <i>Dassault</i> (izquierda) y montaje automatizado del fuselaje del <i>Boeing 737</i> (derecha).....	10
Figura 2: Utillaje específico para el ensamblaje del ala (<i>Airbus UK</i>).....	11
Figura 3: Categorización sencilla del utillaje para el ensamblaje.....	12
Figura 4: Ejemplo de elementos básicos para la unión de la estructura y la fijación de elementos a ensamblar a disposición en la biblioteca de herramientas.	12
Figura 5: Ejemplo de Utillaje de ensamblaje Reconfigurable <i>Low Cost</i> : Configuración con marco completo; Utillaje <i>ReFlex</i> en funcionamiento.....	13
Figura 6: Concepto modular de TORRESTOOL.	14
Figura 7: Utillaje flexible UHF-Chord Trimmer.	15
Figura 8: Estructura <i>DEMAT</i> (<i>Dematerialized machines</i>) en base a barras y nodos.....	16
Figura 9: Concepto Jigless o “sin Utillaje”.	17
Figuras 10: Columna de diseño convencional: la columna completa con los dos hexápodos para el montaje del componente para ensamblar.	18
Figura 11: Diseño de dos columnas con los actuadores integrados en la estructura.	18
Figura 12: Tipos de superficies según su curvatura - Montaje tradicional en <i>Aernnova</i> del cono de cola para <i>Embraer – Radome y cockpit</i>	19
Figura 13: Modos geométricos de generación de superficies.	21
Figura 14: Sistema ORTZ	23
Figura 15: Sistema SEO	24
Figura 16: Sistema nudo ONDDI	25
Figura 17: Nudo de la patente EP 0 310 478 A1	26
Figura 18: Utillaje flexible completo en posición recta.....	27
Figura 19: Utillaje flexible completo en posición curvada	27
Figura 20: Conjunto de apoyo	27



Figura 21: Estructura nodos/barra.....	28
Figura 22: Alzado y perfil de la estructura (sin actuadores)	29
Figura 23: Posición y designación de los actuadores (marcados en amarillo).	30
Figura 24: Esquema de una parte de la columna adaptada a una circunferencia.	31
Figura 25: Dos tipos de pisos (agujeros en rojo orientados hacia distintos lados)	31
Figura 26: Alzado (izq) y perfil (dcha)de las barras existentes entre pisos.	32
Figura 27: Configuración de barra con doble tornillo	33
Figura 28: Configuración de barra con doble perno esférico	33
Figura 29: Configuración de barra con tornillo y perno esférico	33
Figura 30: Alzado, planta y perfil de la unión entre pisos.	33
Figura 31: Cono + tuercas + tornillo M10	34
Figura 32: Cono + tuerca + perno esférico.....	34
Figura 33: Posición inicial de los nudos	34
Figura 34: Posición final de los nudos	34
Figura 35: Ejemplo de la unión entre un tubo de composite y una pieza de aluminio mediante gripado electromagnético.	35
Figura 36: Esquema de la unión por soldadura electromagnética	35
Figura 37: Distancia entre la tapa y la cara plana del nudo.....	36
Figura 38: Actuador con pernos en ambos extremos.....	37
Figura 39: Actuador con juntas cardan en ambos extremos.....	37
Figura 40: Conjuntos de amarre superior (izq) e inferior (dcha).....	38
Figura 41: Soporte o apoyo	39
Figura 42: Brazo	40
Figura 43: Tubo	40
Figura 44: Cono	41



Figura 45: Nudos utilizados	42
Figura 46: Tapa.....	43
Figura 47: Espárrago.....	43
Figura 48: Pletinas: superior, circular e inferior	44
Figura 49: Machón de unión.....	44
Figura 50: Cono alargado	45
Figura 51: Tornillo DIN EN ISO 4017	45
Figura 52: Tornillo DIN EN ISO 4762	46
Figura 53: Tuerca DIN EN ISO 4017	46
Figura 54: Perno esférico DIN 71803.....	46
Figura 55: Actuador lineal electromecánico RA-38	47
Figura 56: Junta universal RS PRO	47
Figura 57: Estructura nodo/barra con actuadores integrados de AERO3NAK.....	48
Figura 58: Primera estructura creada (0 gdl y 24 redundancias).....	49
Figura 59: 1ª solución. Vista isométrica (izq.), alzado (centro) y perfil (dcha)	50
Figura 60: Rango de movimiento de la 1ª solución. Perfil (dcha) y parte trasera (izq) ..	50
Figura 61: 2ª solución. Vista isométrica (izq.), alzado (centro) y perfil (dcha.)	51
Figura 62: Rango de movimiento de la 2ª solución. Perfil (dcha) y parte trasera (izq) ..	52
Figura 63: 3ª solución. Vista isométrica (izq.), alzado (centro) y perfil (dcha)	52
Figura 64: Vista de planta de la 3ª solución	53
Figura 65: Rango de movimiento de la 3ª solución. Perfil (dcha) y parte trasera (izq) ..	53
Figura 66: 4ª solución. Vista isométrica (izq.), alzado (centro) y perfil (dcha.)	54
Figura 67: Rango de movimiento de la 4ª solución. Perfil (dcha) y parte trasera (izq) ..	54
Figura 68: Solución para curvatura simple con actuadores destacados en amarillo. Vista isométrica (izquierda), alzado (centro) y perfil (derecha).....	57

Figura 69: Representación gráfica del ángulo α (pisos 1 y 2 de actuadores)	58
Figura 70: Cálculo de X	59
Figura 71: Cálculo de Lact.....	60
Figura 72: Numeración de los pisos de actuadores.....	60
Figura 73: Trayectoria del movimiento para un radio de curvatura de 1,85 m.....	61
Figura 74: Numeración de los nudos y de los pisos	63
Figura 75: Circunferencias de la trayectoria de un nudo de cada piso	65
Figura 76: Centros de curvatura en la posición final de los nudos del último piso	65
Figura 77: Numeración de los nudos	66
Figura 78: Nudo nº10.....	67
Figura 79: Nudo nº11	67
Figura 80: Nudo nº12.....	68
Figura 81: Nudo nº13	68
Figura 82: Nudo nº14.....	68
Figura 83: Nudo nº15	69
Figura 84: Nudo nº17	69
Figura 85: Movimiento relativo entre las barras del nudo 10 observado en GIM (posiciones inicial y final)	70
Figura 86: Sistema ONDDI.....	71
Figura 87: Líneas que siguen los agujeros de los nudos	71
Figura 88: Vistas conceptuales del nudo principal	72
Figura 89: Posición de los agujeros roscados en el nudo principal	72
Figura 90: Montajes de la unión atornillada y la unión de junta esférica con el nudo ...	73
Figura 91: Nudo principal con agujeros para las tapas	73
Figura 92: Nudo secundario	73

Figura 93: Distancia entre el perno y el cono	74
Figura 94: Esquema de uno de los cuatro cubos del último piso	75
Figura 95: Vista en planta de la figura 94	75
Figura 96: Esquema de las barras justo en el punto en que interferirían (cálculo R)	76
Figura 97: Dimensiones del nudo principal	77
Figura 98: Esquema de las barras justo en el punto en que interfieren (cálculo θ)	78
Figura 99: Dibujo conceptual del perno esférico y la tapa con cotas	79
Figura 100: Esquema de uno de los cuatro cubos del último piso.....	81
Figura 101: Vista en planta de la figura 94	81
Figura 102: Representación conceptual de la unión entre los nudos del último piso	83
Figura 103: Esquema para el cálculo de α	84
Figura 104: Dibujo esquemático para el cálculo del radio	85
Figura 105: Numeración de barras y nudos en posición recta	87
Figura 106: Diagrama y valores de los esfuerzos axiales (columna recta, hipótesis 1)..	88
Figura 107: Perfil de la deformada de la columna en posición recta. Hipótesis 1 (factor de amplificación de 5000mm/mm)	89
Figura 108: Diagrama y valores de los esfuerzos axiales (columna recta, hipótesis 2)..	90
Figura 109: Perfil de la deformada de la columna en posición recta. Hipótesis 2 (factor de amplificación de 5000mm/mm)	91
Figura 110: Valores de los esfuerzos axiales (columna recta, hipótesis 3.1)	93
Figura 111: Perfil de la deformada de la columna en posición recta. Hipótesis 3.1 (factor de amplificación de 700mm/mm)	94
Figura 112: Valores de los esfuerzos axiales (columna recta, hipótesis 3.2)	96
Figura 113: Perfil de la deformada de la columna en posición recta. Hipótesis 3.2 (factor de amplificación de 700mm/mm)	97
Figura 114: Valores de los esfuerzos axiales (columna recta, hipótesis 3.3).....	99

Figura 115: Perfil de la deformada de la columna en posición recta. Hipótesis 3.3 (factor de amplificación de 700mm/mm)	100
Figura 116: Numeración de barras y nudos en la posición curvada	101
Figura 117: Valores de los esfuerzos axiales (columna curvada, hipótesis 1)	102
Figura 118: Perfil de la deformada de la columna en posición R=1850 mm. Hipótesis 1 (factor de amplificación de 5000mm/mm)	103
Figura 119: Valores de los esfuerzos axiales (columna curvada, hipótesis 2)	105
Figura 120: Perfil de la deformada de la columna en posición R=1850 mm. Hipótesis 2 (factor de amplificación de 3000mm/mm)	106
Figura 121: Valores de los esfuerzos axiales (columna curvada, hipótesis 3.1)	108
Figura 122: Perfil de la deformada de la columna en posición R=1850 mm. Hipótesis 3.1 (factor de amplificación de 700mm/mm).	109
Figura 123: Valores de los esfuerzos axiales (columna curvada, hipótesis 3.2)	111
Figura 124: Perfil de la deformada de la columna en posición R=1850 mm. Hipótesis 3.2 (factor de amplificación de 700mm/mm)	112
Figura 125: Valores de los esfuerzos axiales (columna curvada, hipótesis 3.3)	114
Figura 126: Perfil de la deformada de la columna en posición R=1850 mm. Hipótesis 3.3 (factor de amplificación de 700mm/mm).	115
Figura 127: Tensión de la barra 119 obtenida en CESTRI.	118
Figura 128: Esfuerzos de las barras unidas al nudo 13 (CESTRI).	119
Figura 129: Modelo a analizar en ANSYS.....	119
Figura 130: Mallado del modelo completo	120
Figura 131: Mallado de uno de los tornillos DIN 912 M3x10	120
Figura 132: Mallado de la tapa.	121
Figura 133: Mallado del tornillo, de la tapa y del perno esférico	121
Figura 134: Esfuerzos y apoyo	122
Figura 135: Tensiones de Von-Mises en el modelo completo	123



Figura 136: Tensiones de Von-Mises en el perno	123
Figura 137: Tensiones en la tapa	124
Figura 138: Tensiones en los tornillos	124
Figura 139: Deformaciones en el modelo completo	125
Figura 140: Reacción en el empotramiento.....	126



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Diagrama de Gantt	56
Tabla 2: Calculo de longitudes de los nudos que unen los actuadores	61
Tabla 3: Posiciones iniciales y finales de todos los nudos de la estructura	62
Tabla 4: Coordenadas de los centros y radios de curvatura de las trayectorias de los nudos en la posición inicial	64
Tabla 5: Centros de curvatura en la posición final de los nudos del último piso	65
Tabla 6: Dimensiones del nudo principal.....	77
Tabla 7: Desplazamientos en los nudos del último piso (columna reta, hipótesis 1)	89
Tabla 8: Desplazamientos en los nudos del último piso (columna recta hipótesis 2)	92
Tabla 9: Desplazamientos en los nudos del último piso (columna recta, hipótesis 3.1).....	94
Tabla 10: Desplazamientos en los nudos de los pisos 2 y 3 (columna recta, hipótesis 3.2).....	98
Tabla 11: Desplazamientos en los nudos del último piso (columna recta, hipótesis 3.3).....	100
Tabla 12: Desplazamientos en los nudos de los pisos 2 y 3 (columna curvada, hipótesis 1).	104
Tabla 13: Desplazamientos en los nudos del piso 3 (columna curvada, hipótesis 2) ...	107
Tabla 14: Desplazamientos en los nudos del último piso (columna curvada, hipótesis 3.1)	110
Tabla 15: Desplazamientos en los nudos de los pisos 2 y 3 (columna curvada, hipótesis 3.2).	113
Tabla 16: Desplazamientos en los nudos del último piso (columna curvada, hipótesis 3.3)	115
Tabla 17: Esfuerzos axiales en los actuadores	116
Tabla 18: Fuerzas axiales máximas en las barras	117
Tabla 19: Desplazamientos máximos de los nudos	117
Tabla 20: Presupuesto elementos comerciales	128
Tabla 21: Presupuesto elementos no comerciales	128
Tabla 22: Presupuesto mano de obra	129
Tabla 23: Presupuesto de ejecución material.	129
Tabla 24: Presupuesto de ejecución por contrata	129
Tabla 25: Presupuesto total	130

RESUMEN

El presente proyecto se presenta como Trabajo Fin de Grado (12 ECTS) para optar al título de Graduado en Ingeniería Mecánica. En él se describe el proceso de diseño de un utillaje flexible, formado por una estructura nodos/barra, utilizado para el amarre de diferentes componentes aeronáuticos.

El proyecto comienza con la definición de una estructura que sea capaz, gracias a la acción de actuadores *low-cost*, de adaptarse a la geometría de la parte del fuselaje central de un avión de fuselaje estrecho, es decir, que sea capaz de alcanzar un radio de curvatura “pequeño”. Para llegar a esa estructura, denominada columna, se hace uso del programa informático de simulaciones cinemáticas *GIM*.

Posteriormente se realiza la simulación cinemática de las soluciones adoptadas de las estructuras en 3D en el software *GIM*, donde se observa cómo se mueve el utillaje flexible, todo el rango de movimiento que tiene el mismo y la posición final de los nodos y de las barras, así como los centros de curvatura de sus trayectorias.

El diseño del utillaje y su ensamblaje se ha llevado a cabo en la herramienta de CAD *Inventor*. Para ello se ha buscado en la literatura barras con el suficiente espesor para soportar los esfuerzos axiales y se han diseñado nudos que puedan unir las barras, con una unión atornillada o con una rótula, y que sean capaces tanto de alcanzar el movimiento obtenido en la simulación cinemática como de transmitir correctamente los esfuerzos axiales de tracción o de compresión. Los elementos de unión (tornillos, tuercas, pernos esféricos etc.) son elementos normalizados o comerciales.

Para poder sujetar la pieza a fabricar se ha definido una solución que permita el correcto amarre de dicha pieza a la estructura nodos/barra.

También se ha limitado el número de actuadores *low-cost* que intervienen en el utillaje para abaratar así su precio.

Por último, se ha llevado a cabo una simulación mecánica del sistema mediante el software de cálculo estructural en 3D *CESTRI*, para ver las tensiones axiales aproximadas a las que están sometidas las barras.

El proyecto también incluye el presupuesto, que contempla los costes de oficina técnica, los costes de los elementos comerciales, los costes de los elementos a fabricar y los costes de montaje, pruebas y mantenimiento.

LABURPENA

Proiektu hau Gradu Amaierako Proiektu gisa aurkezten da (12 ECTS) Ingeniaritza Mekanikoko titulua lortzeko. Aeronautika elementu ezberdinen muntaian erabilitako tresna malgu bat diseinatzeko prozesua deskribatzen du.

Proiektu honek kostu baxuko eragingailuen ekintzari esker, gorputz estuetako aireontzi baten fuselaje zentroko geometriara egokitzeko gai den egitura baten definizioarekin hasten da, hau da, "erradio txikiko" kurbatura lortu ahal duena. Zutabea deitzen den egitura hori lortzeko, GIM simulazio zinematikoko softwarea erabili da.

Ondoren, GIM softwarearen 3D-ko simulazio zinematikoko egituren erantzunetan oinarrituta diseinua egiten da. Simulazio hauei esker, tresneria malgua nola mugitzen den ikus daiteke eta baita ere dituen mugimendu guztiak, nodoen eta barraen azken posizioa eta baita haien ibilbideen kurbatura zentroak ere.

Tresneriaren diseinua eta bere muntaketa CAD Inventor tresnaren bidez egin dira. Horretarako, literaturan barrak bilatu dira, nahikoa lodiera duten ardatz eta nodoa lotzeko. Nodoak ere diseinatu dira, eta mugimendua lortzeko gai diren simulazio zinematikokoaren bidez aztertu da. Aukeratutako lotura elementuak (torlojuak, torloju esferikoak, etab.), elementu estandarrak edo komertzialak izan dira.

Fabrikatu beharreko pieza eutsi ahal izateko, pieza hori nodo/barra egiturara era egokian lotzea ahalbidetzen duen soluzioa planteatu da.

Tresna horretan esku hartzen duten kostu baxuko eragingailuen kopurua ere mugatu egin da prezioa murrizteko.

Azkenean, sistemaren simulazio mekanikoa CESTRI 3D ko egiturentzako kalkulu softwarearekin egin da, barra horiek jasaten dituzten gutxi-gorabeherako tensio axialak neurtzeko.

Proiektuak aurrekontua ere barne hartzen du eta bertan: bulego teknikoaren, elementu komertzialen, fabrikatu beharreko elementuen eta muntaia, azterketa eta mantentzearen kostuak biltzen ditu.

ABSTRACT

The present project is presented as Final Degree Project (12 ECTS) to qualify for the degree in Mechanical Engineering. It describes the process of designing a flexible tool, formed by a structure nodes/bar, used for the tying up of different aeronautical components.

The project begins with the definition of a structure that is capable, due to the action of low-cost actuators, of adapting to the geometry of the part of the central fuselage of a narrow-body aircraft, that is, the structure is able to reach a "small" radius of curvature. To get to that structure, called the column, the GIM kinematic simulation software is used.

Subsequently, the kinematic simulation of the adopted solutions of the 3D structures in the GIM software is made, where it is observed how the flexible tooling moves, all the range of movement that it has and the final position of the nodes and the bars, as well as the centers of curvature of their trajectories.

The design of the tooling and its assembly has been carried out in the CAD Inventor tool. For this purpose, bars have been searched for in the literature with sufficient thickness to withstand axial stresses and knots have been designed that can join the bars, with a bolted connection or with a ball joint, and that are capable of achieving the movement obtained in the kinematic simulation as to correctly transmit the axial forces of traction or compression. The joining elements (screws, nuts, spherical bolts, etc.) are standard or commercial elements.

To be able to hold the piece to be manufactured, a solution has been defined that allows the correct clamping of said piece to the structure nodes / bar.

The number of low-cost actuators that intervene in the tooling has also been limited to lower its price.

Finally, a mechanical simulation of the system has been carried out using CESTRI 3D structural calculation software, to see the approximate axial tensions to which the bars are subjected.

The project also includes the budget, which includes the technical office costs, the costs of the commercial elements, the costs of the elements to be manufactured and the costs of assembly, testing and maintenance.

1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto se ha desarrollado en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingeniería de Bilbao, UPV/EHU, en el marco del Laboratorio Transfronterizo ÆNIGME. El Departamento de Ingeniería Mecánica participa en el proyecto AEROTRESNAK, que se propone responder a la necesidad descrita en el siguiente apartado, proponiendo un cambio conceptual en el utillaje utilizado actualmente, pasando de ser un elemento pasivo a ser “utillaje inteligente” como elemento dinamizador para la automatización de los diferentes procesos de fabricación y ensamblaje de aeroestructuras complejas de gran tamaño en la Fábrica 4.0. De hecho, se podría decir que el reto que propone AEROTRESNAK es pasar a una fábrica de aeroestructuras con “cero utillajes”, desde un punto de vista de concepción tradicional de utillaje, al convertirse en un elemento clave y facilitador en la automatización de procesos.

El LTC ÆNIGME se proyecta como una estructura de investigación transversal integrada en el Campus Euroregional y Transfronterizo UPV/EHU – Université de Bordeaux, y cuya finalidad es convertirse en referente docente, científico y tecnológico del Arco Atlántico de Europa de impacto internacional, que constituya la referencia en ambos territorios para la generación de conocimiento y potenciación de capacidades científicas y tecnológicas en toda la cadena de valor. Inició su andadura en 2010 tras el acuerdo de colaboración firmado por la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) en el desarrollo de su proyecto de Campus de Excelencia Internacional Euskampus y el Pôle de Recherche et d’Enseignement Supérieur (PRES) Université de Bordeaux en el de IdEX, Initiative d’Excellence. Siguiendo esta filosofía y la posibilidad de formar un Laboratorio Internacional Asociado entre el Departamento de Ingeniería Mecánica de la ETSI de Bilbao, UPV/EHU, y el I2M, UBx / ENSAM / Bordeaux INP / CNRS se diseña una estructura con el objetivo de que sea, en el futuro, una referencia del Arco Atlántico de Europa en su temática.

La temática general del LTC se refiere al *Impacto de los procesos sostenibles sobre el comportamiento en servicio y el dimensionamiento previo de componentes y estructuras*.

Las nuevas problemáticas introducidas por esos procesos (condiciones extremas de sollicitación termo-mecánicas de la materia para el mecanizado y la soldadura FSW, ciclos extremos de temperatura y de cambio de estado para la fabricación aditiva por láser) generan gradientes de propiedades metalúrgicas y mecánicas. Predecir esos gradientes de propiedades es un prerequisite indispensable al estudio del comportamiento en servicio de los materiales. Los gradientes de propiedades obtenidos deben ser analizados y tienen una gran influencia en el comportamiento en servicio del componente fabricado, de un punto de vista tanto mecánico (fatiga) como químico (corrosión). A partir de los gradientes de propiedades mecánicas y metalúrgicas de las piezas, hay que ser capaz de

construir las herramientas de predicción y los criterios de dimensionamiento previo de los componentes. Los conocimientos teóricos desarrollados durante las dos fases deben ser sintetizados en las herramientas de diseño para poder facilitar la aplicación de esos procesos sostenibles.

El proyecto del LTC consiste en asociar el conjunto de competencias científicas (física de los procesos y del comportamiento de la materia) y técnicas (industrialización y diseño) para proporcionar las herramientas que permitan un mayor uso de los procesos sostenibles garantizando la calidad de los productos desde el punto de vista del comportamiento en servicio.

El LTC gira naturalmente en torno a tres ejes principales para desarrollar la temática descrita previamente:

- 1) Diseño sostenible y ecológico de componentes o estructuras realizados por los procesos de fabricación sostenible y Equipamientos para la fabricación sostenible,
- 2) Modelos y procesos para la Fabricación sostenible,
- 3) Comportamiento en servicio de componentes o estructuras con fuertes gradientes de propiedades.

Este proyecto se desarrolla en la primera temática del LTC con los objetivos siguientes:

- Desarrollo de una metodología que permita, a partir de cualquier geometría de superficie, definir la geometría de la estructura nodos/barras y facilite su diseño.
- Desarrollo de nuevas estructuras dinámicas y flexibles de bajo coste para ensamblaje de aeroestructuras de geometría complejas orientado a la Industria 4.0, como elemento dinamizador para la automatización y digitalización de procesos de ensamblaje Aeronáutico.
- Estructuras nodos/barras incorporando mallas que no sean obligatoriamente cuadradas y regulares (triangular, hexagonal...) y permitan adaptarse a superficies complejas de forma libre (componentes de simple curvatura de radio inferior a 2,5 m; componentes de doble curvatura...).
- Diseño de nodos articulables temporalmente.

2. CONTEXTO

La ingeniería aeronáutica ha tenido históricamente exigencias difíciles de satisfacer en cuanto a precisión, inspección y calibración durante las fases de ensamblaje y construcción [1]. Es necesario satisfacer requisitos notoriamente elevados en materia de alineamiento y metrología, que los fabricantes de este sector han satisfecho aplicando tecnologías de medición modernas para la inspección aeroespacial, el alineamiento, la ingeniería inversa y el control de calidad para la construcción de los componentes aeroespaciales. La precisión es clave en casi todos los aspectos de la fabricación y el ensamblaje aeroespacial, y la medición es esencial para lograrla. Es necesaria una medición de alta precisión, obtención de imágenes y comparación de piezas y estructuras compuestas dentro de los procesos de producción y control de calidad.

La fabricación de componentes en la industria aeronáutica está condicionada principalmente por la productividad y la calidad requeridas. En concreto, durante el ensamblaje de estructuras aeronáuticas se producen tensiones que pueden suponer la introducción en el utillaje de una carga para la que no fue concebido, pudiendo provocar un desajuste de la calibración del utillaje y su consecuente riesgo de fabricación de producto no conforme. La solución habitual en este tipo de situaciones suele estar asociada al análisis, medición y control de cada paso del proceso de montaje, siendo necesaria una gran cantidad de tiempo y la parada en muchos momentos del montaje para la realización de mediciones.

Además de enfrentarse a empresas de mucha mayor envergadura, la competitividad de las empresas aeronáuticas vascas del sector de aeroestructuras, se enfrenta en los mercados mundiales a tres amenazas fundamentalmente:

- Creciente intensificación de la competencia tecnológica resultante del apoyo que reciben otros países como Gran Bretaña, Alemania y Francia a la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías y productos, proponiendo un escenario de competencia agresiva en nichos de mercado en los que la industria vasca desea mantener su ventaja competitiva.
- Crecimiento de ciertos países como China, India y Brasil, que se han situado entre las 20 potencias mundiales en las últimas décadas. La capacidad financiera de estos países para superar las barreras de entrada en el sector aeronáutico, su clara vocación por entrar, y sus bajos costes de mano de obra, suponen un claro riesgo a largo plazo para el sector de aeroestructuras vasco.
- Ciertas economías emergentes con tradición en el sector aeronáutico, tales como Polonia o la República Checa, que se están posicionando para competir en un segundo nivel.

El enfoque que se debe emplear es el de desarrollar y mantener unas ventajas

competitivas sostenibles, basadas en los aumentos de la productividad y del valor añadido, gracias a una diferenciación tecnológica respecto a los potenciales competidores que del mercado global aeronáutico. Por tanto, para poder competir globalmente las empresas vascas del sector deben ganar competitividad vía el incremento de tecnología y la eliminación de procesos manuales, potenciando los trabajos humanos de alto valor añadido y dejando en líneas automatizadas procesos claves para el coste final de piezas.

Las operaciones de ensamblaje de una aeronave suponen más del 40% del trabajo en su fabricación. Estas operaciones impactan de forma considerable en la calidad final de la aeronave y en su coste y su ciclo de fabricación.

El utillaje que se utiliza actualmente para los procesos de fabricación y ensamblaje, mecanizado y ensayos de grandes componentes aeroestructurales deben cumplir unos requisitos críticos (posicionamiento, rigideces...), fabricándose ad-hoc para cada componente, no pudiendo ser adaptado a una familia de productos ni a variaciones en la cadencia de producción. Esto conlleva largos tiempos de diseño y fabricación y unos costes adicionales para el almacenamiento de estos utillajes. La mayoría de las operaciones de montaje son manuales y conllevan grandes costes y tiempo.

En la mayoría de los casos, se siguen utilizando diseños similares desde hace 50 años, son rígidos y pesados con un alto coste energético en las operaciones. No se adaptan al entorno, siendo meros elementos pasivos, espaciosos y costosos. De cara a las concepciones actuales de automatización demandadas por el sector, que implican flexibilidad para múltiples productos, múltiples procesos y múltiples programas, este tipo de soluciones tradicionales no son válidas.

La ingeniería aeronáutica ha tenido históricamente exigencias difíciles de satisfacer en cuanto a precisión, inspección y calibración durante el ensamblaje y la construcción de aeronaves debido a los elevados requerimientos de calidad que se les solicita. Esta necesidad junto con los requisitos de procesos más eficientes y automatizados, la reducción de los periodos de entrega y de costes, hacen necesaria la exploración de nuevos conceptos en este campo que permitan el diseño y fabricación de utillajes inteligentes capaces de sentir y de actuar, re-configurables, ligeros, modulares y re-utilizables, integrados dentro de la Industria 4.0.

3. OBJETIVOS

Durante los últimos años no se están desarrollando nuevos modelos de aeronaves, sin embargo, la demanda de producción de los modelos ya existentes va en aumento. Actualmente los procesos de fabricación y montaje están poco automatizados, la cadencia de producción de componentes aeronáuticos es muy baja y los utillajes de montaje son específicos para cada componente. Además, debido al actual incremento de los requisitos de producción, estas soluciones tradicionales no son válidas.

Por todo ello, se busca determinar un utillaje de montaje que sea flexible y versátil y que pueda cumplir con este incremento de los requisitos de producción del sector aeronáutico, que implican flexibilidad para múltiples productos, múltiples procesos y múltiples programas.

Se busca un utillaje de fabricación modular y flexible, constituido por una estructura formada por nodos, barras y actuadores, cuya geometría se pueda modificar de forma que se adapte, tanto a piezas sin ningún tipo de curvatura, es decir, “planas” (por ejemplo el ala de un avión), como a piezas de simple curvatura ($k=0$) con un radio “pequeño” (menor a los radios estudiados previamente) como puede ser la parte central del fuselaje de un avión,

Para conseguir esto se mejorará la estructura nodos/barras previamente diseñada incorporando mallas que no sean cuadradas y regulares (triangular, hexagonal...) y que permitan adaptarse a superficies de forma libre. Además, se diseñarán los nudos que unen dichas barras y que permitan el correcto movimiento de la estructura.

En otras palabras, se busca adaptar la estructura a geometrías de componentes con curvaturas más pronunciadas, es decir, adaptar la geometría de la estructura incorporando nodos orientables para que esta se adapte al fuselaje y al cono de cola de un avión. Para ello se reemplazarán ciertas barras por actuadores para convertir el utillaje en un sistema totalmente flexible (siempre y cuando los actuadores sean de bajo coste).

3.1. ALCANCE

En el proyecto se calcula y especifica todo lo necesario para la fabricación y el montaje de la estructura flexible nodos/barra diseñada, en donde entra principalmente el diseño de los nudos, el diseño del sistema de amarre de la pieza a fabricar y la elección de los actuadores, quedando fuera del alcance del proyecto el esquema eléctrico de los actuadores y el sistema de unión de la estructura al suelo.

4. BENEFICIOS

El desarrollo de un utillaje inteligente tendrá un impacto potencial alto en la mejora de la competitividad de la empresa AERNOVA, en cuanto a mejora de competitividad y ampliación de la capacidad de producción, lo que conllevaría un aumento de cuota de mercado, así como mejoras medioambientales.

5. ESTADO DEL ARTE

Hoy en día, el utillaje aeronáutico no contempla, o contempla mínimamente, un utillaje automatizado para fabricación en cadena, sustituyéndose siempre que sea posible por operaciones realizadas por control numérico. Abunda el utillaje para el empleo en operaciones manuales. Ha de mantener sus exigencias de precisión y coordinación durante muy largo tiempo, por lo que su mantenimiento se hace crítico.

Los costes asociados al utillaje pueden rondar el 10-20% del coste total del sistema de fabricación. Estos costes aumentan en aplicaciones para lotes pequeños ya que normalmente los utillajes son específicos para cada pieza [2]. Por lo tanto, desde hace unos años se lleva realizando un esfuerzo importante en el desarrollo de equipos cada vez más flexibles y eficientes en el campo de los utillajes.

En sectores como la aeronáutica, se requiere la geometría de utillajes más eficiente y precisa, así como controles dimensionales sobre estructuras y piezas de gran volumen.

El ensamblaje de paneles y secciones de fuselaje aeronáutico son operaciones muy manuales todavía. Para reducir los costes recurrentes y a la vez incrementar la producción por reducción del Lead Time de la operación, es necesaria la automatización mediante sistemas robóticos [3].

Las funciones de un utillaje tradicionalmente incluyen la localización y la fijación de la pieza, junto con la capacidad para soportar las fuerzas existentes durante el proceso de fabricación. La tendencia actual de fabricación es la utilización de utillajes que permitan un mayor grado de flexibilidad en su reconfigurabilidad y automatización. Habitualmente, los utillajes son diseñados como un subsistema, y de manera independiente a otros aspectos, como los tiempos de ciclo. Sin embargo, forman un mismo sistema máquina-utillaje-pieza proceso, cuyas interacciones pueden llegar a influir de manera determinante en el resultado final, afectando a la precisión, la calidad o el coste del componente fabricado.

Las fases de ensamblaje son particularmente complejas: En primer lugar, se parte de piezas o sub-ensamblajes que se deben posicionar de manera precisa dentro del utillaje.

A continuación, se incorporaban nuevas piezas al conjunto, necesitando de operaciones adicionales (taladrado, remachado...) para ir conformando el componente final. Durante el ensamblaje de estructuras aeronáuticas se producen tensiones que pueden suponer la introducción en el utillaje de una carga para la que no fue concebido, pudiendo provocar un desajuste de la calibración del utillaje y su consecuente riesgo de fabricación de producto no conforme. La solución habitual en este tipo de situaciones suele estar asociada al análisis, medición y control de cada paso del proceso de montaje, siendo necesaria una gran cantidad de tiempo y la parada en muchos momentos del montaje para la realización de mediciones.

Debido a las dimensiones generales del componente (metros) y las precisiones requeridas (décimas de milímetro) tradicionalmente se han utilizado utillajes fabricados ad-hoc para cada componente, estructuras rígidas y pesadas que evitaban deformaciones durante el proceso de montaje. El problema asociado a este tipo de utillaje y al propio proceso productivo, es que resulta complicada la automatización y que requiere de gran cantidad de operaciones manuales, y en consecuencia la cadencia de fabricación es baja. Durante los últimos años no se están desarrollando nuevos modelos de aeronaves, pero la demanda de producción de los modelos ya existentes va en aumento. Actualmente los procesos de fabricación y montaje están poco automatizados, la cadencia de producción de componentes aeronáuticos es muy baja y, los utillajes de montaje tienen una vida útil muy larga y son específicos para cada componente (figura 1). Los requisitos de producción del sector aumentan y las concepciones actuales de automatización demandadas por el sector, que implican flexibilidad para múltiples productos, múltiples procesos y múltiples programas, ponen de manifiesto que las soluciones tradicionales no son válidas.



Figura 1: Montaje tradicional en Aciturri de un Elevator para Dassault (izquierda) y montaje automatizado del fuselaje del Boeing 737 (derecha).

Durante el montaje del producto sobre el utillaje, las piezas se ven sometidas a deformaciones a lo largo del proceso de amarre, taladrado y remachado. El modo tensión implica que la pieza se deforma tendiendo a aumentar la presión de contacto con el

utillaje; mientras que en el modo compresión la pieza tiende a separarse del utillaje perdiendo el contacto con éste. Durante el proceso de montaje las distintas piezas del ensamblaje pueden estar trabajando en diferentes modos (tensión o compresión).

En las series cortas o piezas unitarias, los requisitos del utillaje son más exigentes porque hay que asegurar su funcionamiento con fiabilidad y tiempos de configuración del utillaje reducidos, por lo que factores como la flexibilidad o adaptabilidad toman mayor relevancia. Además de su facilidad de uso, se busca para los utillajes sobre todo que sus coeficientes de expansión térmica sean lo más similares al de producto, siendo suficientemente rígidos y precisos, con durabilidad y fáciles de manejar, modificar y reparar.

El ensamblaje representa hasta un 40% del coste total de la fabricación de una aerestructura debido a los problemas de mano de obra y calidad debido a las operaciones de taladrado de miles de agujeros por avión. Alrededor del 5% del coste total de fabricación de una aeronave o el 10% del coste de la aerestructura es causado por el uso de herramientas fijas.

5.1. UTILLAJES ACTUALES DE ENSAMBLAJE

El concepto básico para el ensamblaje de estructuras aeronáuticas es el “hierro” o Utillaje Específico (Dedicated Tooling), hecho a medida. Esos utillajes están hechos en acero y están diseñados para montar una estructura particular. Este concepto es la técnica más utilizada en el montaje de las aeronaves de hoy. Si se requieren cambios, se tiene que cortar parte del utillaje; diseñar nuevas piezas, fabricarlas y finalmente soldarlas o tal vez atornillarlas en la posición correcta. La consecuencia de esto es que este tipo de dispositivos no se vuelve a reconfigurar. Un “hierro” o una bancada determinan tanto la ubicación del ensamblaje como la posición de las características de ensamblaje tales como agujeros (figura 2).



Figura 2: Utillaje Especifico para el ensamblaje del ala (Airbus UK).

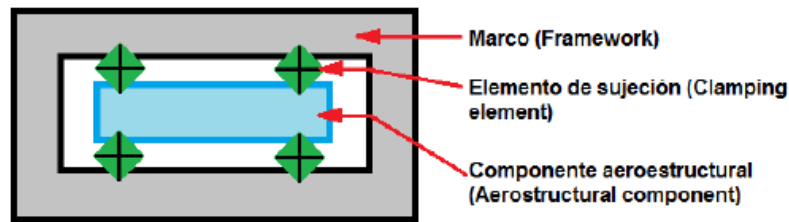


Figura 3: Categorización sencilla del utillaje para el ensamblaje.

5.2. UTILLAJE DE ENSAMBLAJE RECONFIGURABLE LOW COST

El proyecto ReFlex o proyecto Reconfigurable Flexible Assembly Tooling (Airbus Operations Ltd.) es un buen ejemplo de demostración y evaluación de concepto de utillaje flexible para satisfacer los objetivos de flexibilidad y reconfiguración a coste asequible para el montaje del ala [4]. Ofrece la posibilidad de reducir los costes y los plazos de entrega en todo el diseño, fabricación, instalación y fases operativas del proyecto utillaje.

Tanto en los utillajes convencionales como los reconfigurables, los elementos del sistema pueden ser categorizados. El marco es la estructura circundante de la plantilla y la sujeción es la parte que posiciona el componente dentro del marco (figura 3). Se desarrollan herramientas de diseño o "configuradores" en el entorno de software CAD para simplificar y facilitar el proceso de diseño [5]. Mediante el uso de estas herramientas de diseño, se genera automáticamente una lista de componentes. Esto incluye todos los detalles necesarios, tales como vigas, placas, tornillos y tuercas (figura 4). Del mismo modo, los configuradores generan automáticamente una lista de puntos de referencia claves para medir durante la instalación. El operador de metrología a continuación, utiliza esta lista de puntos de referencia como instrucciones sobre lo que debe medirse durante el proceso de instalación.



La flexibilidad en el proceso de diseño también significa que es mucho más fácil para dar cabida a cambios tardíos de diseño de productos. Como la mayoría de los elementos en el dispositivo son flexibles y reconfigurables, un cambio en el diseño del producto normalmente sólo implicará una pequeña cantidad de trabajo de diseño para cambiar la posición y reorientar los componentes para que se adapten. La figura 5 es un ejemplo de las diferentes posibilidades del concepto con una configuración con marco completo y su posterior realización, una configuración con viga superior solamente y otra con viga inferior.

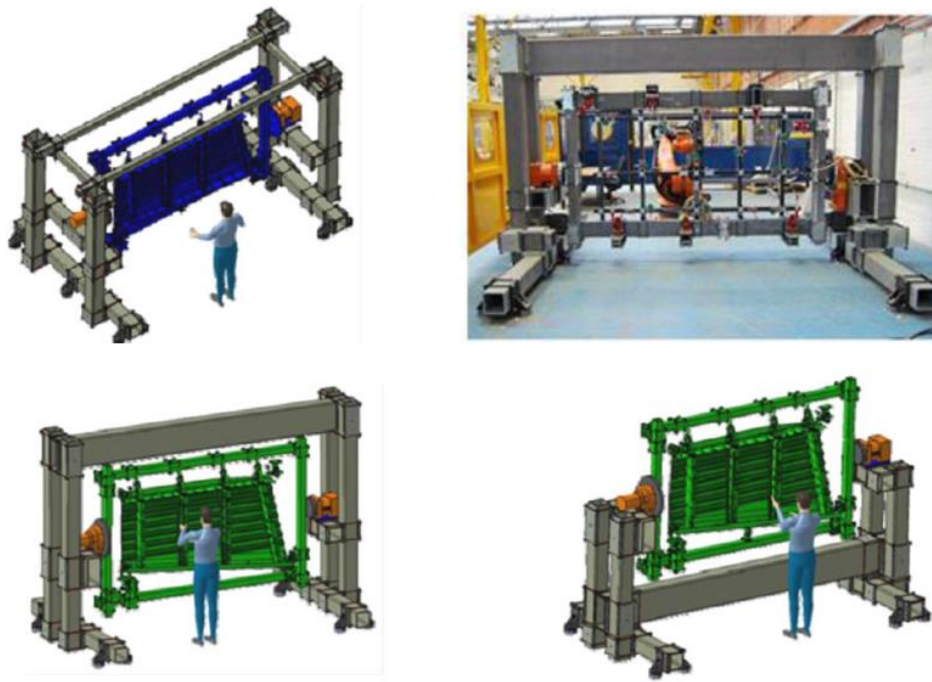


Figura 5: Ejemplo de Utillaje de ensamblaje Reconfigurable Low Cost: Configuración con marco completo; Utillaje ReFlex en funcionamiento.

Este tipo de solución necesita un gran número de piezas intermedias, la rigidez del sistema depende de la apertura entre pilares y vigas, y los puntos de referencia deben estar todos en el mismo plano. Es una solución con cierto interés pero que puede ser mejorada.

5.3. DISPOSITIVO DE SUJECCIÓN UNIVERSAL TORRESTOOL

TORRESTOOL es un dispositivo de sujeción universal multiflexible inventado por MTorres y diseñado para sujetar componentes estructurales del sector aeronáutico y aeroespacial durante su fresado o corte con láser.

El concepto modular de TORRESTOOL está formado por varios vagones que se mueven en la dirección del eje X, con distintos soportes por vagón, que se mueven en los ejes Z e Y. Cada vástago de soporte tiene una función de autoajuste en una inclinación de 45° con la copa de soporte al vacío en la parte superior. En determinadas aplicaciones, en su lugar encontramos una abrazadera de piezas.

Todos los vástagos de soporte con copas de vacío o abrazaderas se mueven simultáneamente en los ejes X/Y/Z y se bloquean de forma automática en sus respectivas posiciones finales. Los movimientos se accionan mediante servomotores y se controlan por CNC. Se utilizan guías en tierra, sistemas de cremallera y piñones, y sistemas de bolas para conducir los ejes.

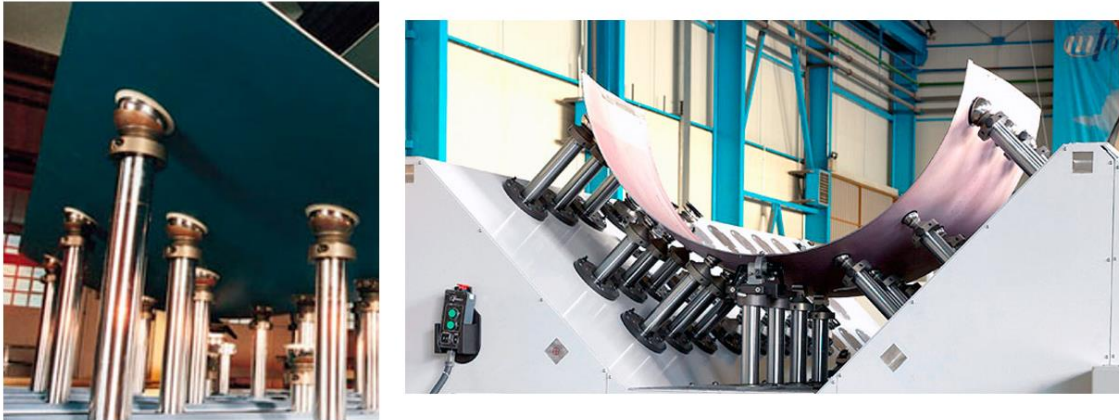


Figura 6: Concepto modular de TORRESTOOL.

El sistema de Utillaje Flexible TORRESTOOL maximiza la flexibilidad y eficiencia de la maquina con la que trabaja conjuntamente (TORRESMILL o TORRESLASER) generando un proceso *Lean* que elimina los utillajes dedicados tradicionalmente utilizados en la industria, reduciendo sustancialmente el costo recurrente de operación [15].

5.4. UTILLAJES PARA MECANIZADO DE PERFILES DE ALUMINIO CURVADOS: UHF – CHORD TRIMMER.

El utillaje universal Modig Chord Trimmer destaca por ser un utillaje flexible especial para el amarre de perfiles de aluminio extruido preformados para utilizar en fresadoras puente de 5 ejes. El utillaje UHF consiste en varias secciones independientes que se pueden posicionar sobre la mesa de la fresadora puente de 5 ejes según la geometría de la pieza a mecanizar. Los útiles de amarre o mordazas se pueden posicionar a 180° con 15 secciones de mordazas o a 360° con 30 secciones de mordazas formando un círculo.

Su funcionamiento está comandado por el control numérico CNC de la máquina fresadora de 5 ejes, y cada una de las secciones se mueve de forma independiente.

Con este sistema de utillaje flexible para mecanizado de piezas aeronáuticas tenemos la ventaja de tener unos tiempos de puesta a punto récord, en pocos segundos amarramos la pieza.

Cada una de las secciones tienen 2 movimientos controlados por CNC, uno de los movimientos en el eje longitudinal respecto al centro de la pieza y otro movimiento de giro del cabezal. Ambos movimientos tienen alta precisión de amarre.

Los puntos de amarre en cada sección consisten en:

- Un punto de apoyo y referencia para posicionar la pieza en el punto de referencia.
- Un brazo que gira y amarra por la parte inferior contra el punto de referencia, por un lado.
- Dos puntos de referencia fijos en el plano vertical como referencia.
- Dos garras móviles salen horizontalmente de la mordaza para amarrar la pieza hacia el soporte. Este movimiento es controlado mediante una leva.

Todos los útiles de amarre para piezas de aeronáutica se pueden cambiar de posición fácilmente para adaptar a perfiles de extrusión de nueva geometría. El tiempo de puesta a punto de estos utillajes es muy rápido.

El cabezal de cada sección o útil de amarre puede girar $\pm 180^\circ$ lo cual hace posible que se puedan amarrar una amplia variedad de piezas, desde piezas más o menos rectas a piezas con radios muy pequeños [16].



Figura 7: Utillaje flexible UHF-Chord Trimmer.

5.5. UTILLAJES RECONFIGURABLES DEMAT

La principal tendencia en el campo de los componentes estructurales es la desmaterialización de sus componentes estructurales, pasando de máquinas-rigidez con el objetivo de máquinas ligeras y robustas, como se ve en la figura 8. En ese sentido, se puede mencionar las soluciones innovadoras desarrolladas por TECNALIA (concepto DEMAT con participación de la UPV/EHU). Estas estructuras de tipo barras/nodos (bar-ball frame) permiten llegar a soluciones con alta rigidez disminuyendo de manera importante el peso. Son además totalmente desmontables y permiten reutilizar los elementos para configurar otro tipo de bancada para componentes diferentes.

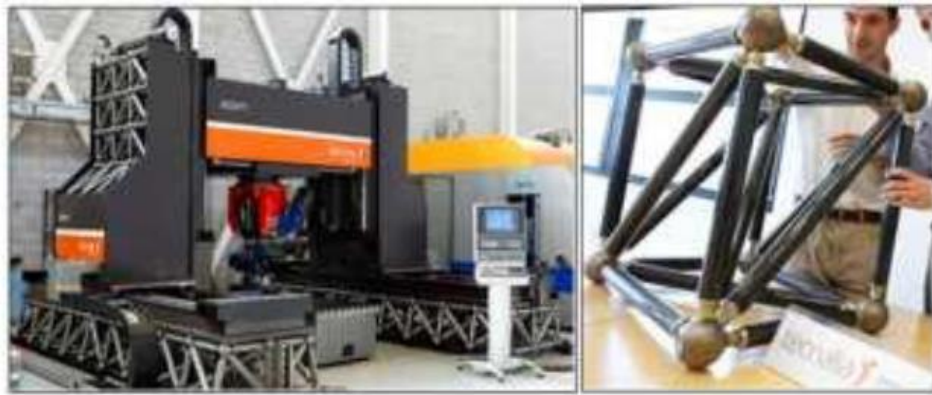


Figura 8: Estructura DEMAT (Dematerialized machines) en base a barras y nodos.

5.6. CONCEPTO JIGLESS O “SIN UTILLAJE”

La fabricación sin utillaje no significa que se prescindiera del utillaje y que el componente no sea sujetado y apretado. Elementos estructurales claramente sencillos seguirán siendo necesarios para sostener y soportar los componentes durante las operaciones de ensamblaje (figura 9), pero la filosofía es hacer que estos accesorios sean lo más genéricos posible [6-7]. La industria está avanzando hacia la fabricación digital, la integración perfecta del diseño y de la fabricación. Esto será facilitado a través del CAD-3D, del pre-ensamblaje digital, de utillajes flexibles, de la fabricación “sin Utillaje” y de la Metrología en 3D.

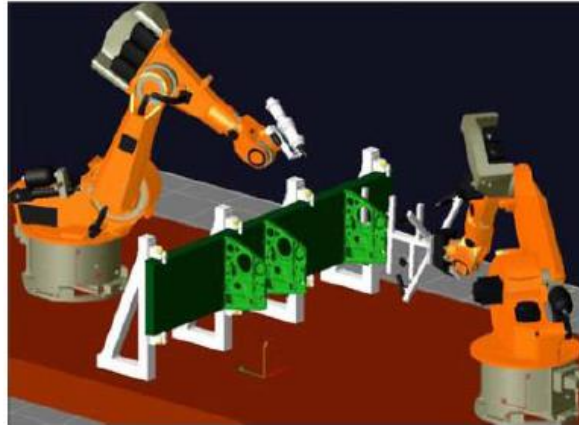


Figura 9: Concepto Jigless o “sin Utillaje”.

La principal diferencia entre una bancada y un elemento estructural es que ese dispositivo fijo localiza el ensamblaje, pero no determina la posición de las características como lo hace una bancada. Por lo tanto, los accesorios son mucho más simples que las bancadas y ofrecen más flexibilidad. Los elementos estructurales también pueden reconfigurarse mediante el uso de actuadores equipados con servomotores de acuerdo con las especificaciones del producto. Hay pocos ejemplos de este tipo de solución, y los elementos básicos elementales siguen de diseño clásico es decir basados en “hierros”.

5.7. SOLUCIONES DESARROLLADAS EN EL PROYECTO AERO3NAK

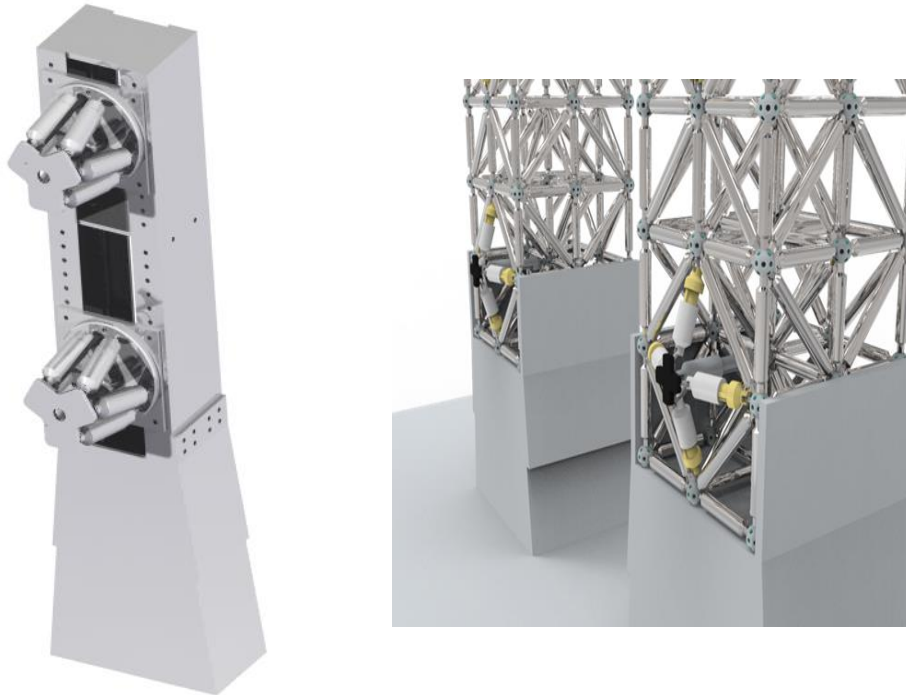
La parte innovadora de los conceptos basados en módulos de tipo barras/nodos consiste en asociar unos elementos que se puedan deformar por la presencia de actuadores y/o de barras cuyas dimensiones pueden variar manualmente asociadas a nodos articulados, y de elementos que sigan el desplazamiento de las partes móviles, pero sin deformarse.

El utillaje se adapta así a la geometría del componente y lo envuelve para un mejor posicionamiento y sujeción. La solución permite ensamblar piezas de cualquier dimensión y reconfigurarse para poder montar otro tipo de componentes que pueden ser totalmente diferentes cuando se cambia de producción. No existe actualmente propuesta de este tipo. Los obstáculos científicos y tecnológicos consisten en validar por CAD la solución (diseño de los diferentes componentes, definición de los actuadores...), determinar los volúmenes de accesibilidad cuando se deforma la estructura.

Es necesario también completar con un análisis por elementos finitos de la estructura para definir los materiales a utilizar para garantizar la rigidez del sistema (tubos

en acero, aleación de aluminio, material compuesto...).

Se ha diseñado dos soluciones diferentes. Una de tipo columna de diseño convencional (figura 10), la otra de tipo columna también, pero de diseño nodo/barra (figura 11). Las dos soluciones tienen una base fijada al suelo que es común. Para el ensamblaje de los dos componentes seleccionados de 4 y 6 m de largo se usan 3 columnas.



Figuras 10: Columna de diseño convencional: la columna completa con los dos hexápodos para el montaje del componente para ensamblar. Figura 11: Diseño de dos columnas con los actuadores integrados en la estructura.

El proyecto AEROTRESNAK (Elkartek 2017) ha demostrado la viabilidad de estructuras nodos/barras siempre y cuando se pueda incorporar materiales avanzados y/o sostenibles: aleaciones de aluminio, aceros en cantidades limitadas, materiales compuestos CFRP. Ese tipo de estructura es tan rígida como una estructura convencional con una masa mucho menor. Pero ha demostrado también sus límites. Una estructura nodos/barras rígidas con dos sistemas hexápodos en cada columna para posicionar la pieza, se queda limitado a geometrías de piezas sencillas y radios de curvatura importantes según los dos ejes. La figura 10 clasifica las superficies según su grado de complejidad.

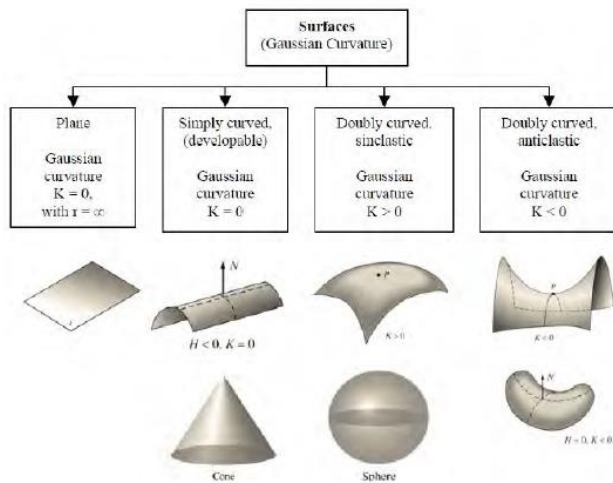


Figura 12: Tipos de superficies según su curvatura [8] - Montaje tradicional en Aernnova del cono de cola para Embraer – Radome y cockpit.

AEROTRESNAK ha permitido solucionar el primer caso (superficies planas) y parte del segundo (curvaturas simples con un radio superior a los 5 m). En el caso de la parte delantera de un avión (radome y cockpit) o del cono de cola, tenemos respectivamente una superficie simple, pero con un radio de curvatura pequeño (entre 1 y 2 m), y una superficie de doble curvatura. Para esos tipos de superficies, el utillaje debe conllevar más posibilidades o grados de libertad.

5.8. NUEVOS DISEÑOS DE UTILLAJE / ARQUITECTURA DE GEOMETRÍAS COMPLEJAS

Los procesos que conducen a la generación de una superficie se pueden dividir en modos geométricos de generación y procesos no geométricos que involucran un agente que da forma, por ejemplo, la gravedad de la tierra, la presión del aire o el pretensado. Para fines constructivos, uno de los métodos más convenientes para especificar superficies geoméricamente es considerarlos como caminos o trazas de líneas rectas y curvas, como se muestra en la figura 13. Aquí, las líneas rectas se usan normalmente para representar los ejes de los miembros estructurales, mientras que los puntos nodales de la red de ejes representan los puntos medios de los conectores físicos o las intersecciones teóricas de los ejes estructurales. Vale la pena mencionar que un gran grupo de superficies se puede definir en términos de la transformación homotética o dilatadora [9-11], donde se obtiene una superficie reticulada o facetada aplicando las combinaciones adecuadas de operaciones de simetría de traslación y dilatación, esta última en sus dos formas de expansión y contracción, sobre los elementos generadores. Una característica especial de

la transformación homotética es que se puede utilizar para generar estructuras reticuladas con mallas perfectamente planas manteniendo las líneas rectas de generación llamadas generatrices paralelas en el espacio 3D. Las superficies de revolución incluso se pueden definir desde un punto de vista homotético si los polígonos circulares alrededor del eje de la superficie se ven como generatrices, que pueden obtenerse entre sí mediante una dilatación central con respecto al eje de rotación y deslizándose a lo largo de la misma línea. Además, un gran número de superficies regladas implican una transformación adicional, a saber, la rotación, que conduce a superficies reticuladas con facetas no planas, como el paraboloides hiperbólico generado al traducir una línea recta a lo largo de dos líneas oblicuas en el espacio 3D, mientras permanece paralelo a un plano directivo.

El grupo más general de superficies es el de formas libres, cuya especificación geométrica se basa en las matemáticas y los procedimientos especiales resumidos bajo el nombre de NURBS, donde este término significa B-splines racionales no uniformes. Las superficies y técnicas NURBS permiten la especificación de prácticamente cualquier forma imaginable. A diferencia de las superficies algebraicas, como el cilindro, la esfera o los diversos paraboloides, que pueden especificarse directamente mediante ecuaciones fijas, las formas libres o las superficies NURBS requieren una construcción compleja de objetos matemáticos, como líneas, curvas y planos, fórmulas y procedimientos que interactúan para especificar o incluso crear un nuevo formulario de forma iterativa. El diseñador de formas prácticas rara vez se involucra en las matemáticas largas y complejas de las superficies de forma libre, pero utiliza programas especializados [12] donde los objetos abstractos y las funciones del sistema matemático se han implementado como herramientas CAD. Por lo tanto, estas herramientas se utilizan, incluso de manera intuitiva, para desarrollar, construir geoméricamente y manipular superficies de forma libre.

La parte inferior de la figura 13 muestra de manera esquemática varios componentes geoméricos, que están involucrados en el modelado NURBS de una superficie de forma libre. El diseñador normalmente comienza definiendo las líneas de contorno de toda la superficie y luego las divide en áreas o parches más pequeños y más simples, con la ayuda de líneas y curvas, para formar un marco aproximado. Aunque se pueden usar líneas y curvas simples para definir los segmentos del marco interno, una curva utilizada con mayor frecuencia es la spline, ya que permite describir cualquier forma. La densidad del marco generalmente está determinada por la complejidad y la suavidad de la superficie a modelar. Los límites de parches internos son, en general, secciones transversales significativas de la superficie y son instrumentales para el modelado de los parches. La suavidad de la forma o "imparcialidad" es el criterio habitual para dar forma a los segmentos de curvas y conectarlos a los nodos del marco. Los parches de superficie individuales se generan luego con la ayuda de funciones o herramientas de generación de superficie, que potencialmente cubren todo el inventario de formas geométricas individuales.

Una vez que se generan los parches de superficie, la siguiente acción es relacionarlos o conectarlos en sus límites comunes en términos de suavidad de curvatura, tangencia o proximidad simple. Al final, la superficie completa debe aparecer como una forma continua. Las superficies de forma libre en el diseño de envolturas de edificios suelen ser complejas y la definición de una forma final, más que una simple acción de modelado, es un proceso iterativo, relativamente largo, de modelado de formas, verificación de funciones, corrección y mejora.

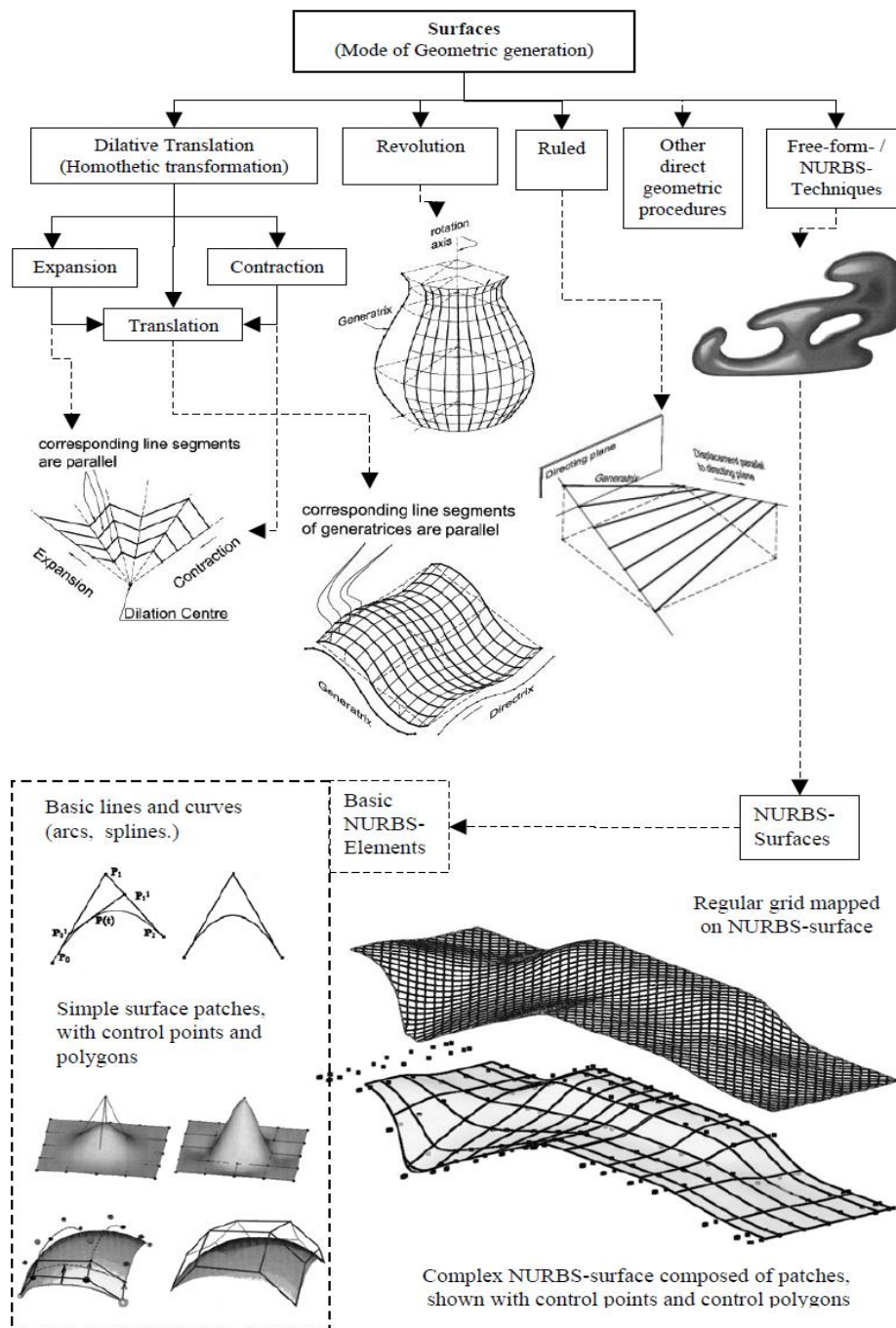


Figura 13: Modos geométricos de generación de superficies.

Las redes en superficies de forma libre para estructuras reticuladas se pueden obtener de varias formas, por ejemplo, extrayendo redes de curvas intrínsecas de la superficie, mediante la proyección paralela de una red plana externa sobre la superficie o mediante cualquier otro tipo de mapeo o construcción geométrica en la superficie, como se sugiere en la parte inferior de la figura 13.

La mayoría de los autores [13] hace referencia a los modos no geométricos de generar superficies para estructuras con el término métodos de búsqueda de formas, que a su vez pueden subdividirse en métodos experimentales, analíticos o numéricos. Colgante de redes o telas físicas, que es la forma tradicional que da origen a las conchas de rejilla de compresión; y las pompas de jabón, que señalan la forma de dar forma a membranas textiles neumáticas y pretensadas y redes de cables con una superficie mínima, son ejemplos bien conocidos de métodos de búsqueda de formas experimentales. Los métodos analíticos de búsqueda de formas, tales como el método de "densidad de fuerza" y el método de "relajación dinámica" para producir superficies analíticas mínimas, son principalmente contrapartes numéricas de los métodos físicos experimentales. No sería el caso para nuestras aplicaciones.

Uno de los objetivos será definir una metodología de uso de los elementos matemáticos que permiten definir una superficie para extraer los mapeos adecuados para representar nuestra superficie y definir la posición y la geometría que deberán tener nuestras columnas para posicionar la pieza respetando la geometría local, y las especificaciones asociadas a los componentes que ensamblar (rigidez del componente, distancia entre dos columnas...).

5.9. DISEÑO TECNOLÓGICO DE LOS NUDOS

5.9.1. SISTEMA *ORTZ* PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MALLAS ESPACIALES

El Sistema Estructural *ORTZ* para la construcción de mallas espaciales, diseñado por *LANIK* está constituido básicamente por dos tipos de elementos: nudos y barras.

El nudo es una pieza esférica dotada de una serie de orificios roscados según las direcciones de las barras que han de concurrir en el mismo. La disponibilidad en cuanto a las posibles direcciones de acceso de las barras es prácticamente total, quedando sólo limitada por el ángulo mínimo que deben mantener dos barras contiguas para evitar la interferencia entre ellas.

Las barras son de perfil tubular y llevan soldados en sus extremos sendos casquillos cónicos dotados de orificios axiales. Estos casquillos quedan atravesados por tornillos

especialmente diseñados que presentan dos cuerpos roscados con sentidos inversos de rosca, separados por una superficie troncocónica que es la que, tras el ensamblaje asienta en la parte exterior de las esferas. Este doble sentido de rosca permite que con un sólo sentido de accionamiento sobre el tornillo, se consigan dos aprietes, el de la esfera con el tornillo y el de éste con la barra por medio de las tuercas alojadas en el cuerpo de mayor diámetro del tornillo. El objetivo principal de estas dos tuercas es el de servir para el accionamiento del tornillo mediante un sistema de bloqueo por efecto de tuerca y contratuerca. Pero además, en su posición final, este conjunto garantiza el mantenimiento del apriete evitando que se afloje la unión por eventuales vibraciones.

Todo este sistema permite la retracción del tornillo hacia el interior de la barra de modo que ésta pueda ensamblarse y desensamblarse sin modificar las posiciones relativas de las dos esferas que une, incluso cuando estas se encuentran en su posición definitiva. Esto proporciona una extraordinaria flexibilidad en el proceso de montaje de la malla y facilita la eventual reposición de cualquier barra dañada [17].



Figura 14: Sistema ORTZ.

5.9.2. SISTEMA SEO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MALLAS ESPACIALES

El sistema estructural SEO para la construcción de mallas espaciales, también de LANIK, consta de barras y nudos, unidos entre sí mediante tornillos.

El nudo está constituido por una esfera monopieza forjada, con un número de orificios roscados, dependiente de la geometría y posición que la esfera ocupe en el espacio; estando restringido el número de éstos únicamente por el ángulo mínimo que determina la interferencia entre dos barras contiguas.

Las barras son de acero estructural. En los extremos de las mismas llevan soldados dos elementos troncocónicos que alojan tornillos diseñados especialmente.

Estos tornillos presentan un doble cuerpo: hexagonal y roscado. Sobre el cuerpo hexagonal se aloja un casquillo separador que determina la separación entre la esfera y la barra. La parte roscada se introduce en la esfera. La unión entre barra y esfera se realiza accionando mediante una llave el casquillo separador.

Mediante este procedimiento, se consigue el apriete requerido en la unión y se garantiza que no se produce ningún movimiento de afloje en el extremo opuesto de la barra.

El sistema de unión permite cambiar cualquier barra de la estructura, aun estando en su posición definitiva, accionando el casquillo en sentido inverso; con esto se consigue la retracción del tornillo hacia el interior de la barra, lo suficiente como para proceder a su liberación y sustitución por otra en caso necesario [18].



Figura 15: Sistema SEO.

5.9.3. NUDO DEL SISTEMA ONDDI.

El sistema “Nudo ONDDI” es un sistema constructivo concebido para la fabricación y montaje de estructuras tridimensionales atornilladas esféricas. Este sistema está constituido por nudos y barras.

El nudo se realiza mediante unas piezas esféricas en las que, mediante un mecanizado, se han realizado unos taladros roscados con asientos para las barras y para recibir los tornillos de unión de nudo a barra. De esta manera, cada esfera cuenta con diversos taladrados de conexión orientados según el ángulo de confluencia de cada barra. Además, como cada barra soporta cargas diferentes, la dimensión de cada tornillo que confluye en un nudo puede ser diferente.

Las barras son elementos de perfil tubular de acero, conformados en frío (o en caliente para espesores mayores de 12,5 mm), en cuyos extremos se han soldado unos platillos troncocónicos dotados de orificios coaxiales. Estos platillos quedan atravesados

por tornillos de alta resistencia. El juego de la tuerca bloqueada y la móvil permiten embocar el tornillo en la esfera.

La disponibilidad en cuanto a las posibles direcciones de acceso de las barras es prácticamente total, quedando sólo limitada por el ángulo mínimo que deben mantener dos barras contiguas para evitar la interferencia entre ellas.

Este sistema constructivo garantiza la correspondencia entre las solicitaciones determinadas por el cálculo y las que se producen realmente en la estructura, ya que la unión de las barras a las esferas se comporta en la práctica como una articulación, debido a la composición geométrica de la estructura y a la enorme diferencia entre la rigidez flexional de las uniones respecto de la rigidez axial de las barras.

Para lograr que la estructura esté correctamente montada debe darse un apriete mínimo a la tuerca móvil. Este apriete evita posibles movimientos de la tuerca en caso de vibraciones. Si se prevén grandes vibraciones por viento u otras razones, en lugar de la tuerca móvil se colocan dos tuercas finas que permiten bloquear una contra otra con el sistema de tuerca contra tuerca. Así se asegura la estabilidad del sistema contra vibraciones continuas [19].

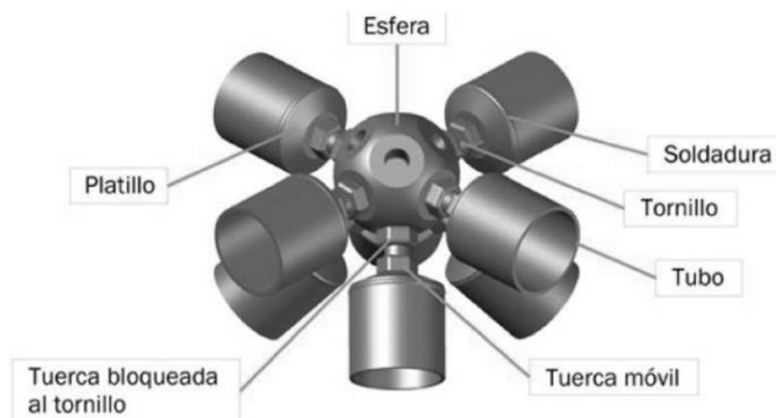


Figura 16: Sistema nudo ONDDI.

5.9.4. NUDO DE LA PATENTE EP 0 310 478 A1

La patente EP 0 310 478 A1 consiste en un armazón de metal constituido por paneles ensamblado mediante uniones atornilladas, soportado por unos cimientos, que forma una chimenea de refrigeración de una central energética [14]. La estructura contiene nudos como el que se observa en la figura 17, dichos nudos están formados por dos partes iguales (mitad y mitad del nudo) que permiten la introducción de la esfera de una unión de rótula, estas dos partes se unen mediante tornillos.

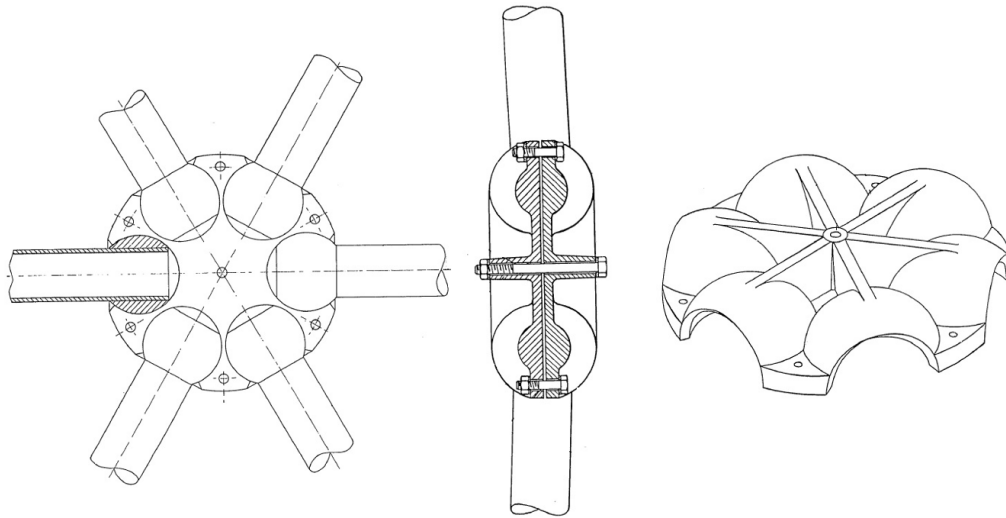


Figura 17: Nudo de la patente EP 0 310 478 A1.

6. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

6.1. DESCRIPCIÓN DEL UTILLAJE FLEXIBLE DISEÑADO

El utillaje flexible se puede dividir en tres partes: el conjunto de apoyo, el sistema de amarre y la columna (estructura nodos/barra). El conjunto de apoyo está formado por el soporte y los brazos, y consiste en un soporte sobre el cual se eleva y se sujeta, mediante uniones atornilladas, la columna. La columna es la parte principal del sistema y consiste en un entramado de barras de distinta longitud y nudos, la columna se puede dividir en pisos y en ella se encuentran integrados los 6 actuadores lineales que la dotan del movimiento necesario para poder llegar a la geometría final deseada. El sistema de amarre sirve para sujetar la pieza que se quiere fabricar, consiste en dos chapas de acero entre las cuales se encuentra la pieza a fabricar, estas chapas y la pieza se unen a ciertos nudos de la columna mediante un espárrago roscado y una tuerca.

Todo el ensamblaje de la estructura se ha realizado mediante es software de CAD *Inventor 2019* [20].

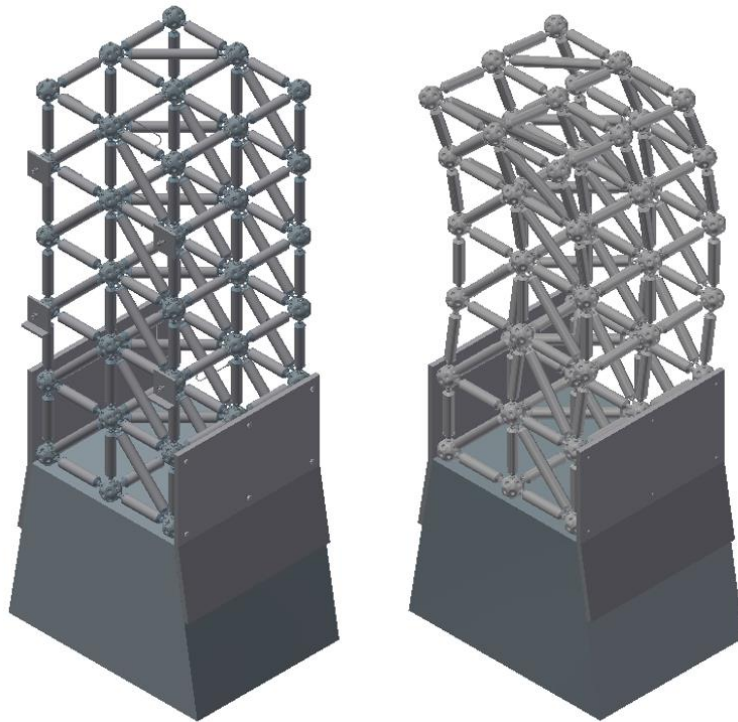


Figura 19: Utillaje flexible completo en las dos posiciones.

6.1.1. CONJUNTO DE APOYO

El conjunto de apoyo está formado por el soporte y los brazos. Los brazos se unen al soporte mediante soldadura, y ambos, brazos y soporte, se unen a los nudos de la columna mediante tornillos M10, de forma que la columna se quede firmemente sujeta. Tanto los brazos como el soporte están fabricados de acero F-1140.

El conjunto de apoyo tiene la siguiente forma:

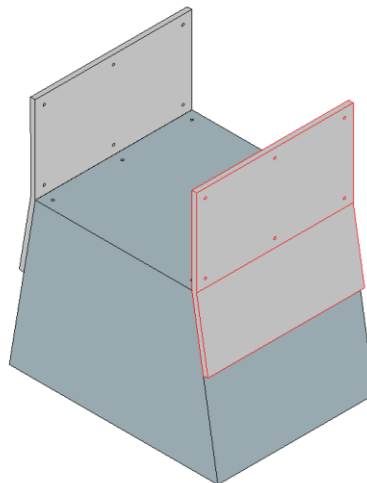


Figura 20: Conjunto de apoyo.

El conjunto de apoyo está unido al suelo y puede ser móvil o estar fijo. Así el apoyo puede ir empotrado al suelo o bien puede desplazarse a través de un carril o ir montado sobre un AGV (Automated Guided Vehicle).

6.1.2. COLUMNA

La columna, cuyo proceso de diseño se muestra en apartados anteriores, consiste en una estructura formada principalmente por nudos y por barras tubulares, pero que también consta de más elementos que se explican a continuación.

Como ya se ha dicho, la columna consiste en una celosía espacial, donde las barras trabajan exclusivamente bajo solicitaciones axiales de tracción o compresión. Con el fin de simplificar el montaje y diseño de la estructura, todos los nudos son iguales (el diseño de los nudos se muestra en apartados posteriores), y las barras, aunque las hay de tres longitudes diferentes, tienen todas el mismo diámetro y el mismo espesor.

La columna consta de un total de 54 nudos, 155 barras de tres longitudes diferentes, 310 conos de unión, 205 pernos esféricos, 117 tornillos de unión con el cono, 439 tuercas, 193 tapas para la unión de junta esférica y 6 actuadores electromecánicos lineales, que necesitan cada uno dos piezas auxiliares (machones de unión) para poder unirlos a los pernos.

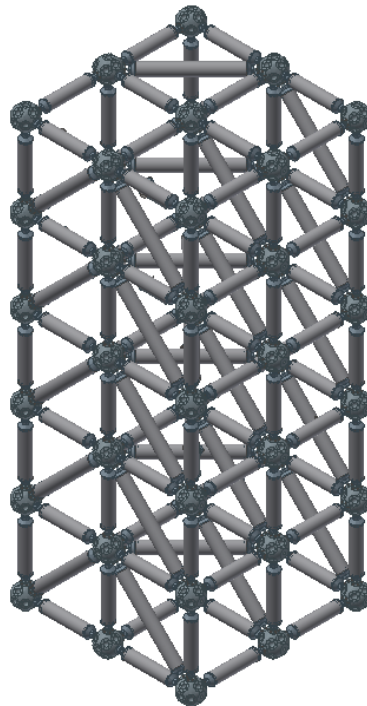


Figura 21: Estructura nodos/barra.

Las medidas de la columna se muestran en las siguientes imágenes. La distancia entre nudos es de 300 mm, por lo que la columna tiene una altura (distancia entre nudos del primer y último piso) de 1500 mm y una anchura de 600 mm. Así las vistas de alzado y perfil forman un rectángulo de 1500x600 mm y la vista de planta (desde arriba) forma un cuadrado de 600 mm de lado.

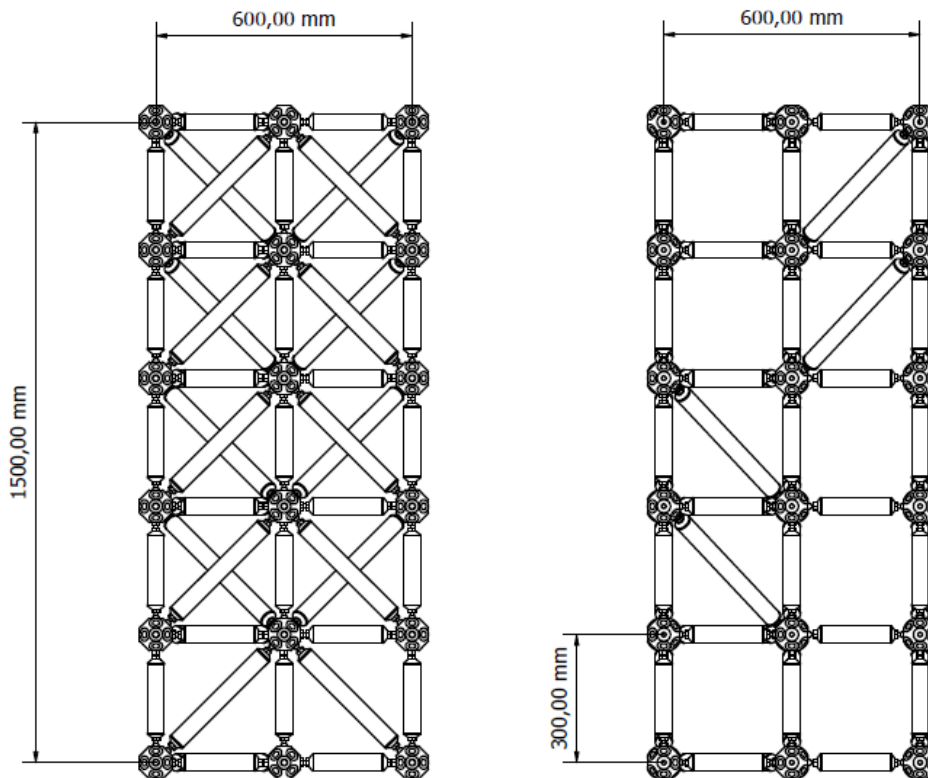


Figura 22: Alzado y perfil de la estructura (sin actuadores).

La columna se puede dividir en 6 pisos de nudos diferentes (figura 37), formados por 9 nudos cada uno. La única diferencia entre ellos es la posición del nudo central, que en los pisos segundo y tercero está orientado hacia el lado contrario que en los pisos cuarto y quinto debido a la posición de los actuadores (barras en el caso del tercer piso). La posición de este nudo es indiferente en los dos pisos restantes, ya que de ellos no parten ni barras ni actuadores en diagonal.

6.1.2.1 DEFINICIÓN DEL NÚMERO DE ACTUADORES Y DE SU POSICIÓN

La columna consta de 6 actuadores lineales, los cuales son responsables de los 6 grados de libertad de esta. Cada actuador aporta un grado de libertad a la columna nodos/barra que se corresponde con el movimiento lineal (expansión y retracción del actuador) de este.

Los 6 actuadores son exactamente iguales y se encuentran totalmente integrados en la estructura nodos/barras (sustituyen a las barras que se encontrarían en esa posición si se tratara de una estructura de 0 grados de libertad). Dependiendo de la variación de longitud que adopten, la columna alcanzará un radio de curvatura u otro.

Todos los actuadores parten del nudo central de cada piso y se conectan con los nudos de los extremos del piso inmediatamente superior, como se muestra en la siguiente imagen.

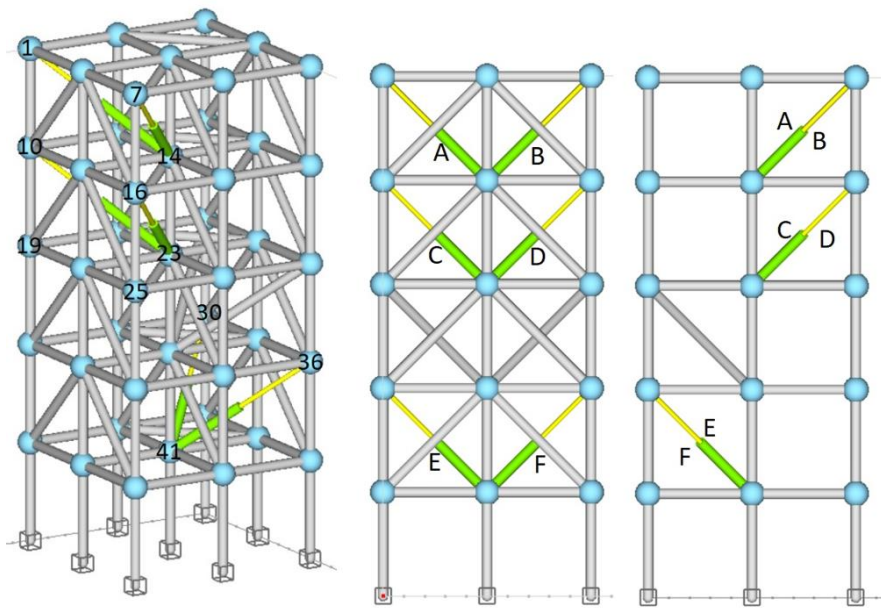


Figura 23: Posición y designación de los actuadores (marcados en amarillo).

El actuador designado con la letra A une los nudos 14 y 1, y el actuador B está conectado entre los nudos 14 y 7. Lo mismo ocurre con los actuadores que se encuentran por debajo, el C une los nudos 23 y 10, el D los nudos 23 y 16, el E los nudos 41 y 30 y el F los nudos 41 y 36.

Para que la columna pueda alcanzar la posición observada en la figura 65, los actuadores lineales E y F están orientados hacia el lado contrario que el resto de actuadores, es decir, conectan el nudo central con los nudos de la parte de atrás de la columna en vez de con los de la parte de delante. Si los 6 actuadores estuvieran orientados hacia el mismo sitio, se lograría un movimiento como el de la figura 62.

Gracias a esta orientación distinta de los actuadores E y F, se puede prescindir de los actuadores del piso superior, colocando barras en su lugar. Esto es debido a que, como se puede apreciar en la figura 28, las barras verticales que unen los pisos 2 y 3 se mantienen siempre formando 90° con el suelo (no se inclinan como el resto de barras que están inicialmente en vertical) ya que, como se puede observar en la figura 30, el centro

de dichas barras coincide con el eje horizontal de la circunferencia a la que se adapta la estructura.

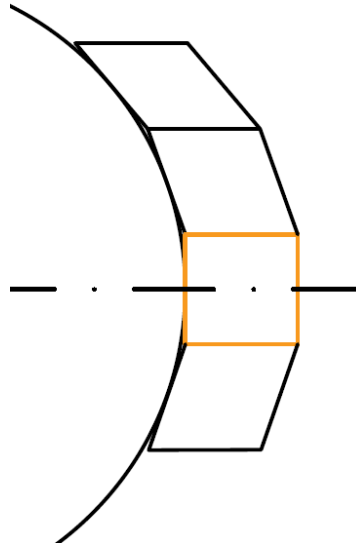


Figura 24: Esquema de una parte de la columna adaptada a una circunferencia.

En la figura 24 se aprecia lo explicado anteriormente, la diagonal del cuadrado naranja no varía independientemente del radio de la circunferencia a la que se adapta la columna, por lo que en ese piso se puede prescindir de actuadores.

6.1.2.2. DISPOSICIÓN DE LAS BARRAS Y LOS NUDOS

Como se observa en la imagen inferior, cada piso está formado por 13 barras y 9 nudos, que forman un cuadrado de 600 mm de lado, dentro del cual se encuentran cuatro cuadrados más pequeños de 300 mm de lado, en uno de los cuales (el de arriba a la izquierda) hay una barra extra en diagonal, y por tanto de distinta longitud a las demás, que lo divide en dos triángulos rectángulos.

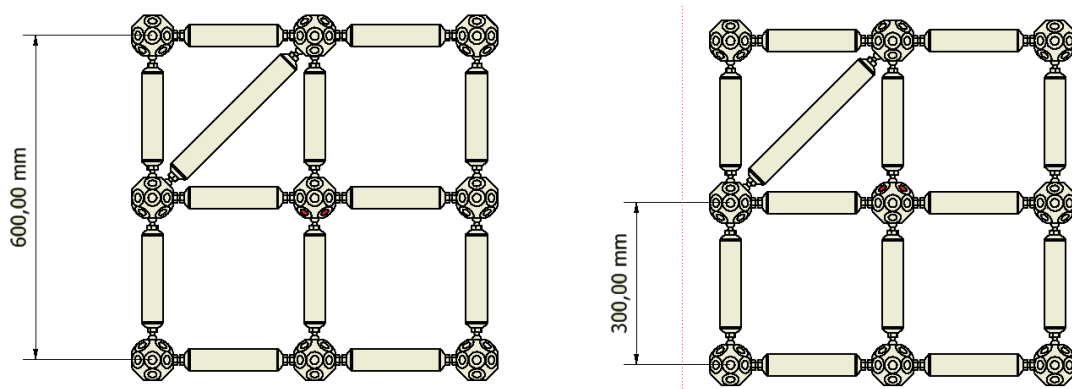


Figura 25: Dos tipos de pisos (agujeros semiesféricos en rojo orientados hacia distintos lados).

Entre piso y piso se encuentran 9 barras dispuestas en vertical que dejan una separación de 300 mm entre los nudos de los pisos y 6 barras dispuestas en diagonal (las que se observan en la vista de alzado) que unen los nudos de los extremos de un piso con el nudo central del piso inmediatamente superior que se encuentra en su mismo plano vertical con el fin de aportar rigidez a la estructura. Entre los pisos también se encuentran los actuadores (o barras entre los pisos 3 y 4), pero no se muestran en la siguiente imagen con el fin de poder observar mejor la estructura.

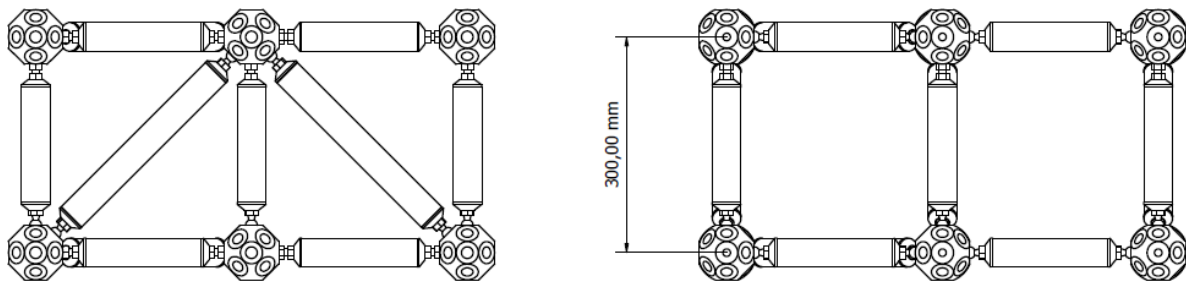


Figura 26: Alzado (izq) y perfil (dcha) de las barras existentes entre pisos.

En la vista de perfil no se colocan barras en diagonal debido a que la longitud de la diagonal de los dos cuadrados que conforman la vista varía en el momento en que la estructura comienza a deformarse.

6.1.2.3. DESCRIPCIÓN DE LAS BARRAS

Las barras son, junto con los nudos, los elementos más importantes del sistema, estas consisten en un tubo hueco que puede ser de acero, aluminio o de composite. Según su material la forma de unión con los nudos se realiza de maneras diferentes.

6.1.2.3.1. Solución para barras de acero o aluminio

Todas las barras están formadas por un tubo hueco, un cono de unión a cada lado del tubo y un perno esférico o un tornillo (dependiendo del tipo de unión con el nudo) también a cada lado del tubo con sus respectivas tuercas. El cono hace de nexo de unión entre el tubo y el tornillo o el perno, y se une al tubo mediante soldadura.

Hay tres tipos de combinaciones de barras según las uniones con los nudos:

- Barras con tornillos a ambos lados del tubo:



Figura 27: Configuración de barra con doble tornillo

- Barras con pernos esféricos a ambos lados del tubo

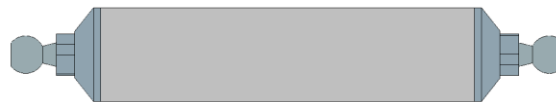


Figura 28: Configuración de barra con doble perno esférico.

- Barras con un perno esférico en un lado del tubo y un tornillo en el otro lado



Figura 29: Configuración de barra con tornillo y perno esférico.

Para poder ver con claridad dónde va montada cada tipo de barra se va a mostrar a continuación una imagen que muestra el alzado, la planta y el perfil de la unión de dos pisos en la que cada tipo de barra tiene un color diferente, siendo el rojo para las barras con doble tornillo, el verde para las barras con doble perno esférico y el azul para las barras con tornillo y perno esférico. Esto es así para toda la columna.

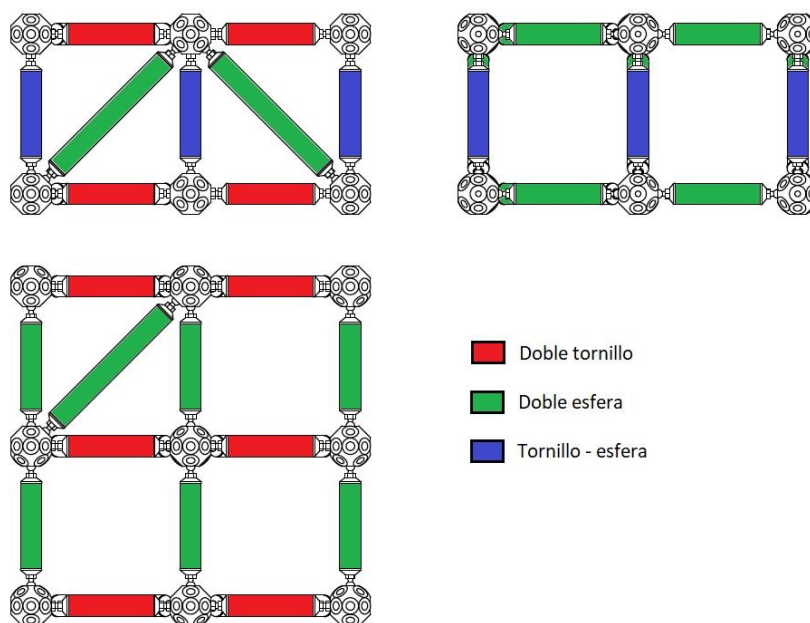
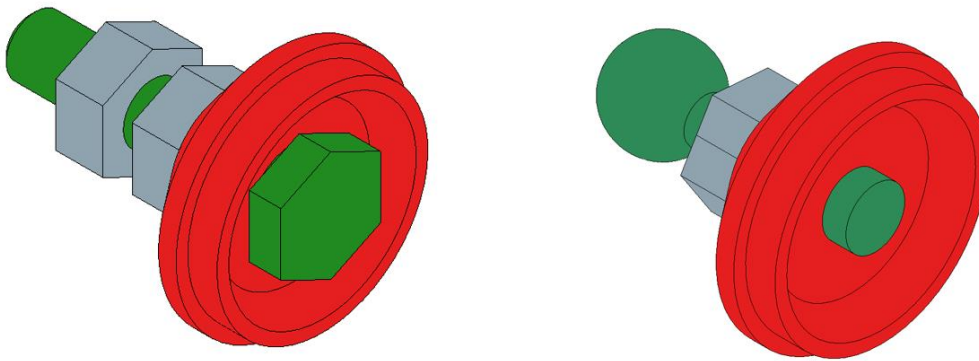


Figura 30: Alzado, planta y perfil de la unión entre pisos.

El conjunto cono + tuercas + tornillo/perno consiste en la unión de un tornillo o un perno esférico con el cono mediante una tuerca. Así, el cono puede unirse mediante soldadura al tubo y el tornillo o el perno (según el tipo de unión que se requiera) se puede introducir en el correspondiente agujero del nudo.

Gracias a este conjunto se produce la unión de los tubos con los nudos y además permite un montaje de la estructura relativamente “sencillo”.



Figuras 31 y 32: Cono + tuercas + tornillo M10 y cono + tuerca + perno esférico.

El accionamiento de las tuercas presentes en ambos conjuntos permite enroscar o desenroscar el perno o el tornillo, pudiendo variar así la longitud entre nudos unos milímetros. Esto permite un juego que hace posible el movimiento de la estructura, ya que cuando esta comienza a moverse, el ángulo de los nudos cambia, incrementándose la distancia entre los puntos de unión de las barras y los nudos unos pocos milímetros.

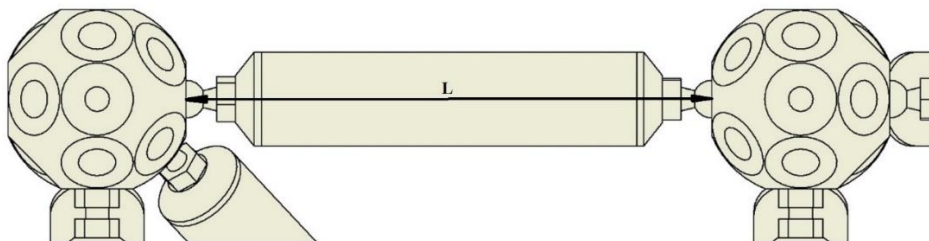


Figura 33: Posición inicial de los nudos.

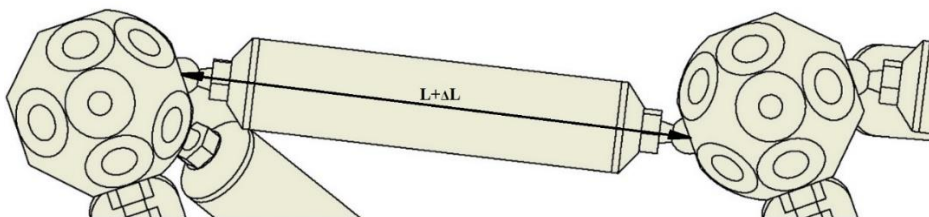


Figura 34: Posición final de los nudos.

6.1.2.3.2. Solución para tubos de composite

Si los tubos son de material compuesto (composite) la solución adoptada para hacer de nexo de unión entre el tubo y el tornillo o el perno esférico consiste en una pieza de aluminio, similar al cono, pero con la parte que se introduce dentro del tubo más larga, que se fija al tubo mediante crimpado electromagnético. Ésta es una solución tecnológica que consiste en la unión de la pieza al tubo mediante un anillo exterior también de aluminio, dicho anillo se comprime mediante la acción de un campo magnético, comprimiendo a su vez el composite del tubo sobre el la parte del cono que se encuentra dentro del tubo, quedando fijas las tres piezas. Como consecuencia de la compresión del composite del tubo en los extremos donde se colocan los conos, se produce un aumento de longitud del tubo.

Por lo demás, es sistema de funcionamiento del conjunto formado por este nuevo cono, el tornillo o perno y las tuercas es exactamente igual al descrito en el caso anterior.

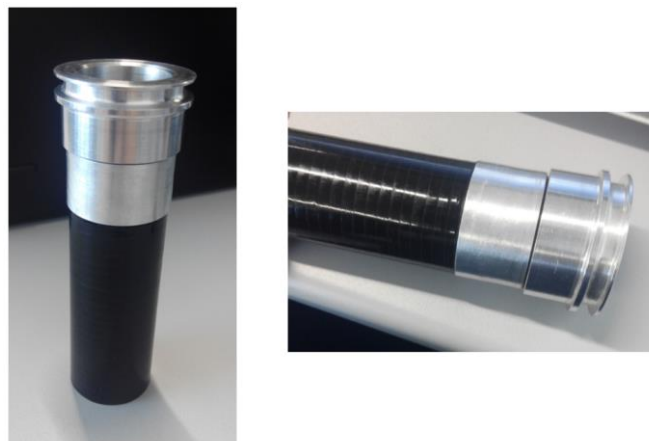


Figura 35: Ejemplo de la unión entre un tubo de composite y una pieza de aluminio mediante gripado electromagnético.

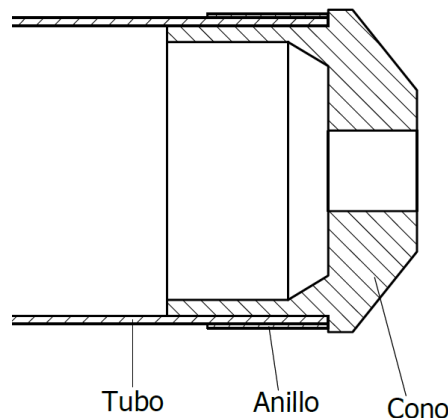


Figura 36: Esquema de la unión por soldadura electromagnética.

6.1.2.4. NUDOS

Los nudos tienen dos tipos de agujeros: roscados y semiesféricos. En estos últimos se da la unión de junta esférica, en la que es necesaria una tapa (atornillada al nudo) que cubra la segunda parte hemisférica de la esfera del perno para que pueda funcionar (figura 37).

La unión del nudo con la tapa no cubre la esfera del perno por completo, queda, además del agujero superior de la tapa, un espacio de unos 0,5 mm entre base inferior de la tapa y la cara plana del nudo para permitir el movimiento libre de la unión, y así, cuando se halla alcanzado la geometría deseada de la estructura, se aprietan los tornillos reduciendo esta distancia de 0,5 mm, permitiendo que la unión quede bloqueada debido al rozamiento entre la tapa y el perno.

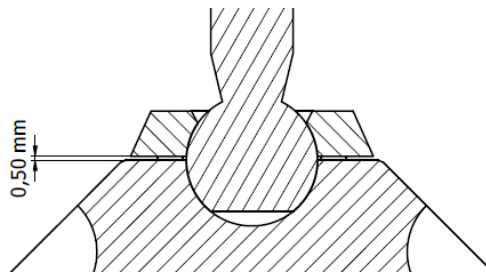


Figura 37: Distancia entre la tapa y la cara plana del nudo.

6.1.2.5. UNIÓN ENTRE NUDOS Y ACTUADORES

En este apartado se describen dos alternativas para unir los actuadores lineales de la columna y los nudos. La primera solución consiste en unir el actuador a los nudos mediante pernos esféricos como los usados en las barras. La segunda solución consiste en unir el actuador y los nudos mediante una junta cardan o junta universal.

6.1.2.5.1. Unión mediante pernos esféricos

En esta solución el perno esférico se enrosca en una pieza intermedia que hace de nexo de unión entre el actuador y el perno. Esta pieza, cuyas dimensiones se muestran en el apartado 7, tiene forma cilíndrica y posee un taladro roscado en un extremo donde se enrosca el perno y un agujero con un diámetro igual al vástago del actuador en el otro extremo para hacer posible la unión con el actuador. Este machón de unión se encuentra en ambos extremos del actuador, tal y como se muestra en la figura 38.

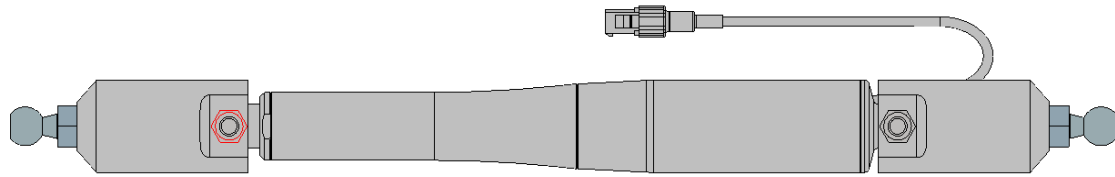


Figura 38: Actuador con pernos en ambos extremos.

Esta es la solución para la que se realiza el presupuesto y la que se muestra en los planos del Anexo I.

6.1.2.5.2. Unión mediante juntas cardan

En esta solución, propuesta como una alternativa a la anterior, la unión del actuador con los nudos de sus extremos se realiza mediante dos juntas cardan iguales (una en cada extremo del actuador). El agujero interior de estas juntas tiene el mismo diámetro que el vástago del actuador, para su correcto ensamblaje. Así, en cada uno de los extremos del actuador una horquilla de la junta cardan se une al actuador y la otra al nudo mediante un sistema igual al de las barras (sistema *ONDDI*), un cono, soladado a la segunda horquilla de la junta cardan, con un agujero interior que acoge un tornillo, tornillo que a su vez se enrosca al nudo.

Para esta solución el nudo a utilizar es diferente al utilizado en la anterior, ya que el agujero del nudo que en la primera solución era semiesférico (para acoger al perno) ahora es un agujero roscado.

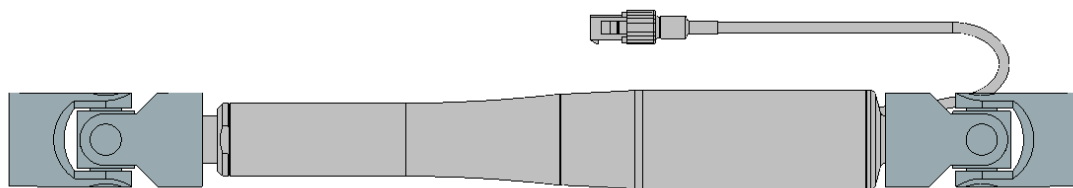


Figura 39: Actuador con juntas cardan en ambos extremos.

6.1.3. SISTEMA DE AMARRE

El sistema de amarre diseñado para sujetar la pieza a fabricar se basa en los puntos de referencia que vienen dados en dicha pieza. Se supone una pieza cuyos puntos de referencia coincidan con la posición de los nudos 10, 16, 28 y 34 (figura 77) de la columna. Así, cada punto de referencia consiste en un agujero que se posiciona sobre un

espárrago con doble rosca, espárrago que por un lado se une al nudo y que, por el otro, gracias a una tuerca, se produce la fijación de la pieza que se quiere fabricar.

Para que la pieza no esté en contacto directo con la tuerca y con el nudo (lo que provocaría un posible deterioro de esta) se coloca una chapa de acero a cada lado de la pieza, una es una pletina con forma cuadrada y la otro una especie de arandela, pero más grande.

En los nudos 10 y 16 la pletina tiene un saliente sobre el que se apoya la pieza a fabricar, en este saliente se coloca un elastómero para el correcto apoyo y para que la pieza no se deteriore en contacto directo con el saliente de la pletina.

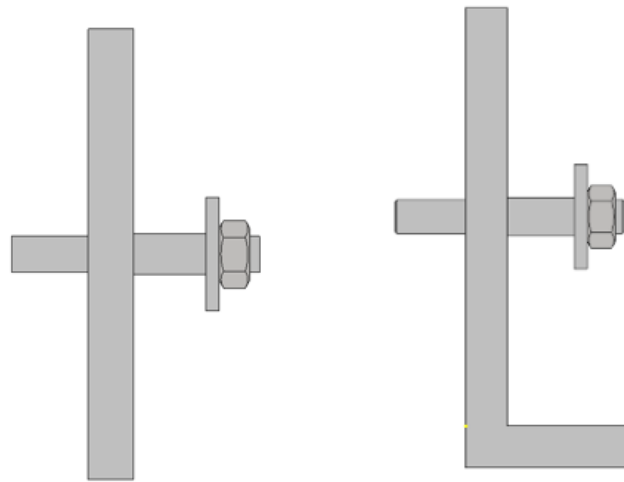


Figura 40: Conjuntos de amarre superior (izq) e inferior (dcha).

6.2. DIMENSIONAMIENTO DE LOS COMPONENTES

Todos los elementos que componen el utillaje han de diseñarse de forma que sean funcionales y puedan ser fabricados con un coste razonable. El diseño se ha realizado mediante el software de diseño asistido por ordenador (CAD) *Inventor2019*.

Como ya se ha mencionado en el apartado anterior, el utillaje está compuesto por el conjunto de apoyo y por la columna. El conjunto de apoyo se compone del soporte, los brazos y los tornillos que unen estos elementos con los nudos de los dos pisos inferiores de la columna. La columna se compone de tubos de acero, conos de unión, nudos orientables, actuadores integrados y otros elementos comerciales para unir los ya mencionados, como son los tornillos, las tuercas, los pernos y las uniones cardan (si se utiliza la segunda alternativa como unión entre actuadores y nudos).

Las dimensiones de todos estos componentes están detalladas en los planos pertenecientes al Anexo I.

6.2.1. SOPORTE

Adopta la forma de una pirámide truncada formada por paneles de acero de espesor 20 mm, la cual tiene una base inferior de dimensiones 900x676 mm y una base superior cuadrada de 676 mm de lado. Tiene una altura de 672 mm y en su base superior hay taladrados 6 agujeros de 10,5 mm de diámetro necesarios para poder atornillar el soporte a la columna.

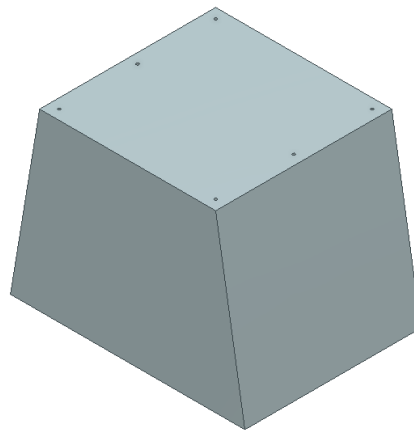


Figura 41: Soporte o apoyo.

6.2.2. BRAZOS

Los brazos sirven para conformar la unión rígida entre el soporte y la columna. Son dos y se han diseñado con el fin de que la parte inferior pueda ir soldada al soporte y la parte superior atornillada a la columna mediante 6 tornillos de métrica M10, por esto, cada brazo dispone de 6 agujeros de 10,5 mm de diámetro en la parte de superior. Para poder adaptarse a la geometría del soporte, la parte inferior forma con la superior un ángulo de 170,5°. Los brazos tienen la misma anchura que el soporte, 676 mm. Las chapas con las que están fabricadas tienen un espesor de 20 mm, al igual que el soporte. Antes de ser doblada, la chapa inicial forma un cuadrado de 676 mm de lado.

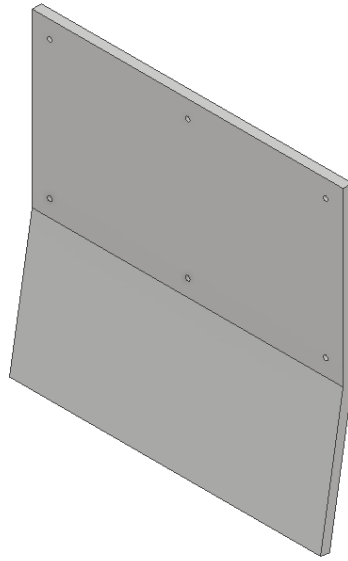


Figura 42: Brazo.

6.2.3. TUBOS

En la columna hay tres longitudes diferentes de nudos. Los tubos que se encuentran donde la separación entre nudos es de 300 mm, que son la mayoría, tienen una longitud de 160 mm. Los tubos colocados en las diagonales, bien sea en horizontal o en vertical tienen una longitud de 284,3 mm. Por último, los tubos colocados entre los pisos de nudos 3 y 4 que están dispuestos de la misma forma que los actuadores tienen una longitud de 380 mm.

Todos los tubos tienen un diámetro exterior de 40 mm y uno interior de 36 mm, y, por tanto, un espesor de 2 mm.

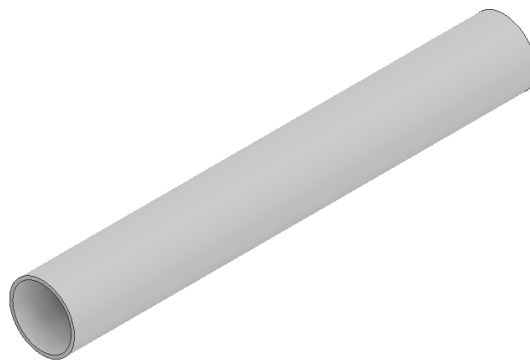


Figura 43: Tubo.

6.2.4. CONOS

Los conos o platillos son los elementos de transición entre el tubo y el tornillo y tuerca o perno y tuerca. El diseño de cada platillo se corresponde a la combinación entre el diámetro del tubo y la métrica y calidad del tornillo. Estos van soldados al tubo, dejando un hueco de 1 mm para el cordón de soldadura.

Los conos en donde se alojan pernos esféricos tienen su agujero interior roscado para poder montar el sistema y poder jugar con la tuerca. Los conos que alojan tornillos no tienen el agujero roscado, ya que se produce la unión mediante una tuerca, y en el tornillo se encuentra otra tuerca para ajustar la unión con el nudo.

El cono tiene una longitud total de 16 mm y el agujero pasante un diámetro de 10,5 mm si en él se aloja un tornillo o una rosca de métrica M10 si en él se aloja un perno esférico. La parte con forma de tronco de cono de la pieza tiene un diámetro menor de 20 mm de diámetro y uno mayor de 40 mm (diámetro exterior del tubo) y una distancia entre ambos de 11 mm. Seguida de la parte troncocónica sigue un cilindro de diámetro 40 mm y una longitud de 3 mm. La última parte de la pieza consiste en otro cilindro de 36 mm de diámetro (diámetro interior del tubo) y una longitud de 5 mm en cuyo interior se encuentra un agujero troncocónico de diámetros 32 mm y 26 mm, situándose el diámetro mayor en la parte final de la pieza.

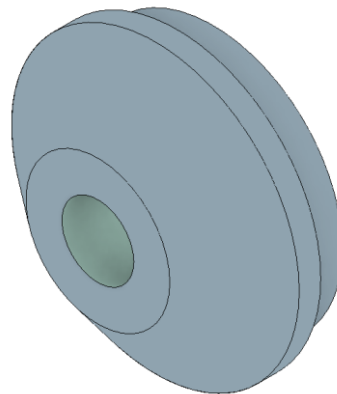


Figura 44: Cono.

6.2.5. NUDOS

El proceso de diseño de los nudos sus dimensiones se detallan en el apartado 9.2. Estos consisten en una esfera con diversos agujeros, tanto semiesféricos con un diámetro de 16 mm, como taladros roscados con una profundidad de 22 mm y una rosca M10.

La esfera que conforma el nudo tiene un diámetro 82 mm y en su superficie se hay mecanizadas caras planas de perímetro circular concéntricas con los agujeros que permiten la colocación de las tapas si se trata de una unión de junta esférica o el correcto asentamiento de la tuerca si se trata de una unión atornillada. En estas caras planas hay taladrados 6 agujeros roscados M3 de 10 mm de profundidad para la colocación de las dichas tapas.

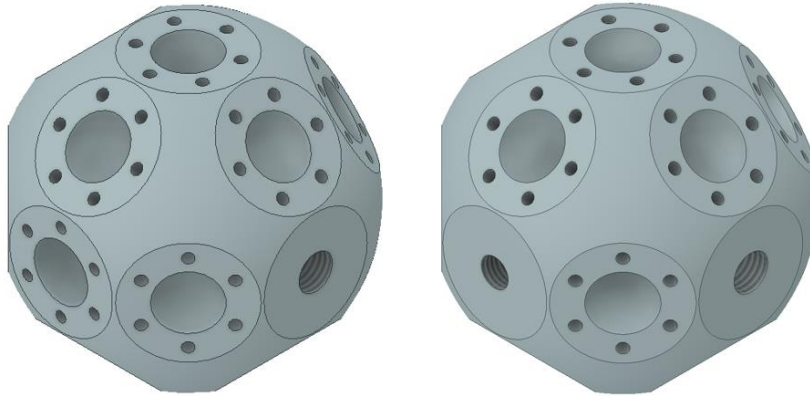


Figura 45: Nudos utilizados.

6.2.6. TAPAS

En la estructura hay sobre todo uniones de junta esférica, de ahí los agujeros semiesféricos de los nudos, pero para que la unión se pueda dar, hace falta otra pieza que cubra la parte hemisférica del perno esférico que no esté introducida en el agujero del nudo. Para esto se crea una tapa.

Esta tapa tiene forma de tronco de cono, con una base inferior de 29,55 mm de diámetro, una base superior de 24,58 mm de diámetro y una altura de 5,5 mm. En su base inferior tiene un agujero semiesférico (al igual que los nudos) de radio 8 mm para acoger al perno esférico. De su base superior parte un agujero cilíndrico de 13,2 mm de diámetro necesario para poder introducir el perno, además este agujero tiene un chaflán cuya función es permitir un mayor ángulo de giro del perno respecto al nudo. En la tapa hay fabricados 6 agujeros pasantes con refrentado para alojar los tornillos M3 que unen esta tapa con el nudo.

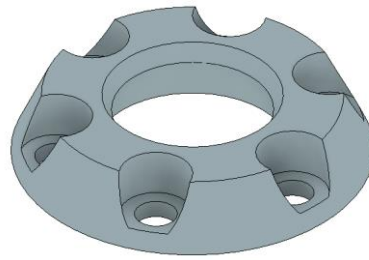


Figura 46: Tapa.

6.2.7. ESPÁRRAGO

Los espárragos, necesarios para que se pueda dar la sujeción de la piza a fabricar su pueden dividir en tres partes: un extremo roscado M8 de 27 mm de longitud que va unido al nudo y donde se posiciona la pletina grande, una parte central de 10 mm de diámetro y 16 mm de longitud con dos caras planas separadas 9 mm para poder atornillar el espárrago donde se coloca la pieza a fabricar (el diámetro y la longitud tiene que ser igual al de los agujeros de referencia y al espesor de la/s de la/s pieza/s a fabricar, pero se supone de 10 mm y 26 mm) y otro extremo con rosca M8 de 12 mm de longitud donde se coloca la pletina circular y la tuerca que aprieta todo el conjunto.

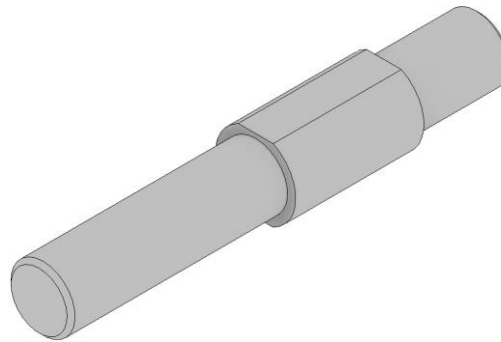


Figura 47: Espárrago.

6.2.8. PLETINAS

Las pletinas son parte del sistema de amarre y consisten en chapas de acero. La pletina usada en el sistema de amarre superior es cuadrada de 100 mm de lado y 10 mm de espesor. La pletina circular es mucho más pequeña, tiene 25 mm de diámetro y 3 mm de espesor. La pletina usada en el sistema de amarre inferior tiene las mismas dimensiones que la usada en el superior, solo que tiene un saliente de 30 mm en la parte de abajo. Las tres tienen en su centro un agujero pasante de 8,5 mm de diámetro para que pueda pasar el espárrago.

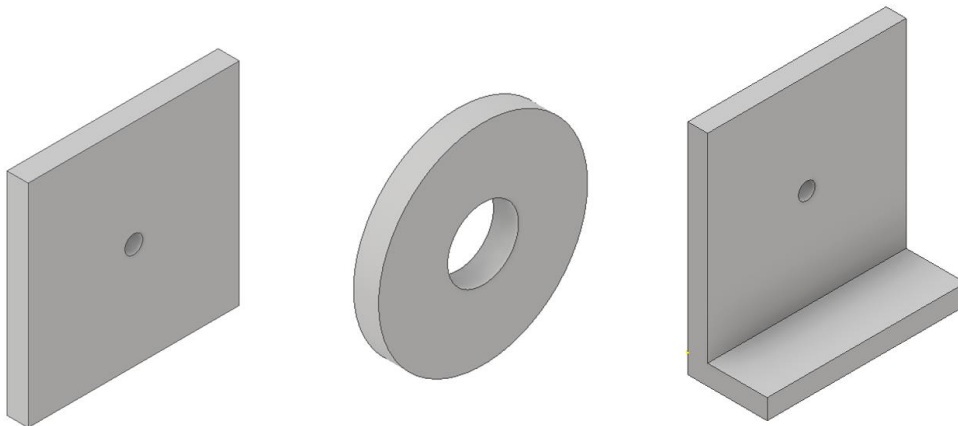


Figura 48: Pletinas: superior, circular e inferior.

6.2.9. MACHÓN DE UNIÓN

Este componente tiene forma cilíndrica, con un diámetro de 38 mm y una longitud total de 71 mm. En un extremo se encuentra un agujero roscado y pasante de métrica M10 para el perno, dicho extremo tiene forma troncocónica con un diámetro mínimo de 20 mm y una longitud de 8 mm (hasta alcanzar el radio de 38 mm del cilindro). En el otro extremo hay otro agujero de 18 mm de diámetro donde se encaja el actuador, este agujero tiene una profundidad de 17 mm, además en este extremo hay dos caras planas, como se aprecia en la figura 49, a una distancia de 28 mm, donde hay mecanizado otro agujero de 8,5 mm de diámetro necesario para acoger al tornillo que produce la unión fija entre esta pieza y el actuador.

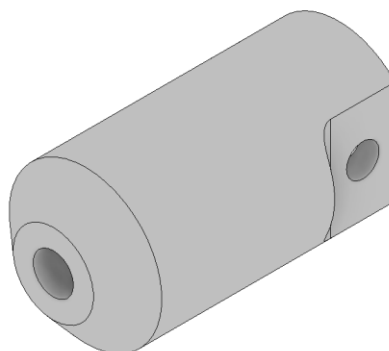


Figura 49: Machón de unión.

6.2.10. CONO DE UNION PARA LAS BARRAS DE COMPOSITE

Esta pieza es la que aparece en el apartado 6.1.2.3.2. como solución para colocar el tornillo o el perno necesario para unir el tubo de composite al nudo. Tiene una longitud

total de 31 mm. La parte delantera tiene las mismas dimensiones que las del cono descrito en el apartado 6.2.4, la diferencia está en la prolongación de la parte trasera, necesaria para que se pueda realizar la unión electromagnética (la parte que se coloca por dentro del tubo tiene una longitud de 20 mm, ligeramente superior a la del anillo que se comprime mediante el impulso electromagnético y que produce la fijación entre éste, el tubo y el cono)

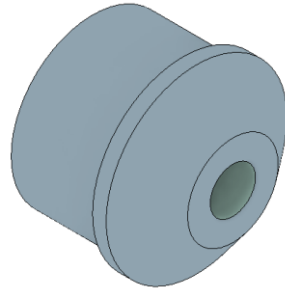


Figura 50: Cono alargado.

6.2.11. ELEMENTOS COMERCIALES

Hay varios elementos normalizados necesarios para el montaje de la estructura nodos/barra como lo son los tornillos, las tuercas y los pernos. Estos son elementos comerciales que, además de facilitar la fabricación de la estructura y simplificar su diseño, suponen un ahorro económico. Los distintos elementos se detallan a continuación.

6.2.11.1. TORNILLOS

Se han empleado tornillos de cabeza hexagonal de acero inoxidable DIN EN ISO 4017 M10x40 para la unión de los nudos de los dos primeros pisos con el soporte y los brazos.

Para las uniones entre nudos y barras se utilizan los mismos tornillos de métrica 10 y cabeza hexagonal, pero con una longitud nominal de 40 mm en vez de 45.



Figura 51: Tornillo DIN EN ISO 4017.

También se necesita de tornillos de cabeza de boquilla o cilíndrica y hexágono interior DIN EN ISO 4762 M3x10 para unir las tapas a las caras planas de los nudos.



Figura 52: Tornillo DIN EN ISO 4762.

6.2.11.2. TUERCAS

Hay dos tuercas de métrica M10 por cada tornillo DIN EN ISO 4017 M10x45 y una tuerca de métrica M8 por cada espárrago y dos por cada actuador. Se ha optado por tuercas hexagonales de acero inoxidable DIN EN ISO 4032.



Figura 53: Tuerca DIN EN ISO 4017.

6.2.11.3. PERNOS ESFÉRICOS

Para las uniones de junta esférica se opta por la utilización de pernos esféricos para articulaciones angulares DIN 71803 con vástago roscado con métrica M10 de acero cincado y diámetro de bola 16 mm.



Figura 54: Perno esférico DIN 71803.

Debido a que la zona del vástago con diámetro más grande impide el montaje con de la tapa, esta zona se tiene que eliminar mediante una operación de mecanizado.

6.2.11.4. ACTUADORES

Debido a su barato coste, su tamaño y la carga máxima que soportan (2000 N) se ha optado por la utilización de actuadores lineales *REGNER RA-38*. Dentro de esta gama

de actuadores, los seleccionados para la columna tienen unos diámetros mínimo y máximo de 28 mm y 38 mm respectivamente. La carrera máxima es de 80 mm y el vástago tiene un diámetro de 18 mm. A ambos lados del actuador se encuentran dos agujeros pasantes de 8.1 mm de diámetro para poder ensamblarlos a la columna, y la distancia entre ellos es de 176 mm cuando el actuador está recogido.

Si se utiliza el método de unión explicado en el apartado 6.1.2.5.2. la longitud entre los agujeros tiene que ser la inmediatamente menor, 230 mm, ya que la longitud de las juntas cardan es mayor que la de los elementos de unión usados en la solución inicial.



Figura 55: Actuador lineal electromecánico RA-38.

El uso de estos actuadores tiene un fallo, y es que el plástico pasamuros del cable interfiere con los elementos de unión al nudo, por lo que habría que cambiar la posición de salida de dicho cable.

6.2.11.5. JUNTAS CARDAN

Si se opta por la solución del apartado 6.1.2.5.2. la unión entre el actuador y los dos nudos de los extremos se realiza mediante juntas universales. Se eligen las juntas universales fabricadas por *RS PRO* de acero inoxidable y un diámetro interior de 18 mm.



Figura 56: Junta universal RS PRO.

7. FASES SEGUIDAS EN EL PROYECTO

7.1. PROCESO DE DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

Esta es la parte del proyecto que se ha realizado primero, y tiene el único objetivo de conseguir una estructura capaz de alcanzar la geometría final deseada (curvatura simple de radio pequeño). Por tanto, en esta fase del proyecto aún no se han definido ni el material ni las dimensiones de ningún elemento que constituye la estructura. La estructura se diseña para alcanzar un radio de curvatura de 1850 mm.

El utillaje a diseñar está basado en la solución tipo columna de diseño nodo/barra con actuadores integrados en la estructura, desarrollada en el proyecto AERO3NAK, donde se han tomado como referencia las celosías espaciales que se utilizan en construcción para cubiertas y otros usos. Por tanto, la columna a diseñar consiste en una celosía espacial formada por dos elementos principales; nudos y barras.

Para el diseño del utillaje flexible se ha necesitado del software de simulación cinemático *GIM* [21], donde se puede cambiar la posición de los nudos y de las barras de forma fácil, permitiendo así una rápida modificación de la estructura, y donde se puede observar, además del número de grados de libertad y de redundancias (barras que no están sometidas a ningún esfuerzo) de la columna, el movimiento de la misma.

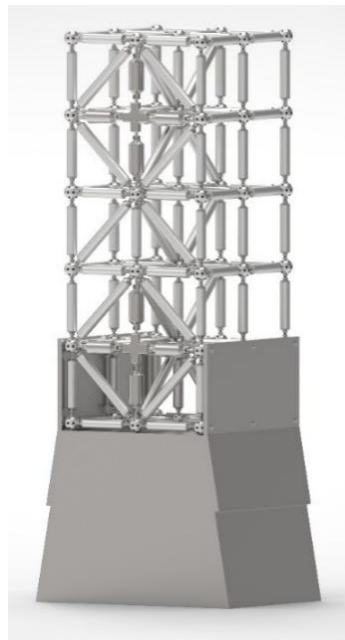


Figura 57: Estructura nodo/barra con actuadores integrados de AERO3NAK.

En primer lugar, se ha creado una estructura de partida en *GIM* similar a la de la imagen anterior, a partir de la cual se ha modificado la posición de algunas barras y se

han añadido o quitado otras hasta llegar a una primera estructura de 0 grados de libertad, Estos 0 grados de libertad conllevan que la estructura sea isostática, así la columna no se comporte como un mecanismo ($gdl > 0$) y tampoco es hiperestática ($gdl < 0$), con esto, cada actuador que se añada aporta 1 grado de libertad a la estructura, debido a su movimiento lineal, y como resultado, la estructura final (con actuadores) tendrá el mismo número de grados de libertad que de actuadores, dotando así a la columna de la capacidad de movimiento.

Cabe destacar que en el programa *GIM* se crea una estructura de forma muy conceptual, por lo que se han puesto todos los nudos como articulaciones esféricas, aunque en la realidad cada nudo tendrá, según las barras que le lleguen, uniones atornilladas con unas barras y uniones de rótula esférica con otras. Además, las barras inferiores se han empotrado al suelo, simulando la unión que hay en la figura 18 de los nudos con la base o el soporte.

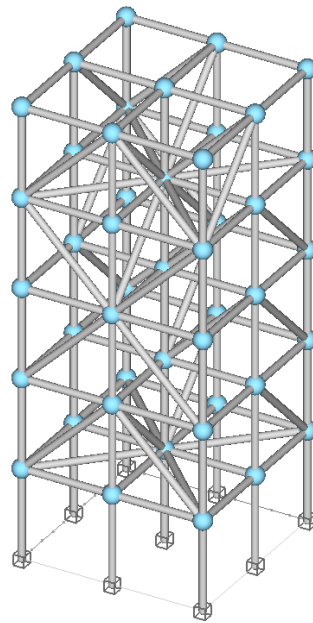


Figura 58: Primera estructura creada (0 gdl y 24 redundancias).

En segundo lugar, se han sustituido algunas barras por actuadores y se ha ido modificado la posición de algunas barras y eliminado otras hasta conseguir, como ya se ha mencionado antes, un número de grados de libertad igual al número de actuadores, y una disposición de las barras que los actuadores sean capaces de “mover” hasta alcanzar la geometría requerida, es decir, un radio de curvatura de la estructura relativamente pequeño. Se ha llegado a 4 estructuras diferentes capaces de adoptar el radio de curvatura deseado, en las que principalmente cambia la posición y número de actuadores.

7.1.1. PRIMERA SOLUCIÓN

Como primera solución se han sustituido las 12 barras verticales de la parte trasera por actuadores y se han eliminado numerosas barras de la estructura inicial, alcanzándose la disposición de barras observada en la siguiente imagen y una estructura de 12 grados de libertad y 16 redundancias que es capaz de alcanzar un radio de curvatura pequeño.

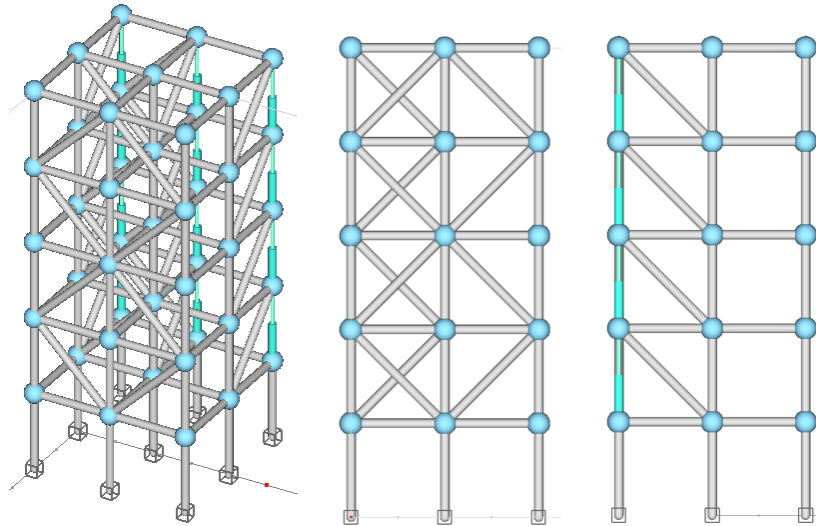


Figura 59: 1ª solución. Vista isométrica (izq.), alzado (centro) y perfil (dcha).

Como se puede ver en la siguiente imagen, dando a todos los actuadores la misma variación de longitud, la columna es capaz de “doblarse” y alcanzar la geometría deseada. Sin embargo, las barras horizontales de los pisos superiores que se ven en el perfil alcanzan una posición final inadecuada, y los nudos de la parte trasera que unen los actuadores se salen del plano en el que están en la posición inicial, todo esto hace pensar, a priori, que la estructura tendrá un comportamiento incorrecto, en cuanto a tensiones se refiere, cuando la estructura esté expuesta a esfuerzos.

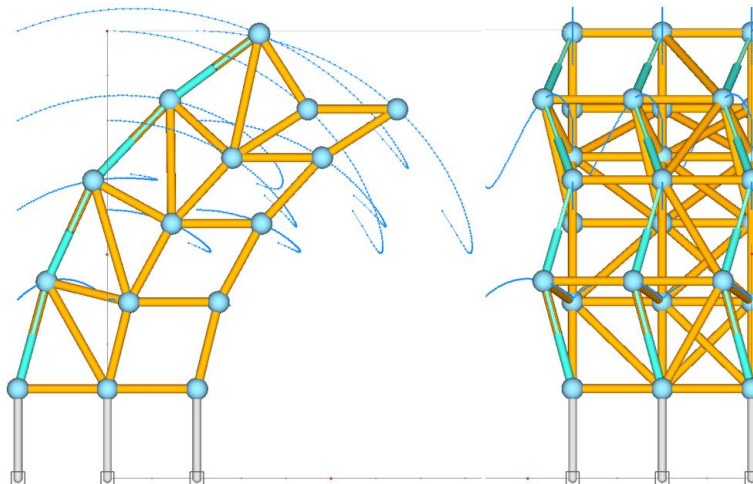


Figura 60: Rango de movimiento de la 1ª solución. Perfil (dcha.) y parte trasera (izq.).

7.1.2. SEGUNDA SOLUCIÓN

Esta solución tiene la misma disposición de barras y el mismo número de actuadores que la anterior y por tanto el mismo número de grados de libertad y de redundancias, sólo que los actuadores, en vez de estar los 12 sustituyendo lo que antes eran las barras verticales de la parte trasera, ahora están sustituyendo las barras diagonales que se observan en el perfil de la figura 61.

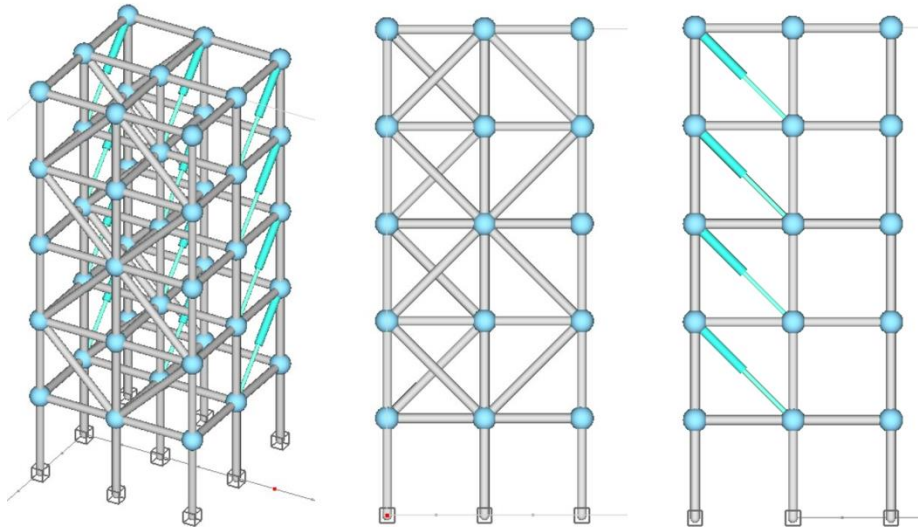


Figura 61: 2ª solución. Vista isométrica (izq.), alzado (centro) y perfil (dcha.).

El rango de movimiento de esta solución es muy similar al de la anterior solución, pero para alcanzar un radio de curvatura los actuadores de cada piso tienen que tener una variación de longitud distinta, a diferencia de la solución anterior, en donde todos se alargan lo mismo.

En esta solución, los nudos que antes se salían de su plano inicial ya no lo hacen, y todas las barras que en su posición principal son horizontales, siguen estando en posición horizontal una vez la columna a alcanzado la geometría deseada y por tanto siendo, a priori, más óptima que la anterior cuando esté solicitada a esfuerzos.

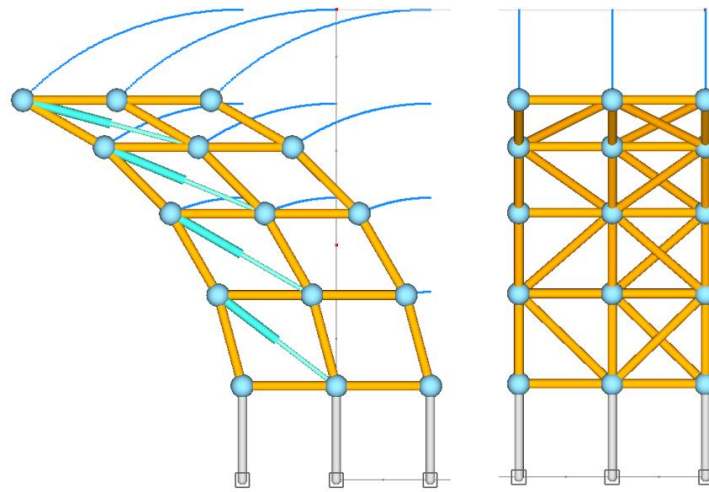


Figura 62: Rango de movimiento de la 2ª solución. Perfil (dcha.) y parte trasera (izq.).

7.1.3. TERCERA SOLUCIÓN

En esta solución los actuadores se han colocado de forma que unen los nudos centrales de la estructura con los de los extremos del siguiente piso, tal y como se puede apreciar en la imagen inferior. De esta forma el número de actuadores se reduce de 12, que hacían falta en las anteriores soluciones, a 8. Así, esta solución tiene un total de 8 grados de libertad y 25 redundancias.

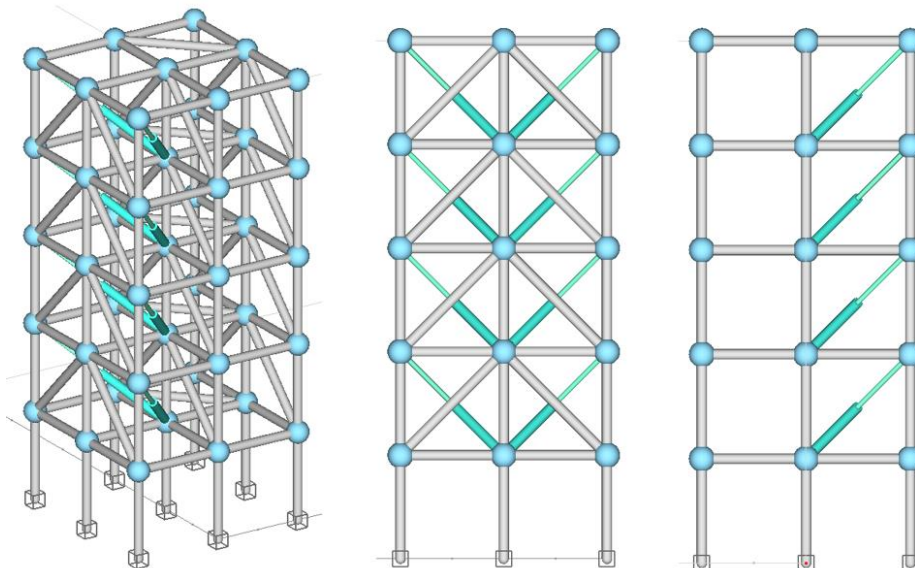


Figura 63: 3ª solución. Vista isométrica (izq.), alzado (centro) y perfil (dcha.).

El cambio de posición de los actuadores supone también una reestructuración de la posición de algunas barras, teniendo que añadir 4 barras horizontales dispuestas en diagonal, como las que se observan en la vista de planta de esta solución, para llegar a los 8 grados de libertad.

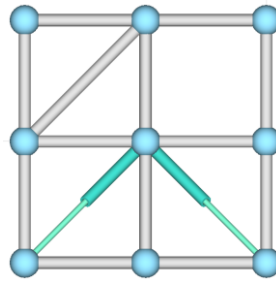


Figura 64: Vista de planta de la 3ª solución.

En este caso, con la variación de longitud de los actuadores adecuada, el movimiento que se adquiere es exactamente igual al de la solución anterior, pero con 4 actuadores menos y su consiguiente ahorro económico.

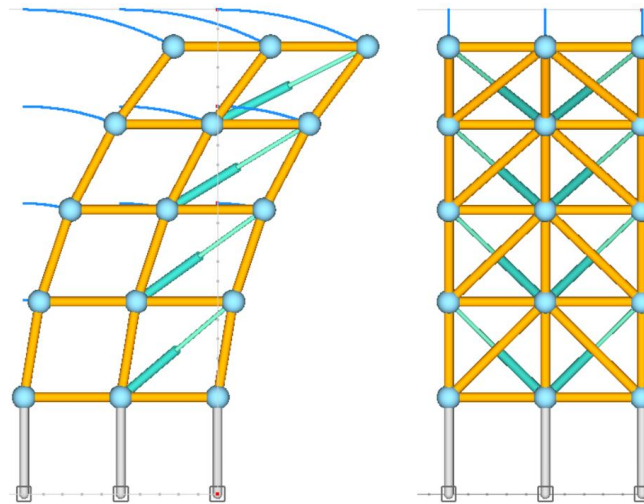


Figura 65: Rango de movimiento de la 3ª solución. Perfil (dcha.) y parte trasera (izq.).

7.1.4. CUARTA SOLUCIÓN

En esta solución se ha cambiado la posición de los actuadores del primer piso, de forma que ahora están unidos a los nudos del lado contrario al que estaban antes (los actuadores “miran para el otro lado”), y además se han sustituido los actuadores del segundo piso por barras, reduciéndose aún más el número de actuadores, que pasan de ser 8 a ser 6.

Con este cambio se llega a una columna que presenta 6 grados de libertad y las mismas redundancias que en la anterior solución, 25, ya que no cambia la disposición del resto de las barras.

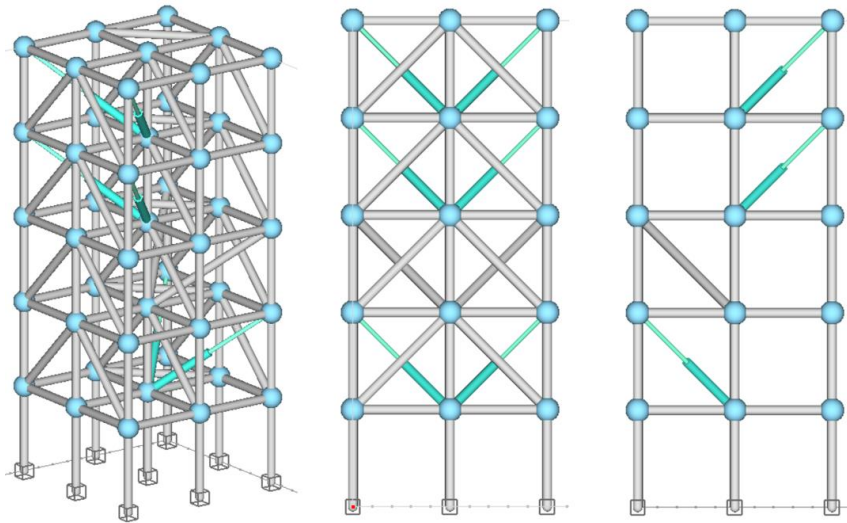


Figura 66: 4ª solución. Vista isométrica (izq.), alzado (centro) y perfil (dcha.).

En esta solución el radio de curvatura que se puede alcanzar es el mismo que en las anteriores, y además los ángulos que se forman entre las barras cuando la estructura alcanza la geometría requerida son considerablemente más grandes. Otra ventaja de esta solución es que el centro de gravedad de la estructura se queda dentro de la base, a diferencia de las tres soluciones anteriores.

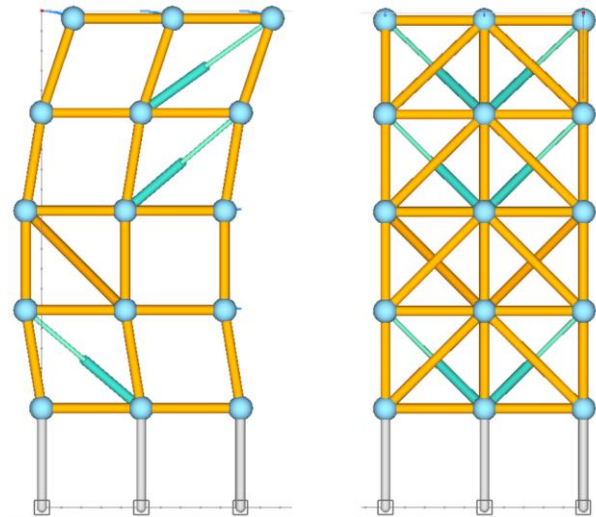


Figura 67: Rango de movimiento de la 4ª solución. Perfil (dcha.) y parte trasera (izq.).

Por todas estas ventajas mencionadas, esta es la mejor solución de las cuatro, y por tanto es la geometría de la que se realiza el diseño.

7.2. FASES DEL PROYECTO

Una vez se ha llegado a la geometría adecuada de la columna (figura 66) las fases posteriores que se han realizado han sido las siguientes:

- Simulación cinemática de la columna con el software *GIM*
- Diseño y dimensionamiento de los nudos
- Creación de todas las piezas y su ensamblaje en *INVENTOR 2019*
- Cálculo del radio mínimo alcanzable por la columna
- Análisis mecánico aproximado de la estructura (tensiones y deformaciones).

Además de todas estas fases, antes de realizar el proceso de diseño descrito en el apartado 7.1, se ha realizado una exhaustiva búsqueda de información.

8. DIAGRAMA DE GANTT

El diagrama de Gantt mostrado a continuación muestra la planificación inicial por semanas propuesta para la realización de este proyecto, dicha planificación se divide en dos partes. Por un lado, están las actividades a realizar, entre las que se encuentran la recopilación de información, la identificación de una geometría curvada, la simulación cinemática, la modificación de los nodos, la definición del sistema de amarre de la pieza a fabricar, la limitación del número de actuadores y la simulación mecánica del sistema. Por otro lado, se muestra la documentación a entregar, dichos documentos son: el estado del arte, los objetivos del proyecto, los resultados de las distintas simulaciones, la descripción de la nueva estructura y la documentación oficial.

Esta planificación no se ha cumplido tal cual se indica en el diagrama de Gantt, sin embargo, se han cumplido todos los apartados del mismo (realizándose algunos en distinto orden al mostrado)



	mar			abril				may					jun				jul			ago			sept			
Actividades a realizar	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
Recopilar información del trabajo ejecutado hasta el momento	█																									
Realizar una búsqueda de información sobre utillajes flexibles	█	█																								
Identificar una geometría curvada (potencial elemento de fuselaje)			█	█																						
Simulación de la cinemática (GIM)				█	█	█	█																			
Modificar la geometría de la estructura actual para que se adapte al fuselaje								█	█																	
Modificar nodos rígidos										█	█															
Definir la solución para amarrar la pieza a la estructura											█	█	█													
Limitar el número de actuadores low-cost														█	█	█										
Simulación macánica del sistema (CESTRI O ANSYS)										█	█	█	█	█	█	█	█	█	█							
Informes/documentación a entregar																										
Estado del arte				█ V1																						
Definición de los objetivos específicos y justificación de los pasos a seguir				█																						
Resultados de la simulación cinemática										█																
Informe en el que se plasme la definición de la nueva geometría											█															
Resultados de la simulación mecánica del sistema													█			█										
Documentación oficial																		█	█							
Preparar la presentación																					█	█	█	█	█	█

Tabla 1: Diagrama de Gantt.

9. CÁLCULOS

9.1. SIMULACIÓN CINEMÁTICA

La simulación cinemática de esta estructura se ha realizado con el software GIM. Como solución se ha llegado a una estructura de 6 grados de libertad y 25 redundancias formada por barras y nudos, donde se pueden unir las barras de dos formas: con uniones atornilladas (rígidas) y con uniones de junta esférica (dependiendo de las barras que conecten). Las barras están colocadas como se muestra en las siguientes imágenes sacadas del GIM de forma simplificada. La estructura, de cinco pisos, tiene 6 actuadores (que dan los 6 grados de libertad) dispuestos en diagonal, 155 barras de distintas longitudes y 54 nudos. La variación de longitud de los actuadores dota a la estructura de movimiento, pudiéndose “doblar” hasta alcanzar un radio de curvatura relativamente pequeño.

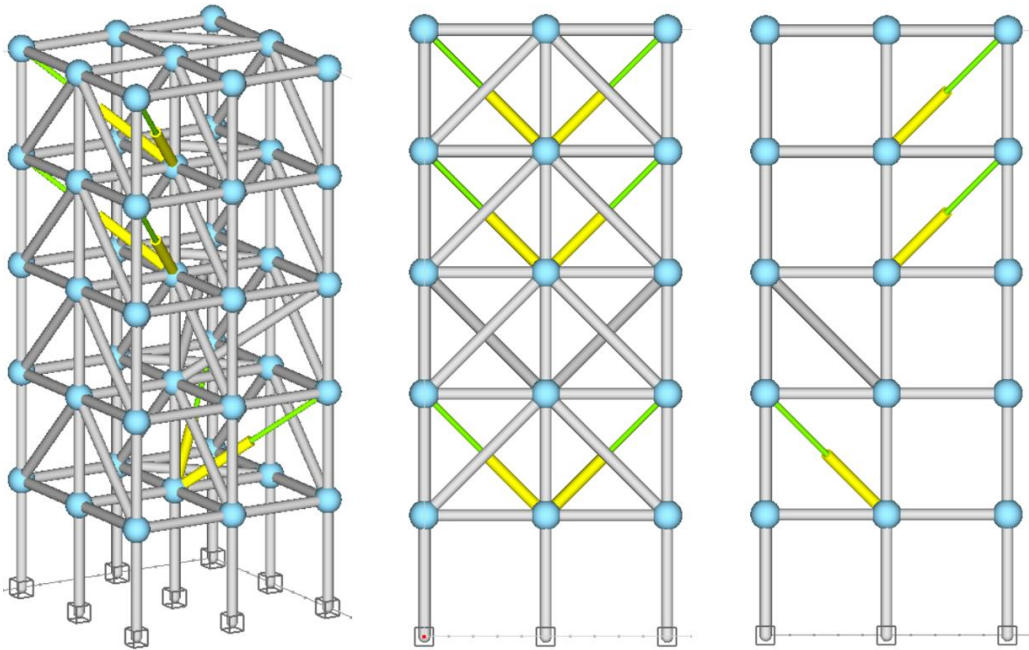


Figura 68: Solución para curvatura simple con actuadores destacados en amarillo. Vista isométrica (izquierda), alzado (centro) y perfil (derecha).

Dependiendo del incremento de longitud que se lleven a cabo los actuadores, la estructura puede “moverse” de una forma u otra. Si lo que se quiere es alcanzar un determinado radio de curvatura, cada piso de actuadores debe incrementar su longitud de forma distinta, dicho incremento se tiene que calcular.

9.1.1. CÁLCULO DE LA LONGITUD FINAL DE LOS ACTUADORES

Para calcular la longitud final de los actuadores se ha llegado, mediante cálculo trigonométrico, a una ecuación que da dicho valor en función del radio de fuselaje, de la distancia entre nudos y del piso en el que se encuentre el actuador a calcular. Para ello se ha procedido de la siguiente manera:

En primer lugar, se determina el ángulo α , mostrado en la imagen inferior, de inclinación de las barras del piso a calcular con la vertical, siendo “R” el radio del fuselaje, “L” la distancia entre los nudos de la columna, “n” un valor que depende del piso de actuadores de la columna (n=1 para los pisos 1 y 3 y n=2 para el último piso, partir de este piso, n se iría incrementando una unidad por cada piso) y “X” la longitud a determinar:

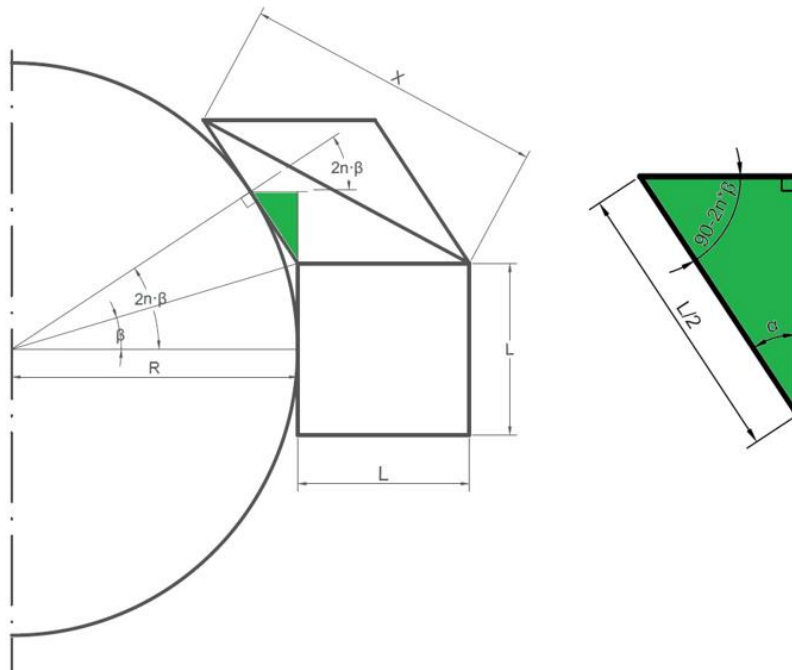


Figura 69: Representación gráfica del ángulo α (se muestran los pisos 1 y 2 de actuadores).

De la imagen anterior se deduce que:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{L/2}{R} \right)$$

$$\alpha = 180^\circ - 90^\circ - (90^\circ - 2n \cdot \beta) = 2n \cdot \beta$$

En segundo lugar, se obtiene la ecuación para hallar el valor de X, como se muestra a continuación.

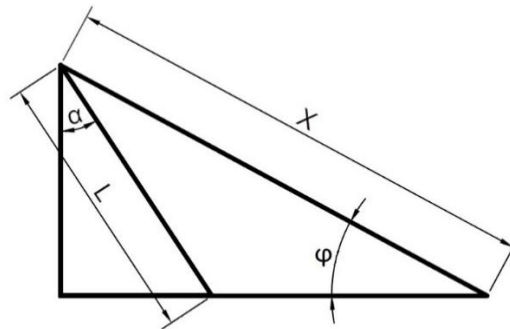


Figura 70: Cálculo de X.

Primero se obtiene el ángulo φ , de inclinación del actuador con la horizontal:

$$\tan \varphi = \frac{L \cdot \cos \alpha}{L + L \cdot \sin \alpha} \rightarrow \varphi = \tan^{-1} \frac{L \cdot \cos \alpha}{L + L \cdot \sin \alpha}$$

Después se igualan las siguientes expresiones:

$$X \cdot \sin \varphi = L \cdot \cos \alpha$$

Despejando X y sustituyendo φ y α :

$$X = \frac{L \cdot \cos(2n \cdot \beta)}{\sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{L \cdot \cos(2n \cdot \beta)}{L + L \cdot \sin(2n \cdot \beta)} \right) \right)}$$

Sustituyendo β :

$$X = \frac{L \cdot \cos \left(2n \cdot \tan^{-1} \left(\frac{L/2}{R} \right) \right)}{\sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{L \cdot \cos \left(2n \cdot \tan^{-1} \left(\frac{L/2}{R} \right) \right)}{L + L \cdot \sin \left(2n \cdot \tan^{-1} \left(\frac{L/2}{R} \right) \right)} \right) \right)}$$

Finalmente, simplificando la expresión anterior queda:

$$X = \frac{L}{\sqrt{\frac{1}{2 + 2 \cdot \sin \left(2n \cdot \tan^{-1} \left(\frac{L/2}{R} \right) \right)}}}$$

El actuador forma un triángulo rectángulo con la línea imaginaria de longitud X y la barra horizontal de longitud L (triángulo rojo de la figura 71), por tanto, mediante el teorema de Pitágoras es posible calcular la longitud final que existe entre los dos nudos que une el actuador:

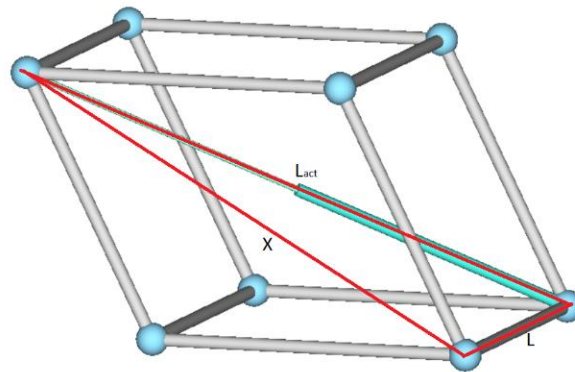


Figura 71: Cálculo de L_{act} .

$$L_{act} = \sqrt{X^2 + L^2}$$

Para calcular el incremento de longitud del actuador basta con restar a L_{act} la longitud inicial entre los nudos.

La numeración de los pisos de actuadores, de los cuales depende “n”, se muestra a continuación.

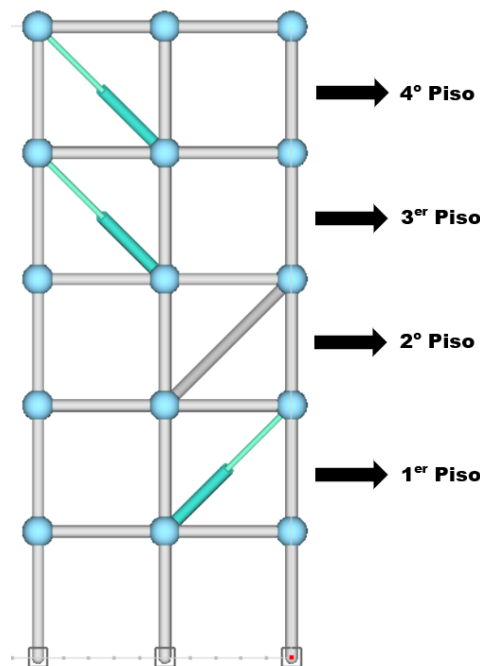


Figura 72: Numeración de los pisos de actuadores.

Así, para un radio de la pieza a fabricar de 1,85 m y una distancia entre nudos de 300 mm, la longitud final entre los dos nudos que unen los actuadores (que tiene una longitud inicial de 519,6153 mm) es:

- Primer piso ($n = 1$): 546,8076 mm \rightarrow Carrera del actuador: 27,2 mm
- Tercer piso ($n = 1$): 546,8076 mm \rightarrow Carrera del actuador: 27,2 mm
- Cuarto piso ($n = 2$): 572,0485 mm \rightarrow Carrera del actuador: 52,44 mm

DATOS			RESULTADOS					
L (mm)	R (mm)	n	β	α	φ	X (mm)	L_{act} (mm)	ΔL
300	1850	1	4,635°	9,271°	40,364°	457,164	546,808	27,194
		2		18,542°	35,542°	487,072	572,049	52,435

Tabla 2: Cálculo de longitudes de los nudos que unen los actuadores para un radio de 1,85 m.

9.1.2. TRAYECTORIA DE MOVIMIENTO DE LOS NUDOS

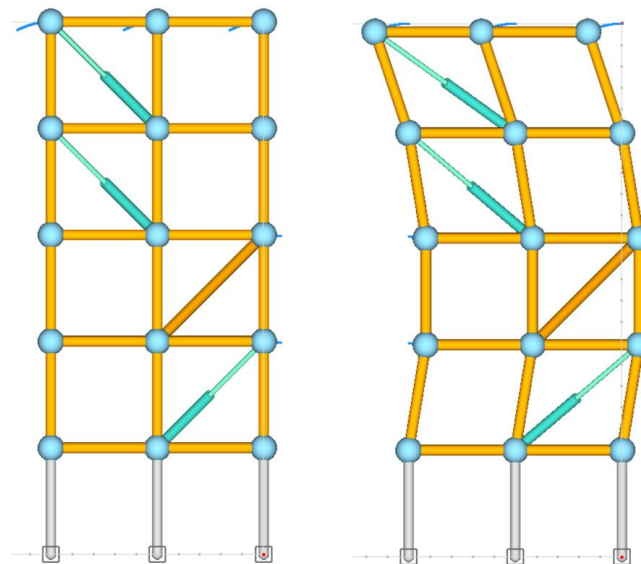


Figura 73: Trayectoria del movimiento para un radio de curvatura de 1,85 m.

Las líneas azules representan la trayectoria que siguen los nudos de la estructura desde la posición inicial (estructura completamente en vertical) hasta la posición final (la estructura alcanza la curvatura requerida).

9.1.3. POSICIONES INICIALES Y FINALES DE LOS NUDOS

En la tabla 2 se indican las posiciones en forma de coordenadas de todos los nudos de la columna en dos casos: cuando los actuadores están en reposo, es decir, no se ha incrementado su longitud (columna vertical) y cuando los actuadores han alcanzado la longitud calculada en el apartado anterior, es decir, la estructura ha alcanzado un radio de curvatura de 1,85 metros. Ambas posiciones se muestran en la figura 73 del apartado anterior.



Todos los nudos de los distintos pisos se mantienen en el mismo plano horizontal en su posición final, por lo que las coordenadas Z serán iguales para cada piso de nudos. Las coordenadas X e Y de los pisos 1 y 4 son iguales, lo mismo ocurre con los pisos 2 y 3, esto se debe a lo explicado en el apartado 5 (los actuadores C, D, E y F se expanden exactamente la misma longitud), que hace que hasta el piso 4 la estructura se “doble” de forma simétrica.

Nº Nudo	Posiciones iniciales (mm)			Posiciones finales (mm)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	600	0	1500	695,307	0	1476,626
2	300	0	1500	395,307	0	1476,626
3	0	0	1500	95,307	0	1476,626
4	600	300	1500	695,307	300	1476,626
5	300	300	1500	395,307	300	1476,626
6	0	300	1500	95,307	300	1476,626
7	600	600	1500	695,307	600	1476,626
8	300	600	1500	395,307	600	1476,626
9	0	600	1500	95,307	600	1476,626
10	600	0	1200	600	0	1192,167
11	300	0	1200	300	0	1192,167
12	0	0	1200	0	0	1192,167
13	600	300	1200	600	300	1192,167
14	300	300	1200	300	300	1192,167
15	0	300	1200	0	300	1192,167
16	600	600	1200	600	600	1192,167
17	300	600	1200	300	600	1192,167
18	0	600	1200	0	600	1192,167
19	600	0	900	551,683	0	896,083
20	300	0	900	251,683	0	896,083
21	0	0	900	-48,317	0	896,083
22	600	300	900	551,683	300	896,083
23	300	300	900	251,683	300	896,083
24	0	300	900	-48,317	300	896,083
25	600	600	900	551,683	600	896,083
26	300	600	900	251,683	600	896,083
27	0	600	900	-48,317	600	896,083
28	600	0	600	551,683	0	596,083
29	300	0	600	251,683	0	596,083
30	0	0	600	-48,317	0	596,083
31	600	300	600	551,683	300	596,083
32	300	300	600	251,683	300	596,083
33	0	300	600	-48,317	300	596,083
34	600	600	600	551,683	600	596,083
35	300	600	600	251,683	600	596,083
36	0	600	600	-48,317	600	596,083
37	600	0	300	600	0	300
38	300	0	300	300	0	300
39	0	0	300	0	0	300
40	600	300	300	600	300	300
41	300	300	300	300	300	300
42	0	300	300	0	300	300
43	600	600	300	600	600	300
44	300	600	300	300	600	300
45	0	600	300	0	600	300

Tabla 2: Posiciones iniciales y finales de todos los nudos de la estructura.

La numeración de los pisos de nudos, la de los nudos y la posición del origen de coordenadas desde donde se toman los puntos de la tabla 3 se muestra en la siguiente imagen.

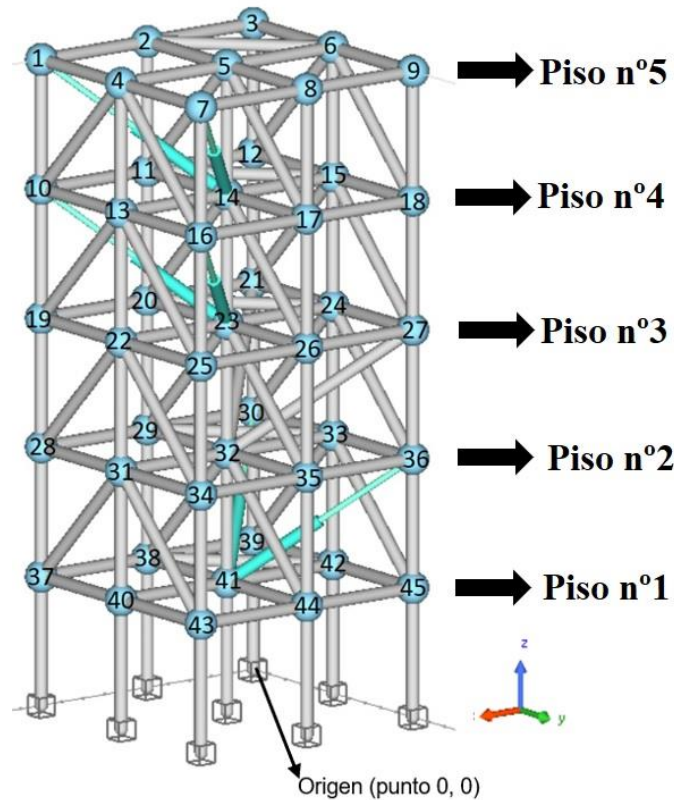


Figura 74: Numeración de los nudos y de los pisos

9.1.4. CENTROS DE CURVATURA DE LA TRAYECTORIA DE LOS NUDOS

Todos los nudos de la columna siguen una trayectoria circular (excepto los del último piso), cuyo centro y radio se detallan en la tabla que se muestra a continuación. Los radios de las trayectorias de los nudos de cada piso son iguales, ya que estos, una vez la columna ha alcanzado la geometría final, siguen estando en un plano horizontal (paralelo al suelo).

Los nudos del primer piso (37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44 y 45) y del cuarto piso (10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 y 18) no se mueven, por lo que no presentan ni trayectoria ni centro de curvatura (el centro de curvatura está en el propio nudo).

Nº Nudo	Coordenadas (mm)			Radio (mm)
	X	Y	Z	
1	600	0	1305,018	194,982
2	300	0	1305,018	194,982
3	0	0	1305,018	194,982
4	600	300	1305,018	194,982
5	300	300	1305,018	194,982
6	0	300	1305,018	194,982
7	600	600	1305,018	194,982
8	300	600	1305,018	194,982
9	0	600	1305,018	194,982
10	600	0	1200	0
11	300	0	1200	0
12	0	0	1200	0
13	600	300	1200	0
14	300	300	1200	0
15	0	300	1200	0
16	600	600	1200	0
17	300	600	1200	0
18	0	600	1200	0
19	600	0	600	300
20	300	0	600	300
21	0	0	600	300
22	600	300	600	300
23	300	300	600	300
24	0	300	600	300
25	600	600	600	300
26	300	600	600	300
27	0	600	600	300
28	600	0	300	300
29	300	0	300	300
30	0	0	300	300
31	600	300	300	300
32	300	300	300	300
33	0	300	300	300
34	600	600	300	300
35	300	600	300	300
36	0	600	300	300

Tabla 4: Coordenadas de los centros y radios de curvatura de las trayectorias de los nudos en la posición inicial.

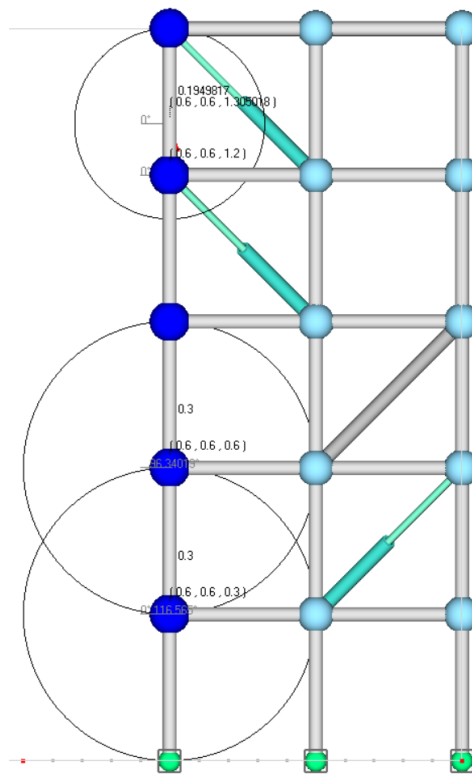
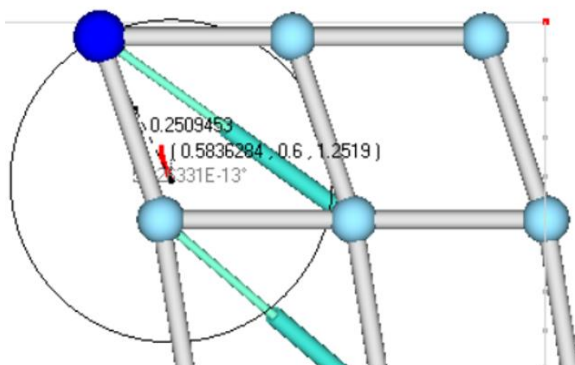


Figura 75: Circunferencias de la trayectoria de un nudo de cada piso.

Los centros de curvatura de los nudos pertenecientes a los pisos primero, segundo, tercero y cuarto se quedan en la misma posición durante el desplazamiento de los mismos hacia la posición final de la estructura, sin embargo, el centro de curvatura de los nudos del último piso cambia de posición, de forma que el radio de curvatura va aumentando a medida que el nudo se acerca a su posición final.

En la imagen inferior se muestra la trayectoria que sigue el centro de la trayectoria (línea roja) y su posición final y radio.



Nº Nudo	Coordenadas (mm)			Radio (mm)
	X	Y	Z	
1	583,628	0	1305,018	250,945
2	283,628	0	1305,018	250,945
3	0	0	1305,018	250,945
4	583,628	300	1305,018	250,945
5	283,628	300	1305,018	250,945
6	0	300	1305,018	250,945
7	583,628	600	1305,018	250,945
8	283,628	600	1305,018	250,945
9	0	600	1305,018	250,945

Figura 76 y tabla 5: Centros de curvatura en la posición final de los nudos del último piso.

9.2. DISEÑO DE LOS NUDOS

A continuación, se va a mostrar el proceso de diseño de los nudos de la columna, estos son la pieza más importante de la estructura, ya que de ellos depende la capacidad de movimiento de la columna cuando los actuadores comienzan a expandirse. Se expondrán los conceptos de partida, el diseño CAD y el dimensionamiento de ellos.

9.2.1. CONCEPTOS

Para poder realizar el diseño de los nudos se ha observado en GIM el movimiento de la estructura para saber en todos y cada uno de los nudos que barras se mueven con respecto a las demás barras (movimiento relativo entre las barras) y así saber cómo unir dichas barras al nudo, si mediante una unión atornillada o mediante una unión de rótula esférica.

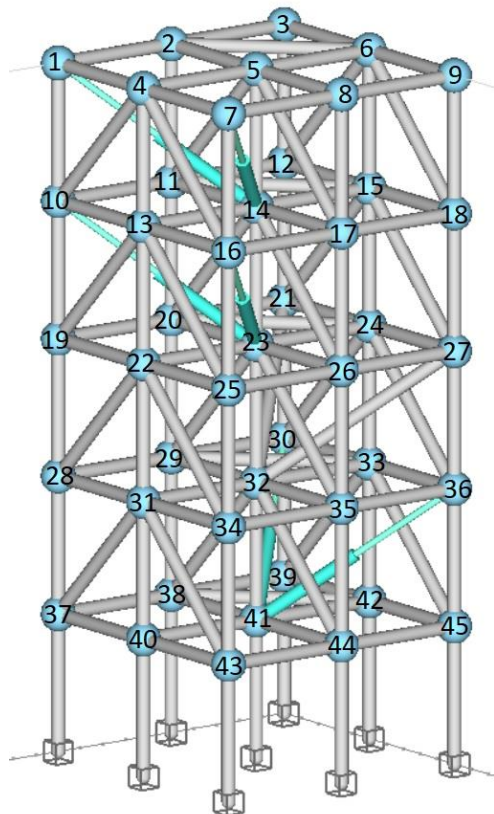


Figura 77: Numeración de los nudos.

Para simplificar el diseño de los nudos, las barras están dispuestas de forma que todos los pisos de la columna son iguales, así a todos los nudos dispuestos en la misma vertical llegan el mismo número de barras y dispuestas de la misma forma, excepto a los del último piso.

A continuación, se van a ver todos los tipos de nudos que hay en la estructura, representándose en las imágenes de color amarillo la unión de junta esférica con los actuadores, de color verde las uniones atornilladas con las barras y de color azul las uniones de junta esférica con las barras.

A los nudos 10, 16, 30 y 36 hay unidas 5 barras y un actuador. Entre las barras 10-13 y 10-19 no existe movimiento relativo, por lo que estarán unidas al nudo mediante una unión atornillada, sin embargo, el resto de las barras y el actuador sí se mueven con respecto a las dos barras mencionadas anteriormente, por lo que estarán unidas mediante una unión de junta esférica.



Figura 78: Nudo nº10.

A los nudos 11, 20, 29 y 38 hay unidas 7 barras. Como no existe movimiento relativo entre las barras 11-14 y 11-20, estas irán atornilladas al nudo. Las demás en cambio estarán unidas mediante una unión de junta esférica.

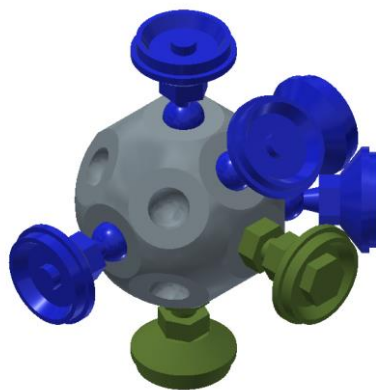


Figura 79: Nudo nº11.

En los nudos 12, 21, 30, 39, 18, 27, 36 y 45 las barras están unidas de la misma forma que en el nudo número 10, pero sin el actuador.

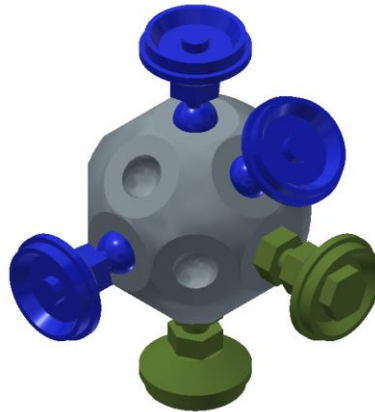


Figura 80: Nudo nº12.

Los nudos 13, 22, 31 y 40 tienen 7 barras, de las cuales la 13-10, 13-19, 13-22, 13-25 y 13-16 están atornilladas y el resto, como tienen un movimiento con respecto a las anteriores, unidas mediante junta esférica.

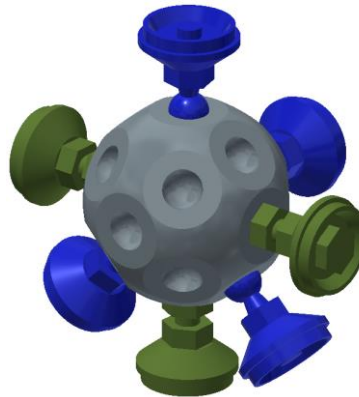


Figura 81: Nudo nº13.

A los nudos 14, 23 y 41 se unen dos actuadores mediante una unión esférica y 7 barras de las cuales 5 están atornilladas al nudo y 2 unidas mediante una junta esférica.

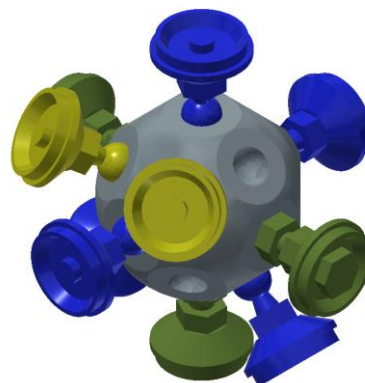


Figura 82: Nudo nº14.

Los nudos 15, 24, 33 y 42 son iguales que el 13, excepto por una barra más que tienen que une dichos nudos con los 11, 20, 29 y 38.

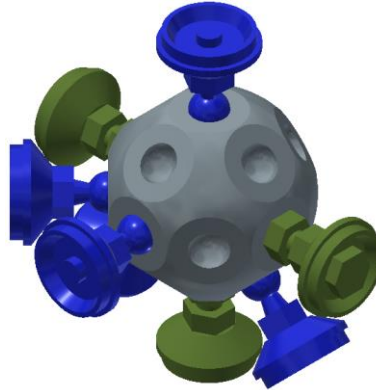


Figura 83: Nudo nº15.

Lo mismo ocurre con los nudos 17, 26, 35 y 44, donde las barras se unen de la misma forma que al nudo 11, solo que sin la barra horizontal en diagonal mencionada anteriormente que une los nudos 11 y 15.

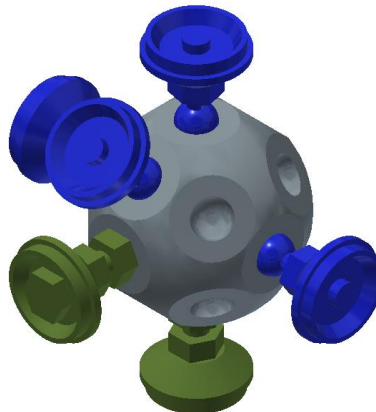


Figura 84: Nudo nº17.

Los nudos de la parte superior de la columna 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9 son iguales que los nudos 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 y 18 respectivamente sólo que, obviamente, en los primeros no existen las barras que unirían dichos nudos con los de un piso más superior.

Si no fuera por esas cuatro barras horizontales ya mencionadas y necesarias para llegar a los 8 grados de libertad en la estructura, que unen los nudos 2 y 6, 11 y 15, 20 y 24, y 29 y 33, la columna presentaría un plano de simetría. Esto haría que los nudos 2 y 6 y los de sus verticales fueran iguales a los nudos 8 y 4 y los de sus verticales respectivamente.

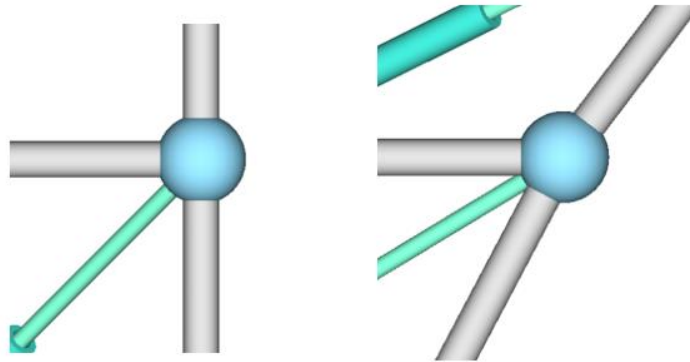


Figura 85: Movimiento relativo entre las barras del nudo 10 observado en GIM (posiciones inicial y final).

9.2.2. DISEÑO CAD

Se ha diseñado un nudo principal válido para todas y cada una de las diferentes disposiciones de barras presentes en la columna, de forma que se simplifique el montaje y solo sea necesaria la fabricación de un tipo de nudo. Es decir, la geometría del nudo acoge a todas las combinaciones de barras y actuadores que se dan en la estructura, ya explicadas en el apartado anterior (figuras de la 78 a la 84). Sin embargo, para poder unir el conjunto de amarre de la pieza que se quiere fabricar se necesita de otro tipo de nudo (nudo secundario), que solo cambia en un agujero, dicho agujero, en vez de ser semiesférico, es un taladro roscado de métrica M8.

El nudo a diseñar en este apartado está basado en el sistema ONDDI, sistema de unión que pretende dar una solución a la conexión entre barras y nudos de forma que la estructura constituya una celosía espacial, donde las barras de la misma trabajen exclusivamente bajo solicitaciones axiales de tracción o de compresión.

El Nudo ONDDI es un sistema constructivo concebido para la fabricación y montaje de estructuras tridimensionales atornilladas metálicas, y consiste en una pieza esférica en la que se han realizado unos taladros roscados con asientos para las barras y para recibir los tornillos de unión de nudo y barra. Así cada esfera tiene diversos taladros de conexión orientados según el ángulo de confluencia de cada barra.

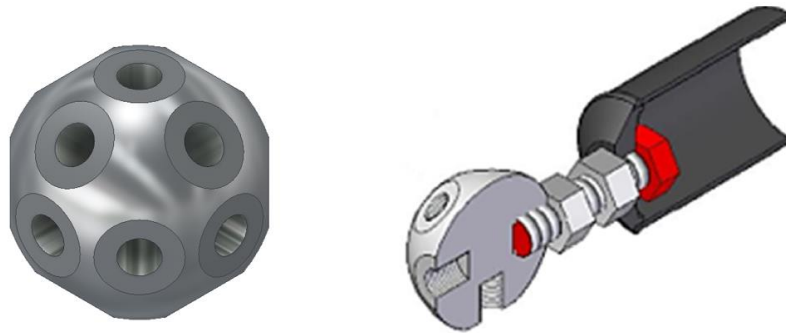


Figura 86: Sistema ONDDI.

En el nudo a diseñar en este apartado la disposición de los agujeros es muy similar a la del Nudo ONDDI, solo que muchos taladros roscados se han sustituido por agujeros en forma de semiesfera. Así en el nudo esférico hay dos tipos de agujeros: taladros roscados para unir las barras que necesiten estar atornilladas y agujeros semiesféricos para unir las barras que necesiten de una unión de junta esférica.

Los agujeros se disponen de forma que sus centros están sobre las líneas azules de la imagen inferior y con una separación de 45° entre ellos, habiendo uno en todas las intersecciones de las líneas.

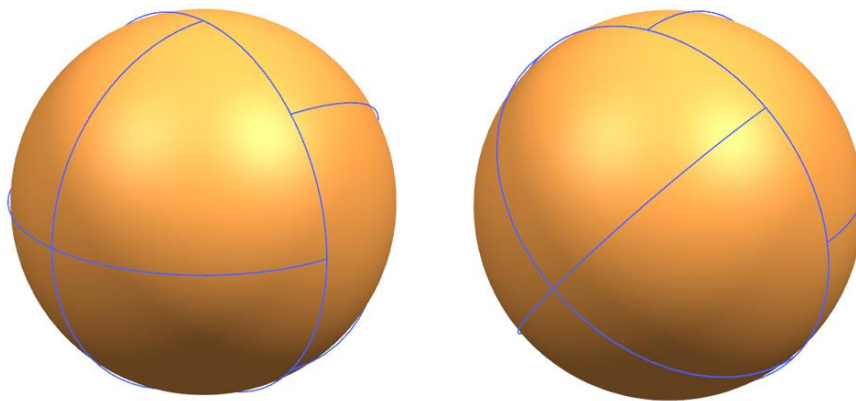


Figura 87: Líneas que siguen los agujeros de los nudos.

Así la esfera se puede dividir en dos mitades, separadas por la circunferencia completa, en las que hay el mismo número de agujeros semiesféricos, pero en distinta posición dispuestos sobre las “cruces” de imagen anterior, y de forma que una cruz está girada 45° respecto de la otra.

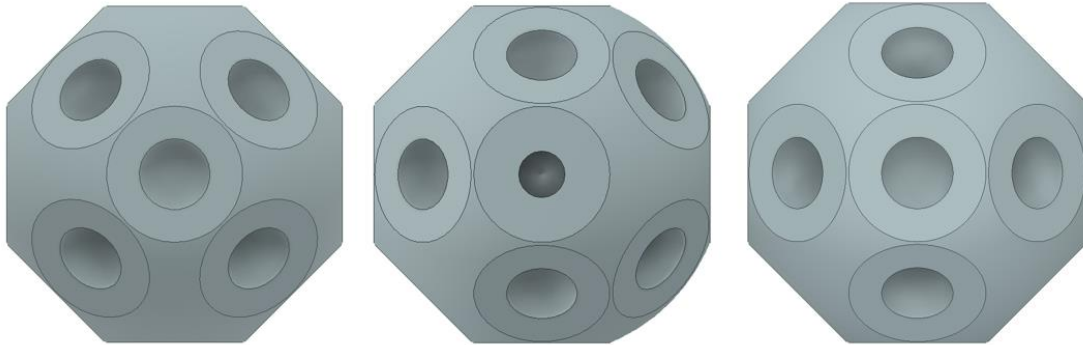


Figura 88: Vistas conceptuales del nudo principal.

El nudo tiene un total de 18 agujeros, de los cuales 3 son agujeros roscados, cuyos ejes se encuentran todos en el mismo plano, plano que separa la esfera en las dos mitades ya mencionadas, y colocados en la posición que se muestra en la imagen inferior. Los 15 restantes son agujeros semiesféricos.

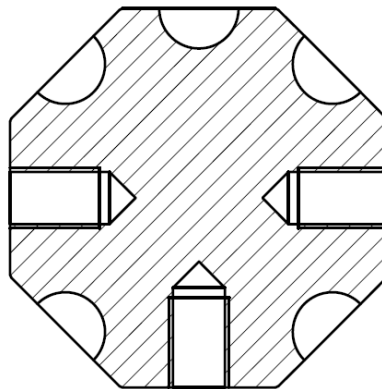


Figura 89: Posición de los agujeros roscados en el nudo principal.

Esta disposición de los agujeros permite, como ya se ha dicho anteriormente, acoger todas las combinaciones de barras que se encuentran en la columna, siendo necesaria únicamente la fabricación de los nudos principal y secundario.

Los taladros roscados tienen una profundidad de 22 mm y la rosca, de métrica 10 (M10x1,5), una profundidad de 20 mm, en ellos van atornillados los tornillos que a su vez van unidos gracias a una tuerca a los conos o platillos, igual que en el sistema ONDDI. Los agujeros semiesféricos tienen un diámetro de 16 mm y acogen a la bola de los pernos esféricos, dichos pernos también se unen al cono mediante una tuerca. Son semiesféricos para poder realizar el montaje del perno, una vez este se ha introducido en el agujero, se coloca una tapa que cubre la otra parte hemisférica de la rótula.

Como se observa en la figura 75, el nudo no es una esfera perfecta, se mecanizan unos asientos, de forma que cada agujero está realizado sobre una superficie plana.

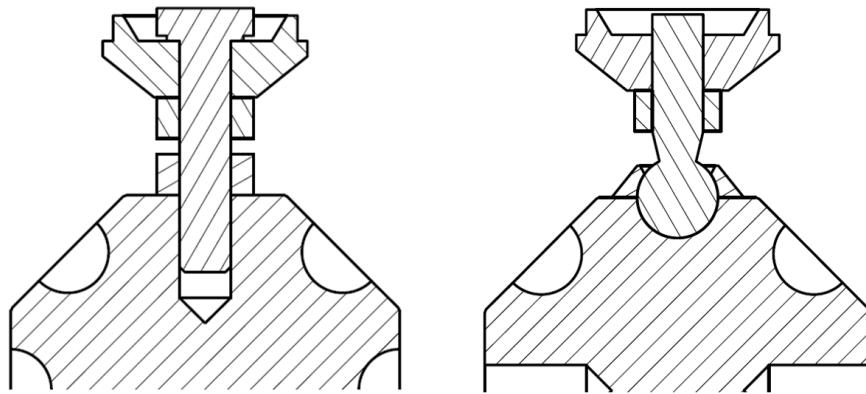


Figura 90: Montajes de la unión atornillada y la unión de junta esférica con el nudo.

Para poder unir la tapa al nudo se mecanizan en los asientos 6 agujeros roscados de métrica 3 separados 60° unos de otros y formando sus centros un radio de 11,5 mm.

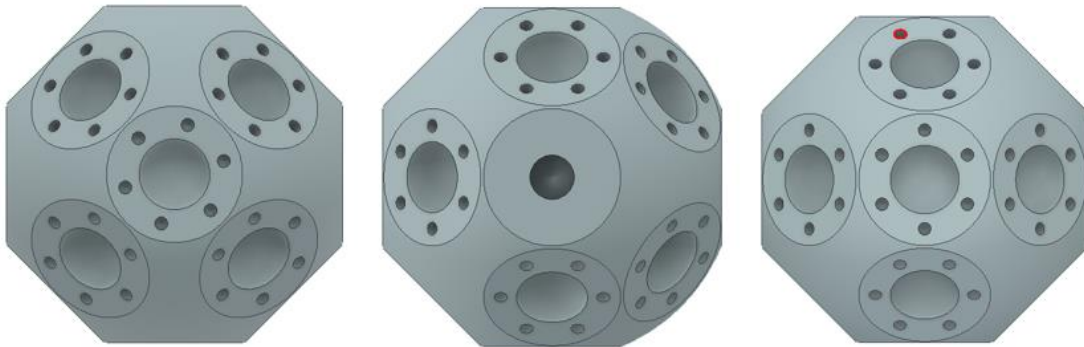


Figura 91: Nudo principal con agujeros para las tapas.

Los nudos denominados como secundarios, que son 4 (nudos 10, 16, 28 y 34), utilizados para atornillar los sistemas de amarre son exactamente iguales a los principales, solo cambia el agujero que se aprecia en la imagen, que en estos nudos es un agujero roscado M8 con la misma profundidad que los demás taladros roscados. Este agujero tiene que estar orientado de forma que “mire” la pieza que se va colocar en la columna.

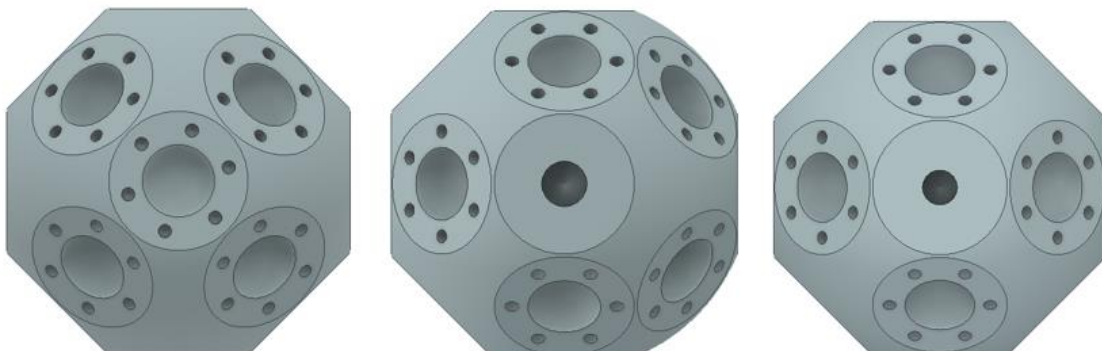


Figura 92: Nudo secundario.

9.2.3. DIMENSIONAMIENTO

La esfera, además de estar dotada de una serie de orificios que dan asiento a las barras y soportar las cargas producidas por ellas, sirve de separación entre las diferentes barras, por lo que tiene que tener un diámetro lo suficientemente grande como para evitar la interferencia entre ellas cuando la estructura alcance su máximo grado de movimiento (un radio de 1,85 m), es decir, cuando se alcanza un ángulo mínimo entre dos barras.

Para determinar el diámetro de la esfera se va a calcular la distancia mínima que tiene que haber entre el centro de la esfera y el centro de los agujeros semiesféricos, para ello hay que conocer tres valores: el diámetro de las barras (que es igual que el diámetro máximo del platillo), la distancia entre el centro de la bola del perno esférico y el cono, y el ángulo mínimo que se puede dar entre dos barras (se da en el último piso de la columna):

- Radio de las barras (r): 20 mm
- Distancia mínima entre la bola del perno esférico y el cono o platillo (d): 29 mm

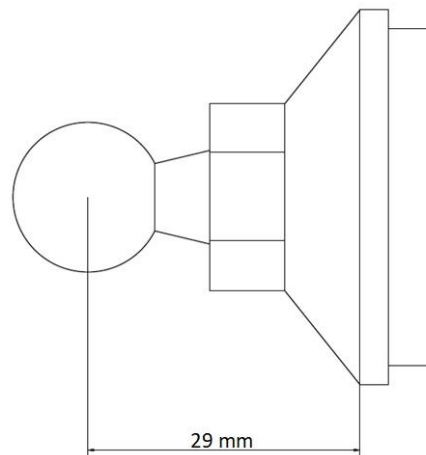


Figura 93: Distancia entre el perno y el cono.

- Ángulo mínimo entre barras (θ): 46,25°

El ángulo mínimo entre barras se da entre el actuador y la barra vertical unida con este, en el último piso (en los nudos 1 y 7).

Para este cálculo se ha considerado que el actuador tiene las mismas dimensiones que las barras con el fin de simplificar los cálculos, ya que, además de que estas son muy similares para el actuador escogido, el método de unión del actuador con el nudo podría ser distinto.

Se conoce la inclinación de las barras verticales del último piso, la longitud entre los nudos C y E (nudos que une el actuador), y la longitud de las barras (300 mm). A

partir de estos datos, mediante cálculo trigonométrico se hallará en ángulo mínimo mencionado anteriormente.

En las siguientes imágenes se observan tres triángulos a raíz de los cuales se calculará el ángulo deseado. Estos triángulos son: el formado por los puntos O, C y E; el formado por los puntos A, E y E'; y el formado por los puntos A, O y E'.

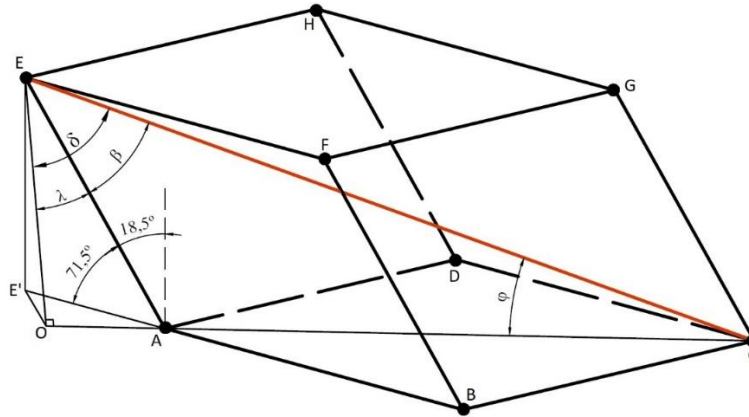


Figura 94: Esquema de uno de los cuatro cubos del último piso.

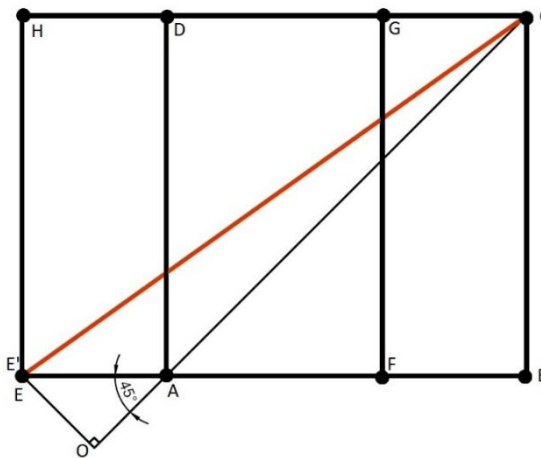


Figura 95: Vista en planta de la figura 94.

Se sabe que:

$$\overline{AE} = 300 \text{ mm}$$

$$\overline{CE} = 572 \text{ mm}$$

Y por tanto:

$$\overline{AC} = \sqrt{300^2 + 300^2} = 424,26 \text{ mm}$$

$$\overline{AE'} = \overline{AE} \cdot \cos 71,5 = 95,19 \text{ mm}$$

$$\overline{OA} = \overline{AE'} \cdot \cos 45^\circ = 67,31 \text{ mm}$$

Conocido el valor de \overline{OA} se puede saber el ángulo λ y la distancia \overline{CO} y con esta última se calcula el ángulo φ y gracias a este el ángulo δ . Restando al ángulo δ el ángulo λ se obtiene el ángulo β .

$$\overline{CO} = \overline{AC} + \overline{OA} = 491,6 \text{ mm}$$

$$\overline{CE} \cdot \cos \varphi = \overline{CO} \rightarrow \varphi = 30,75^\circ$$

$$180 = \varphi + 90 + \delta \rightarrow \delta = 59,25^\circ$$

$$\overline{AE} \cdot \sin \lambda = \overline{OA} \rightarrow \lambda = 13^\circ$$

$$\delta = \lambda + \beta \rightarrow \beta = 46,25^\circ$$

Con estos datos se determina la distancia mínima que tiene que haber entre el centro de la esfera y el centro de los agujeros semiesféricos, o lo que es lo mismo, la distancia entre el centro de la esfera y las superficies planas o asientos para las barras.

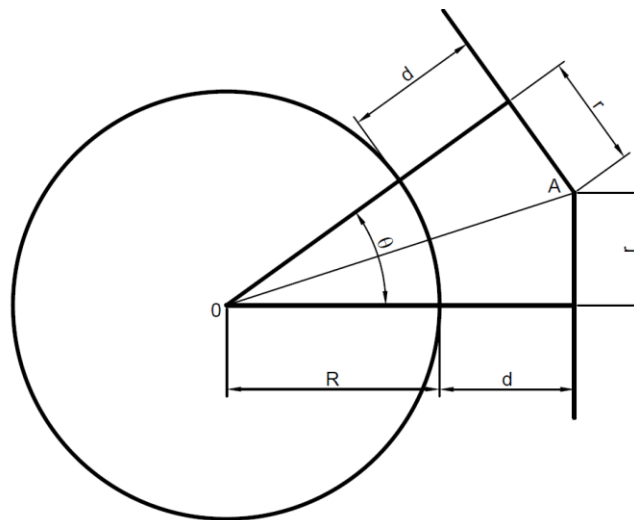


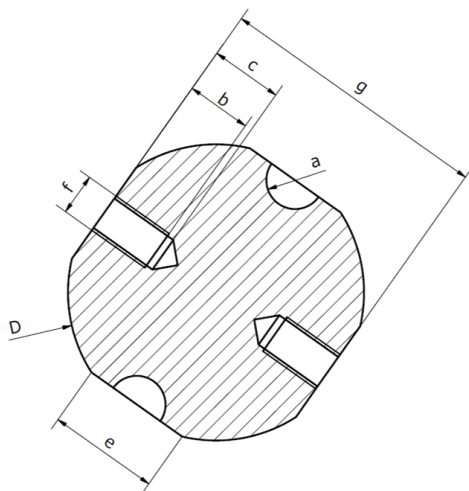
Figura 96: Esquema de las barras justo en el punto en que interferirían para el cálculo de R.

Para hallar “R” se iguala la distancia del punto 0 (centro de la esfera) al punto A (donde interfieren las dos barras) utilizando la fórmula del seno y el teorema de Pitágoras.

$$\overline{OA} = \frac{r}{\sin \frac{\theta}{2}} = \sqrt{r^2 + (R + d)^2} \rightarrow R = \frac{2 \cdot r \cdot \cot \frac{\theta}{2} - 2 \cdot d}{2} = 17,83 \text{ mm} \approx 18 \text{ mm}$$

La distancia mínima que puede haber entre el centro de la esfera y los agujeros es de 18mm, sin embargo, para tener un margen de error el nudo tendrá una distancia de unos 2 cm más, es decir, 38 mm.

Una vez obtenida la distancia R se le otorga un radio a la esfera. Se ha escogido un radio de 41 mm, y por tanto, un diámetro de 82 mm para que la superficie plana donde se encuentran los agujeros tenga un diámetro suficientemente grande como para poder colocar y unir con la esfera la tapa necesaria para las uniones de rótula.



Símbolo	Descripción	Medida (mm)
a	Radio agujero semiesférico	8
b	Profundidad rosca	20
c	Profundidad agujero roscado	22
e	Diámetro cara plana	30,79
f	Rosca	M10
g	Distancia entre caras planas	76
D	Diámetro esfera	82

Figura 97 y tabla 6: Dimensiones del nudo principal.

9.3. CURVATURA MÁXIMA ALCANZABLE POR LA COLUMNA

Para poder hallar el radio de curvatura máximo que puede alcanzar la estructura se necesitan saber previamente los ángulos mínimos que se pueden dar en la estructura. En este apartado se calculan estos ángulos. Por un lado, está el ángulo mínimo que puede haber entre dos barras, es decir, el ángulo que forman dos barras justo en el punto en que estas interfieren entre sí. Por otro lado, hay que tener en cuenta el máximo ángulo de giro posible entre el perno esférico y el nudo, que está limitado por la tapa del perno y se da cuando el perno interfiere o entra en contacto con dicha tapa.

El ángulo más crítico de estos dos será el que limite el máximo radio de curvatura que puede alcanzar la estructura. De lo visto previamente, se deduce que estos ángulos críticos se dan en el último piso de la columna.

9.3.1. ANGULO MÍNIMO ENTRE BARRAS

Para determinar este ángulo se sigue un planteamiento similar al del apartado 9.2, donde se determina el radio mínimo del nudo para un ángulo determinado que se alcanza cuando la estructura alcanza los 1850 mm de radio. Sólo que ahora el radio del nudo es

conocido y lo que se quiere determinar es el ángulo entre las barras. Las dos primeras barras en alcanzar este ángulo serían el actuador y la barra vertical que se junta con él en los nudos 1 y 7 (del último piso).

Los datos para este cálculo son los siguientes:

- Distancia del centro del nudo al centro de la esfera del perno (R): 38 mm
- Radio de las barras (r): 20 mm
- Distancia entre el centro de la esfera del perno y el inicio del tubo (d): 29 mm

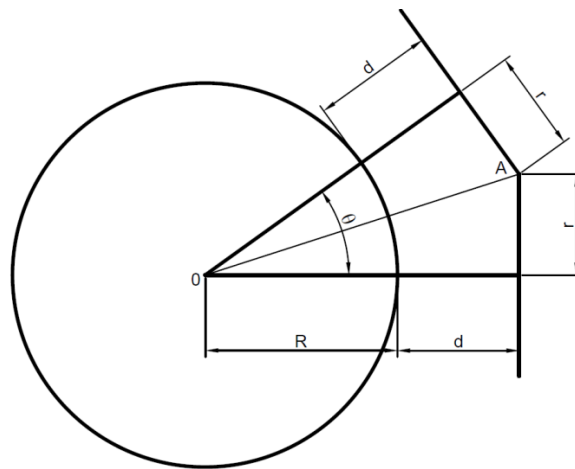


Figura 98: Esquema de las barras justo en el punto en que interfieren para el cálculo de θ .

A diferencia del otro caso, donde se calculaba el radio, este caso es más sencillo, y basta con realizar el siguiente cálculo:

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{r}{R + d} = \frac{20}{38 + 29} = 0,298 \rightarrow \theta = 33,24^\circ$$

Para este cálculo se ha considerado que el actuador tiene las mismas dimensiones que las barras con el fin de simplificar los cálculos, ya que, además de que estas son muy similares para el actuador escogido, el método de unión del actuador con el nudo podría ser distinto.

9.3.2. ÁNGULO DE GIRO MÁXIMO DEL PERNO

Para este cálculo hay que tener en cuenta los siguientes datos:

- Radio del cilindro roscado del perno (R): 5 mm
- Distancia vertical entre el centro de la esfera y la base superior de la tapa (h): 6 mm
- Radio del agujero superior de la tapa (d): 7,38 mm
- Radio de la esfera: 8 mm

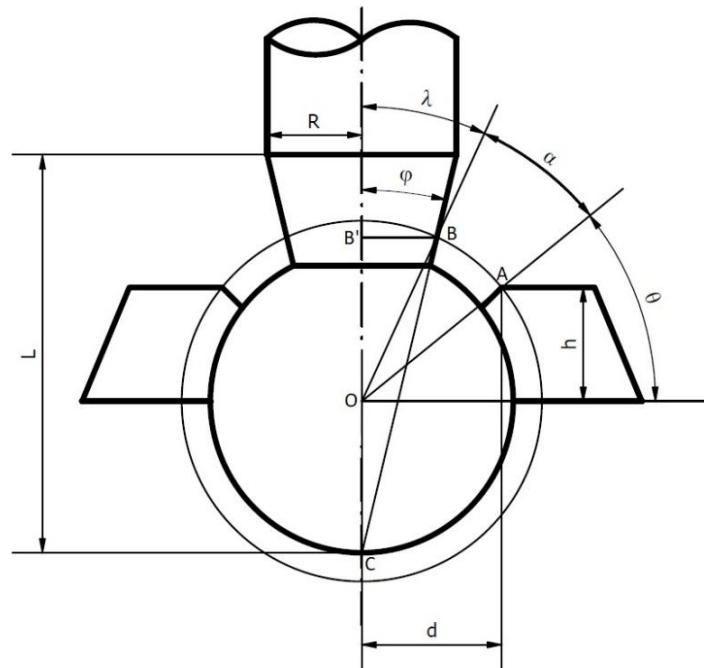


Figura 99: Dibujo conceptual del perno esférico y la tapa con cotas.

El ángulo a determinar es el ángulo α , que es el ángulo que puede girar el perno (en cualquier dirección) hasta interferir con la tapa.

Se observa que el punto de la tapa donde se produciría el contacto es el punto A (esquina superior del chaflán), por tanto, trazando una circunferencia de radio \overline{OA} se determina el punto del perno que entra en contacto con la tapa (punto B), que es el punto de corte entre el perno y esta circunferencia.

En primer lugar, sabiendo el radio del agujero del chaflán (d) y la distancia entre el centro de la esfera y la base superior de la tapa (h) se determina tanto el ángulo θ , como la distancia \overline{OA} .

$$\tan \theta = \frac{h}{d} \rightarrow \theta = 39,11^\circ$$

$$\overline{OA} = \sqrt{h^2 + d^2} \rightarrow \overline{OA} = 9,51 \text{ mm}$$

En segundo lugar, se determina el ángulo φ :

$$\tan \varphi = \frac{R}{L} \rightarrow \varphi = 13,4^\circ$$

Conociendo la distancia \overline{OB} , que es la misma que la distancia \overline{OA} , y conociendo también la distancia \overline{CO} , que es el radio de la esfera, se puede determinar la distancia $\overline{OB'}$ resolviendo las siguientes ecuaciones:

$$\overline{OB}^2 = \overline{OB'}^2 + \overline{BB'}^2 \rightarrow \overline{BB'} = \sqrt{\overline{OB}^2 + \overline{OB'}^2}$$

$$\tan \varphi = \frac{\overline{BB'}}{\overline{CB'}} = \frac{\overline{BB'}}{\overline{CO} + \overline{OB'}}$$

Sustituyendo $\overline{BB'}$ y resolviendo:

$$\tan \varphi = \frac{\sqrt{\overline{OB}^2 + \overline{OB'}^2}}{\overline{CO} + \overline{OB'}} \rightarrow \overline{OB'} = 8,66 \text{ mm}$$

Una vez obtenido $\overline{OB'}$ se puede calcular el ángulo λ :

$$\cos \lambda = \frac{\overline{OB'}}{\overline{OB}} \rightarrow \lambda = 24,64^\circ$$

Por último, se determina el ángulo α , sabiendo que los tres ángulos: α , θ y λ forman 90 grados en total:

$$90 = \alpha + \lambda + \theta \rightarrow \alpha = 26,24^\circ$$

Este ángulo depende sobre todo del chaflan y la altura de la tapa, por lo que modificando esos parámetros se podría llegar a un ángulo de giro algo más grande que el que se acaba de calcular.

9.3.3. RELACIÓN DEL ÁNGULO MÍNIMO ENTRE BARRAS Y EL ÁNGULO DE GIRO DEL PERNO

En este apartado se va a calcular el ángulo que se produce entre el perno y el nudo en las barras horizontales de último piso cuando la estructura está en la posición en la que se da el ángulo mínimo entre barras calculado en el apartado 9.3.1, y se observará si el ángulo que puede girar el perno supera o no al calculado en el apartado anterior.

Si el ángulo es superado significa que la estructura no puede alcanzar la posición en la que se produce el ángulo mínimo entre barras ($33,24^\circ$), y que por tanto el radio mínimo de curvatura lo determinará el ángulo máximo de giro del perno calculado en el anterior apartado.

Para calcular el ángulo de giro del perno cuando las barras ya mencionadas forman un ángulo de $33,24^\circ$, hay que calcular antes el ángulo de inclinación de la barra vertical de ese piso (ángulo α de la imagen inferior).

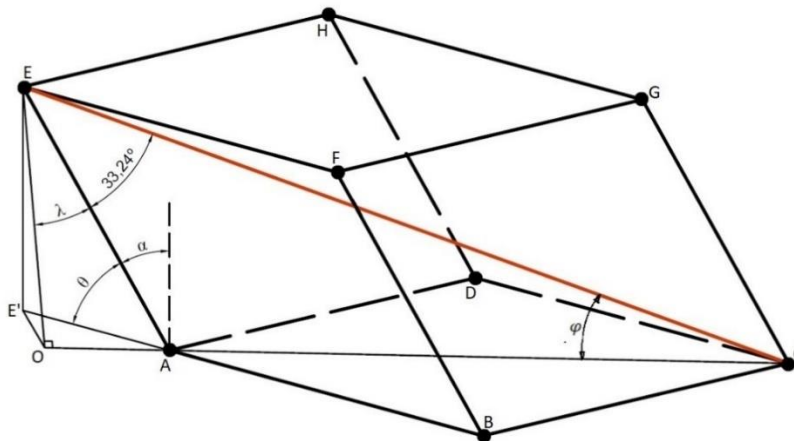


Figura 100: Esquema de uno de los cuatro cubos del último piso.

En la figura 100 se muestra de forma conceptual una de las partes del último piso de la estructura cuando el actuador (línea roja) forma $33,24^\circ$ con la barra que une los nudos E-A. En esta imagen se pueden observar tres triángulos a partir de los cuales se va a hallar el valor de α . Estos triángulos son: el formado por los puntos O, C y E; el formado por los puntos A, E y E'; y el formado por los puntos A, O y E'.

A continuación, se muestra lo mismo que en la imagen anterior, pero en su vista de planta, para comprender mejor el procedimiento.

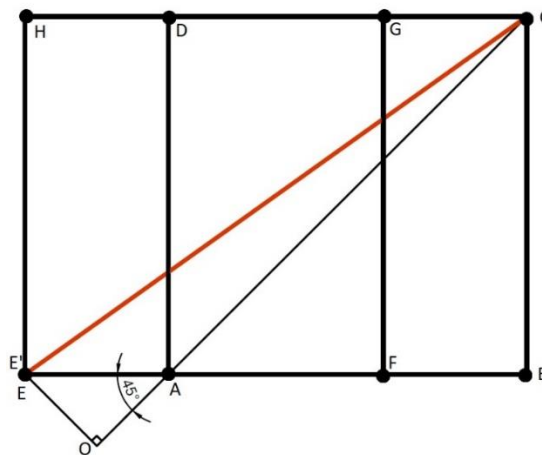


Figura 101: Vista en planta de la figura 94.

En primer lugar, se procede al cálculo de la distancia $\overline{E'A}$, y una vez determinada esta distancia, sabiendo que todas las distancias entre nudos son 300 mm, se halla el ángulo θ .

La distancia \overline{AC} se calcula mediante el teorema de Pitágoras:

$$\overline{AC} = \sqrt{300^2 + 300^2} = 424,26 \text{ mm}$$

Se sabe que:

$$\tan \varphi = \frac{\overline{EO}}{\overline{AC} + \overline{AO}}$$

$$\tan \lambda = \frac{\overline{AO}}{\overline{EO}}$$

$$300^2 = \overline{EO}^2 + \overline{AO}^2 \rightarrow \overline{AO} = \sqrt{300^2 - \overline{EO}^2}$$

$$\varphi = 180 - 90 - 33,24 - \lambda \rightarrow \varphi = 56,76 - \lambda$$

Sustituyendo φ en la primera ecuación de las anteriores:

$$\tan(56,76 - \lambda) = \frac{\overline{EO}}{\overline{AC} + \overline{AO}}$$

$$\frac{\tan 56,76 - \tan \lambda}{1 + \tan 56,76 \cdot \tan \lambda} = \frac{\overline{EO}}{\overline{AC} + \overline{AO}}$$

Se despeja $\tan \lambda$:

$$\tan \lambda = \frac{1,526 \cdot \overline{AC} + 1,526 \cdot \overline{AO} - \overline{EO}}{1,526 \cdot \overline{EO} + \overline{AO} + \overline{AC}}$$

Y se sustituye por la segunda expresión:

$$\frac{\overline{AO}}{\overline{EO}} = \frac{1,526 \cdot \overline{AC} + 1,526 \cdot \overline{AO} - \overline{EO}}{1,526 \cdot \overline{EO} + \overline{AO} + \overline{AC}}$$

Se sustituye \overline{AO} por la tercera expresión, y sabiendo también el valor de \overline{AC} , se determina el valor de \overline{EO} :

$$300^2 + \overline{AC} \sqrt{300^2 - \overline{EO}^2} = 1,526 \cdot \overline{AC} \cdot \overline{EO} \rightarrow \overline{EO} \simeq 248,8 \text{ mm}$$

Y por tanto, según la tercera expresión: $\overline{AO} = 167,6 \text{ mm}$

Una vez obtenida la distancia \overline{AO} se determina la distancia $\overline{AE'}$, sabiendo que el ángulo entre estas es 45° :

$$\overline{AE'} \cdot \cos 45^\circ = \overline{AO} \rightarrow \overline{AE'} = 237 \text{ mm}$$

Finalmente, con esta distancia $\overline{AE'}$ se puede calcular el ángulo θ , y por tanto el ángulo α :

$$300 \cdot \cos \theta = \overline{AE'} \rightarrow \theta = 37,8^\circ$$

$$90 = \theta + \alpha \rightarrow \alpha = 52,2^\circ$$

Conocidos los ángulos α y θ , se puede hallar el ángulo de giro del perno, ya que el nudo tiene la misma inclinación que la barra (α) y son conocidas todas las dimensiones del nudo y la distancia entre nudos.

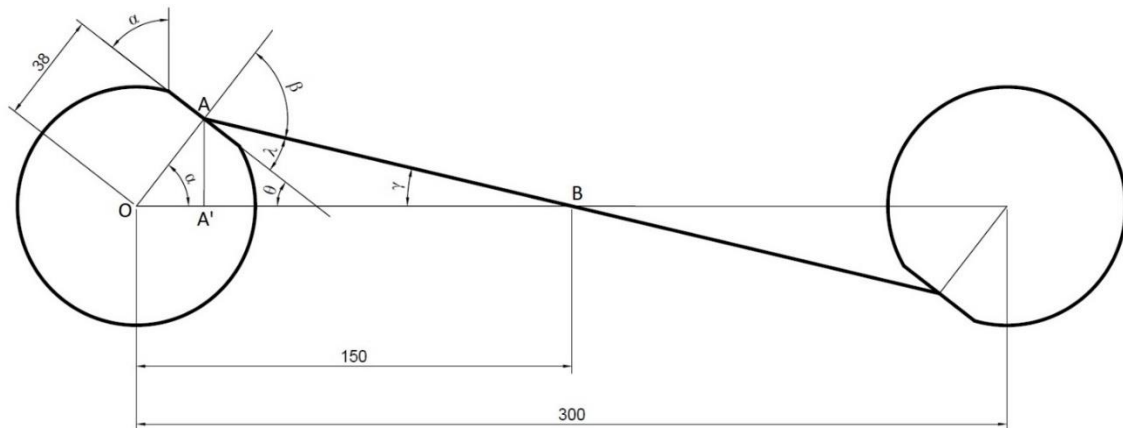


Figura 102: Representación conceptual de la unión entre los nudos del último piso. Cotas en mm.

El objetivo es calcular el ángulo β , correspondiente con el ángulo de rotación del perno. Para ello se sigue el siguiente procedimiento.

$$\overline{OA'} = 38 \cdot \cos \alpha = 23,3 \text{ mm}$$

$$\overline{AA'} = 38 \cdot \sin \alpha = 30 \text{ mm}$$

$$\tan \gamma = \frac{\overline{AA'}}{150 - \overline{OA'}} \rightarrow \gamma = 13,3^\circ$$

$$180 = \gamma + (180 - \theta) + \lambda \rightarrow \lambda = 24,5^\circ$$

$$90 = \beta + \lambda \rightarrow \beta = 65,5^\circ > 26,24^\circ$$

Este ángulo β es mucho mayor que los $26,24^\circ$ calculados en el apartado anterior, que es el ángulo máximo de giro del perno. Por tanto el radio mínimo que puede alcanzar la columna depende de estos $26,24^\circ$ que se dan en el perno y no de los $33,24^\circ$ entre el actuador y la barra.

9.3.4. CÁLCULO DEL RADIO MÍNIMO ALCANZABLE

En este apartado se vuelve a calcular el ángulo α de inclinación de las barras verticales del último piso de la columna, pero esta vez partiendo del ángulo β ya calculado

en el apartado anterior. A raíz de este ángulo es sencillo obtener el radio mínimo que se puede alcanzar con esta columna dimensionada de la forma en la que se explica en el apartado XX.

Cálculo del nuevo ángulo α :

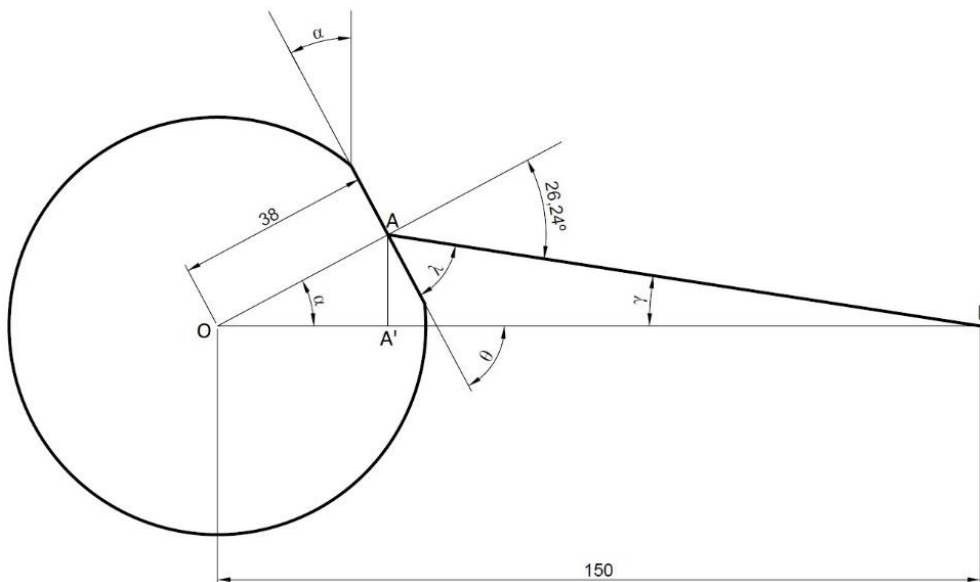


Figura 103: Esquema para el cálculo de α .

En la figura 108 se observan dos triángulos: el formado por los puntos O, A y A' y el formado por los puntos B, A y A'. De estos triángulos se sabe que:

$$\tan \gamma = \frac{\overline{AA'}}{150 - \overline{OA'}}$$

$$\tan \alpha = \frac{\overline{AA'}}{\overline{OA'}}$$

$$38^2 = \overline{AA'}^2 + \overline{OA'}^2 \rightarrow \overline{AA'} = \sqrt{38^2 - \overline{OA'}^2}$$

$$180 = \gamma + 90 + \alpha + 63,76 \rightarrow \alpha = 26,24 - \gamma$$

Sustituyendo α en la segunda expresión y despejando $\tan \gamma$ queda la expresión:

$$\tan (26,24 - \gamma) = \frac{\overline{AA'}}{\overline{OA'}}$$

$$\tan \gamma = \frac{\tan 26,24 \cdot \overline{OA'} - \overline{AA'}}{\tan 26,24 \cdot \overline{AA'} + \overline{OA'}}$$

Ahora se igualan las dos expresiones $\tan \gamma$ y se desarrolla la ecuación:

$$\frac{\tan 26,24 \cdot \overline{OA'} - \overline{AA'}}{\tan 26,24 \cdot \overline{AA'} + \overline{OA'}} = \frac{\overline{AA'}}{150 - \overline{OA'}}$$

$$\tan 26,24 \cdot \overline{AA'}^2 = 150 \cdot \tan 26,24 \cdot \overline{OA'} - 150 \cdot \overline{AA'} - \tan 26,24 \cdot \overline{OA'}^2$$

A continuación, se sustituye $\overline{AA'}$ y se despeja $\overline{OA'}$:

$$\tan 26,24 \cdot (38^2 - \overline{OA'}^2) = 150 \cdot \tan 26,24 \cdot \overline{OA'} - 150 \cdot \sqrt{38^2 - \overline{OA'}^2} - \tan 26,24 \cdot \overline{OA'}^2$$

$$\overline{OA'} = 35,75 \text{ mm}$$

Finalmente se determina α :

$$300 \cdot \cos \alpha = \overline{OA'} \rightarrow \alpha = 19,8^\circ$$

Con este ángulo ya se puede determinar el radio más pequeño al que puede llegar la columna:

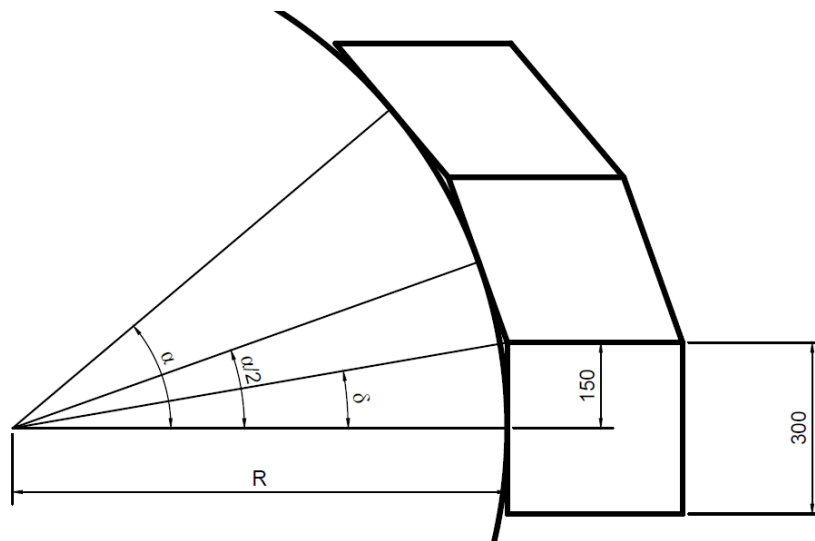


Figura 104: Dibujo esquemático para el cálculo del radio.

$$\delta = \frac{\alpha}{4} = 4,95^\circ$$

$$\tan 4,95 = \frac{150}{R} \rightarrow R = 1732 \text{ mm}$$

Como ya se ha dicho, modificando las dimensiones de la tapa se podría llegar a un radio más pequeño. También se podrían obtener radios más pequeños aumentando la longitud de las barras horizontales.

También cabe destacar que este radio es ligeramente inferior al radio para el cual se ha definido la estructura (1850 mm).

9.4. CÁLCULO ESTÁTICO APROXIMADO DE LA ESTRUCTURA

En este apartado se procede a un cálculo aproximado de las tensiones axiales, de tracción o de compresión, y de las deformaciones (desplazamiento de los nudos) que se dan en la columna tanto cuando se está fabricando una pieza en posición vertical como cuando se está fabricando una pieza con una curvatura de 1,85 m de radio (posiciones de los nudos en la tabla 2).

Este estudio se ha realizado mediante el programa informático de cálculo estructural en 3D *CESTRI* [22], en el que únicamente se pueden introducir las barras y los nudos. Para el cálculo se han seleccionado barras tubulares de 40 mm de diámetro y 2 mm de espesor de acero S235JR y nudos totalmente articulados. Para simular los nudos que están atornillados al conjunto de apoyo se han colocado en dichos nudos apoyos triarticulados.

Se han realizado tres hipótesis, usadas para las dos posiciones de la columna (recta y “doblada”), en la primera se simulan los resultados que produce una pieza de 200 kg de peso sujeta en tres columnas, en la segunda los resultados que produce una pieza de 444,44 kg de peso también elevada mediante tres columnas, y en la tercera se simula, además de una sujeción de una pieza como la de la segunda hipótesis, una operación de taladrado de 910 N de fuerza aplicados en la parte de arriba, en la parte central y en la parte de abajo de la pieza.

Se ha considerado que el peso se reparte por partes iguales entre los cuatro nudos donde se coloca el sistema de amarre, y dichos pesos se han aplicado como cargas puntuales en los nudos.

9.4.1. COLUMNA EN POSICIÓN RECTA

La estructura vista en *CESTRI* es la que se muestra en la figura 100, en la que se también se señala el número de las barras y de los nudos con el fin de determinar posteriormente con mayor facilidad las barras cuyas tensiones son mayores. Las fuerzas aplicadas en este análisis se aplican en los nudos 21, 27, 39 y 45.

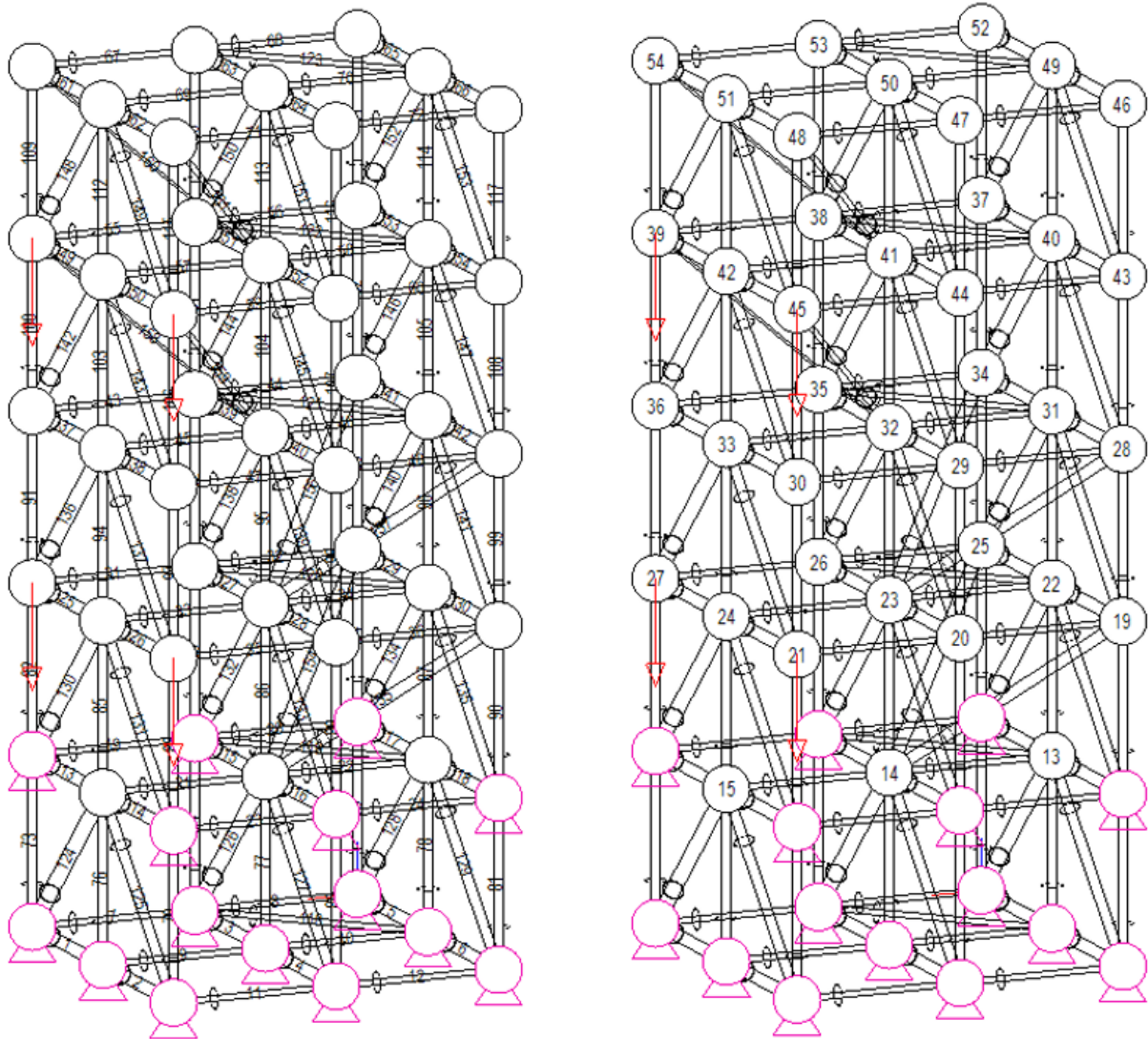


Figura 105: Numeración de barras y nudos en posición recta.

9.4.1.1. HIPÓTESIS 1: 200 kg ENTRE TRES COLUMNAS

Como se considera que el peso se reparte por partes iguales en los cuatro nudos, cada uno de estos recibe la misma carga puntual.

- Peso en una columna: $200/3 = 66,7$ kg
- Peso en cada nudo: $66,7/4 = 16,67$ kg
- Coeficiente de mayoración: 1,35
- Fuerza aplicada en cada nudo: $1,35 \cdot 16,67 \cdot 9,81 = 220,725$ N (-z)

9.4.1.1.1. Esfuerzos

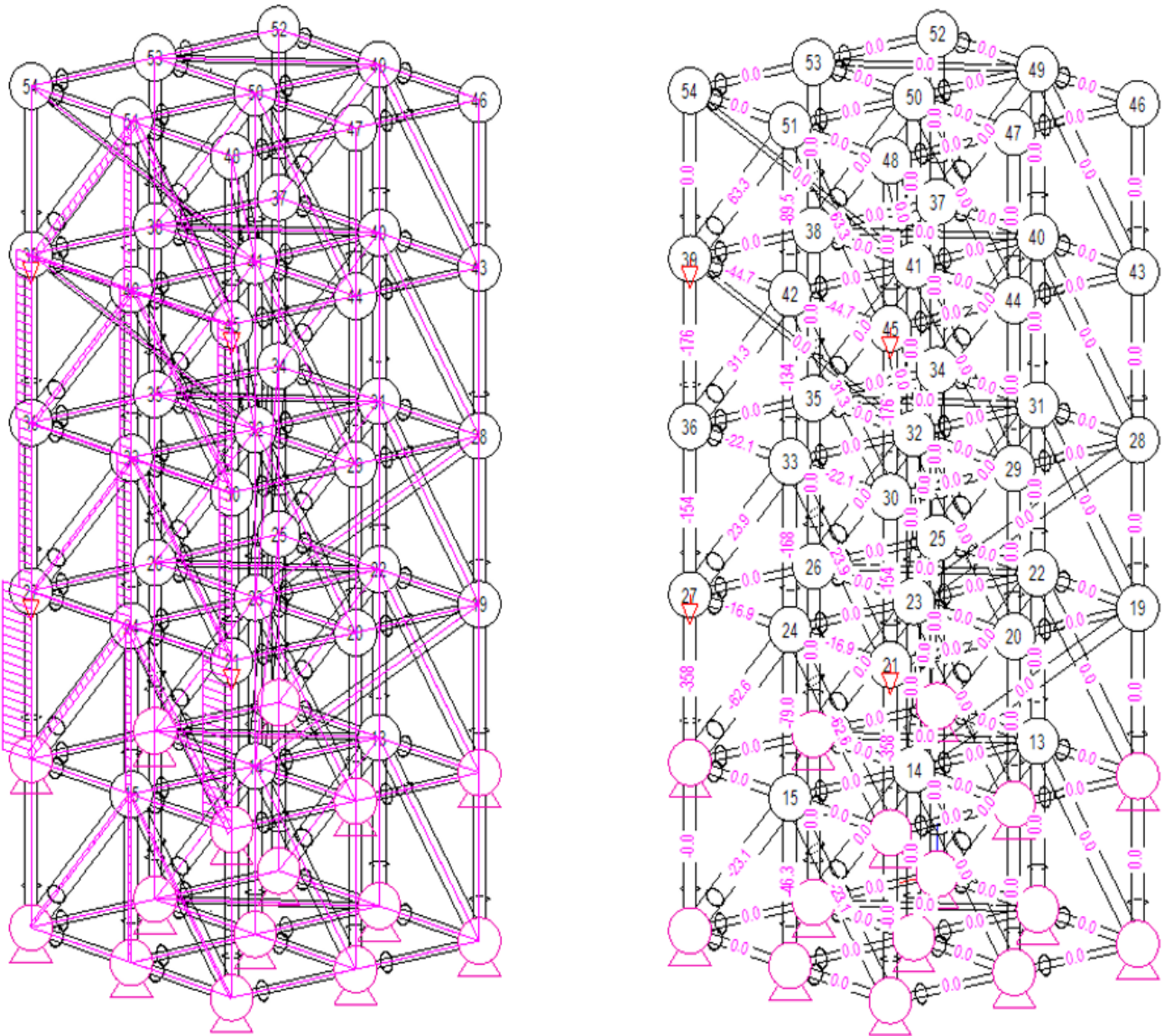


Figura 106: Diagrama y valores de los esfuerzos axiales (columna recta, hipótesis 1).

El mayor esfuerzo de tracción se da en las barras 148 y 149, cuyos nudos de sus extremos son 39, 51 y 51, 45 respectivamente, y su valor es de 63,28 N

El mayor esfuerzo de compresión se da en la barra 82, que tiene en sus extremos los nudos 18 y 27, y su valor des de 357,65 N.

9.4.1.1.2. Deformaciones

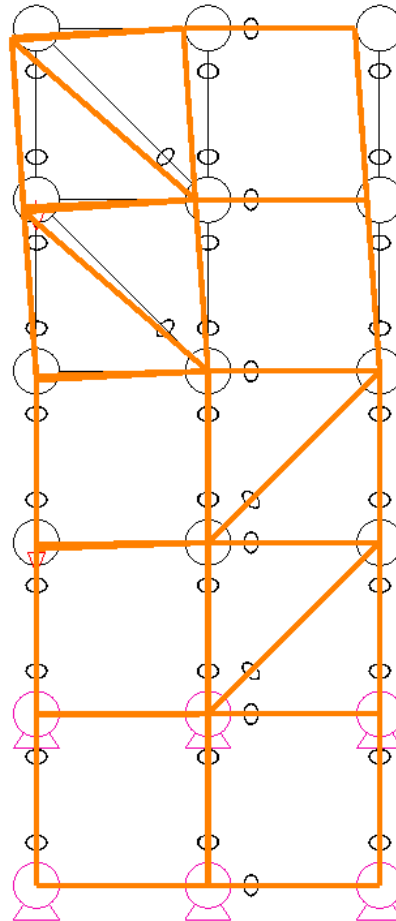


Figura 107: Perfil de la deformada de la columna en posición recta. Hipótesis 1 (factor de amplificación de 5000mm/mm)

El mayor desplazamiento de los nudos, como se observa en la figura X, se da en los del último piso (del 46 al 54), dichos desplazamientos se recogen en la siguiente tabla.

HIPÓTEIS 1. COLUMNA RECTA				
Nº Nudo	Desplazamiento (mm)			
	X	Y	Z	Total
46	0,00865	0	0	0,00865
47	0,00865	0	0	0,00865
48	0,00865	0	-0,0042	0,0096
49	0,00865	0	0	0,00865
50	0,00865	0	0	0,00865
51	0,00865	0	-0,00315	0,0092
52	0,00865	0	0	0,00865
53	0,00865	0	0	0,00865
54	0,00865	0	-0,0042	0,0096

Tabla 7: Desplazamientos en los nudos del último piso (columna reta, hipótesis 1).

9.4.1.2. HIPÓTESIS 2: 444,44 kg ENTRE TRES COLUMNAS

En esta hipótesis el reparto del peso también se considera igual en los cuatro nudos, así que cada uno de los nudos recibe la misma carga puntual.

- Peso en una columna: $444,44/3 = 148,15$ kg
- Peso en cada nudo: $148,15/4 = 37,04$ kg
- Coeficiente de mayoración: 1,35
- Fuerza aplicada en cada nudo: $1,35 \cdot 37,04 \cdot 9,81 = 490,5$ N (-z)

9.4.1.2.1. Esfuerzos

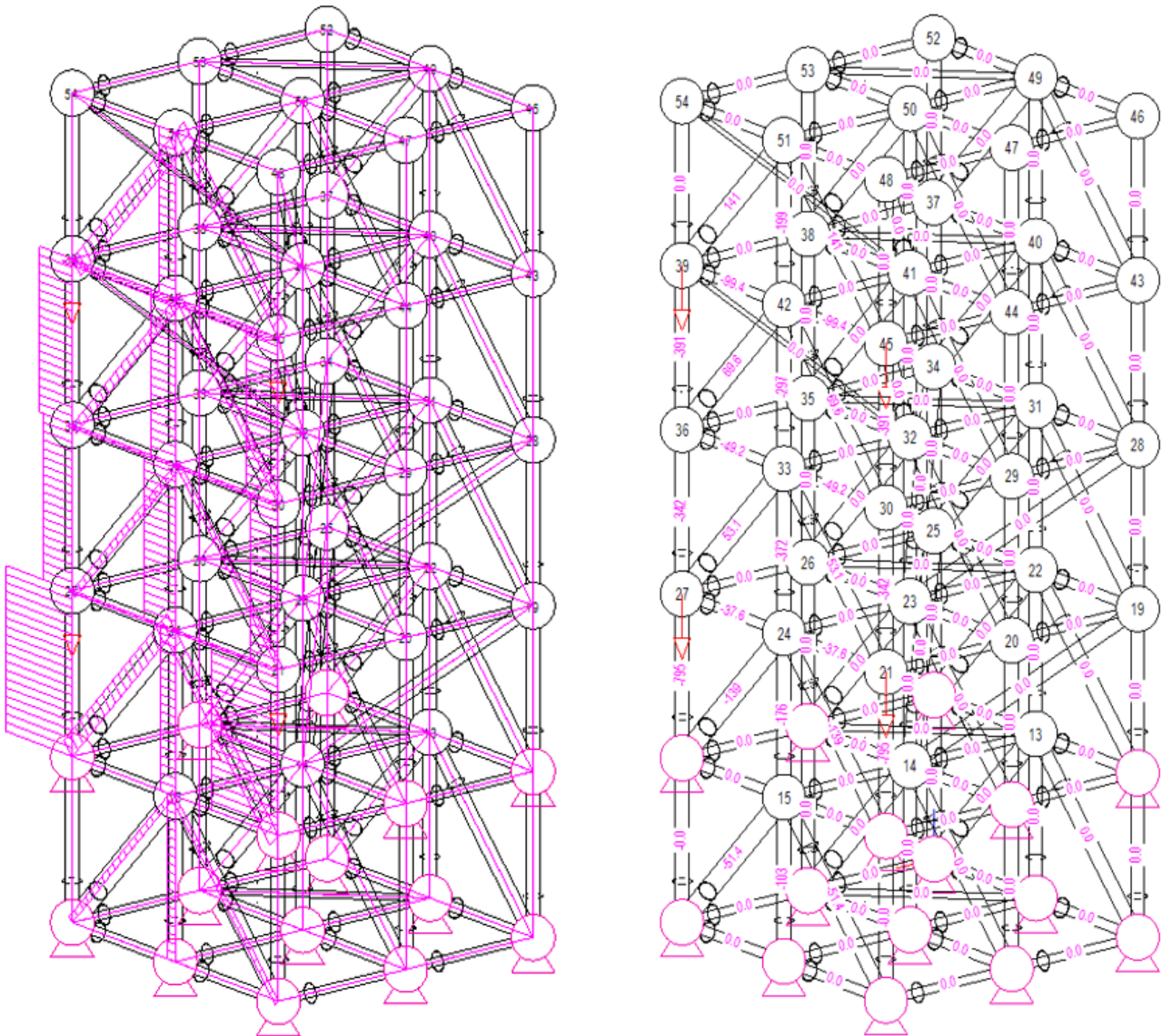


Figura 108: Diagrama y valores de los esfuerzos axiales (columna recta, hipótesis 2).

El mayor esfuerzo de tracción, de valor 140,61 N, se da en las barras 148 y 149, barras en cuyos extremos se encuentran los nudos 39, 51 y 51, 45 respectivamente.

El mayor esfuerzo de compresión se da en la barra 82, que tiene en sus extremos los nudos 18 y 27, y su valor des de 794,77 N

9.4.1.2.2. Deformaciones

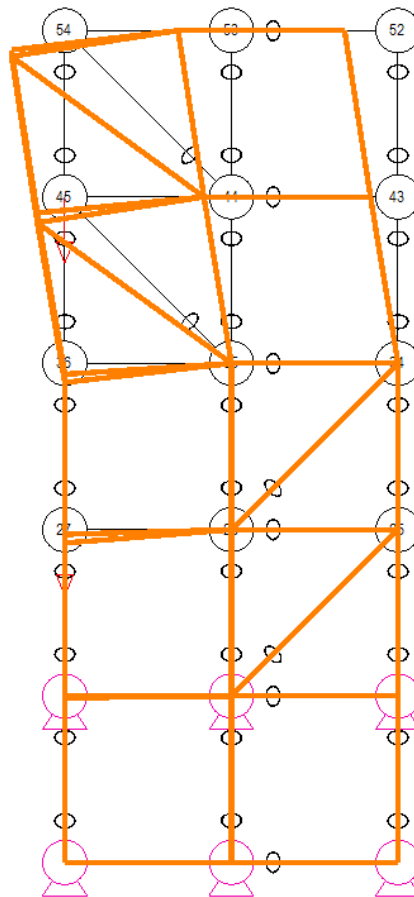


Figura 109: Perfil de la deformada de la columna en posición recta. Hipótesis 2 (factor de amplificación de 5000mm/mm).

El desplazamiento más grande también se da en los nudos del último piso.



HIPÓTEIS 2. COLUMNA RECTA				
Nº Nudo	Desplazamiento (mm)			
	X	Y	Z	Total
46	0,019	0	0	0,019
47	0,019	0	0	0,019
48	0,019	0	-0,0093	0,021
49	0,019	0	0	0,019
50	0,019	0	0	0,019
51	0,019	0	-0,007	0,02
52	0,019	0	0	0,019
53	0,019	0	0	0,019
54	0,019	0	-0,0093	0,021

Tabla 8: Desplazamientos en los nudos del último piso (columna recta hipótesis 2).

9.4.1.3. HIPÓTESIS 3: HIPÓTESIS 2 + 910 N DE TALADRO

9.4.1.3.1. Hipótesis 3.1. Taladro repartido en los apoyos superiores.

Los 910 N ejercidos por la operación de taladrado se reparten entre los nudos 39 y 45 por igual, 455 N en cada nudo.

- Peso de la pieza en una columna: $444,44/3 = 148,15$ kg
- Peso en cada nudo: $148,15/4 = 37,04$ kg
- Coeficiente de mayoración: 1,35
- Fuerza aplicada en cada nudo por el peso: $1,35 \cdot 37,04 \cdot 9,81 = 490,5$ N (-z)
 - Nudo 21: 490,5 N (-z)
 - Nudo 27: 490,5 N (-z)
 - Nudo 39: 455 N (-x) y 490,5 N (-z)
 - Nudo 45: 455 N (-x) y 490,5 N (-z)

9.4.1.3.1.1. Esfuerzos

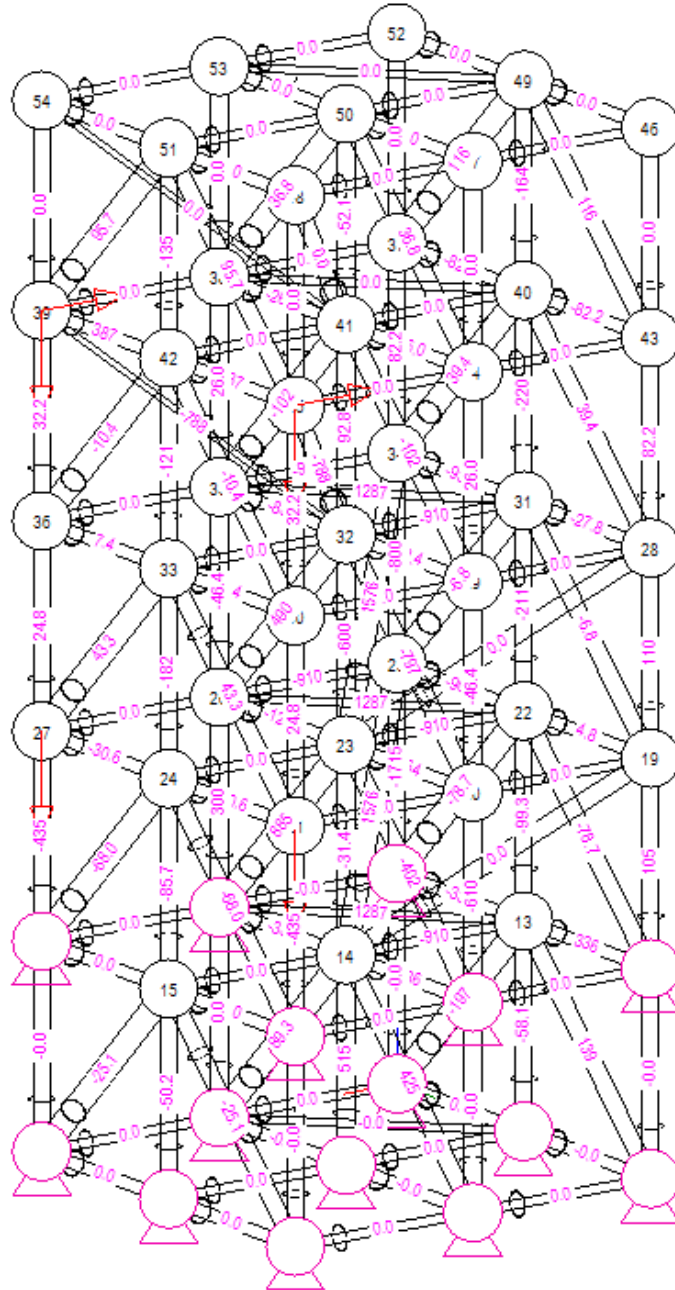


Figura 110: Valores de los esfuerzos axiales (columna recta, hipótesis 3.1).

Los mayores esfuerzos de tracción se dan en las barras 119 (nudos 13-17), 120 (nudos 22-26) y 121(nudos 31-35) con un valor de 1286,93 N

El mayor esfuerzo de compresión se da en la barra 84 (nudos 16-25), con un valor de 1714,71 N.

9.4.1.3.1.2. Deformaciones

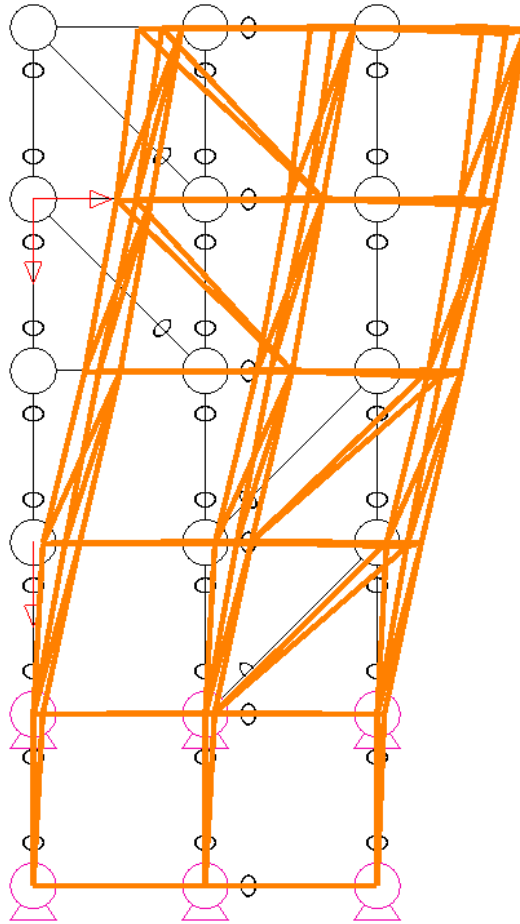


Figura 111: Perfil de la deformada de la columna en posición recta. Hipótesis 3.1 (factor de amplificación de 700mm/mm).

Nuevamente los desplazamientos de mayor valor, recogidos en la tabla X, se dan en el último piso de la columna.

HIPÓTEIS 3.1. COLUMNA RECTA				
Nº Nudo	Desplazamiento (mm)			
	X	Y	Z	Total
46	-0,262	-0,0166	0,0018	0,263
47	-0,262	0,0323	-0,0038	0,264
48	-0,262	0	-0,0023	0,262
49	-0,37	-0,0166	-0,0046	0,370
50	-0,37	0,0323	-0,00046	0,371
51	-0,37	0	-0,0035	0,370
52	-0,321	-0,0166	-0,0148	0,322
53	-0,321	0,0323	0,0017	0,323
54	-0,321	0	-0,0023	0,321

Tabla 9: Desplazamientos en los nudos del último piso (columna recta, hipótesis 3.1).

9.4.1.3.2. Hipótesis 3.2. Taladro repartido en los apoyos inferiores.

Los 910 N ejercidos por la operación de taladrado se reparten entre los nudos 21 y 27 por igual, 455 N en cada nudo.

- Peso de la pieza en una columna: $444,44/3 = 148,15$ kg
- Peso en cada nudo: $148,15/4 = 37,04$ kg
- Coeficiente de mayoración: 1,35
- Fuerza aplicada en cada nudo por el peso: $1,35 \cdot 37,04 \cdot 9,81 = 490,5$ N (-z)
 - Nudo 21: 455 N (-x) y 490,5 N (-z)
 - Nudo 27: 455 N (-x) y 490,5 N (-z)
 - Nudo 39: 490,5 N (-z)
 - Nudo 45: 490,5 N (-z)

9.4.1.3.2.1. Esfuerzos

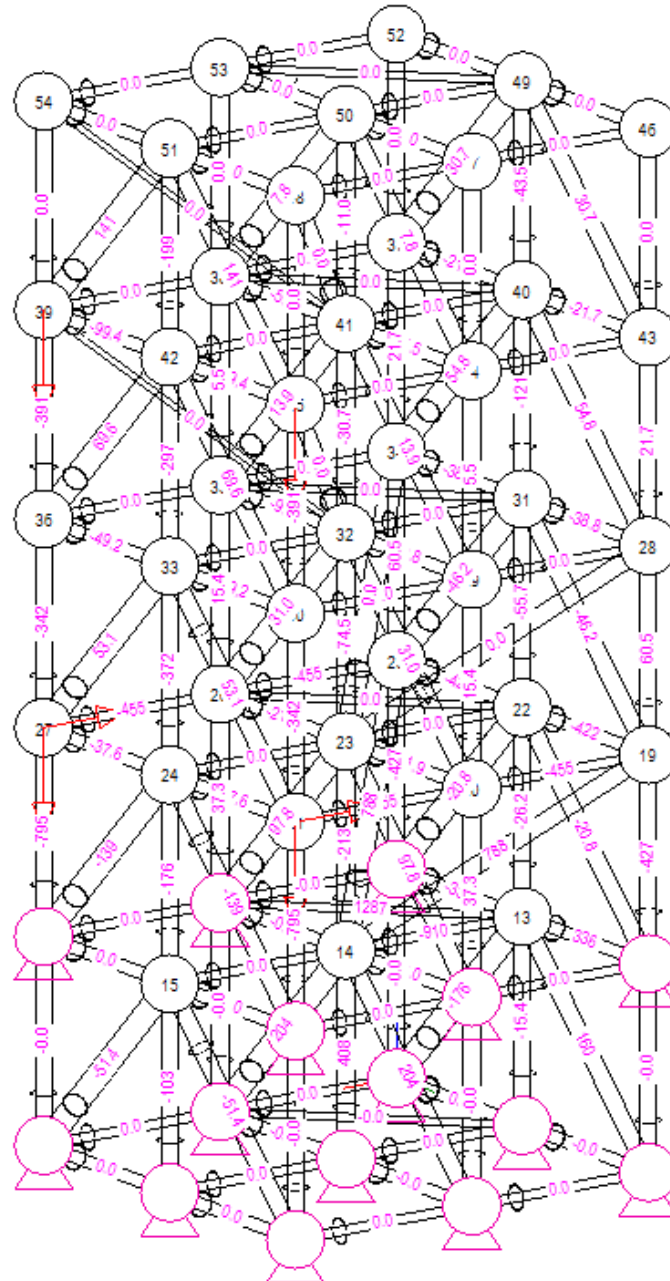


Figura 112: Valores de los esfuerzos axiales (columna recta, hipótesis 3.2).

La barra 119 (nodos 13-17) está sometida al mayor esfuerzo de tracción, con un valor de 1286,93 N.

Las barras 82 (nodos 18-27) y 88 (nodos 12-21) están sometidas al mayor esfuerzo de compresión, cuyo valor es de 794,77 N

9.4.1.3.2.2. Deformaciones

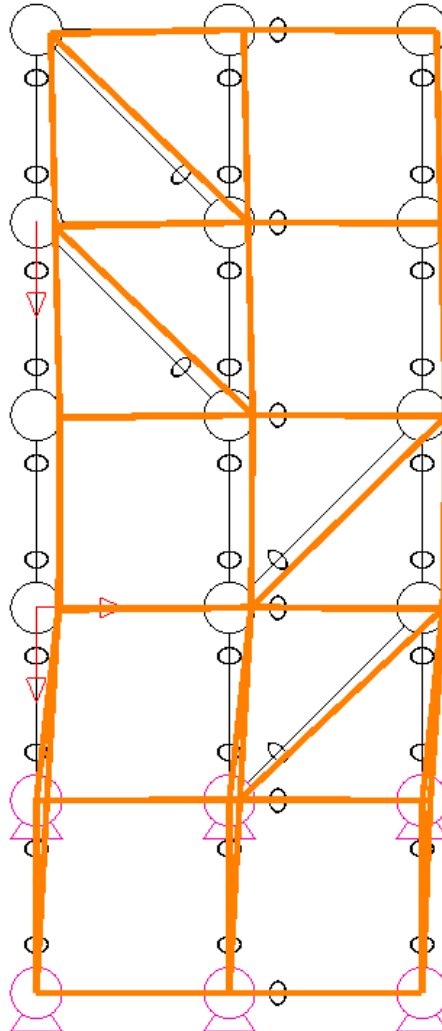


Figura 113: Perfil de la deformada de la columna en posición recta. Hipótesis 3.2 (factor de amplificación de 700mm/mm).

Al no está claro si los desplazamientos máximos se dan en el 2º o en el 3º piso, en la tabla siguiente se muestran los desplazamientos de todos los nudos pertenecientes a dichos pisos.

HIPÓTEIS 3.2. COLUMNA RECTA				
Nº Nudo	Desplazamiento (mm)			
	X	Y	Z	Total
19	-0,045	-0,0026	-0,0026	0,045
20	-0,048	0,00013	0,00023	0,048
21	-0,051	-0,00023	-0,0048	0,051
22	-0,048	0	-0,00025	0,048
23	-0,048	0	0,0012	0,048
24	-0,048	0	-0,0017	0,048
25	-0,045	0,00257	-0,0026	0,045
26	-0,048	0,00013	0,00023	0,048
27	-0,051	0,00023	-0,0048	0,051
28	-0,052	-0,00024	-0,0022	0,0520
29	-0,052	0	0,00032	0,0520
30	-0,052	-0,0003	-0,0069	0,0525
31	-0,052	0	-0,00059	0,0520
32	-0,052	0	0,0007	0,0520
33	-0,052	0	-0,0039	0,0521
34	-0,052	0,00024	-0,0022	0,0520
35	-0,052	0	0,00032	0,0520
36	-0,052	0,0003	-0,0069	0,0525

Tabla 10: Desplazamientos en los nudos de los pisos 2 y 3 (columna recta, hipótesis 3.2).

9.4.1.3.3. Hipótesis 3.3. Taladro repartido en los cuatro apoyos.

En esta hipótesis se supone que la operación de taladrado está realizada en un punto medio de la pieza, por lo que se considera que los 910 N de fuerza se reparten por igual en los 4 nudos

- Peso de la pieza en una columna: $444,44/3 = 148,15$ kg
- Peso en cada nudo: $148,15/4 = 37,04$ kg
- Coeficiente de mayoración: 1,35
- Fuerza aplicada en cada nudo por el peso: $1,35 \cdot 37,04 \cdot 9,81 = 490,5$ N (-z)
 - Nudo 21: 227,5 N (-x) y 490,5 N (-z)
 - Nudo 27: 227,5 N (-x) y 490,5 N (-z)
 - Nudo 39: 227,5 N (-x) y 490,5 N (-z)
 - Nudo 45: 227,5 N (-x) y 490,5 N (-z)

9.4.1.3.3.1. Esfuerzos

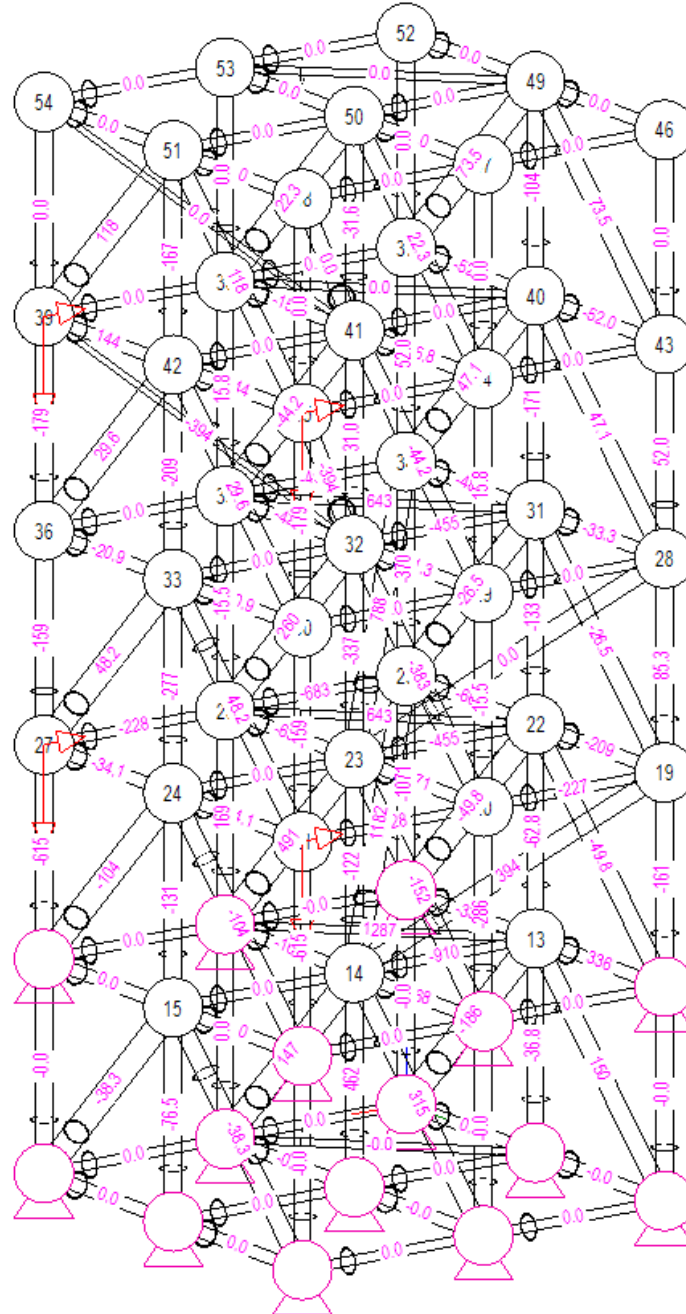


Figura 114: Valores de los esfuerzos axiales (columna recta, hipótesis 3.3).

La fuerza de tracción máxima la sufre la barra 119 (nudos 13-17) y su valor es de 1286,93 N.

La fuerza máxima de compresión se encuentra en la barra 84 (nudos 16-25) y su valor es de 1070,94 N.

9.4.1.3.3.2. Deformaciones

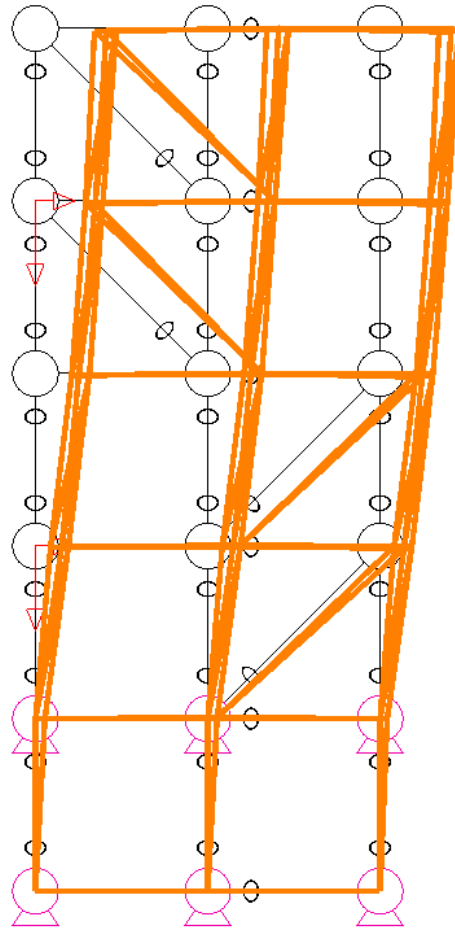


Figura 115: Perfil de la deformada de la columna en posición recta. Hipótesis 3.3 (factor de amplificación de 700mm/mm).

En esta hipótesis, los desplazamientos máximos se dan nuevamente en los nudos del último piso.

HIPÓTEIS 3.3. COLUMNA RECTA				
Nº Nudo	Desplazamiento (mm)			
	X	Y	Z	Total
46	-0,147	-0,0083	-0,00014	0,1472
47	-0,147	0,016	-0,0017	0,1479
48	-0,147	0	-0,0058	0,1471
49	-0,2	-0,0083	-0,0031	0,2002
50	-0,2	0,016	0	0,2006
51	-0,2	0	-0,0052	0,2001
52	-0,176	-0,0083	-0,0085	0,1764
53	-0,176	0,016	0,001	0,1767
54	-0,176	0	-0,0058	0,1761

Tabla 11: Desplazamientos en los nudos del último piso (columna recta, hipótesis 3.3).

9.4.2. COLUMNA ADOPTANDO UN RADIO DE 1,85 m

Ahora se analiza la estructura cuando esta está formando un radio de curvatura de 1850 mm. La numeración de las barras y de los nudos para este análisis se muestra a continuación. En este análisis, las fuerzas puntuales también se aplican en los nudos 21, 27, 39 y 45.

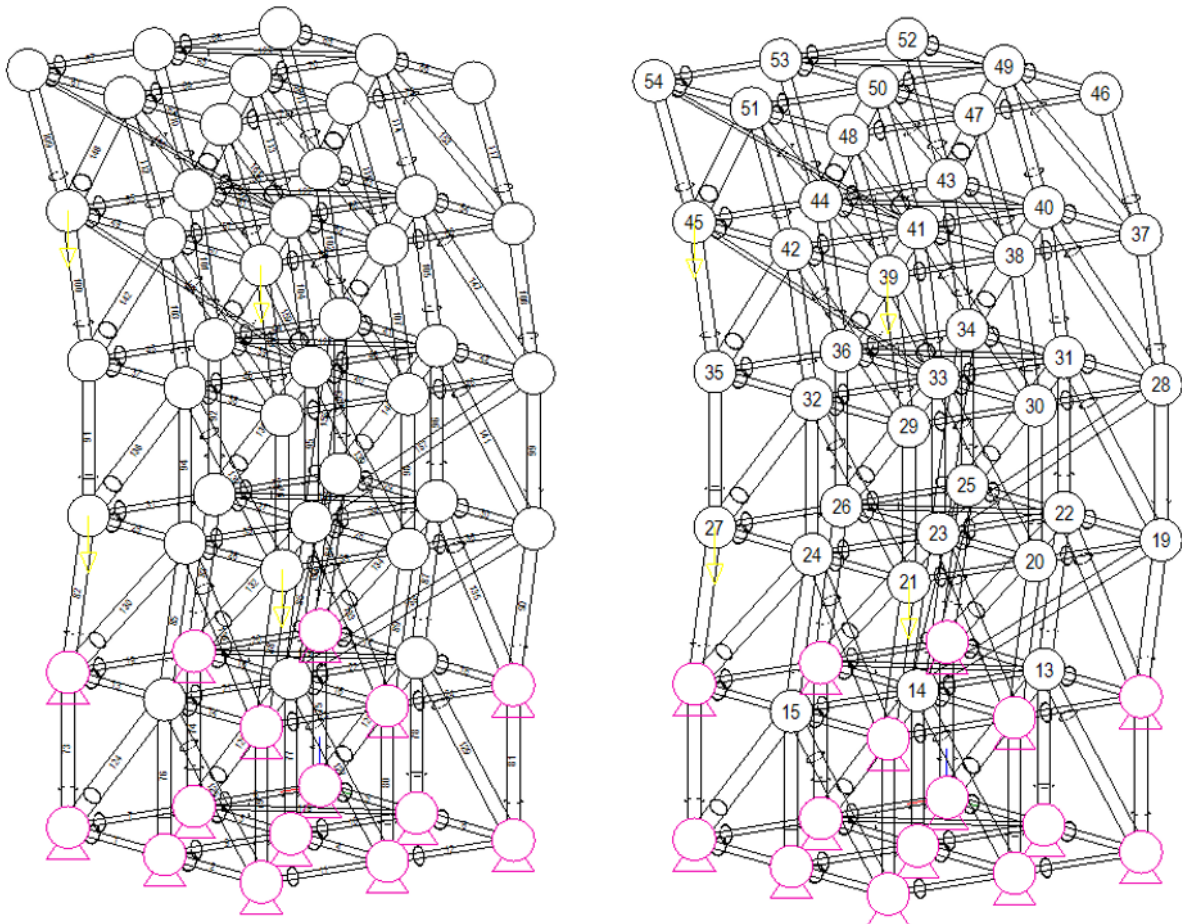


Figura 116: Numeración de barras y nudos en la posición curvada.

9.4.2.1. HIPÓTESIS 1: 200 kg ENTRE TRES COLUMNAS

Como se considera que el peso se reparte por partes iguales en los cuatro nudos, cada uno de estos recibe la misma carga puntual.

- Peso en una columna: $200/3 = 66,7$ kg
- Peso en cada nudo: $66,7/4 = 16,67$ kg
- Coeficiente de mayoración: 1,35
- Fuerza aplicada en cada nudo: $1,35 \cdot 16,67 \cdot 9,81 = 220,725$ N (-z)

9.4.2.1.1. Esfuerzos

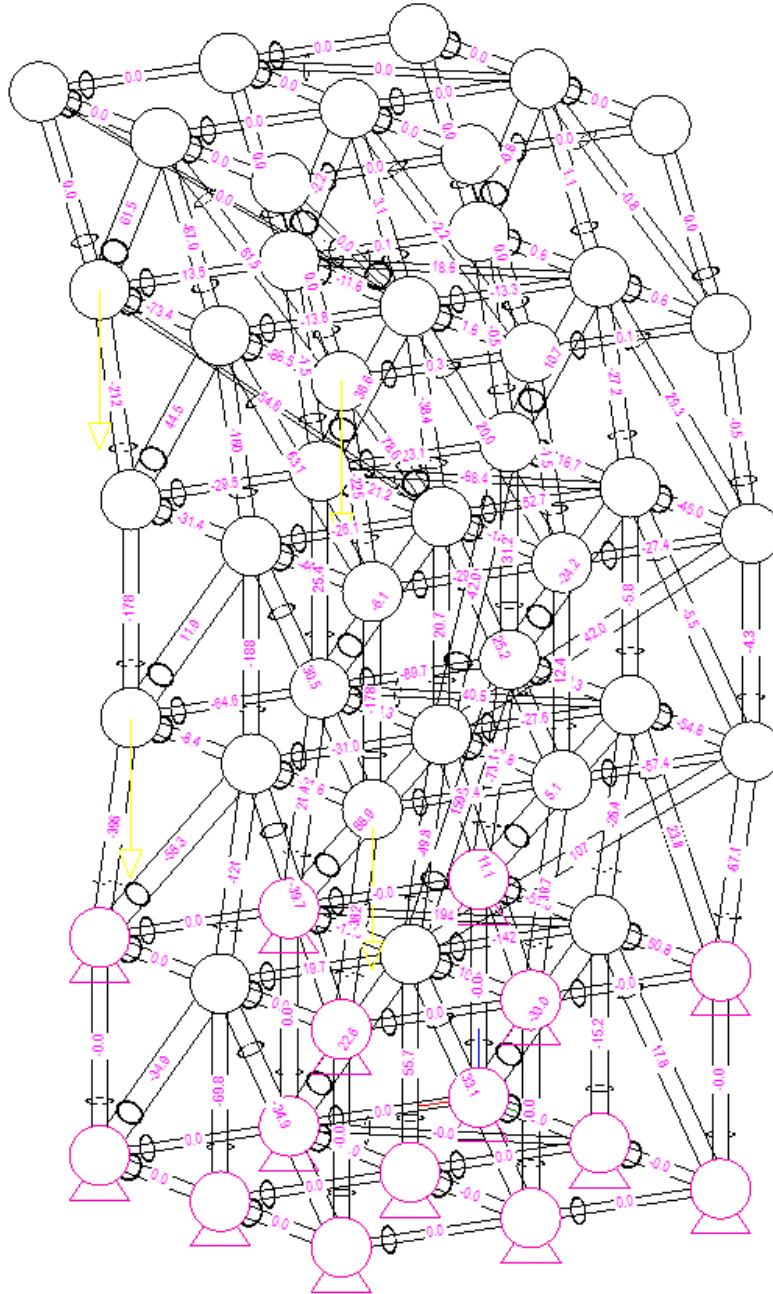


Figura 117: Valores de los esfuerzos axiales (columna curvada, hipótesis 1).

El mayor esfuerzo axial de tracción para esta hipótesis tiene lugar en la barra 133 (nudos 11-23), y tiene un valor de 88,94 N.

El mayor esfuerzo de compresión se da en la barra 82 (nudos 18-27), con un valor de 395,67 N.

11.2.1.2. Deformaciones

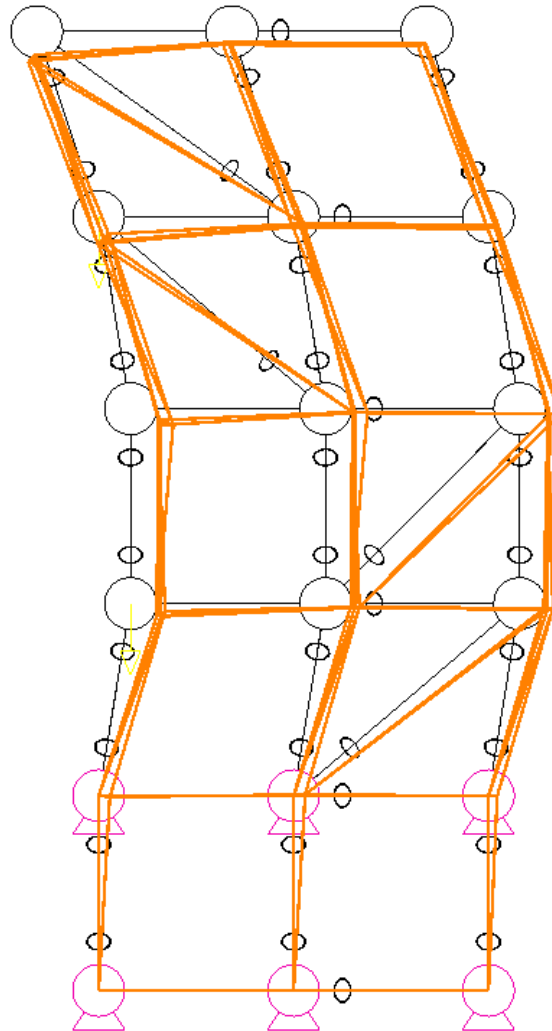


Figura 118: Perfil de la deformada de la columna en posición $R=1850$ mm. Hipótesis 1 (factor de amplificación de 5000mm/mm).

El desplazamiento máximo de los nudos se produce en los pisos 2 y 3, por lo que en la siguiente tabla se muestran los valores de los desplazamientos de los nudos de dichos pisos.

HIPÓTEIS 1. COLUMNA R=1850 mm				
Nº Nudo	Desplazamiento (mm)			
	X	Y	Z	Total
19	-0,0074	-0,00045	-0,0016	0,0076
20	-0,00775	0,00037	-0,0011	0,0078
21	-0,00813	-0,000245	-0,0037	0,0089
22	-0,0103	-0,00011	-0,0015	0,0104
23	-0,01043	0,00047	-0,0011	0,0105
24	-0,01062	-0,00011	-0,0024	0,0109
25	-0,00859	0,00031	-0,0018	0,0088
26	-0,009	0,00062	-0,0014	0,0091
27	-0,094	-0,00006	-0,004	0,0941
28	-0,0128	-0,00056	-0,0016	0,0129
29	-0,0131	-0,00069	-0,0048	0,0140
30	-0,0129	0,00008	-0,001	0,0129
31	-0,0087	-0,00029	-0,0015	0,0088
32	-0,0085	-0,00042	-0,0035	0,0092
33	-0,0084	0,00017	-0,00098	0,0085
34	-0,0093	-0,00039	-0,0016	0,0094
35	-0,0094	-0,00022	-0,0051	0,0107
36	-0,0092	0,00004	-0,0012	0,0093

Tabla 12: Desplazamientos en los nudos de los pisos 2 y 3 (columna curvada, hipótesis 1).

9.4.2.2. HIPÓTESIS 2: 444,44 kg ENTRE TRES COLUMNAS

En esta hipótesis el reparto del peso también se considera igual en los cuatro nudos, así que cada uno de los nudos recibe la misma carga puntual.

- Peso en una columna: $444,44/3 = 148,15$ kg
- Peso en cada nudo: $148,15/4 = 37,04$ kg
- Coeficiente de mayoración: 1,35
- Fuerza aplicada en cada nudo: $1,35 \cdot 37,04 \cdot 9,81 = 490,5$ N (-z)

9.4.2.1.1. Esfuerzos

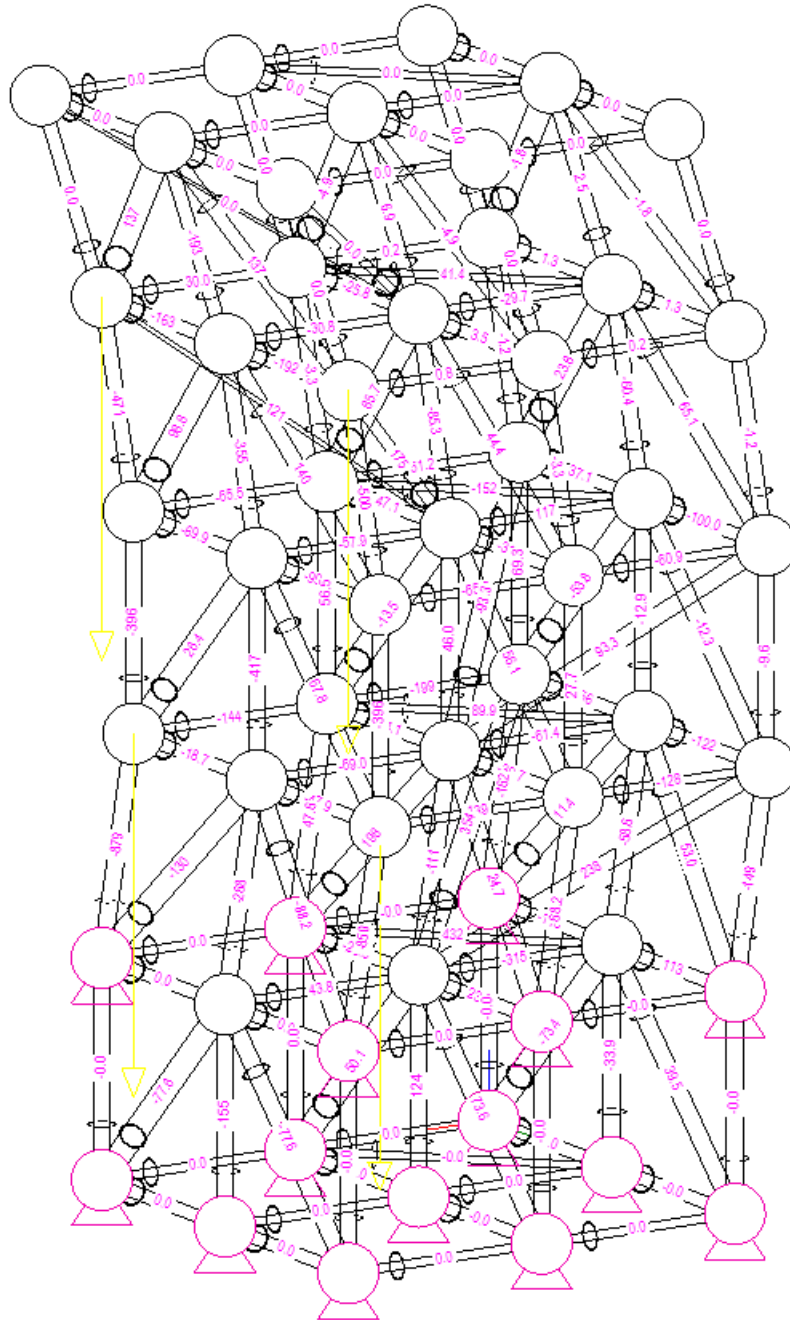


Figura 119: Valores de los esfuerzos axiales (columna curvada, hipótesis 2).

Los mayores esfuerzos de tracción y de compresión se dan en las mismas barras que en la hipótesis anterior (133 y 82), con unos valores de 197,65 N y 879,26 N respectivamente.

9.4.2.1.2. Deformaciones

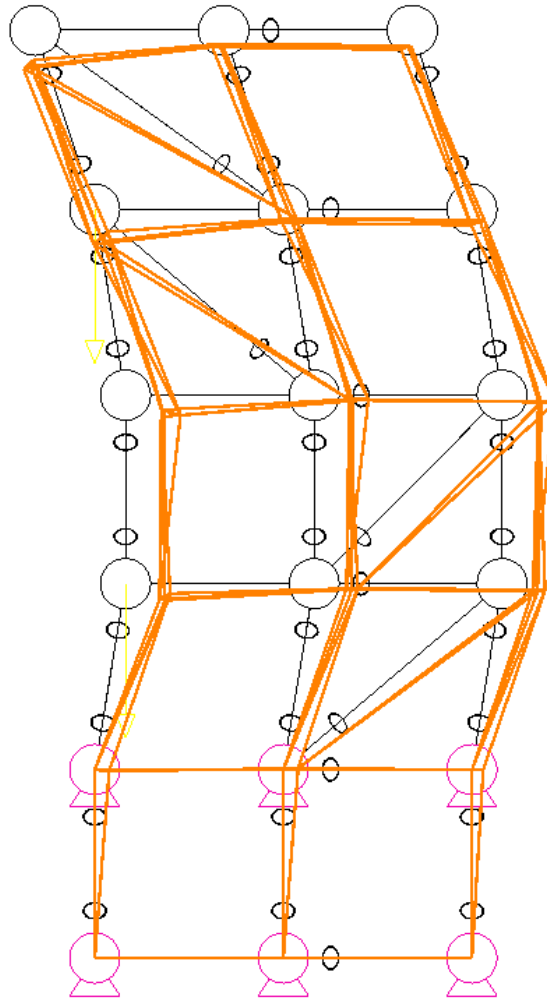


Figura 120: Perfil de la deformada de la columna en posición $R=1850$ mm. Hipótesis 2 (factor de amplificación de 3000mm/mm).

Al igual que en el caso anterior, los desplazamientos máximos se dan en los pisos 2 y 3, pero como la carga está aplicada en los mismos nudos y en la misma dirección, sólo que con un valor superior, se sabe que el desplazamiento máximo se dará en el mismo nudo que en la hipótesis 1 (y que es proporcional al valor de la carga), por esto en la tabla X sólo se muestran los desplazamientos de los nudos del piso 3.

HIPÓTEIS 2. COLUMNA R=1850 mm				
Nº Nudo	Desplazamiento (mm)			
	X	Y	Z	Total
28	-0,0284	-0,0012	-0,0036	0,0287
29	-0,0291	-0,0015	-0,0107	0,0310
30	-0,0288	0,00018	-0,0023	0,0289
31	-0,0193	-0,00064	-0,0034	0,0196
32	-0,0189	-0,00092	-0,0078	0,0205
33	-0,0186	0,00037	-0,0022	0,0187
34	-0,0207	-0,00086	-0,0036	0,0210
35	-0,0208	-0,0005	-0,0113	0,0237
36	-0,0204	0	-0,0027	0,0206

Tabla 13: Desplazamientos en los nudos del piso 3 (columna curvada, hipótesis 2).

9.4.2.3. HIPÓTESIS 3: HIPÓTESIS 2 + 910 N DE TALADRO

9.4.2.3.1. Hipótesis 3.1. Taladro repartido en los apoyos superiores.

Los 910 N de fuerza ejercidos por la operación de taladrado se reparten entre los nudos de apoyo superiores (nudos 38 y 44)

- Peso de la pieza en una columna: $444,44/3 = 148,15$ kg
- Peso en cada nudo: $148,15/4 = 37,04$ kg
- Coeficiente de mayoración: 1,35
- Fuerza aplicada en cada nudo por el peso: $1,35 \cdot 37,04 \cdot 9,81 = 490,5$ N (-z)
 - Nudo 21: 490,5 N (-z)
 - Nudo 27: 490,5 N (-z)
 - Nudo 39: 455 N (-x) y 490,5 N (-z)
 - Nudo 45: 455 N (-x) y 490,5 N (-z)

9.4.2.1.2. Deformaciones

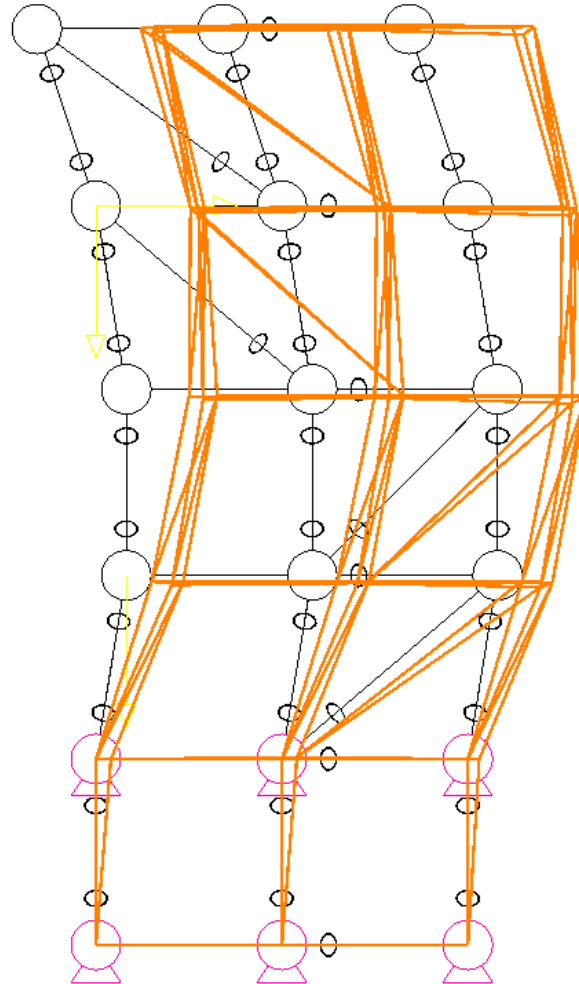


Figura 122: Perfil de la deformada de la columna en posición $R=1850$ mm. Hipótesis 3.1 (factor de amplificación de 700mm/mm).

Se observa que la deformación más acentuada se produce en el último piso de la columna. Los valores de los desplazamientos de los nodos de este piso se muestran a continuación.

HIPÓTEIS 3.1. COLUMNA R=1850 mm				
Nº Nudo	Desplazamiento (mm)			
	X	Y	Z	Total
46	-0,239	-0,0239	0,0042	0,2402
47	-0,239	-0,0001	0,0046	0,2390
48	-0,239	-0,0145	0,002	0,2394
49	-0,288	-0,0239	0,006	0,2891
50	-0,287	-0,0001	0,01	0,2872
51	-0,287	-0,0145	0,0059	0,2874
52	-0,265	-0,0239	-0,013	0,2664
53	-0,265	-0,0001	-0,0011	0,2650
54	-0,265	-0,0145	-0,0056	0,2655

Tabla 14: Desplazamientos en los nudos del último piso (columna curvada, hipótesis 3.1).

9.4.2.3.2. Hipótesis 3.2. Taladro repartido en los apoyos inferiores.

Los 910 N ejercidos por la operación de taladrado se reparten entre los nudos 21 y 27 por igual, 455 N en cada nudo.

- Peso de la pieza en una columna: $444,44/3 = 148,15$ kg
- Peso en cada nudo: $148,15/4 = 37,04$ kg
- Coeficiente de mayoración: 1,35
- Fuerza aplicada en cada nudo por el peso: $1,35 \cdot 37,04 \cdot 9,81 = 490,5$ N (-z)
 - Nudo 21: 455 N (-x) y 490,5 N (-z)
 - Nudo 27: 455 N (-x) y 490,5 N (-z)
 - Nudo 39: 490,5 N (-z)
 - Nudo 45: 490,5 N (-z)

9.4.2.3.2.1. Esfuerzos

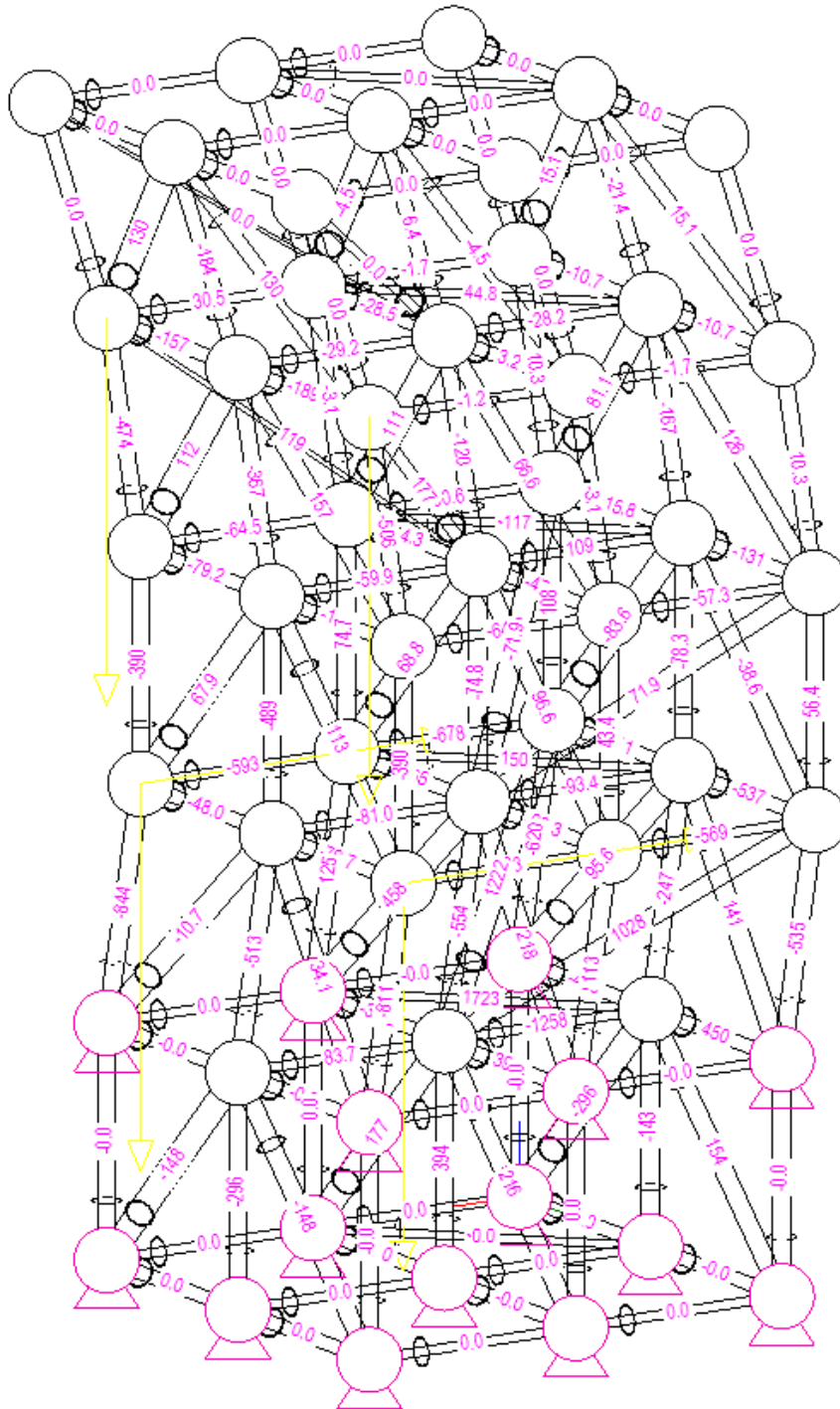


Figura 123: Valores de los esfuerzos axiales (columna curvada, hipótesis 3.2).

Los valores máximos de los esfuerzos de tracción y de compresión se encuentran respectivamente en la barra 120 (nudos 22-26) con 1723,51 N, y en la barra 22 (nudos 13-14) con 1258,16 N

9.4.2.3.2.2. Deformaciones

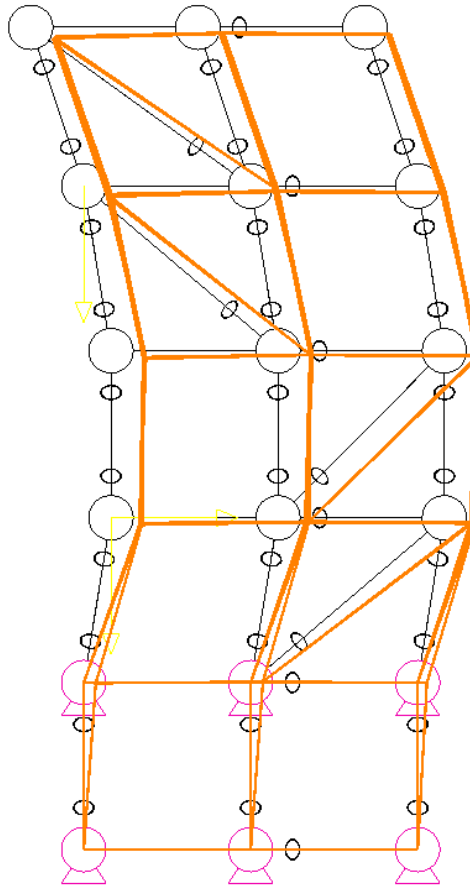


Figura 124: Perfil de la deformada de la columna en posición $R=1850$ mm. Hipótesis 3.2 (factor de amplificación de 700mm/mm).

Los nudos que más distancia se desplazan se encuentran en los pisos 2 y 3, a continuación se muestran los valores de dichos desplazamientos.



HIPÓTEIS 3.2. COLUMNA R=1850 mm				
Nº Nudo	Desplazamiento (mm)			
	X	Y	Z	Total
19	-0,0662	-0,0035	-0,014	0,0678
20	-0,0696	0,001	-0,011	0,0705
21	-0,0732	-0,00076	-0,017	0,0752
22	-0,0796	-0,00028	-0,011	0,0804
23	-0,0802	0,0015	-0,0091	0,0807
24	-0,0807	-0,00027	-0,013	0,0817
25	-0,071	0,0035	-0,015	0,0727
26	-0,0751	0,0024	-0,012	0,0761
27	-0,0787	0	-0,018	0,0807
28	-0,0894	-0,0018	-0,014	0,0905
29	-0,0901	-0,0019	-0,02	0,0923
30	-0,0897	0,00085	-0,011	0,0904
31	-0,0826	-0,00098	-0,012	0,0835
32	-0,0823	-0,0012	-0,016	0,0838
33	-0,082	0,0011	-0,0096	0,0826
34	-0,0821	-0,00088	-0,015	0,0835
35	-0,0823	-0,00072	-0,021	0,0849
36	-0,0819	0,0011	-0,011	0,0826

Tabla 15: Desplazamientos en los nudos de los pisos 2 y 3 (columna curvada, hipótesis 3.2).

9.4.2.3.3. Hipótesis 3.3. Taladro repartido en los cuatro apoyos.

En esta hipótesis se supone que la operación de taladrado está realizada en un punto medio de la pieza, por lo que se considera que los 910 N de fuerza se reparten por igual en los 4 nudos

- Peso de la pieza en una columna: $444,44/3 = 148,15$ kg
- Peso en cada nudo: $148,15/4 = 37,04$ kg
- Coeficiente de mayoración: 1,35
- Fuerza aplicada en cada nudo por el peso: $1,35 \cdot 37,04 \cdot 9,81 = 490,5$ N (-z)
 - Nudo 21: 227,5 N (-x) y 490,5 N (-z)
 - Nudo 27: 227,5 N (-x) y 490,5 N (-z)
 - Nudo 39: 227,5 N (-x) y 490,5 N (-z)
 - Nudo 45: 227,5 N (-x) y 490,5 N (-z)

9.4.2.3.3.1. Esfuerzos

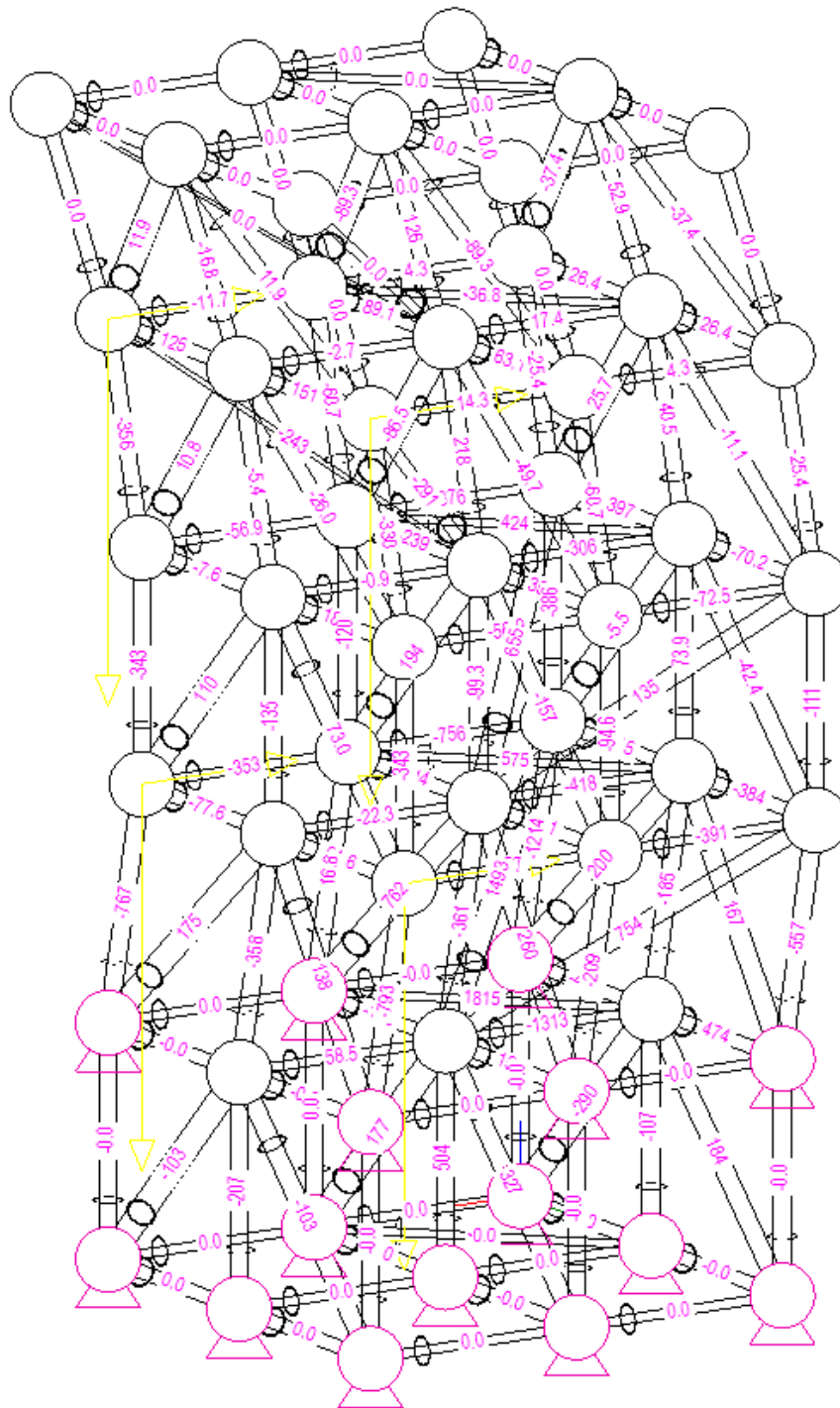


Figura 125: Valores de los esfuerzos axiales (columna curvada, hipótesis 3.3).

Los esfuerzos máximos se dan en las mismas barras que en los dos casos anteriores (120 y 22) con unos valores de 1815,38 N a tracción y 1313,22 N a compresión.

9.4.2.3.3.2. Deformaciones

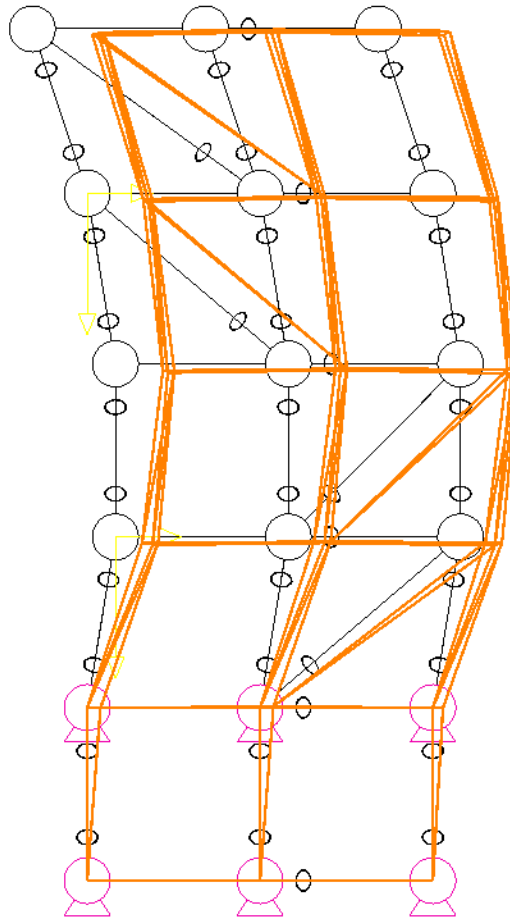


Figura 126: Perfil de la deformada de la columna en posición $R=1850$ mm. Hipótesis 3.3 (factor de amplificación de 700mm/mm).

En esta última hipótesis, los desplazamientos máximos se encuentran nuevamente en el último piso de la estructura nodos/barra.

HIPÓTEIS 3.3. COLUMNA R=1850 mm				
Nº Nudo	Desplazamiento (mm)			
	X	Y	Z	Total
46	-0,148	-0,013	-0,0077	0,1488
47	-0,148	0,0002	-0,006	0,1481
48	-0,148	-0,0082	-0,013	0,1488
49	-0,177	-0,013	-0,0053	0,1776
50	-0,177	0,0002	-0,0017	0,1770
51	-0,177	-0,0082	-0,0086	0,1774
52	-0,164	-0,013	-0,016	0,1653
53	-0,164	0,0002	-0,0081	0,1642
54	-0,164	-0,0082	-0,017	0,1651

Tabla 16: Desplazamientos en los nudos del último piso (columna curvada, hipótesis 3.3).

9.4.3. TENSIONES EN LOS ACTUADORES

A modo de simplificar el análisis mecánico estructural, los actuadores se han sustituido por barras (del mismo diámetro y espesor que el resto de barras). Estas barras son la 154, 155, 158, 159, 160 y 161. Las tensiones producidas en dichas barras, sustitutas de los actuadores, son las siguientes.

Hipótesis	Nº barra	Letra	Esfuerzo axial máximo (N)	
			Posición recta	Posición R=1850 mm
1	154	E	0	159,22
	155	F	0	107,06
	158	C	0	54,65
	159	D	0	78,64
	160	A	0	0
	161	B	0	0
2	154	E	0	358,82
	155	F	0	237,9
	158	C	0	121,44
	159	D	0	174,76
	160	A	0	0
	161	B	0	0
3.1	154	E	1576,17	1763,68
	155	F	0	480,29
	158	C	-788,08	-604,96
	159	D	-788,08	-758,65
	160	A	0	0
	161	B	0	0
3.2	154	E	788,08	1221,51
	155	F	788,08	1028,08
	158	C	0	119,21
	159	D	0	176,99
	160	A	0	0
	161	B	0	0
3.3	154	E	1182,12	1492,6
	155	F	39,04	754,186
	158	C	0	-242,87
	159	D	-394,04	290,83
	160	A	0	0
	161	B	0	0

Tabla 17: Esfuerzos axiales en los actuadores.

La tensión máxima se da en la hipótesis 3.1. cuando la estructura está en la posición en la que se adapta a un radio de 1,85 m. Este esfuerzo, de 1763, 68 N a tracción, afecta al actuador designado con la letra E (figura X).

El esfuerzo máximo que pueden aguantar los actuadores *REGNER RA-38* es de 2000 N, por lo que son válidos para una columna sometida a estas hipótesis de carga.

9.4.4. FUERZAS Y DEFORMACIONES MÁXIMAS

En las dos siguientes tablas se muestran, a modo de resumen, los esfuerzos axiales máximos y deformaciones máximas de las barras para cada una de las hipótesis y para las dos posiciones de la columna.

Hipótesis	ESTRUCTURA RECTA			ESTRUCTURA CON RADIO DE 1850 mm		
	Esfuerzo axial máximo	Valor (N)	Nº barra/s	Esfuerzo axial máximo	Valor (N)	Nº barra/s
1	Tracción	63,28	148 y 149	Tracción	88,94	133
	Compresión	357,65	82	Compresión	395,67	82
2	Tracción	140,61	148 y 149	Tracción	197,65	133
	Compresión	794,77	82	Compresión	879,26	82
3.1	Tracción	1286,93	119, 120 y 121	Tracción	1907,28	119
	Compresión	1714,71	84	Compresión	1806,66	84
3.2	Tracción	1286,93	119	Tracción	1723,51	120
	Compresión	794,77	82 y 88	Compresión	1258,16	22
3.3	Tracción	1286,93	119	Tracción	1815,38	120
	Compresión	1070,94	84	Compresión	1313,22	22

Tabla 18: Fuerzas axiales máximas en las barras.

Es esfuerzo axial máximo, de 1907,28 N, es de tracción, y se da en la barra 119 (barra diagonal de 284 mm de longitud dispuesta entre los nudos 13 y 17) cuando la columna está en posición curvada y sometida a la hipótesis de carga 3.1.

Hipótesis	Estructura recta					Estructura R = 1850 mm				
	Nº Nudo/s	Desplazamiento (mm)				Nº Nudo/s	Desplazamiento (mm)			
		X	Y	Z	Total		X	Y	Z	Total
1	48 y 54	0,00865	0	-0,0042	0,010	29	-0,0131	-0,00069	-0,0048	0,014
2	49 y 54	0,019	0	-0,0093	0,021	29	-0,0291	-0,0015	-0,0107	0,031
3.1	50	-0,37	0,0323	-0,00046	0,371	49	-0,288	-0,0239	0,006	0,289
3.2	30 y 36	-0,052	-0,0003	-0,0069	0,052	29	-0,0901	-0,0019	-0,02	0,092
3.3	50	-0,2	0,016	0	0,201	49	-0,177	-0,013	-0,0053	0,178

Tabla 19: Desplazamientos máximos de los nudos.

El desplazamiento máximo, de 0,37 mm en el eje X se da en el nudo número 50, cuando la columna está en posición totalmente vertical y sometida a la hipótesis de carga 3.1.

Con todos estos datos se puede decir que la hipótesis de carga más crítica para la columna es la 3.1, es decir, una pieza de 444,44 kg sujeta entre tres columnas y una operación de taladrado en la parte superior de dicha pieza que da lugar a una fuerza de 910 N, repartida entre los nudos 39 y 45.

9.4.5. TENSIONES

Debido a que la columna está formada por nudos articulados, las barras sólo están sometidas a esfuerzos axiales, el esfuerzo axial máximo que puede llegar a soportar una barra es de 1907,28 N.

A continuación, se va a calcular la tensión de la barra (σ) que soporta el esfuerzo axial máximo, para ello se divide el valor de este esfuerzo (F) entre el área de la sección de la barra (A).

$$A = 238,76 \text{ mm}^2$$

$$F = 1907,28 \text{ N}$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \approx 8 \text{ MPa}$$

Este valor coincide con el valor de la tensión obtenido en CESTRI.

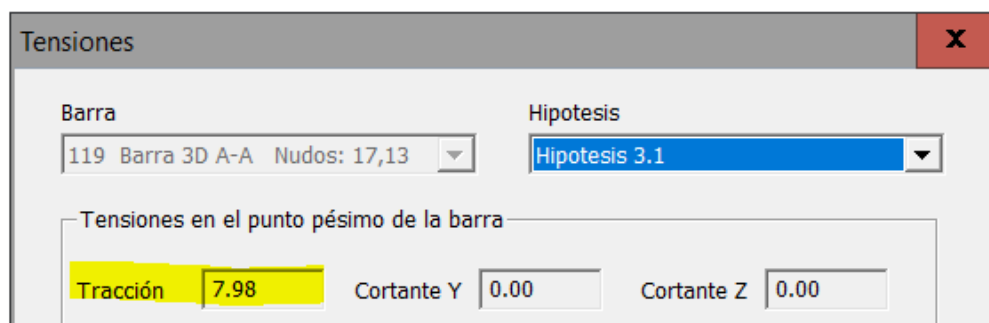


Figura 127: Tensión de la barra 119 obtenida en CESTRI.

Estos 8 MPa son considerablemente menores a los 226 MPa de límite elástico de las barras, fabricadas de acero S235JR.

Si se trata de barras de aluminio o de material compuesto (composite), la tensión resultante también es inferior a la del límite elástico de estos materiales, 196 MPa y 190 MPa respectivamente.

9.4.6. ANÁLISIS DE LA UNIÓN DE RÓTULA

Una vez se han obtenido los esfuerzos en las barras mediante el programa CESTRI, se procede a un análisis más detallado de las uniones de las barras al nudo mediante el Método de Elementos Finitos (MEF), el esfuerzo máximo se da en la barra 119 (hipótesis 3.1), unida al nudo número 13, por lo que se modeliza en ANSYS dicho nudo y se le aplican los esfuerzos correspondientes.

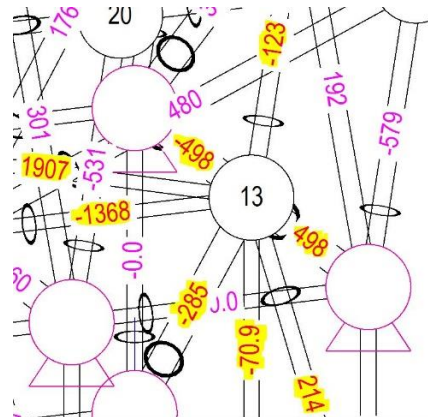


Figura 128: Esfuerzos de las barras unidas al nudo 13 (CESTRI).

9.4.6.1. PREPROCESADO

9.4.6.1.1. Modelo

El modelo a analizar es el mostrado en la figura 117. Como la barra 119 la que más esfuerzo axial presenta, y con el fin de simplificar el modelo y de reducir el coste computacional, sólo se ha modelizado el nudo y la unión de éste con la barra, es decir, los tornillos, la tapa, el perno esférico, el cono y una sección de tubo para la transmisión del esfuerzo. El resto de esfuerzos se han aplicado sobre la superficie de los agujeros del nudo.

Para simplificar el análisis aún más, se han eliminado las caras planas del nudo, los agujeros en los que no hay unidas barras y los chaflanes y agujeros hexagonales de los tornillos.

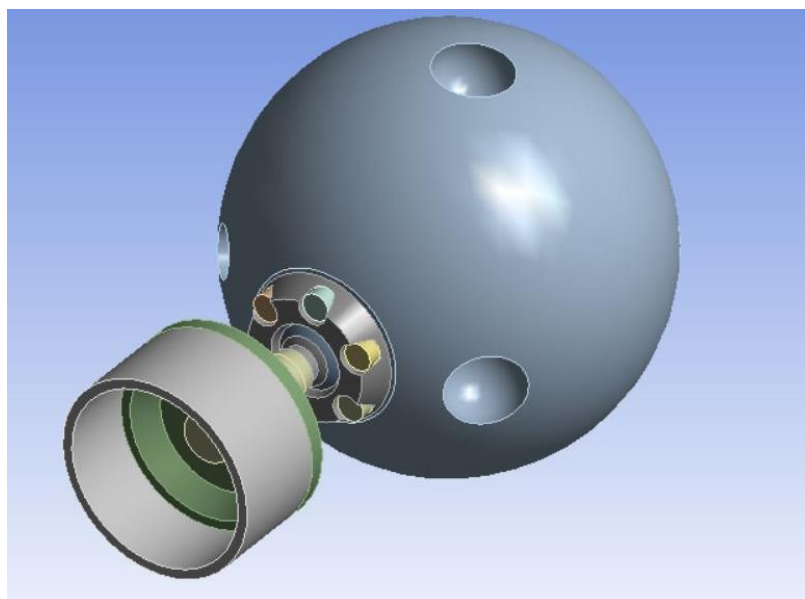


Figura 129: Modelo a analizar en ANSYS.

9.4.6.1.2. Mallado

El mallado se ha realizado para todas las piezas con el método “hex dominant”, refinando en los tornillos, la tapa y el cambio de sección del perno esférico,

El tamaño de elemento elegido para el mallado de la sección de tubo, el cono y el nudo es de 5 mm.

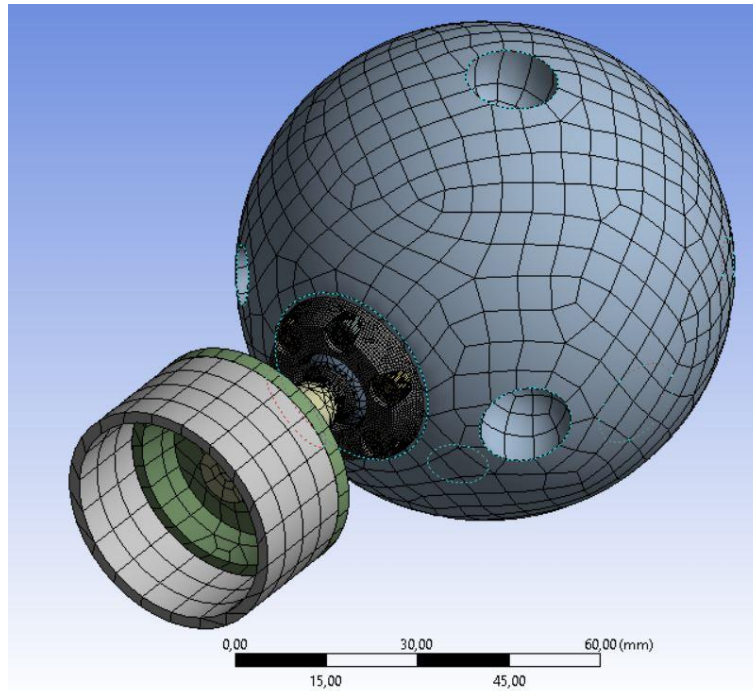


Figura 130: Mallado del modelo completo.

Para los tornillos se ha seleccionado un tamaño de elemento de 0,4 mm, quedando el mallado como se muestra en la imagen inferior.

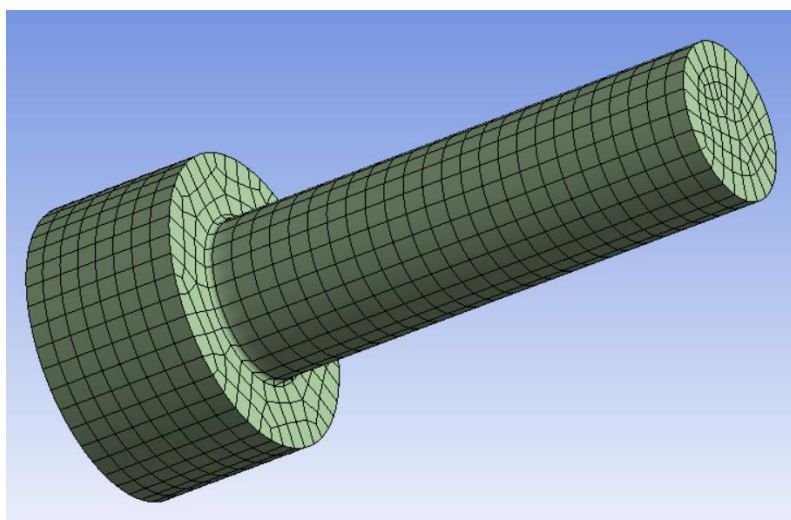


Figura 131: Mallado de uno de los tornillos DIN 912 M3x10.

La tapa se ha mallado con un tamaño de elemento de 0,5 mm, obteniéndose la malla mostrada en la figura 120.

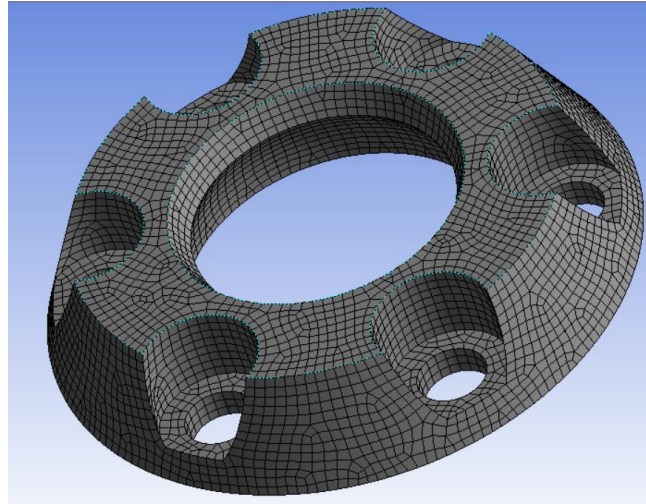


Figura 132: Mallado de la tapa.

El perno esférico se ha mallado con un tamaño de elemento de 4 mm, y se ha realizado un refinamiento en la zona del cambio de sección con un tamaño de elemento de 0,45 mm. La esfera está mallada con tetraedros debido a su geometría.

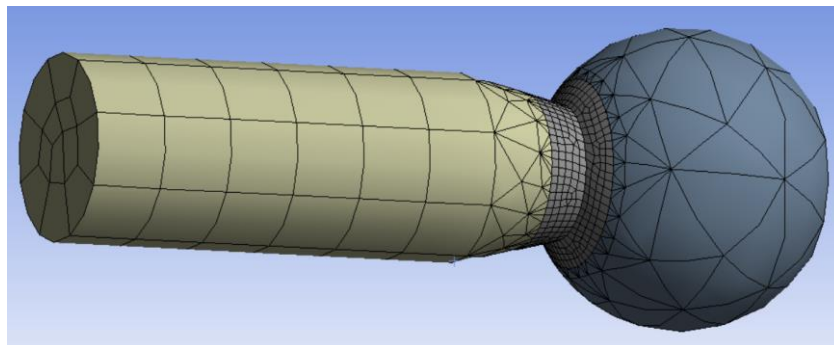


Figura 133: Mallado del tornillo, de la tapa y del perno esférico.

9.4.6.1.3. Contactos

En cuanto a los contactos, se ha optado por el método “bonded” en todas las piezas que entran en contacto entre sí, es decir, el tubo con el cono, el cono con el perno, el perno con la tapa, la tapa con los tornillos y los tornillos con el nudo.

También se han realizado análisis con contactos del tipo “no separation” y del tipo “frictional”, y los resultados obtenidos han sido muy similares a los mostrados en este apartado.

9.4.6.1.4. Condiciones de contorno

Los esfuerzos a los que está sometido el modelo se muestra en la figura 122, y corresponden con los valores de los esfuerzos de las barras obtenidos en CESTRI (figura 116). Como ya se ha dicho, las fuerzas se aplican en la superficie de los agujeros donde se colocan los pernos o tornillo (según el tipo de unión con el nudo).

En el agujero semiesférico superior se ha puesto la condición de contorno de empotramiento (“fixed support”).

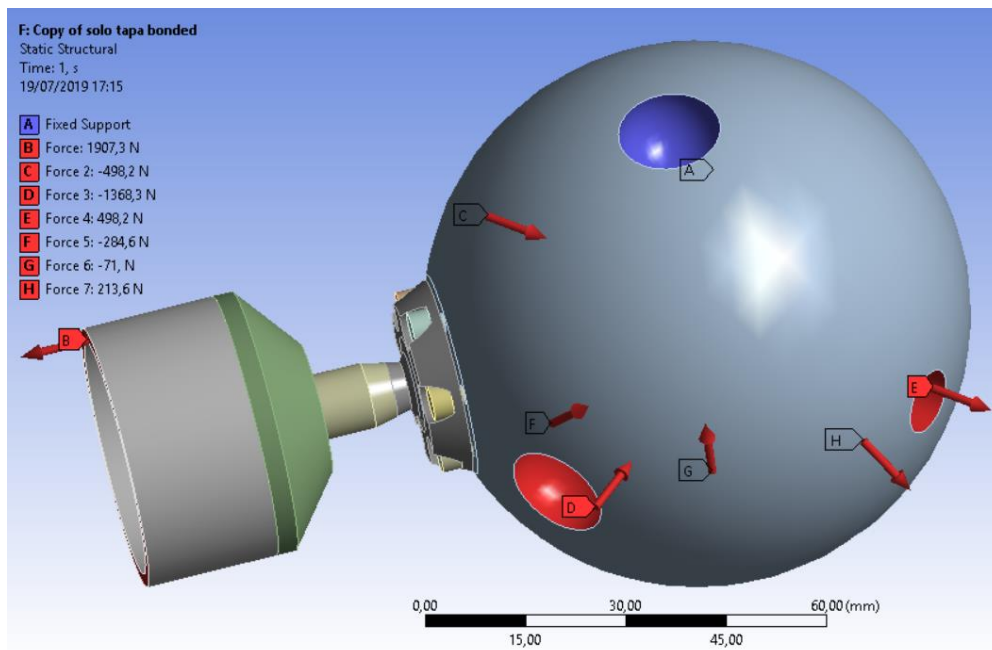


Figura 134: Esfuerzos y apoyo.

9.4.6.2. RESULTADOS

9.4.6.2.1. Tensiones

Las tensiones obtenidas en el análisis, en el modelo completo, en el perno esférico, en la tapa y en los tornillos, se muestran a continuación.

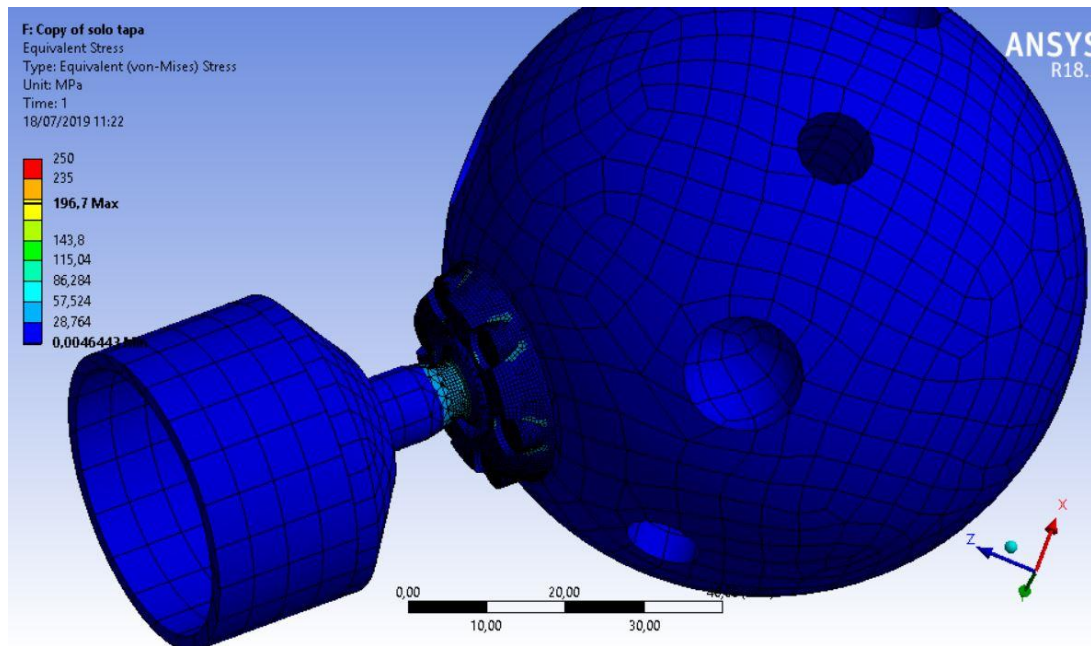


Figura 135: Tensiones de Von-Mises en el modelo completo.

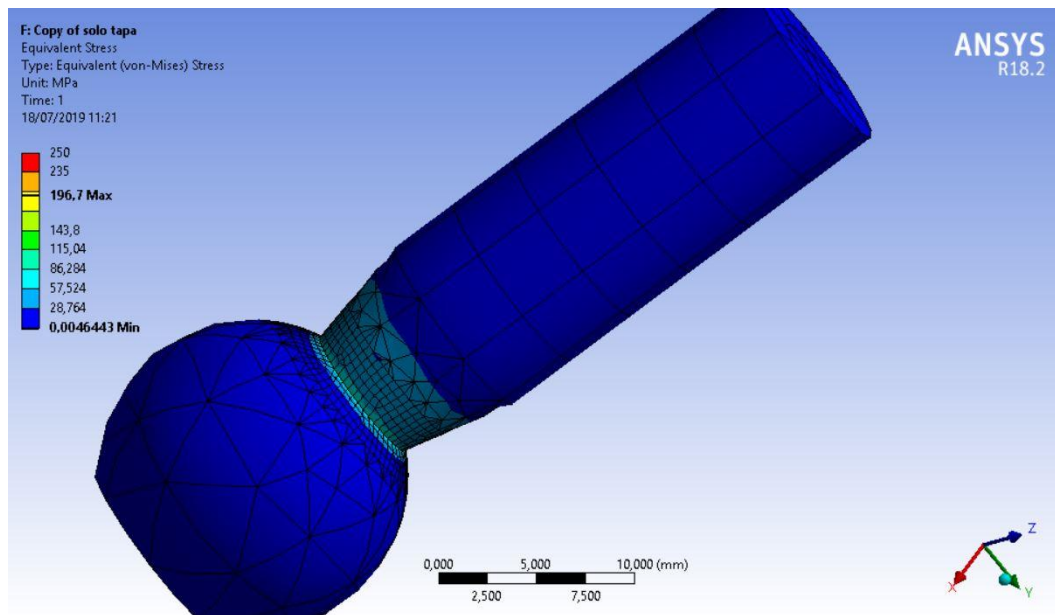


Figura 136: Tensiones de Von-Mises en el perno.

En el perno se alcanzan tensiones máximas de en torno a los 90 MPa, producidas en el cambio de sección.

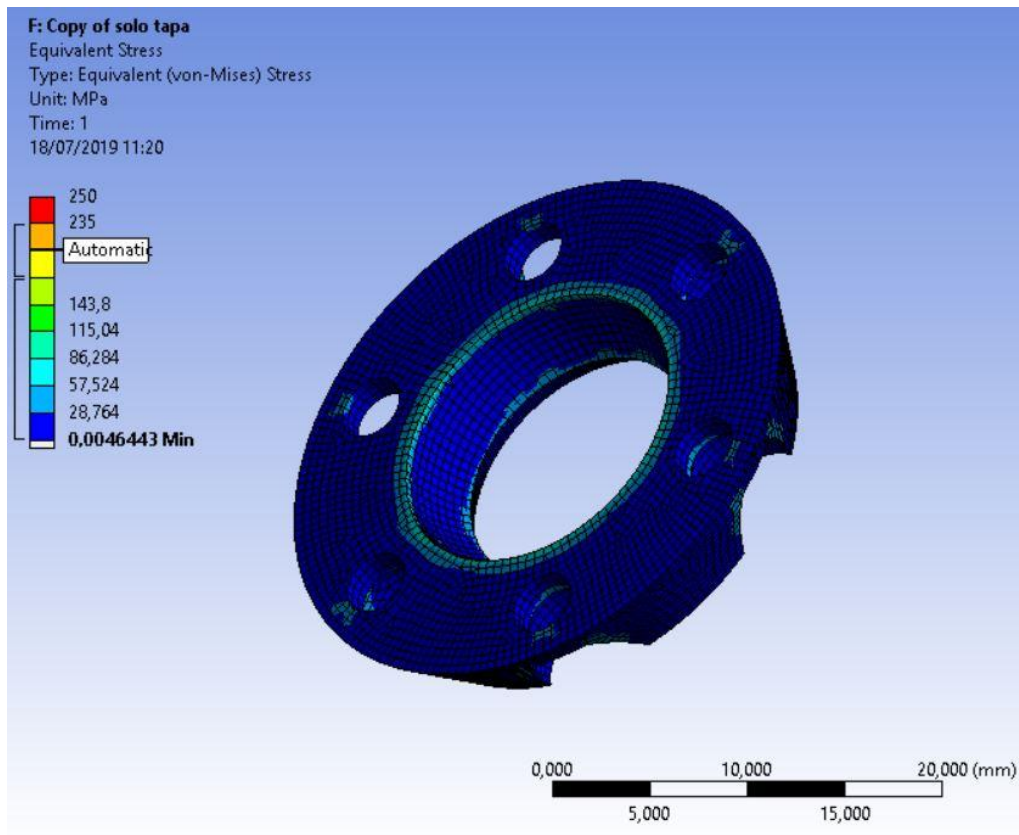


Figura 137: Tensiones en la tapa.

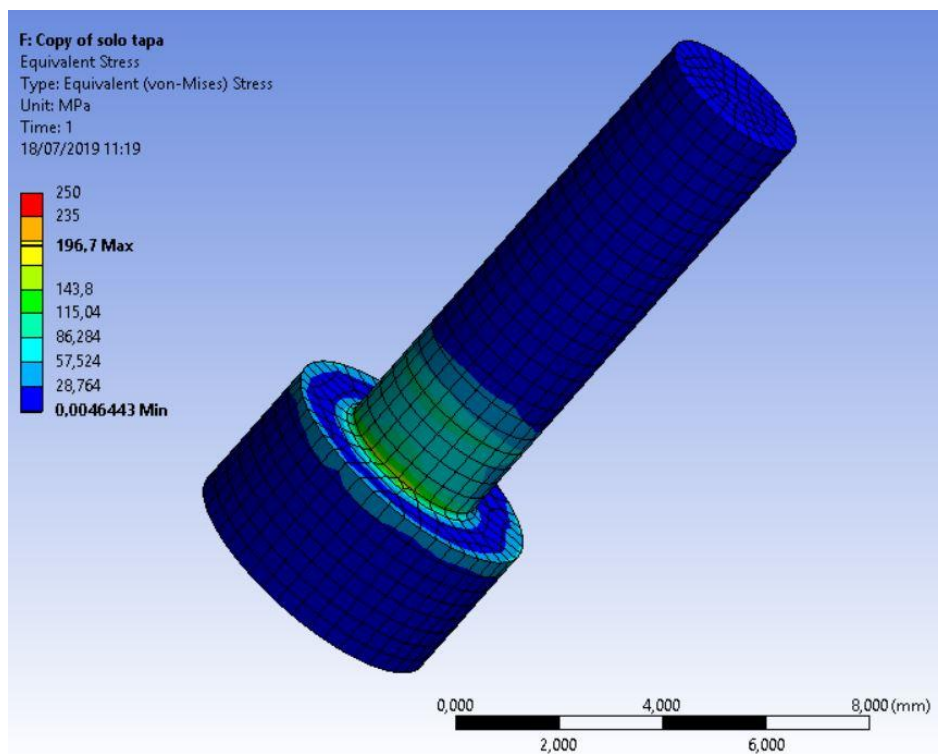


Figura 138: Tensiones en los tornillos.

Como se observa en las imágenes superiores, la tensión más alta se produce en los tornillos, justo en la zona del cambio de sección, esta tensión tiene un valor de 196,7 MPa, que no supera el límite de fluencia del acero AISI 304 (235 MPa) con el que se fabrican los tornillos. Estas tensiones son prácticamente iguales en los seis tornillos.

9.4.6.2.2. Deformaciones

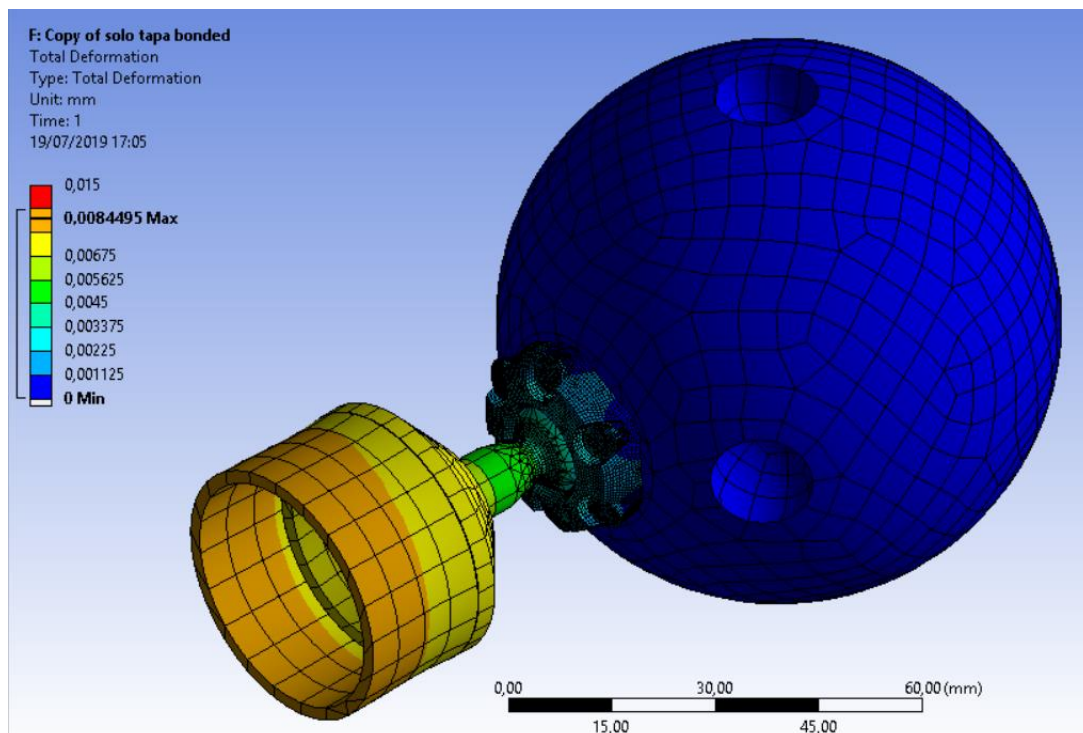


Figura 139: Deformaciones en el modelo completo.

9.4.6.2.3. Reacción en la superficie empotrada

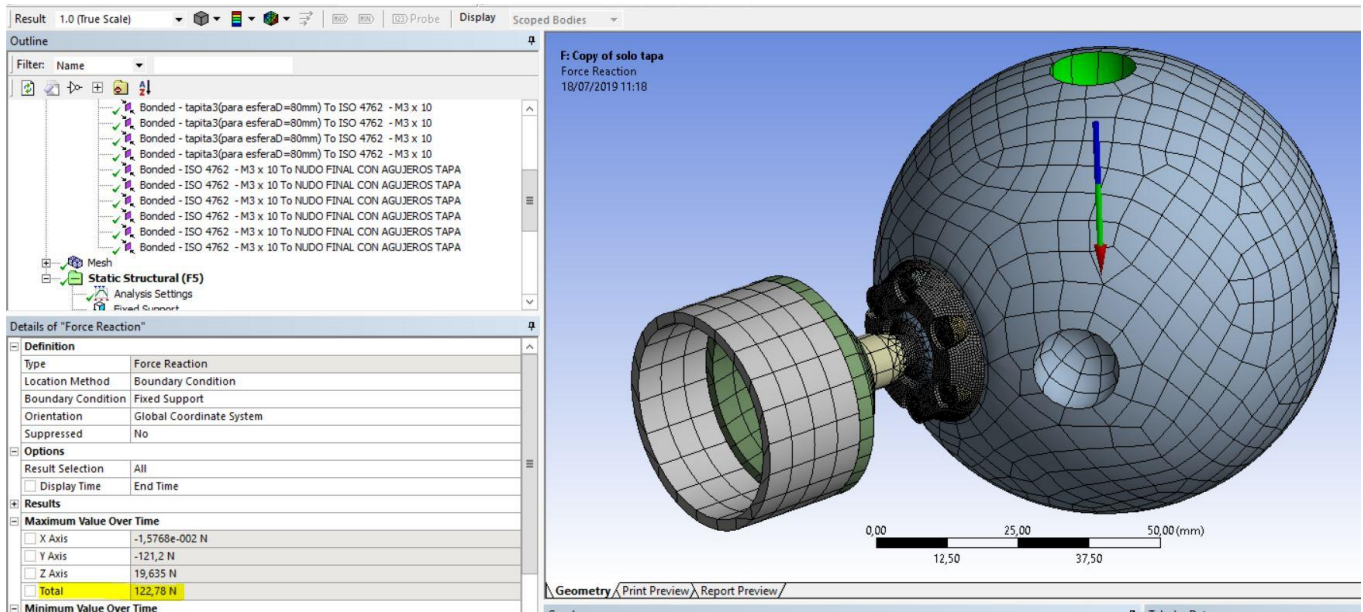


Figura 140: Reacción en el empotramiento.

En la figura 128 se muestra el valor de la reacción total que se produce en la superficie empotrada. Este valor, de 122,78 N, coincide con el valor del esfuerzo de la barra que va sujeta en este agujero empotrado en el modelo (figura 116).

10. PRESUPUESTO

10.1. OBJETO

En este documento se determinan los costes de materiales (presupuesto de ejecución material), tanto comerciales como no comerciales y los costes de la mano de obra, para posteriormente realizar los costes de ejecución por contrata. Finalmente se halla el coste total del proyecto.

10.2. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL

En este apartado se presentan los costes de los materiales empleados para la fabricación del utillaje diseñado, para ello, se distinguen los costes de los elementos comerciales y el de los elementos no comerciales. También se tienen en cuenta los costes de mano de obra empleada en el proyecto.

10.2.1. ELEMENTOS COMERCIALES:

El coste de los elementos comerciales viene impuesto por el precio de venta impuesto por los siguientes proveedores: *RationalStock* [23], proveedor de todos los tornillos y tuercas de las que consta la estructura; *Kipp* [24], proveedor de los pernos esféricos; y *Regner* [25], empresa suministradora de los actuadores lineales electromecánicos.

Los tubos se han descrito antes como elementos no comerciales, ya que tienen unas dimensiones que se adaptan a la estructura, pero como pueden ser suministradas por la empresa *Incafee2000* [26] y cortados a medida por ello se incluyen en esta tabla. Los tubos se venden en unidades de 6000 mm de longitud, y el precio del corte es de 101,65 €.

Los pernos hay que mecanizarlos con el fin de que se pueda introducir la tapa, por lo que se añade este coste de mecanizado, el mecanizado de cada perno tiene un coste aproximado de 1,30 €, por lo que mecanizar los 193 tiene unos gastos de 250,90 €.

En las siguientes tablas se calcula el precio total de los elementos comerciales sin tener en cuenta el IVA (21%).



ELEMENTO	CANTIDAD	COSTE UNITARIO	OTROS COSTOS	COSTE TOTAL ELEMENTO
Tornillo DIN 933 M8x35	12	0,0564 €		0,68 €
Tornillo DIN 933 M10x40	21	0,0968 €		2,03 €
Tornillo DIN 933 M10x45	117	0,1077 €		12,60 €
Tornillo DIN 912 M3x10	1134	0,0114 €		12,93 €
Tuerca DIN 934 M8	16	0,0137 €		0,22 €
Tuerca DIN 934 M10	439	0,0374 €		16,42 €
Peno esférico DIN 71803 M10	193	0,7059 €	250,90 €	136,24 €
Actuador lineal RA-38	6	128,2500 €		769,50 €
Tubos S235JR ø40x2 (L=6000 mm)	6	14,6700 €	101,65 €	189,67 €
Subtotal				1.140,28 €

Tabla 20: Presupuesto elementos comerciales.

10.2.2. ELEMENTOS NO COMERCIALES:

Además de los elementos comerciales, el utillaje flexible necesita de piezas que se diseñan y fabrican únicamente para éste. Para hallar un coste aproximado de estos componentes se tiene en cuenta los costes del volumen de material inicial y los costes de mecanizado necesarios para su fabricación.

En las siguientes tablas se muestra el coste aproximado del mecanizado de todos los elementos no comerciales, y en la última el coste total de estos.

ELEMENTO	CANTIDAD	MATERIAL	PRECIO MATERIAL (€/kg)	VOLUMEN DE PARTIDA (cm ³)	DENSIDAD MATERIAL (kg/cm ³)	PESO (kg)	COSTE MATERIAL	COSTE MECANIZADO	COSTE TOTAL
Nudo principal	50	AISI 316	3,58	571,8	0,00785	4,49	16,07 €	125 €	7.053,46 €
Cono	117	S235JR	1,77	100,53	0,00785	0,79	1,40 €	9 €	1.216,43 €
Cono roscado	193	F-1140	3,5	100,53	0,00785	0,79	2,76 €	11 €	2.656,08 €
Tapa	193	AISI 316	3,58	42,4	0,00785	0,33	1,19 €	13 €	2.738,97 €
Machón de unión	12	AISI 316	3,58	86	0,00785	0,68	2,42 €	17 €	233,00 €
Nudo secundario	4	AISI 316	3,58	571,8	0,00785	4,49	16,07 €	121 €	548,28 €
Apoyo	1	F-1140	3,5	46627,85	0,00785	366,03	1.281,10 €	124 €	1.405,10 €
Brazo	2	F-1140	3,5	9139,52	0,00785	71,75	251,11 €	65 €	632,22 €
Espárrago	4	AISI 316	3,58	5,32	0,00785	0,04	0,15 €	8 €	32,60 €
Pletina superior	2	F-1140	3,5	100	0,00785	0,79	2,75 €	7 €	19,50 €
Pletina circular	4	F-1140	3,5	14,73	0,00785	0,12	0,40 €	2 €	9,62 €
Pletina inferior	2	F-1140	3,5	140	0,00785	1,10	3,85 €	9 €	25,69 €
Subtotal									16.570,94 €

Tabla 21: Presupuesto elementos no comerciales.

10.2.3. PRESUPUESTO DE MANO DE OBRA

Este presupuesto se basa en el número de horas (un total de 240) invertidas en cada fase del proyecto y el coste por hora trabajada.

FASE DE PROYECTO	HORAS	COSTE MANO DE OBRA (€/h)	TOTAL
Busqueda de información	60	6,25	375 €
Cálculos y diseño	120	6,25	750 €
Realización documentación técnica	60	6,25	357 €
Subtotal			1.500 €

Tabla 22: Presupuesto mano de obra.

10.2.4. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL

Una vez obtenidos los costes de los elementos comerciales y no comerciales, se obtiene el presupuesto de ejecución material.

Coste elementos comerciales	1.140,28 €
Coste elementos no comerciales	16.570,94 €
Mano de obra	1.500,00 €
Presupuesto de ejecución material	19.211,22 €

Tabla 23: Presupuesto de ejecución material.

10.3. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA

Al valor de los materiales y la mano de obra, se le añade la parte proporcional de sus gastos generales y del beneficio económico o beneficio industrial a obtener de la estructura.

Se aplica un beneficio industrial del 7% y unos gastos generales del 13%.

Presupuesto de ejecución material	19.211,22 €
Gastos generales (13%)	2.497,46 €
Beneficio industrial (7%)	1.344,79 €
Presupuesto Parcial (P.E.M+G.G+B.I)	23.053,46 €
IVA (21%)	4.841,23 €
Presupuesto por Contrata	27.894,69 €

Tabla 24: Presupuesto de ejecución por contrata.

10.4. PRESUPUESTO TOTAL

Finalmente se obtiene el Presupuesto Total, el importe total a desembolsar, tras sumar al presupuesto de Contrata los demás gastos necesarios para la materialización de la estructura:

Presupuesto por contrata	27.894,69 €
Honorarios ingeniero mecánico (5%)	1.394,73 €
IVA (21% s/Honorarios Ingeniero Mecánico)	292,89 €
Honorarios Ingeniero Técnico (3%)	836,84 €
IVA (21% s/Honorarios Ingeniero Técnico)	175,74 €
PRESUPUESTO TOTAL	30.594,90 €

Tabla 25: Presupuesto total.

Se tienen en cuenta los Honorarios de un Ingeniero Mecánico que intervendrá como proyectista y director de obra y los Honorarios de un Ingeniero Técnico Industrial que ejercerá como director de la ejecución de la obra.

10.5. PRESUPUESTO DE LA SOLUCIÓN CON TUBOS DE COMPOSITE

El presupuesto anterior se ha realizado para una estructura nodos/barra fabricada con barras de ahorro. En este apartado se determina el precio final de una estructura fabricada con tubos de composite. Los únicos elementos que cambian con respecto a la solución anterior son los tubos y los conos.

Los tubos de composite son suministrados por *EXELcomposites* [27], a un precio de 560€ los 6000 mm de tubo. Al igual que en la anterior solución, hacen falta 6 tubos de 6 m (debido a los milímetros perdidos en cada operación de corte), a lo que se le suma el coste de las operaciones de corte, que aproximadamente son unos 150 €. Con todo esto, el precio total de las barras de composite es de 3510 €.

Los conos de esta solución (conos alargados) son de aluminio (1,61 €/kg), y los 310 que hay en la estructura (roscados y no roscador) tienen en total, incluidos los costes de mecanizado, un precio de 3235,5 €.

Con estos nuevos precios de los tubos y los conos, el presupuesto de ejecución material es de 21893,72 €, 2682,5 € más caro que la primera solución.

Con este último dato, el presupuesto total es de 34866,92 €.

11. CONCLUSIONES

Se ha diseñado una columna totalmente vertical nodos/barra con unas dimensiones de 600x600x1500 (distancia entre nudos de 300 mm), que, gracias al movimiento lineal de actuadores *low-cost* integrados, es capaz de “move” pudiendo alcanzar una curvatura máxima de 1732 mm de radio, curvatura que depende principalmente de la geometría de la unión perno-tapa-nudo.

Así, el utillaje flexible diseñado es capaz de sujetar piezas de distintas geometrías (desde piezas planas hasta piezas con un radio de curvatura algo inferior a 1732 mm) y no solo de un tipo de geometría, como se ha venido haciendo hasta ahora. Esto tiene sus consiguientes ventajas económicas, ya que evita la necesidad de cambiar el tipo de utillaje a la hora de fabricar una pieza de geometría diferente.

Se ha llegado a la conclusión de que la posición de los 6 actuadores lineales es clave para conseguir el movimiento correcto de la columna. Sólo la disposición de los actuadores descrita en el apartado 6.1.2.1. permite que la columna adapte la forma de una curvatura simple con 6 actuadores. Por esto se puede decir que esta parte es la más importante del proyecto, además de la que más tiempo ha requerido.

En cuanto a los materiales que se pueden usar para las barras, se han descrito en el presente proyecto tres soluciones distintas: de acero, de aluminio y de material compuesto (fibra de carbono). Una estructura formada por barras de acero es la mejor de las tres desde el punto de vista económico, ya que es un material barato en comparación al composite y la soldadura realizada en la unión de los tubos y los conos es relativamente sencilla al tratarse de acero, sin embargo, este material es el más pesado de los tres, por lo que el peso de la estructura es bastante alto. Una estructura formada por barras de aluminio es una solución aún más barata y algo más ligera que la formada por barras de acero, sin embargo, la soldadura es más compleja. Una columna formada por barras de material compuesto es la más idónea en cuanto al peso total, debido a la ligereza de este material, además los tubos se unen a los conos mediante crimpado electromagnético, como desventaja de las barras de composite está su precio, considerablemente más elevado que el del acero.

Un utillaje formado por barras de acero tiene un peso de 213,06 kg sin tener en cuenta el conjunto de apoyo. Mientras que un utillaje formado por barras de composite tiene un peso total, también sin contar el conjunto de apoyo, de 148,53 kg, es decir, unos 65 kg más ligero que la solución de acero, pero con un coste económico de unos 2700 € más caro.

En cuanto al sistema de unión de los actuadores a los nudos también se han detallado dos soluciones: una mediante la pieza descrita en el apartado 6.1.2.5.1. y otra mediante juntas cardan. En la primera hay que fabricar dicha pieza, esta pieza se une por

un lado al actuador y por el otro a un perno esférico. En la primera solución se tiene que fabricar un cono (como el de las barras) adaptado a las dimensiones de la junta cardan donde se coloca un tornillo que a su vez se atornilla al nudo, por esto, esta solución necesita de un tipo diferente de nudos.

Cabe destacar que el utillaje flexible se ha diseñado para una pieza de simple curvatura con un radio de 1850 mm, y se ha supuesto que esta pieza tiene los puntos (agujeros) de referencia situados justo en la posición de los nudos 10, 16, 28 y 34 (figura 77).

Los mayores problemas que se pueden encontrar en el utillaje diseñado, aparte de la dificultad de fabricación de los nudos, son: el hecho de tener que apretar 1134 tornillos DIN 912 M3 de las tapas para fijar la posición de la columna en la posición final que se quiere adoptar, y el problema con el cable del actuador mencionado en el apartado 6.2.11.4.

Durante el desarrollo del proyecto se ha visto que lo que a priori parecía una simple celosía espacial con actuadores integrados, es un sistema complejo en el que hay que tener en cuenta factores como los ángulos máximos y mínimos que se alcanzan en distintas partes de la columna y el correcto dimensionamiento de los nudos y las barras. Estos dos factores tienen que estar de acuerdo para que no se produzca una interferencia entre barras.

En cuanto al análisis mecánico se refiere, para un predimensionamiento, en principio, las dimensiones de los diferentes componentes son suficiente para resistir a los esfuerzos aplicados.

11.1. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

De cara al futuro se plantea el diseño de otro utillaje flexible, que siga la línea del diseñado en este proyecto, que sea capaz también de alcanzar geometrías de doble curvatura anticlástica y así poder fabricar piezas como puede ser la parte de la cola de un avión (cono de cola), es decir, un utillaje que se capaz de alcanzar las tres posiciones: columna totalmente vertical, columna con simple curvatura y columna con doble curvatura.

Siguiendo con proyecciones futuras, el análisis mecánico estructural realizado se ha hecho de forma aproximada mediante *CESTR*, por lo que convendría un análisis de la estructura completa más exhaustivo y preciso con otro software de elementos finitos como puede ser *ANSYS*.

12. BIBLIOGRAFÍA

Artículos:

[1] Antonio Ballester, “Portabilidad y precisión en la industria aeronáutica”, regional marketing manager Spain & Portugal de Faro Europe, 16/10/2012.

[2] K. Ayesta; G. Rodríguez, E. Olaiz, A. Rubio y M. Puerto. “Ustillaje flexible e inteligente de piezas de gran tamaño para el mecanizado con cero defectos”. Gamesa Energy Transmission; División Industria y Transporte de TECNALIA. 27/01/2016.

[3] D.Sallé, M.Gimenez, I. Goenaga. “Robot flexible para la automatización detaladrado y remachado de grandes componentes aeronáuticos”. Tecnalía Reseach & Innovation, Aibus Operating. 23/03/2016.

[4] Bi, Z., Zhang, W.,2001. Flexible fixture design and automation: review, issues and future directions. Int. J. Prod. Res. 39(13), 2867–2894.

[5] Boyle, I., Rong, Y., Brown, D., 2011. “A review and analysis of current computer-aided fixture design approaches”. Robot. Comput. Integr. Manuf. 27(1), 1–12.

[6] Naing, S., Burley, G., Odi, R., Williamsson, A., Corbett, J., 2000. Design for Tooling to Enable Jigless Assembly - An Integrated Methodology for Jigless Assembly. SAE Aerospace Automated Fastening Conference & Exposition.

[7] S. Naing, PhD dissertation, June 2004, Cranfield University, <http://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/106>.

[8] S. Stephan, J. Sánchez-Alvarez, K. Knebel. “Reticulated structures on free-form surfaces”. MERO GmbH & Co. KG, 97084 Würzburg, Germany.

[9] H. Schober (1994), "Die Masche mit der Glas-Kuppel", db Magazine, Issue 10, Germany

[10] H. Schober (2002), "Freigeformte Netzschalen – Entwurf und Konstruktion", VDI-Jahrbuch "Bautechnik", Germany.

[11] H. Schober (2002), "Geometrie-Prinzipien für wirtschaftliche und effiziente Schalenträgerwerke", Bautechnik 79, Issue 1, Germany.

[12] Rhinoceros 3.0 User’s Guide (2002), Robert McNeel & Assoc., Seattle Washington, USA.

[13] K. Teichmann, J. Wilke (1996), "Prozeß und Form. Natürlicher Konstruktionen", Sonderforschungsbereich 230, Ernst und Sohn, Berlin, Germany.

[14] Structure en coque et procédé de fabrication d'une telle structure, Pierre Bozetto, Jean-Marc Truchet, Marcel Barret, Guy Chauvier, EP 0 310 478 A1.

Páginas web:

[15] <https://www.mtorres.es/es/aeronautica/productos/metalicos/torrestool>

[16] <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/150339-Utillaje-flexible-inteligente-piezas-gran-tamano-para-mecanizado-cero-defectos.html>

[17] <http://www.lanik.com/es/soluciones/estructuras-espaciales/sistema-ortz>

[18] <http://www.lanik.com/es/soluciones/estructuras-espaciales/sistema-seo/>

[19] <https://dit.ietcc.csic.es/dit-634p-18-sistema-nudo-onddi>

[20] <https://www.autodesk.com/education/free-software/inventor-professional>

[21] <http://www.ehu.eus/compmech/software/>

[22] <http://estructudonde.blogspot.com/p/informatica.html>

[23] <https://www.rationalstock.es/>

[24] <https://www.mbo-ossward.de/es/shop-tienda/articulaciones-angulares-cojinetes-esfericos-pernos-esfericos-articulaciones-axiales/pernos-esfericos/pernos-esfericos-din-71803-forma-c-con-perno-roscado-y-superficie-para-llave?number=100340030016013>

[25] <http://www.regner.es/actuators-sensors-products/ra38-linear-actuators/>

[26] <https://www.incafe2000.com/Esp/p/Tubo-redondo-40x2-mm>

[27] <https://www.exelwebstore.com/proposed-use/crosslitetm-carbon-fibre-tube-38-36-mm-1200-cm.html>

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
TRABAJO FIN DE GRADO

***DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE
NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE
AERONÁUTICO***

ANEXOS

Alumno/Alumna: Mazo, Uyarra, Pablo

Director/Directora (1): Iriondo, Plaza, Edurne

Director/Directora (2): Girot, Mata, Franck

Curso: 2018-2019

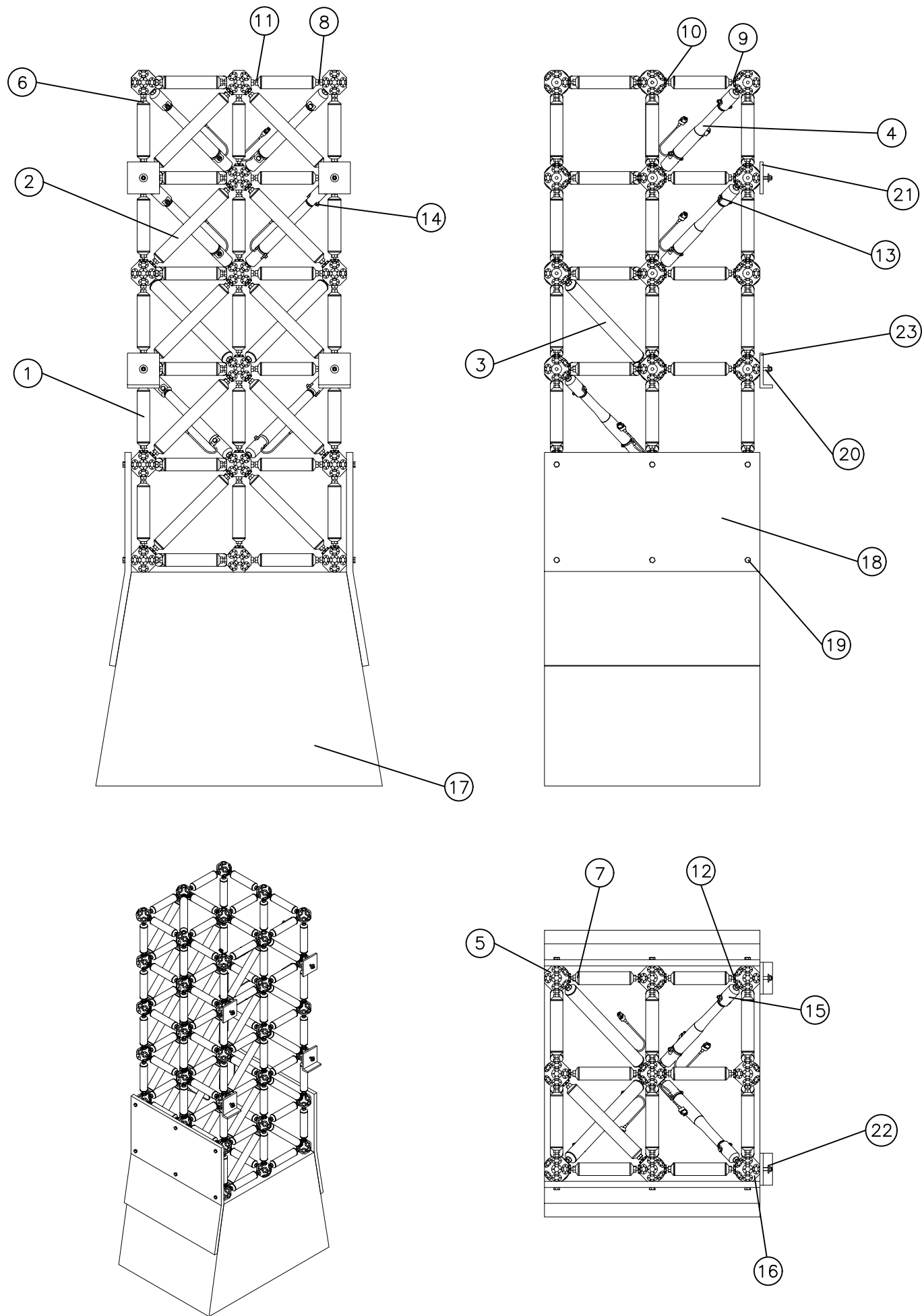
Fecha: Bilbao, 21, Julio, 2019

ANEXO I

PLANOS

ÍNDICE DE PLANOS


Nº DE PLANO	TÍTULO DEL PLANO	FORMATO
1	Conjunto Completo	A3
2	Columna	A3
3	Cono+Tonillo+Tuercas	A4
4	Cono+Perno+Tuerca	A4
5	Conjunto de Amarre Superior	A4
6	Conjunto de Amarre Inferior	A4
7	Tubo 160mm	A4
8	Tubo 284mm	A4
9	Tubo 380mm	A4
10	Nudo principal	A3
11	Cono	A4
12	Cono Roscadp	A4
13	Tapa	A4
14	Machón de Unión	A4
15	Nudo Secundario	A3
16	Apoyo	A4
17	Brazo	A4
18	Espárrago	A4
19	Pletina Superior	A4
20	Pletina Circular	A4
21	Pletina Inferior	A4
22	Tubo $\varnothing 38$ 160mm	A4
23	Tubo $\varnothing 38$ 284mm	A4
24	Tubo $\varnothing 38$ 380mm	A4
25	Cono Alargado	A4
26	Cono Roscado Alargado	A4




193	Cono alargado roscado	7'		6061-T6	0,037	7,14
117	Cono alargado	6'		6061-T6	0,037	4,34
2	Tubo $\varnothing 38$ 380 mm	3'		Composite	0,068	0,14
36	Tubo $\varnothing 38$ 284 mm	2'		Composite	0,051	1,84
117	Tubo $\varnothing 38$ 160 mm	1'		Composite	0,029	3,34
2	Pletina inferior	23		F-1140	1,1	2,2
4	Pletina circular	22		F-1140	0,01	0,04
2	Pletina superior	21		F-1140	0,781	1,56
4	Espárrago	20		AISI 440	0,025	0,1
2	Tornillo de cabeza hexagonal M10x40	19	ISO 4017			
2	Brazo	18		F-1140	71,74	143,5
1	Apoyo	17		F-1140	366	366
4	Nudo secundario	16		AISI 316	1,88	7,52
12	Machón de unión	15		AISI 316	0,51	6,12
16	Tuerca M8	14	ISO 4032			
12	Tornillo de cabeza hexagonal M8x40	13	ISO 4017			
1134	Tornillo de cabeza de boquilla M3x10	12	ISO 4762			
427	Tuerca M10	11	ISO 4032			
193	Tapa	10		AISI 316	0,013	2,51
205	Perno esférico	9	ISO 71803			
117	Tornillo de cabeza hexagonal M10x45	8	ISO 4017			
193	Cono roscado	7		S235JR	0,083	16,02
117	Cono	6		S235JR	0,083	9,71
50	Nudo principal	5		AISI 316	1,88	94
6	Actuador	4	Comercial			
2	Tubo 380mm	3		S235JR	0,71	1,42
36	Tubo 284mm	2		S235JR	0,53	19,08
117	Tubo 160mm	1		S235JR	0,3	35,1

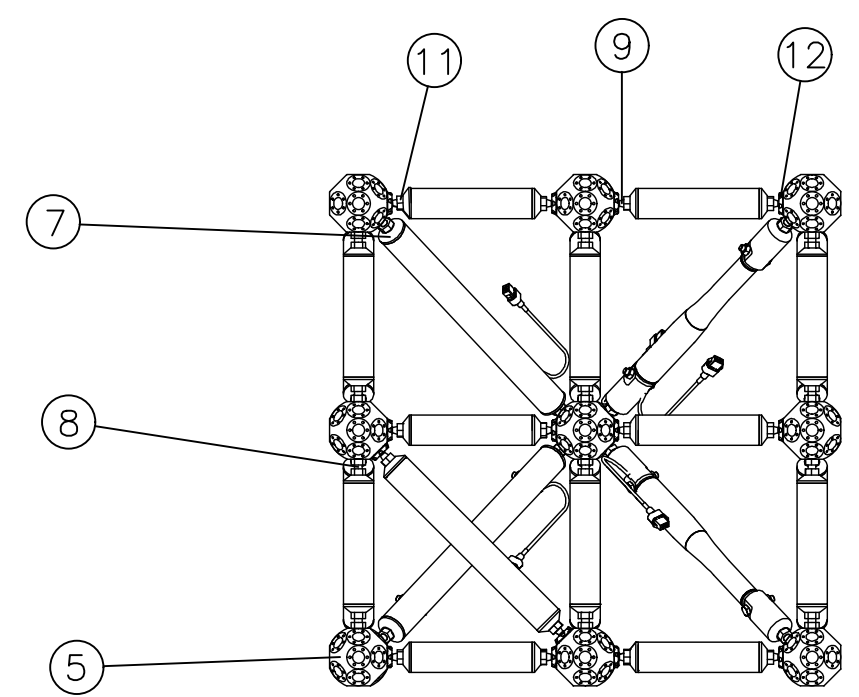
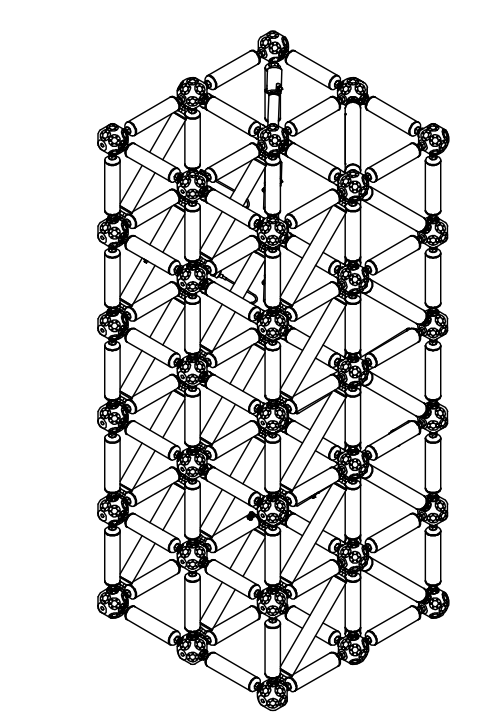
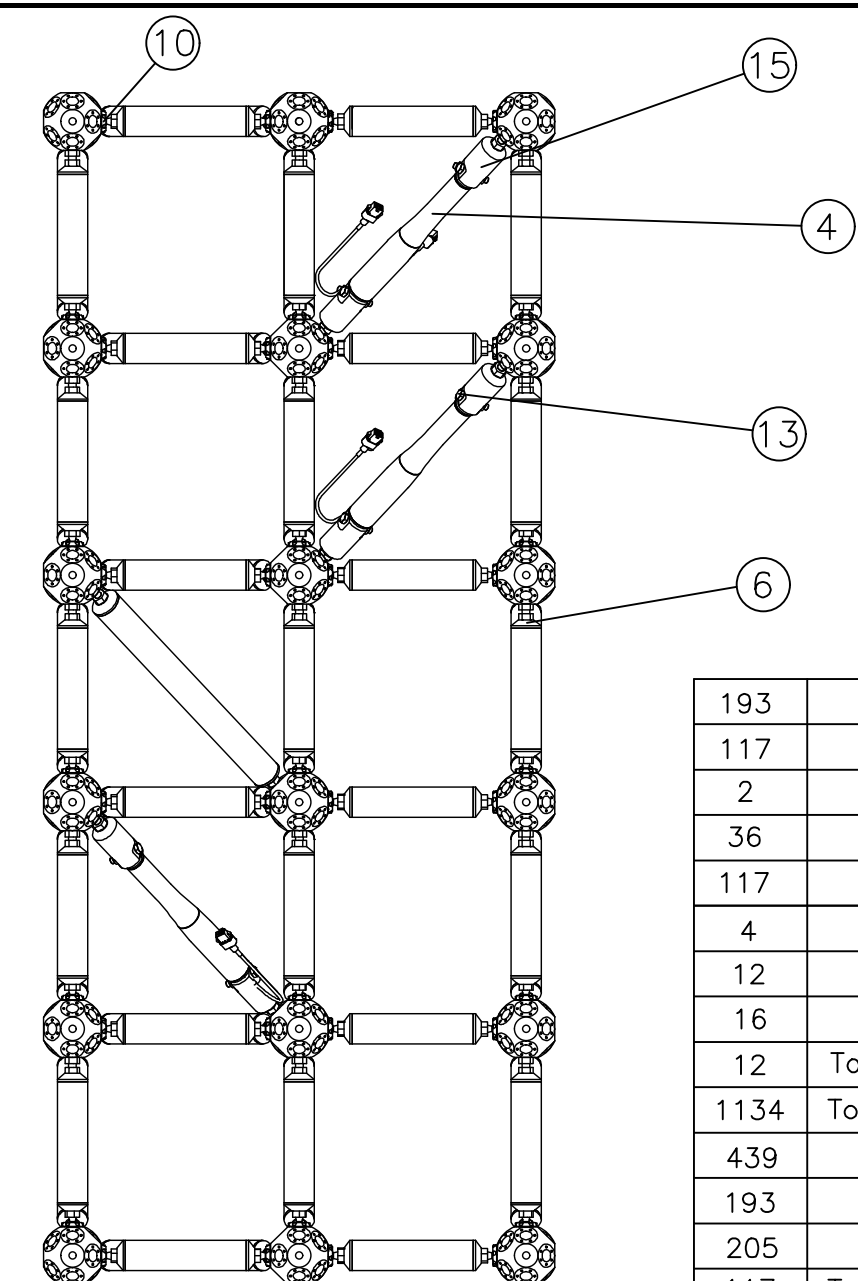
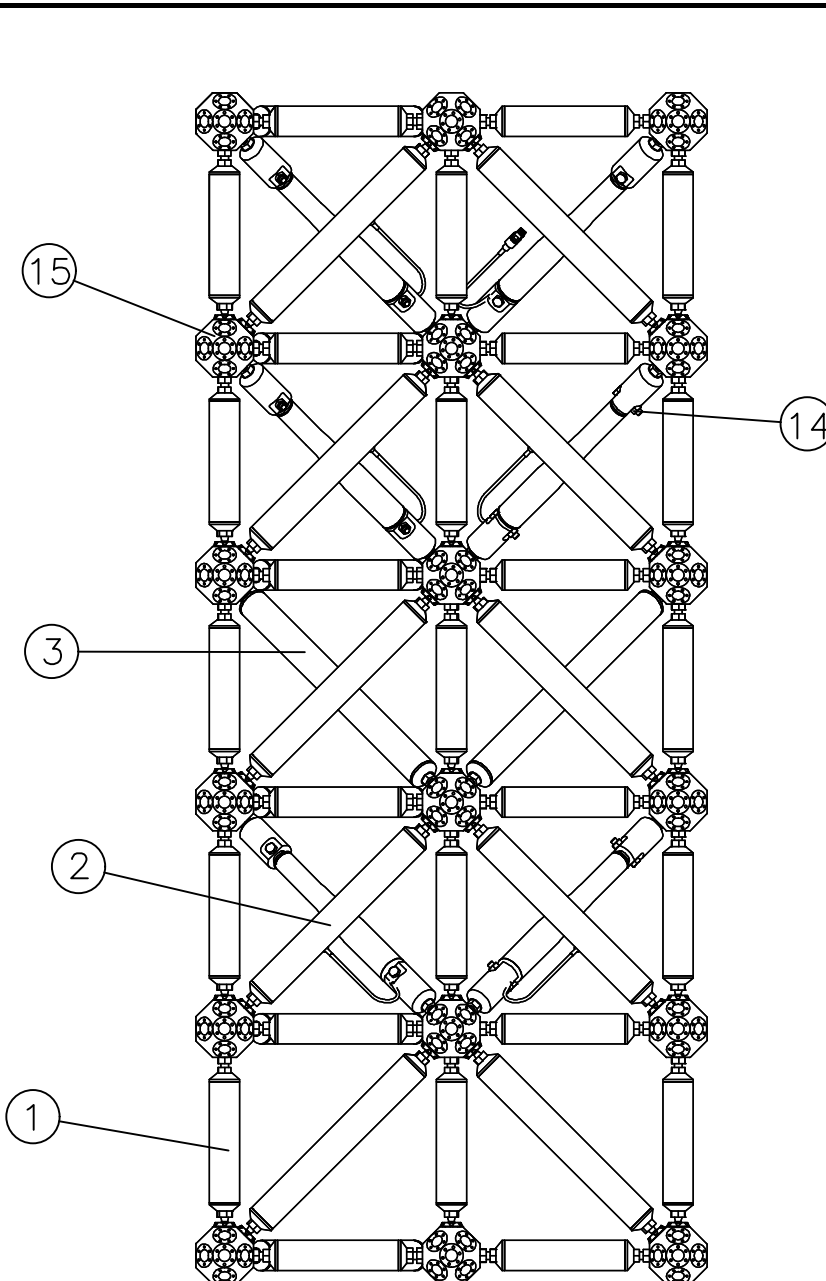
N° Piezas	Denominación y Observaciones	Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
					Peso	

	Fecha	Nombre	Firma
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra	
Comprobado:			



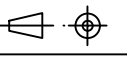

UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA
 TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO

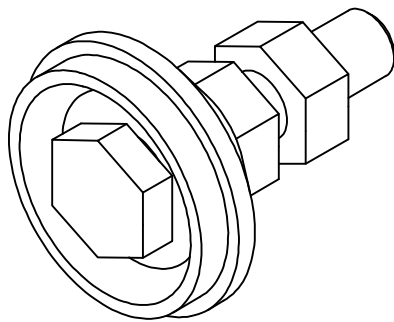
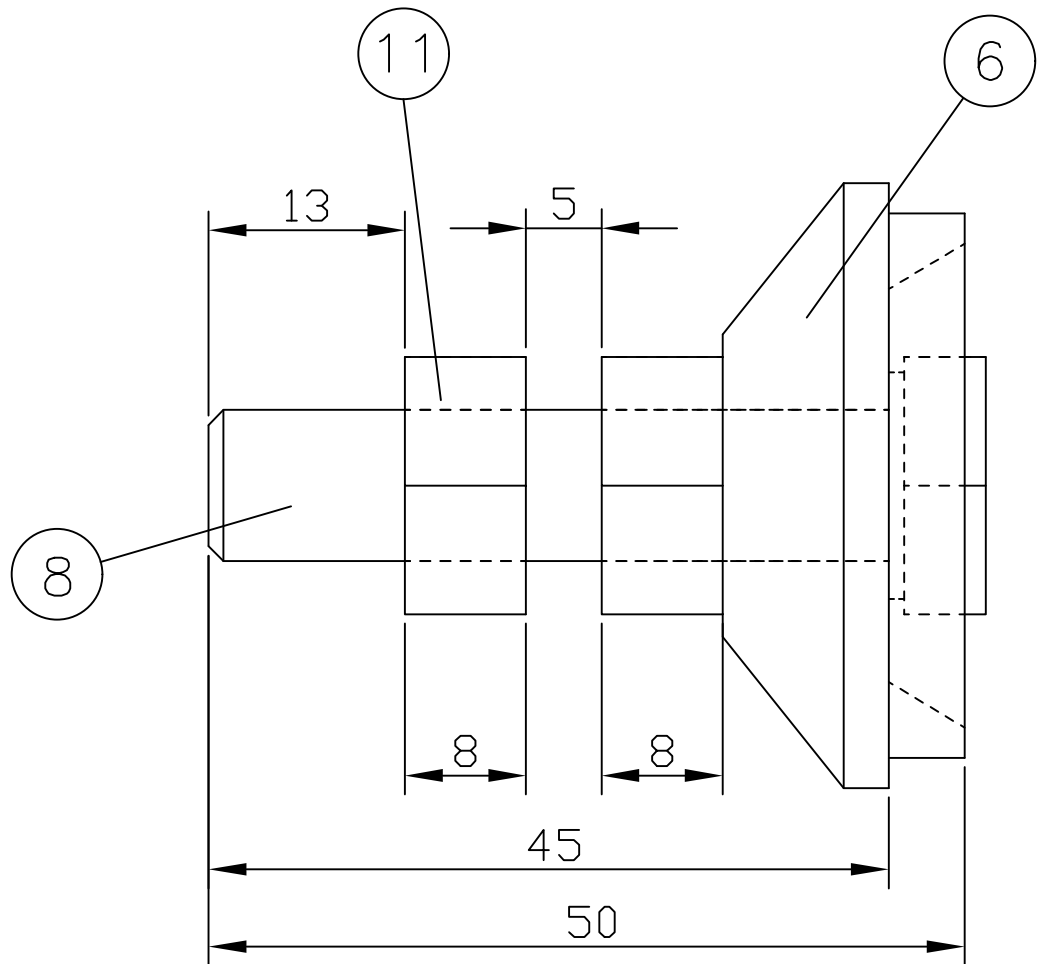


 Tol. gen.	Escala	CONJUNTO COMPLETO	DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO
	1/16		
			N° Planos. 26



193	Cono alargado roscado	7'		6061-T6	0,037	7,14
117	Cono alargado	6'		6061-T6	0,037	4,34
2	Tubo \varnothing 38 380 mm	3'		Composite	0,068	0,14
36	Tubo \varnothing 38 284 mm	2'		Composite	0,051	1,84
117	Tubo \varnothing 38 160 mm	1'		Composite	0,029	3,34
4	Nudo secundario	16		AISI 316	1,88	7,52
12	Macho de unión	15		AISI 316	0,51	6,12
16	Tuerca M8	14	ISO 4032			
12	Tornillo de cabeza hexagonal M8x40	13	ISO 4017			
1134	Tornillo de cabeza de boquilla M3x10	12	ISO 4762			
439	Tuerca M10	11	ISO 4032			
193	Tapa	10		AISI 316	0,013	2,51
205	Perno esférico	9	ISO 71803			
117	Tornillo de cabeza hexagonal M10x45	8	ISO 4017			
193	Cono roscado	7		S235JR	0,083	16,02
117	Cono	6		S235JR	0,083	9,71
50	Nudo principal	5		AISI 316	1,88	94
6	Actuador	4				
2	Tubo 380mm	3		S235JR	0,71	1,42
36	Tubo 284mm	2		S235JR	0,53	19,08
117	Tubo 160mm	1		S235JR	0,3	35,1

Nº Piezas	Denominación y Observaciones	Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total Peso
	Fecha	Nombre	Firma	 UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO 		
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra				
Comprobado:						
	Escala	COLUMNA			DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO	
Tol. gen.	1/10				Plano Nº. 2	
					Nº Planos. 26	



439	Tuerca M10	11	ISO 4032			
117	Tornillo de cabeza hexagonal M10x45	8	ISO 4017			
117	Cono	6		S235JR	0,083	9,71
N° Piezas	Denominación y Observaciones	Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
					Peso	

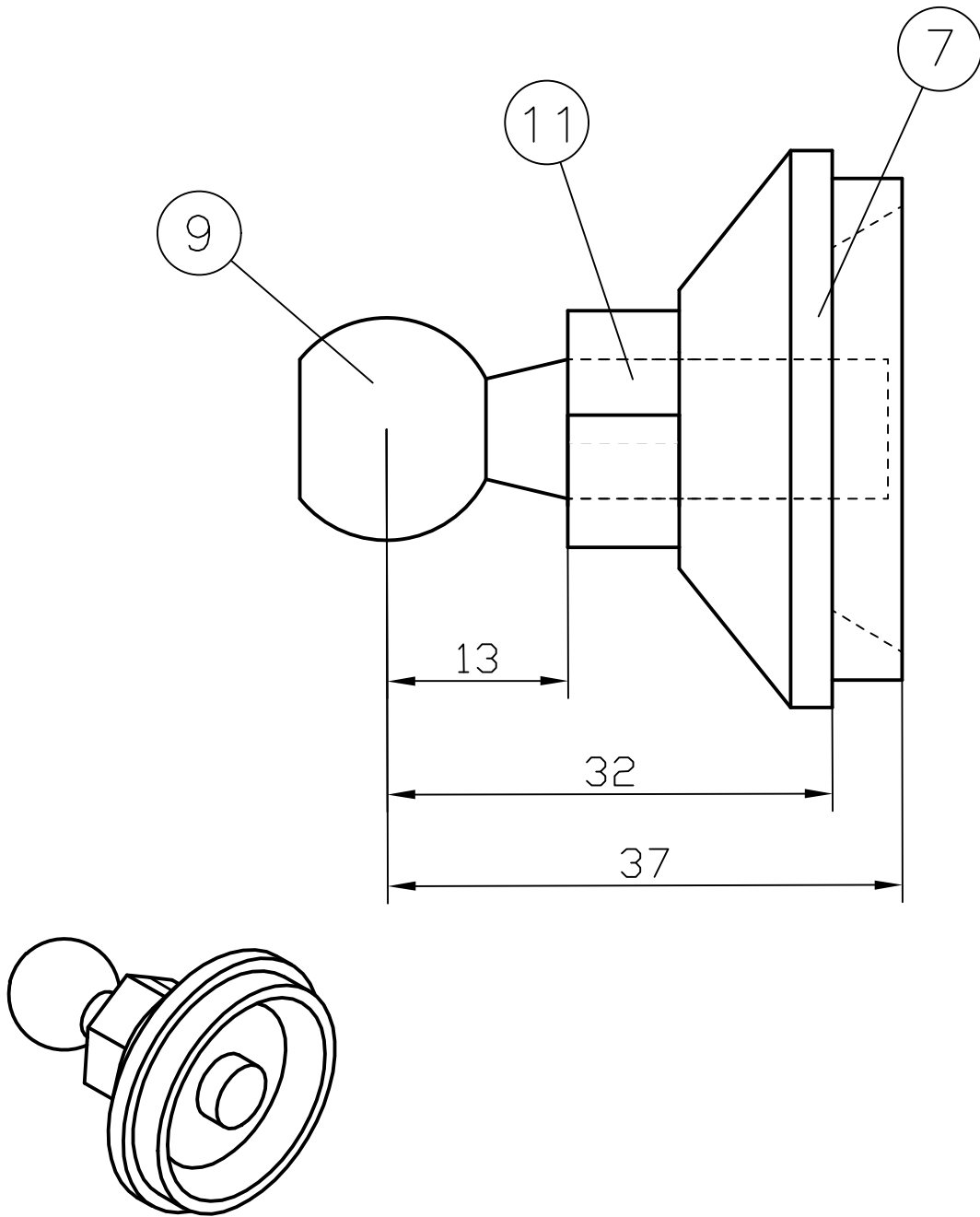
	Fecha	Nombre	Firma
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra	
Comprobado:			



UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA
 TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO




	Escala	CONO+TORNILLO+TUERCAS	DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO
	2/1		
Tol. gen.	Plano N°. 3		
	N° Planos. 26		




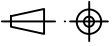
439	Tuerca M10	11	ISO 4032			
205	Perno esférico	9	ISO 71803			
193	Cono roscado	7		S235JR	0,083	16,02

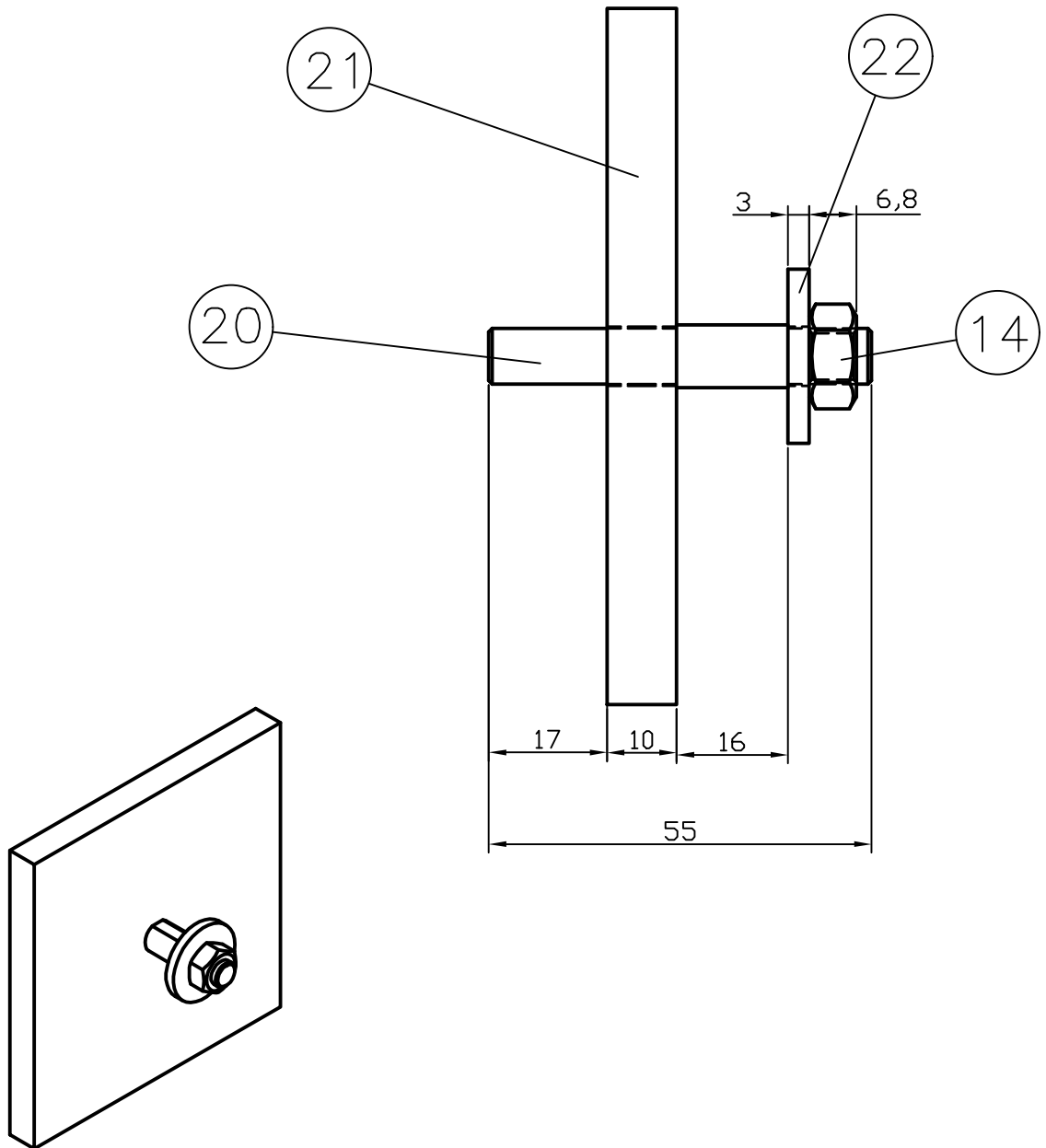
N° Piezas	Denominación y Observaciones	Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
					Peso	

	Fecha	Nombre	Firma
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra	
Comprobado:			




UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA
 TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO

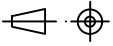


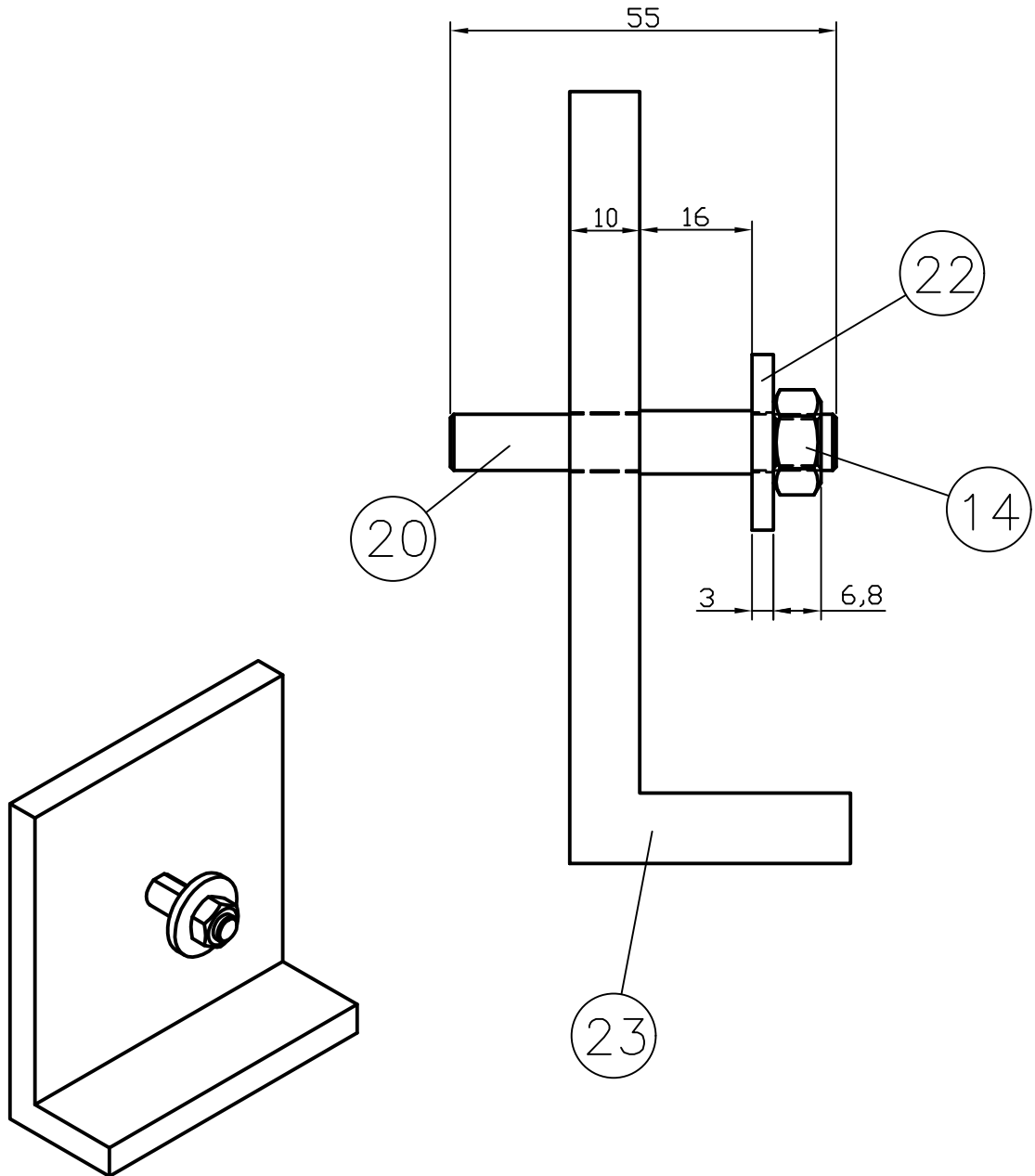
 Tol. gen.	Escala 2/1	CONO+PERNO+TUERCAS	DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO
			Plano N°. 4 N° Planos. 26





4	Pletina circular	22		F-1140	0,01	0,04
2	Pletina superior	21		F-1140	0,781	1,56
4	Espárrago	20		AISI 440	0,025	0,1
16	Tuerca M8	14	ISO 4032			
N° Piezas	Denominación y Observaciones	Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
					Peso	

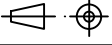
	Fecha	Nombre	Firma	 UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO				
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra						
Comprobado:								

 Tol. gen.	Escala 1/1	CONJUNTO DE AMARRE SUPERIOR	DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO
			Plano N°. 5
			N° Planos. 26

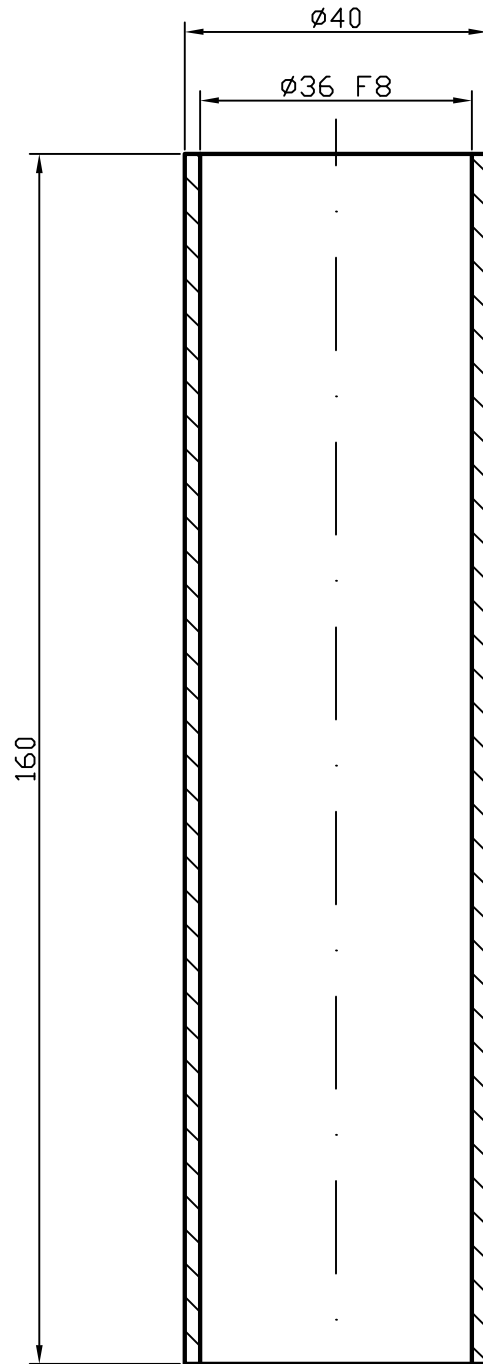
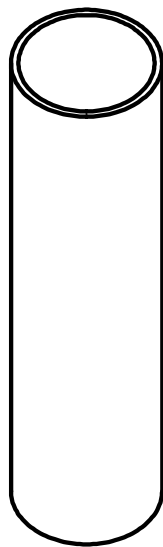


2	Pletina inferior	23		F-1140	1,1	2,2
4	Pletina circular	22		F-1140	0,01	0,04
4	Espárrago	20		AISI 440	0,025	0,1
16	Tuerca M8	14	ISO 4032			
N° Piezas	Denominación y Observaciones	Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
					Peso	

	Fecha	Nombre	Firma	 UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO 
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra		
Comprobado:				

 Tol. gen.	Escala 1/1	CONJUNTO DE AMARRE INFERIOR	DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO
			Plano N°. 6 N° Planos. 26

1 N11



117	Tubo 160mm	1		S235JR	0,3	35,1
-----	------------	---	--	--------	-----	------

N° Piezas	Denominación y Observaciones	Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
					Peso	

	Fecha	Nombre	Firma
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra	
Comprobado:			

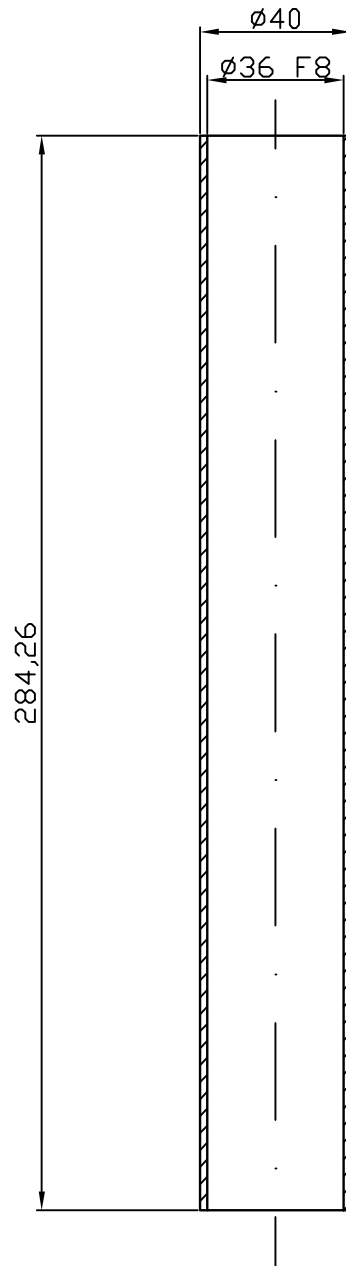
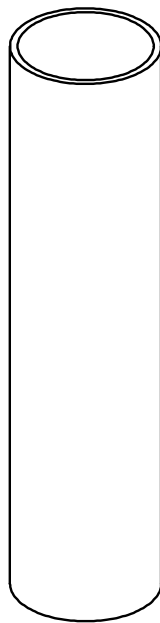


UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA
 TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO



 Tol. gen.	Escala 1/1	TUBO 160mm	DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO
			Plano N°. 7
			N° Planos. 26



② N11

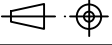


36	Tubo 284mm	2		S235JR	0,53	19,08
----	------------	---	--	--------	------	-------

N° Piezas	Denominación y Observaciones	Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
					Peso	

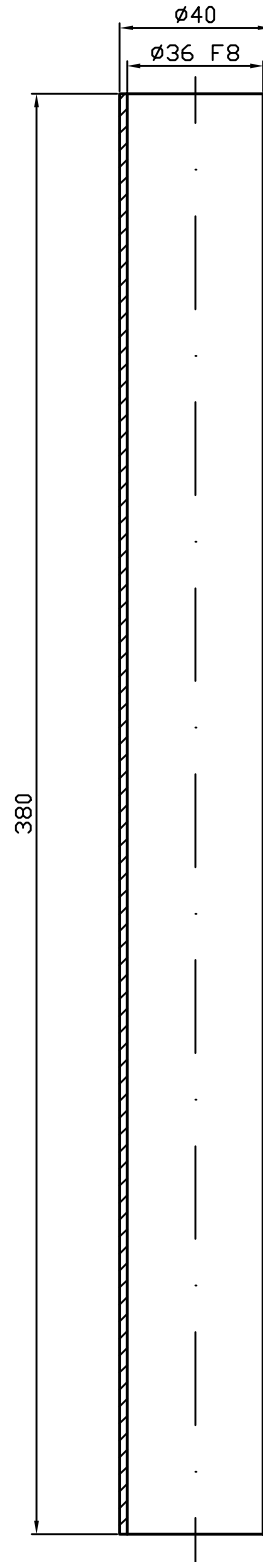
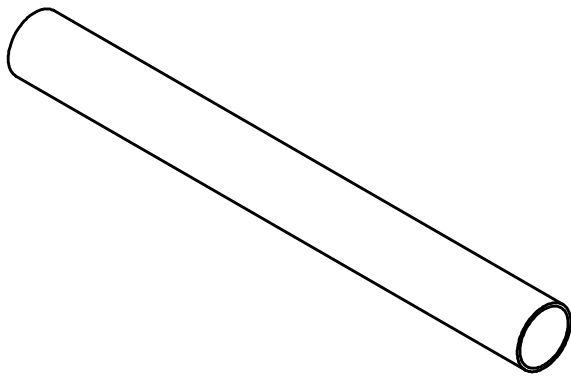
	Fecha	Nombre	Firma
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra	
Comprobado:			



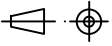

UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA
 TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO
 

 Tol. gen.	Escala 1/2	TUBO 284mm	DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO
			Plano N°. 8
			N° Planos. 26

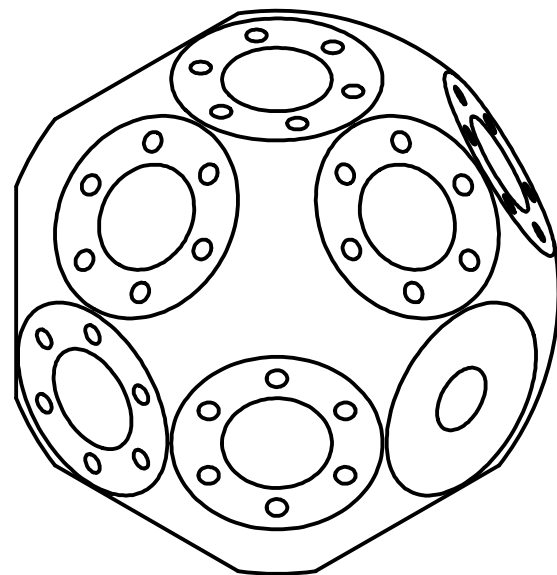
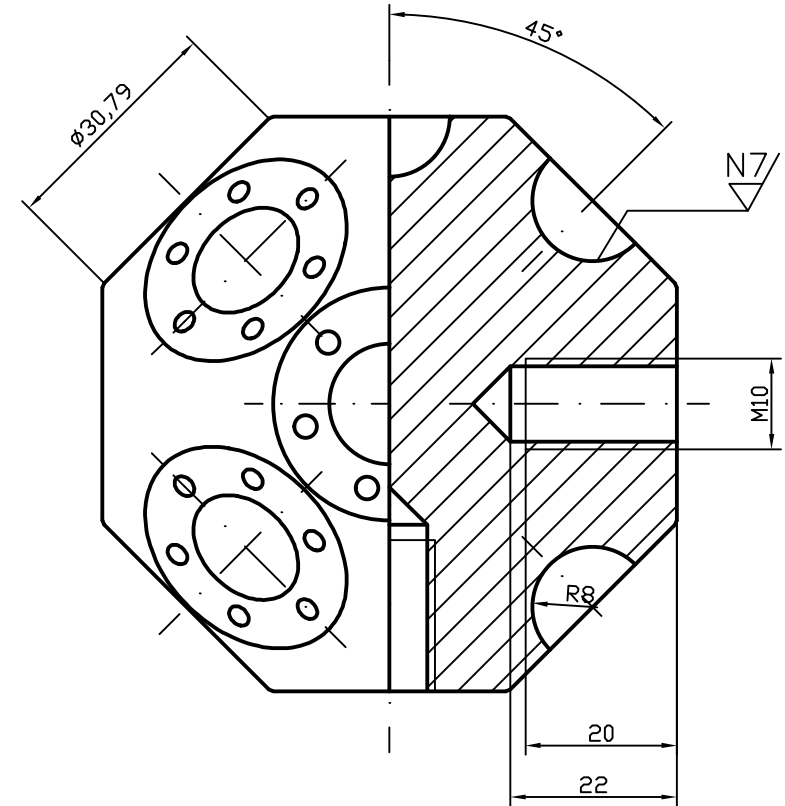
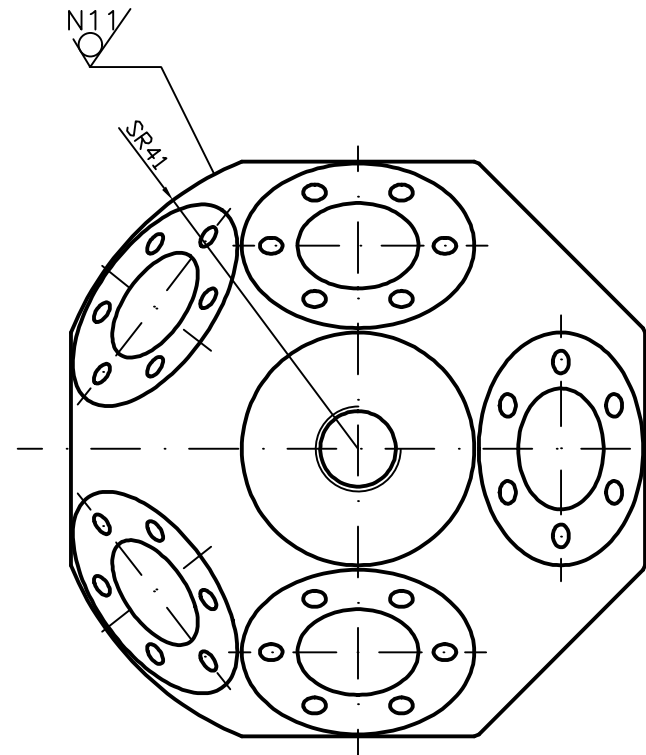
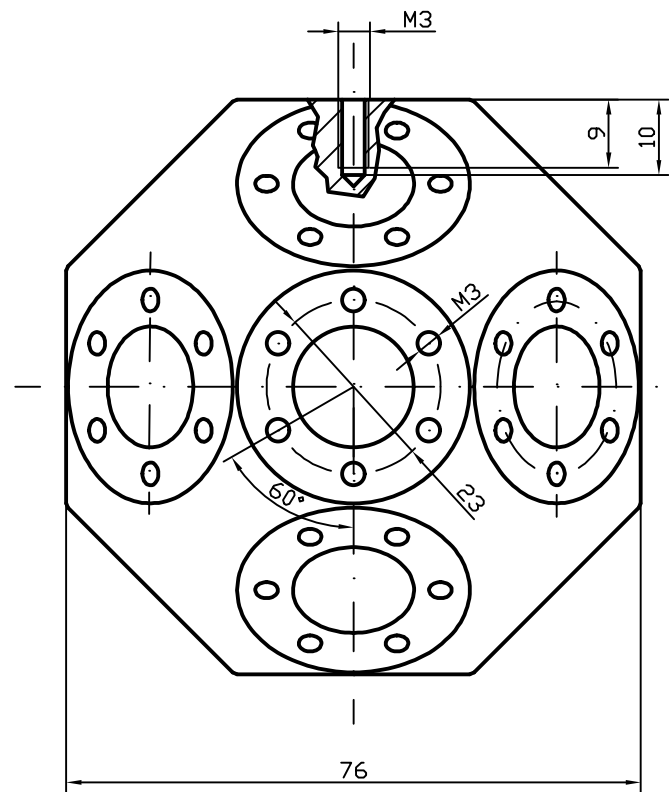
3



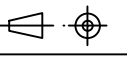
N11



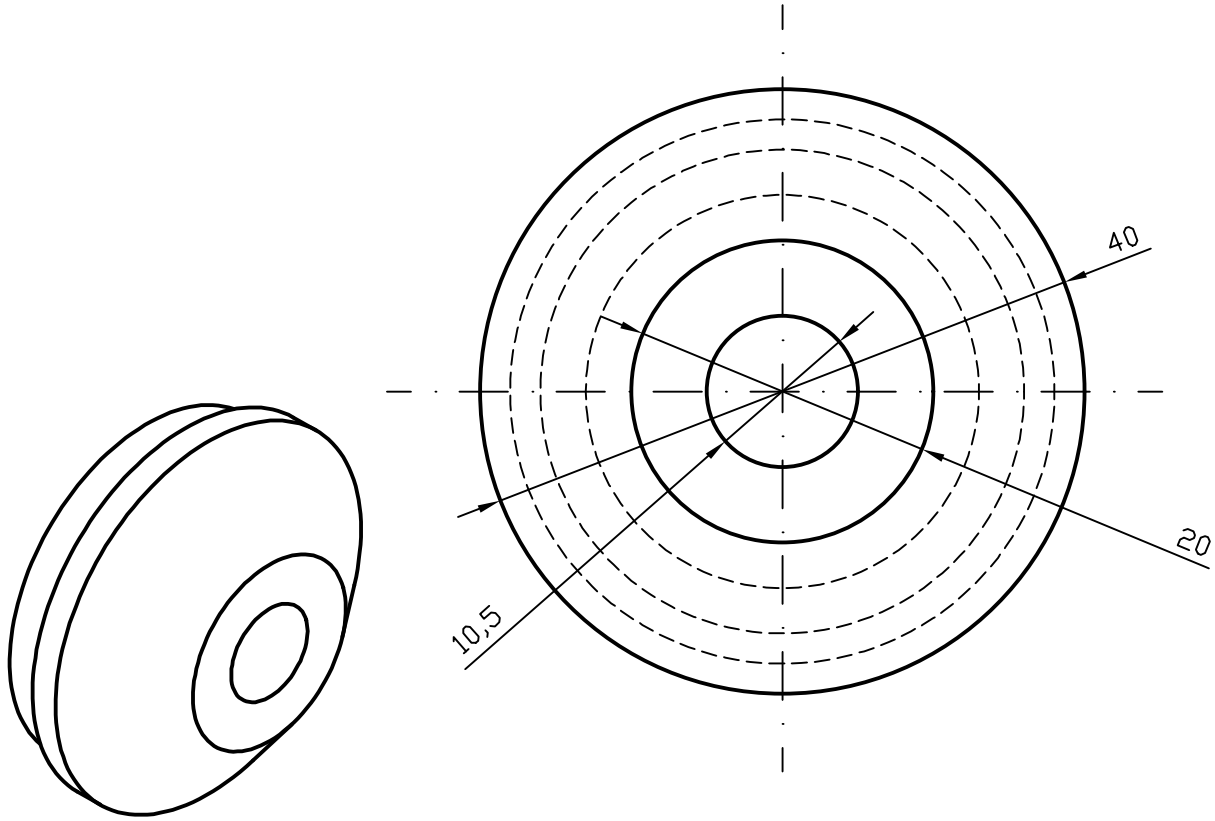
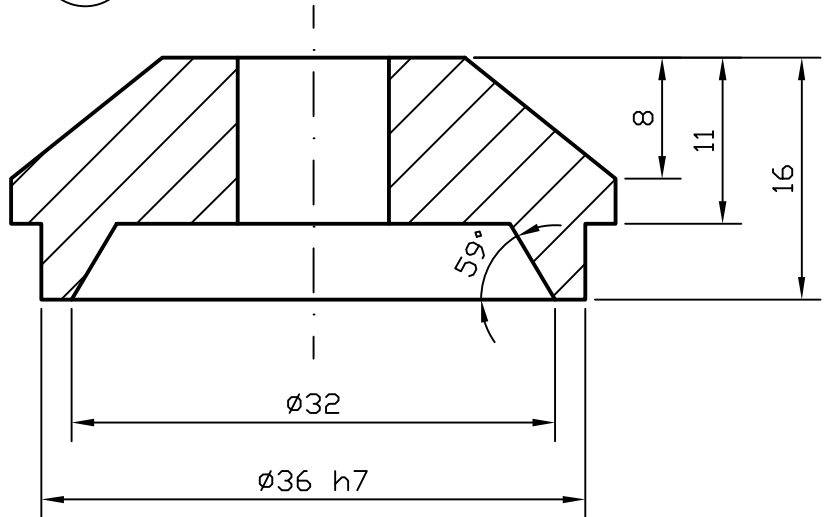
2	Tubo 380mm			3		S235JR	0,71	1,42
Nº Piezas	Denominación y Observaciones			Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
							Peso	
	Fecha	Nombre	Firma	 UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO 				
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra						
Comprobado:								
	Escala	TUBO 380mm			DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO			
Tol. gen.	1/2				Plano Nº. 9			
					Nº Planos. 26			

5 N9/ (N7/ N11/)



50	Nudo principal			5		AI SI 316	1,88	94
Nº Piezas	Denominación y Observaciones			Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
							Peso	
	Fecha	Nombre	Firma	 UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO 				
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra						
Comprobado:								
	Escala	NUDO PRINCIPAL			DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO Plano N°. 10 N° Planos.26			
Tol. gen.	1/1							



6 N9

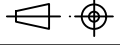


117	Cono	6		S235JR	0,083	9,71
-----	------	---	--	--------	-------	------

N° Piezas	Denominación y Observaciones	Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
					Peso	

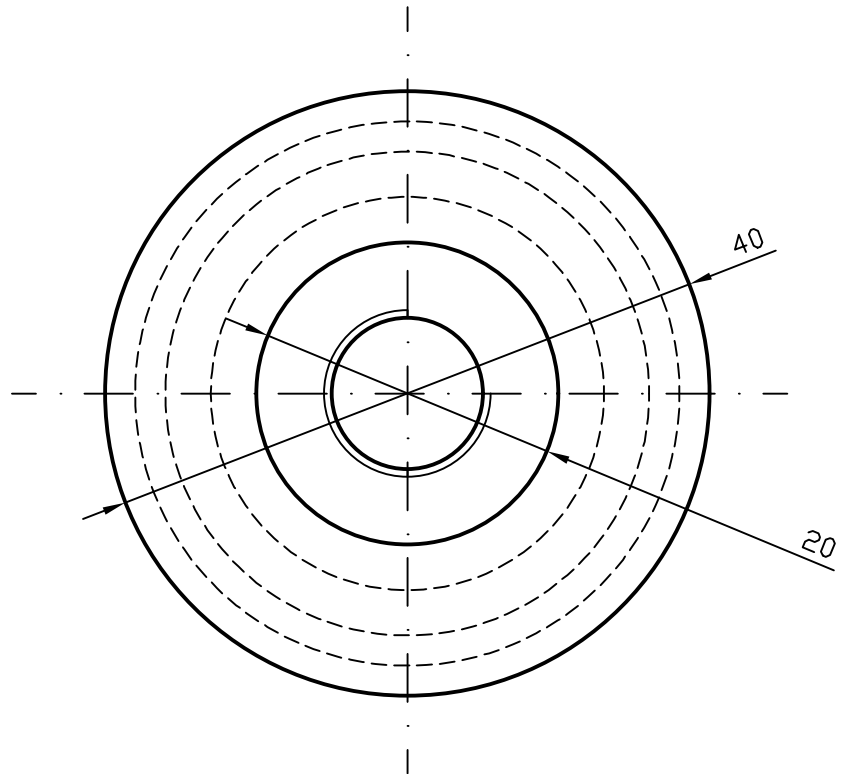
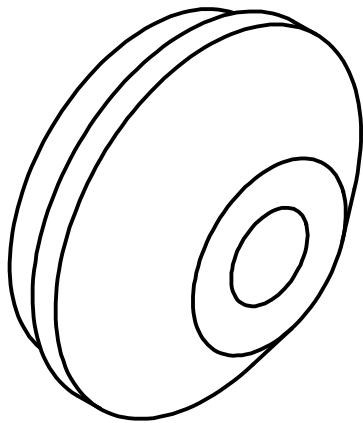
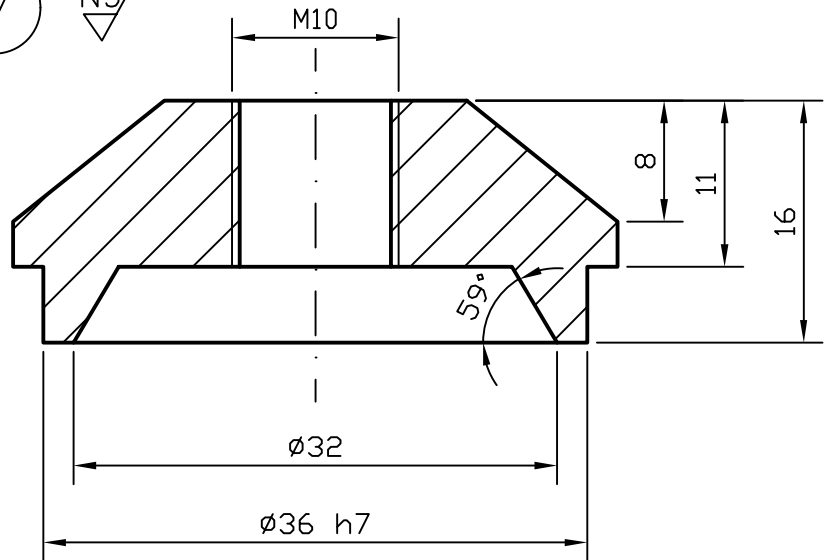
	Fecha	Nombre	Firma
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra	
Comprobado:			




UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO
 ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA
 TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO
 

 Tol. gen.	Escala 2/1	<h1>CONO</h1>	DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO
			Plano N°. 11
			N° Planos. 26

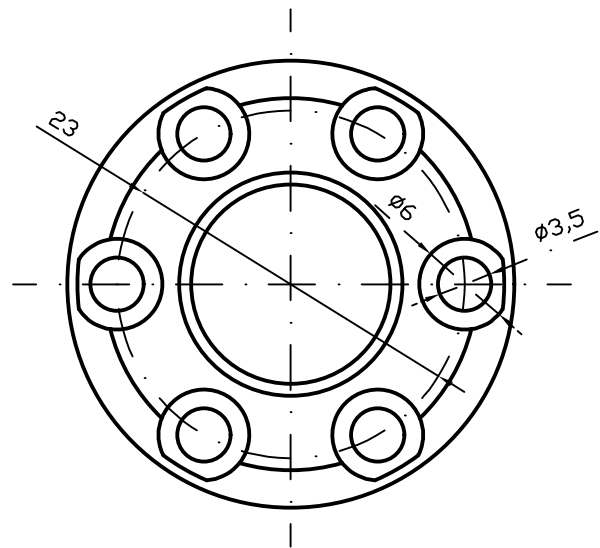
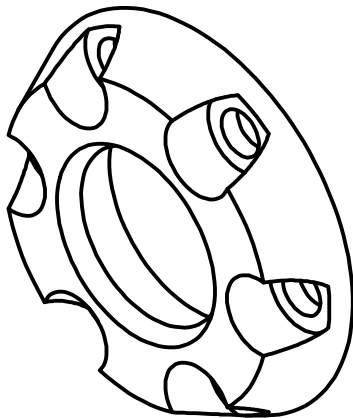
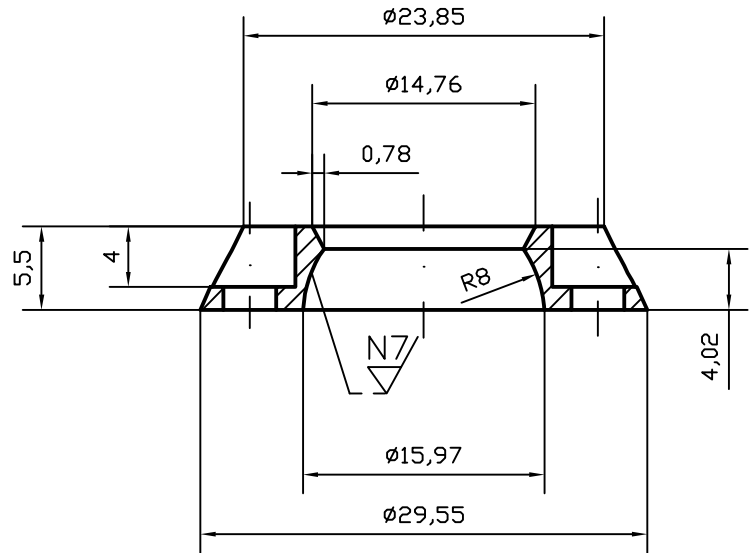
7



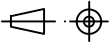
N9



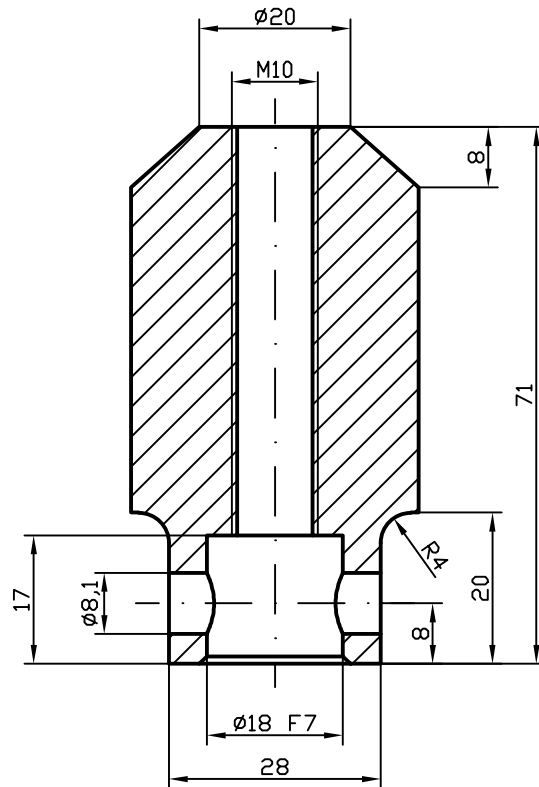
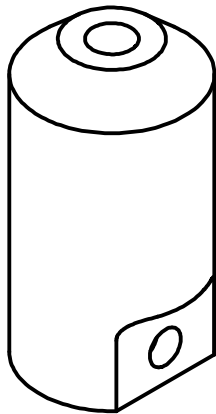
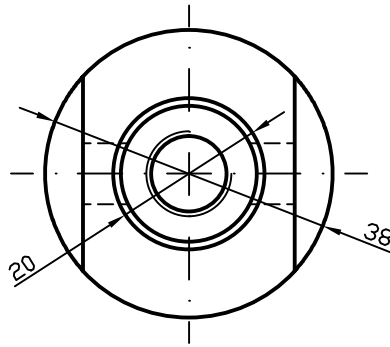
193	Cono roscado		7		S235JR	0,083	16,02
N° Piezas	Denominación y Observaciones		Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
						Peso	
	Fecha	Nombre	Firma	 UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO 			
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra					
Comprobado:							
	Escala	CONO ROSCADO		DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO Plano N°. 12 N° Planos. 26			
Tol. gen.	2/1						



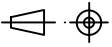
10 ∇ N9/ (∇ N7)



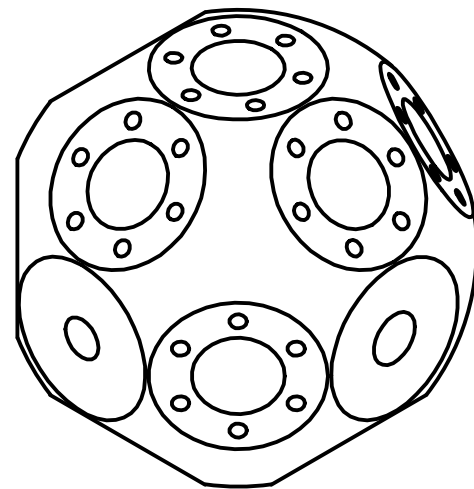
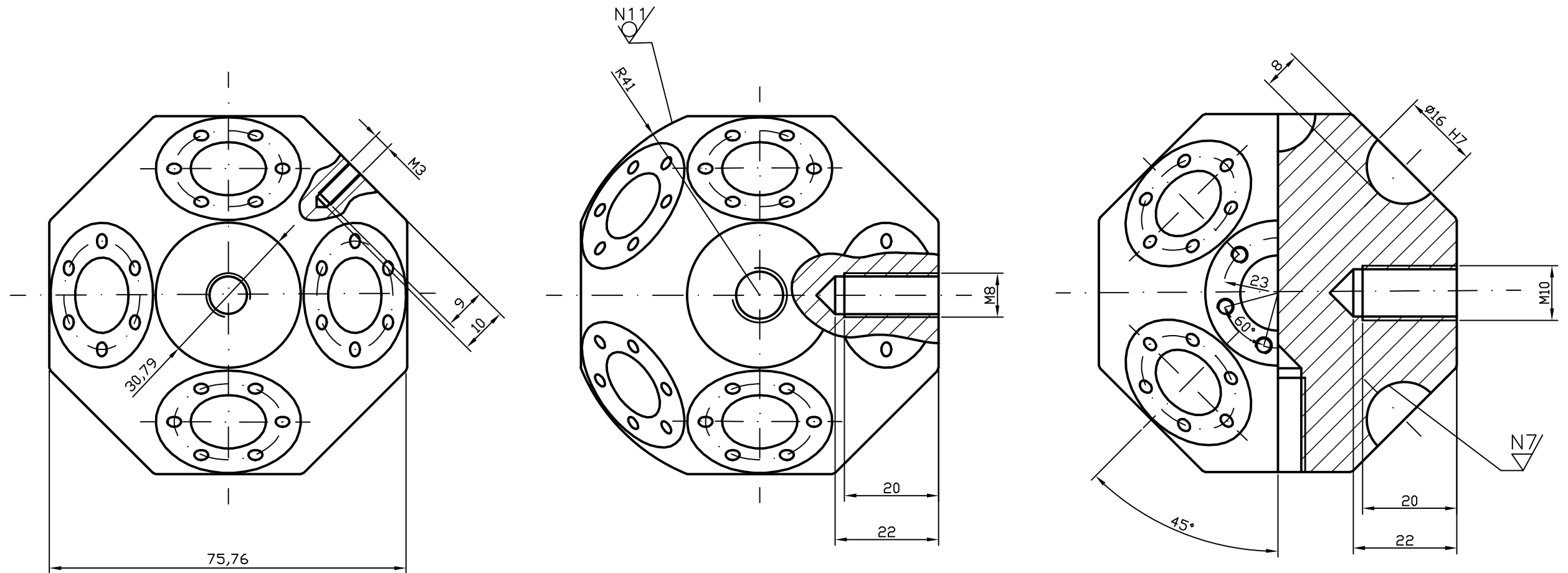
193	Tapa			10		AISI 316	0,013	2,51
N° Piezas	Denominación y Observaciones			Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
							Peso	
	Fecha	Nombre	Firma	 UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO 				
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra						
Comprobado:								
	Escala	TAPA			DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO Plano N°. 13 N° Planos. 26			
Tol. gen.	2/1							



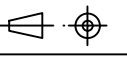
15 N9



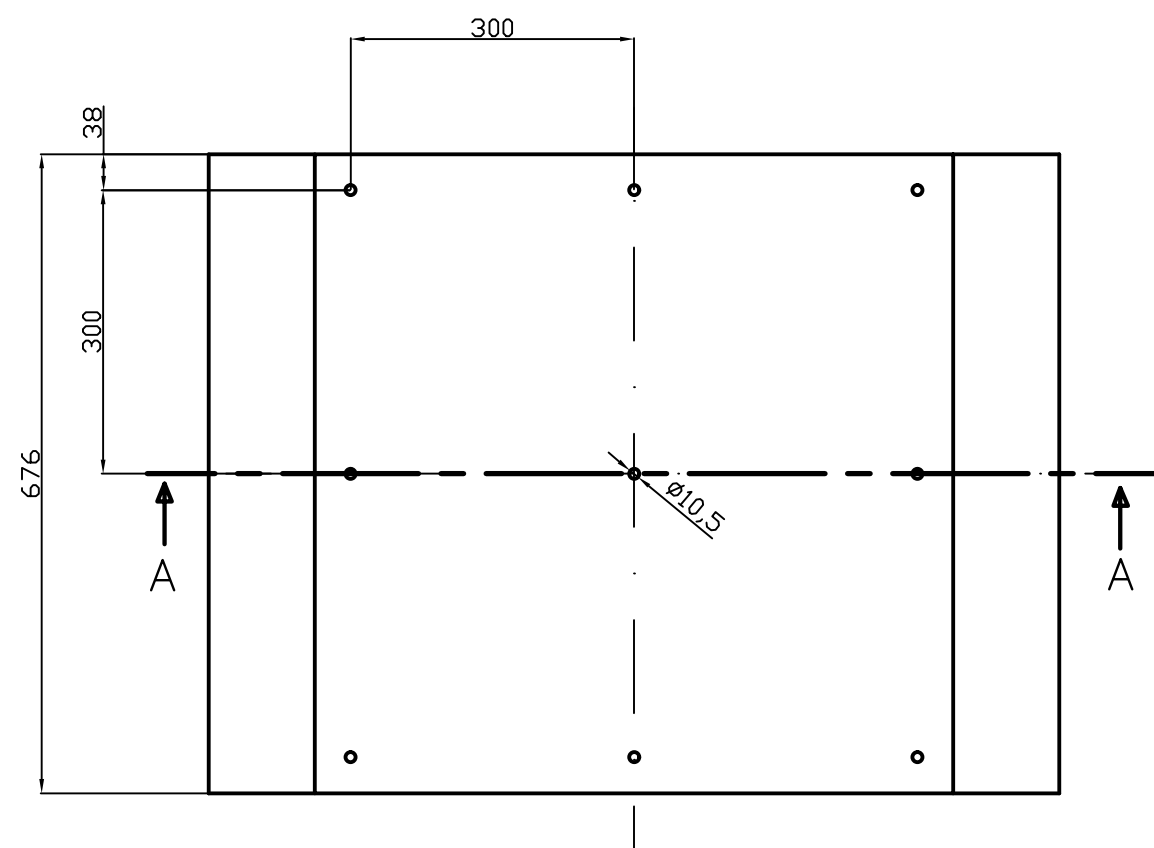
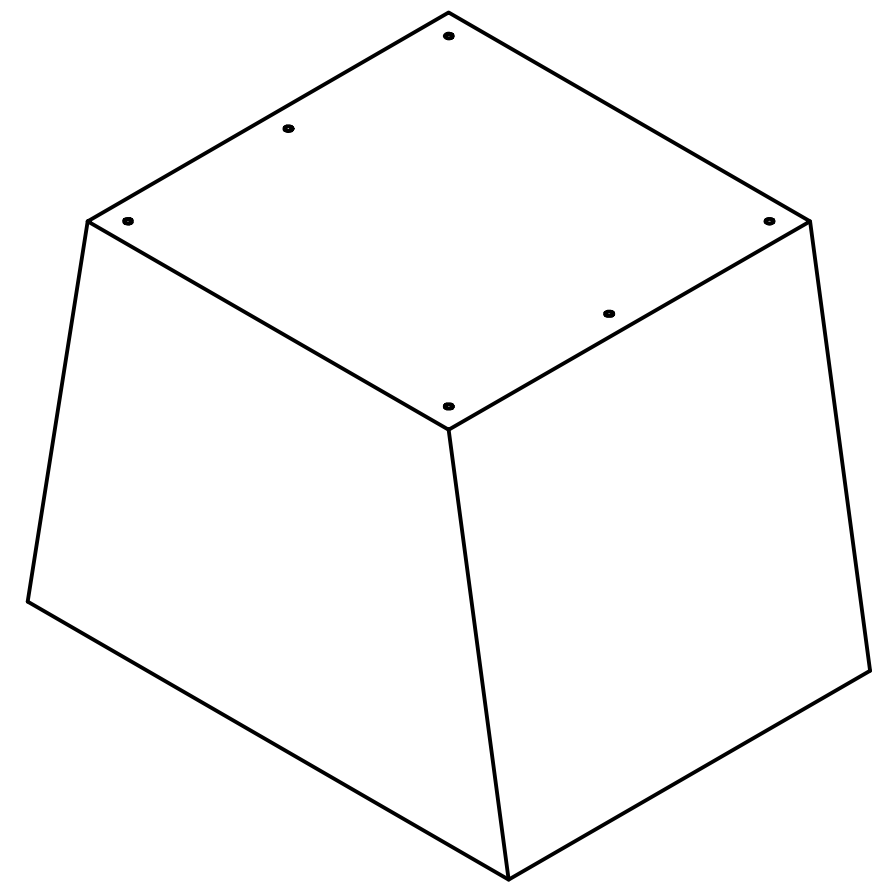
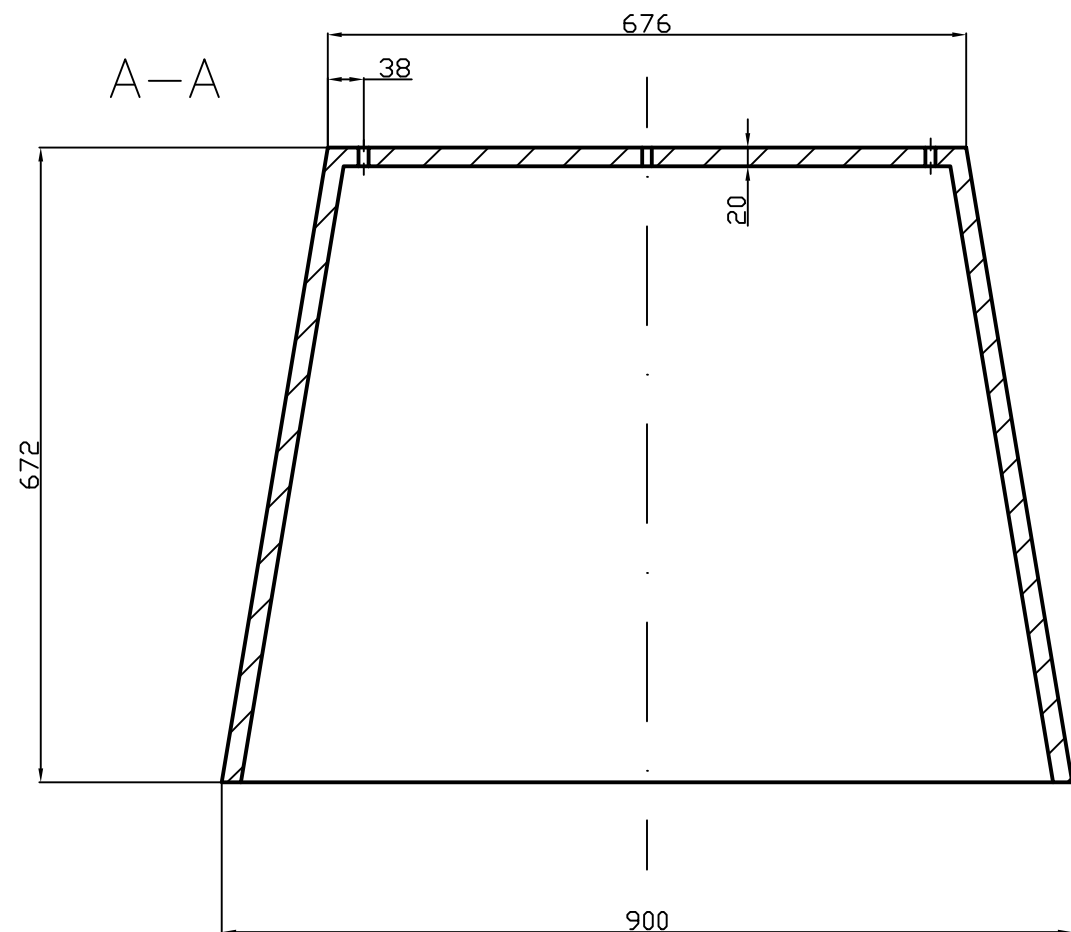
12	Machón de unión		15		ASTM A653	0,51	6,12
Nº Piezas	Denominación y Observaciones		Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
						Peso	
	Fecha	Nombre	Firma	 UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO 			
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra					
Comprobado:							
 Tol. gen.	Escala	MACHÓN DE UNIÓN		DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO Plano Nº. 14 Nº Planos. 26			
	1/1						

5 N9 (N7 N11)



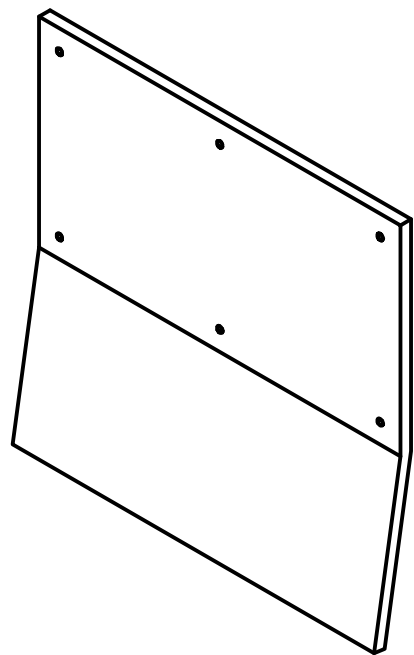
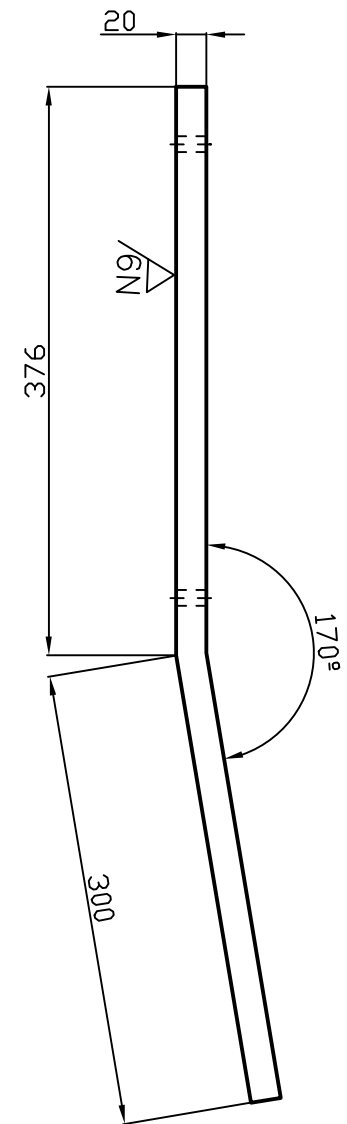
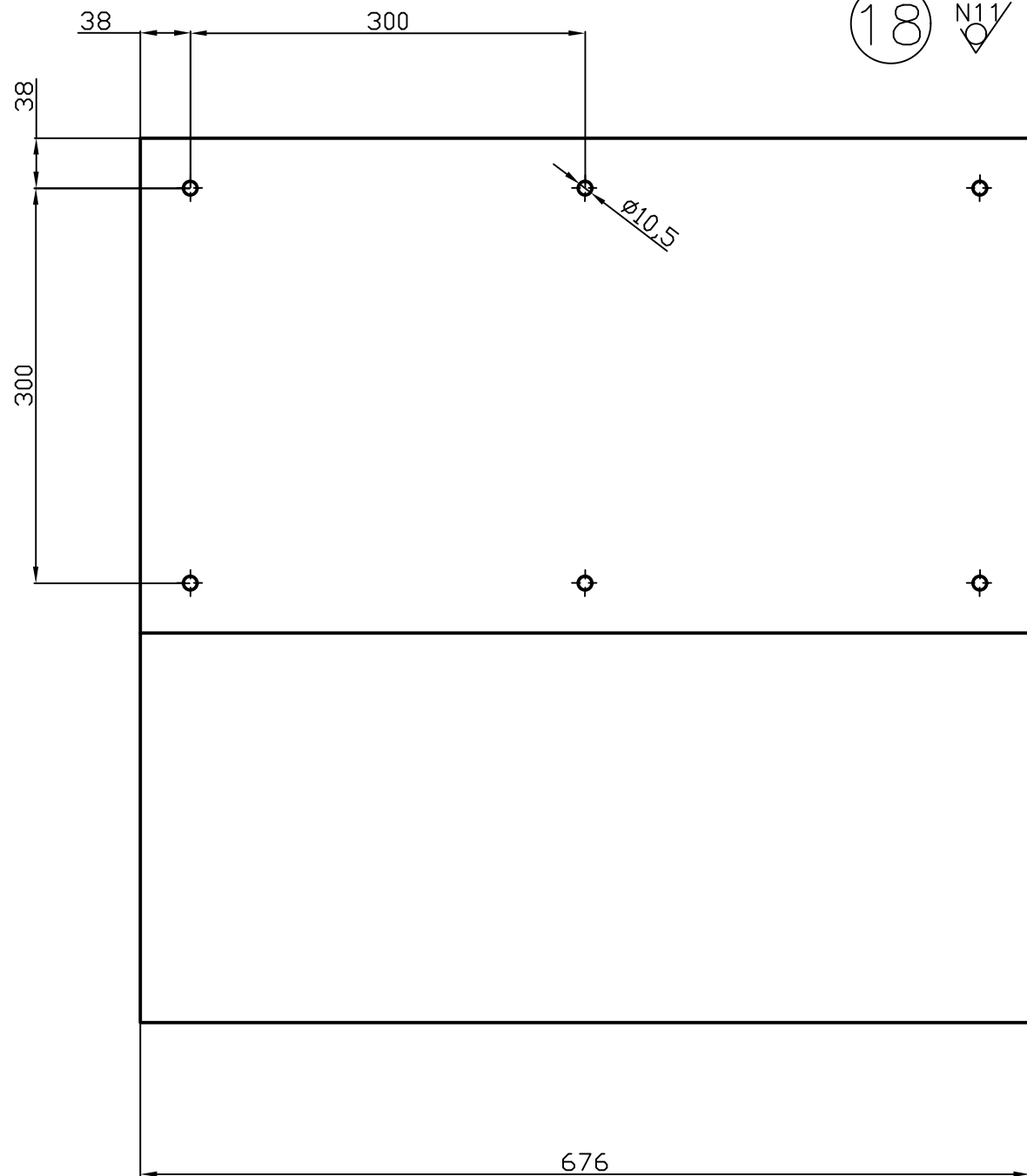
4	Nudo secundario			16		AI SI 316	1,88	7,52
Nº Piezas	Denominación y Observaciones			Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
							Peso	
	Fecha	Nombre	Firma	 UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO 				
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra						
Comprobado:								
 Tol. gen.	Escala	NUDO SECUNDARIO			DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO			
	1/1							
		Plano Nº. 15			Nº Planos.26			



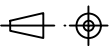
17 N11



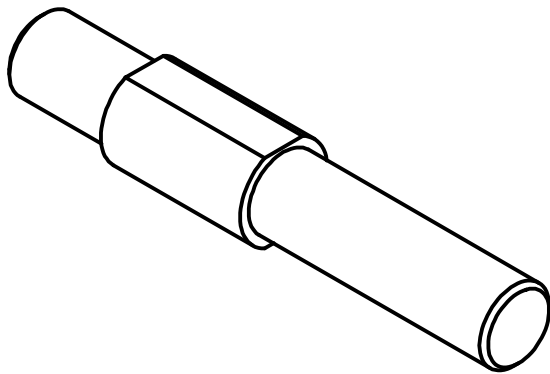
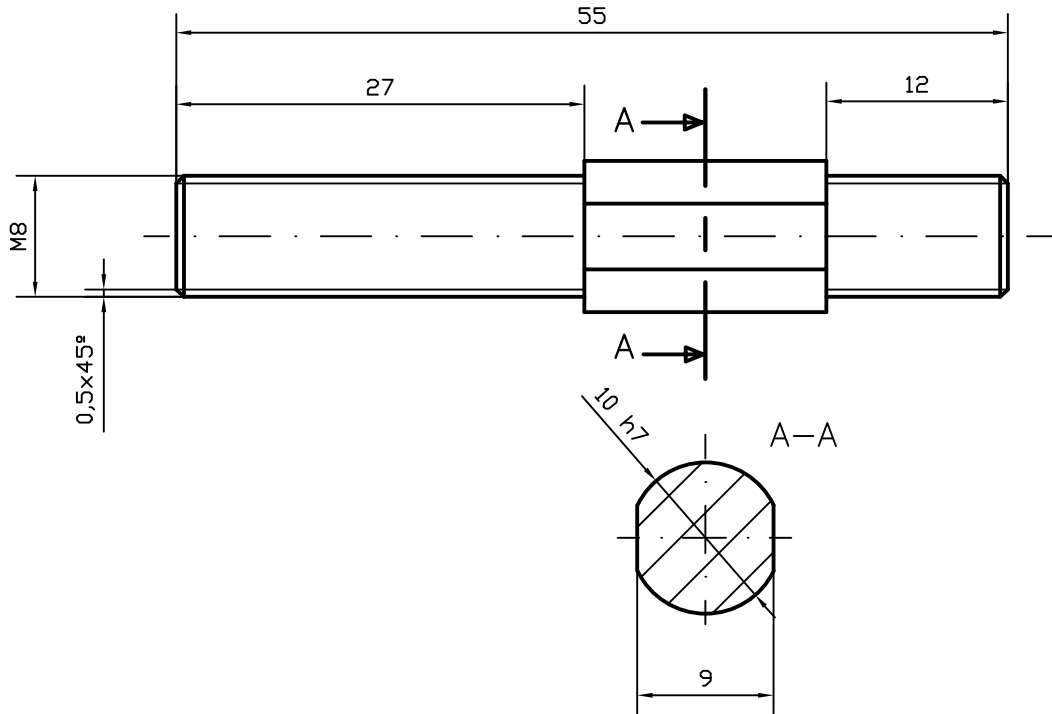
1	Apoyo	17		F-1140	366	366
Nº Piezas	Denominación y Observaciones	Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
					Peso	
	Fecha	Nombre	Firma	UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO		
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra				
Comprobado:						
Tol. gen.	Escala	APOYO			DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO Plano N°. 16 N° Planos.26	
	1/8					


18 N11 (N9)



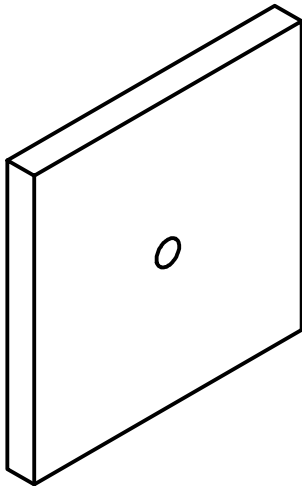
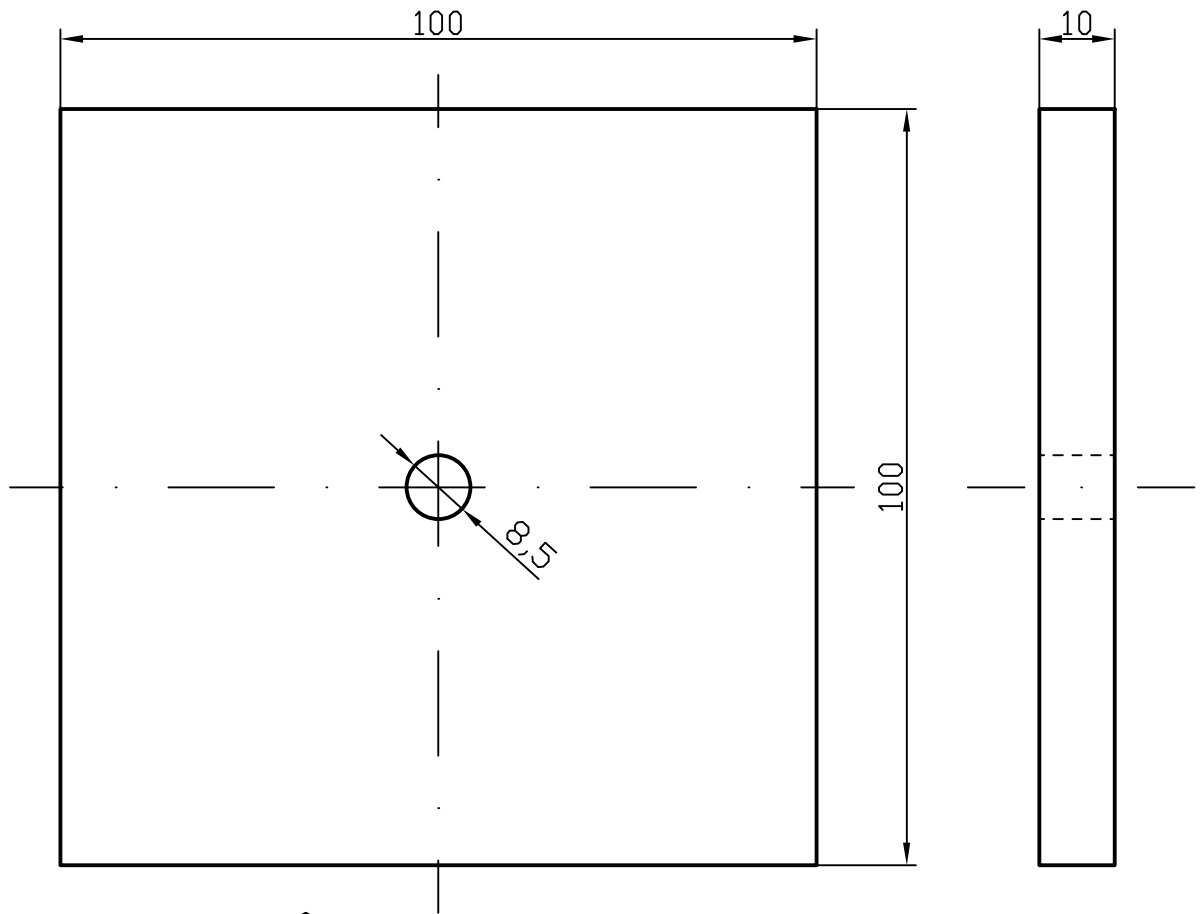
2	Brazo			18		F-1140	71,74	143,5
N° Piezas	Denominación y Observaciones			Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
							Peso	
	Fecha	Nombre	Firma	 UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO 				
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra						
Comprobado:								
	Escala	BRAZO			DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO Plano N°. 17 N° Planos. 26			
Tol. gen.								



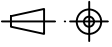
20 ∇ N9



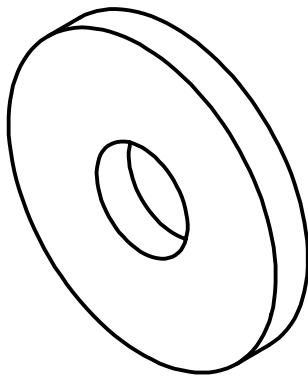
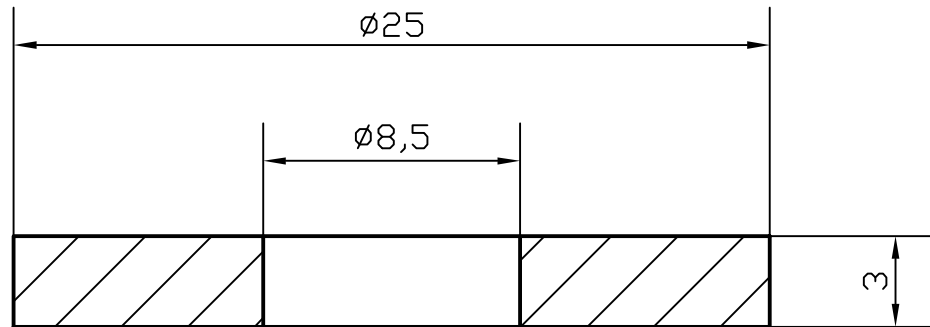
4	Espárrago		20		AI SI 440	0,025	0,1
N° Piezas	Denominación y Observaciones		Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
						Peso	
	Fecha	Nombre	Firma	 UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO 			
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra					
Comprobado:							
	Escala	ESPÁRRAGO		DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO Plano N°. 18 N° Planos. 26			
Tol. gen.	2/1						



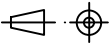
(21) N9



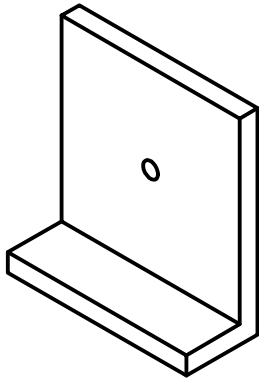
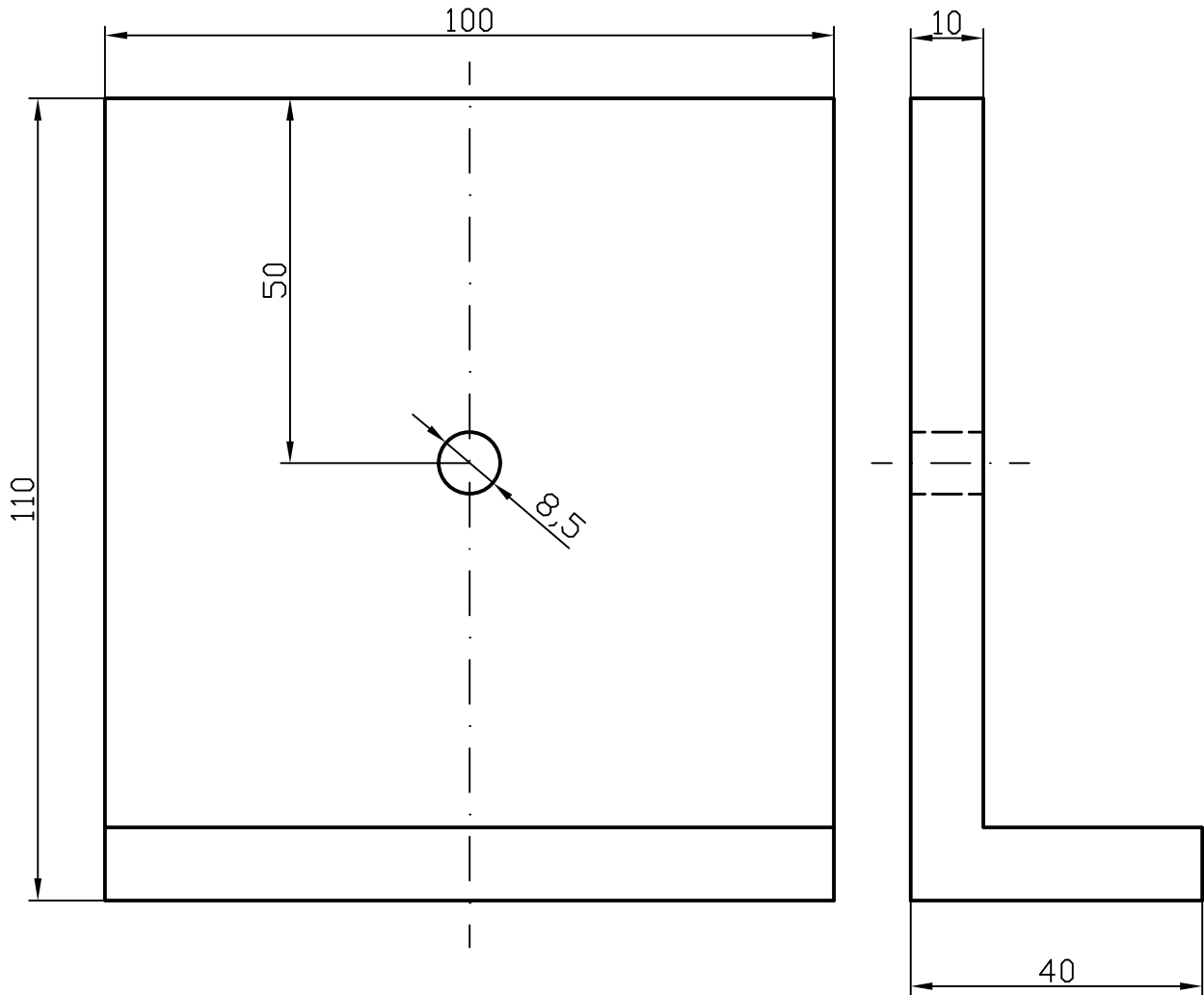
2	Pletina superior		21		F-1140	0,781	1,56
N° Piezas	Denominación y Observaciones		Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
						Peso	
	Fecha	Nombre	Firma	 UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO 			
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra					
Comprobado:							
 Tol. gen.	Escala 1/1	PLETINA SUPERIOR		DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO			
				Plano N°. 19			
				N° Planos. 26			



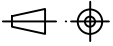
22 N9/



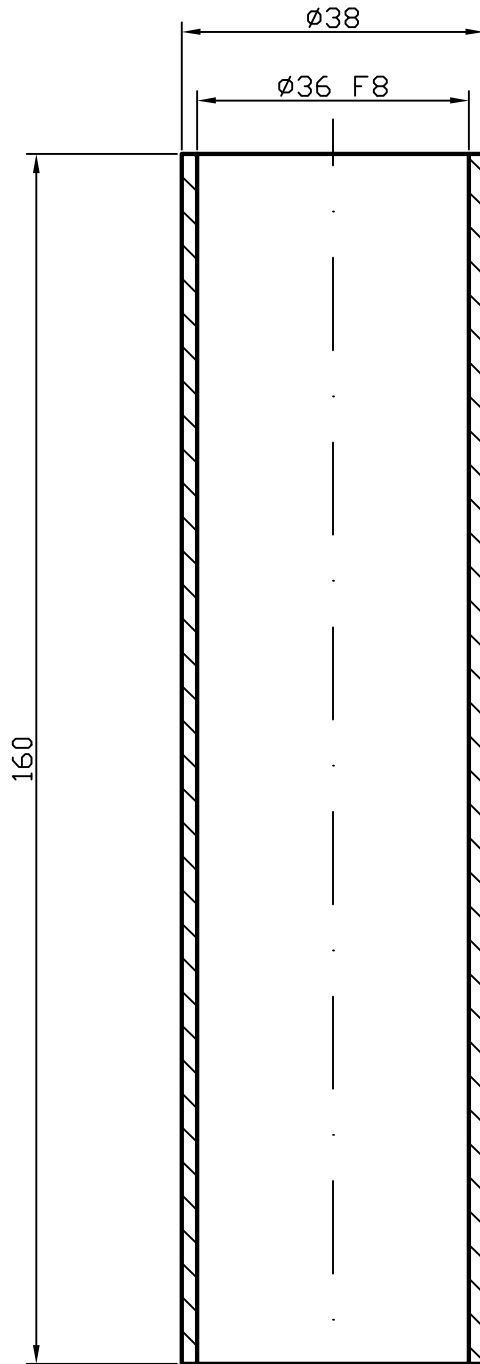
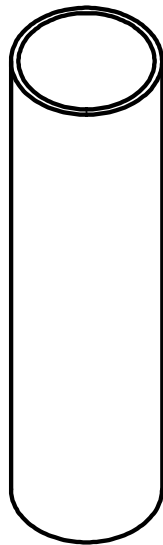
4	Pletina circular			22		F-1140	0,01	0,04
N° Piezas	Denominación y Observaciones			Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
							Peso	
	Fecha	Nombre	Firma	 UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO 				
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra						
Comprobado:								
 Tol. gen.	Escala 4/1	PLETINA CIRCULAR			DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO			
					Plano N°. 20			
					N° Planos. 26			



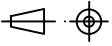
23 N9/



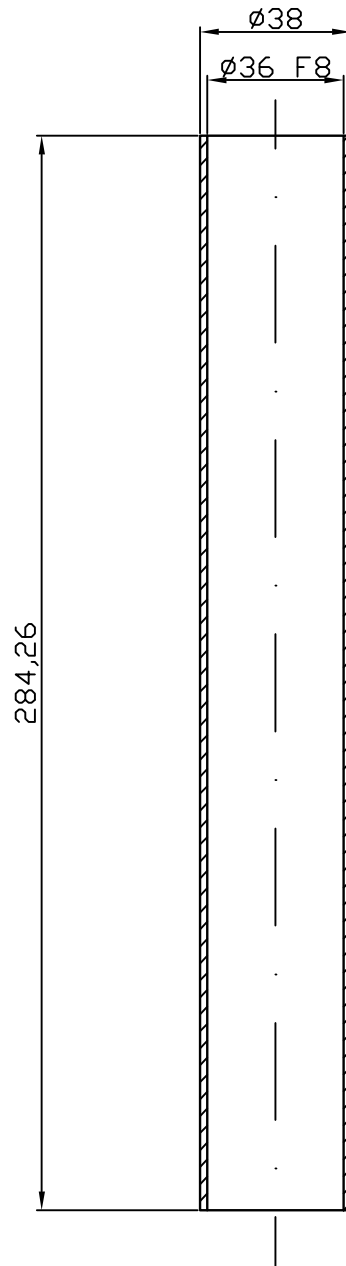
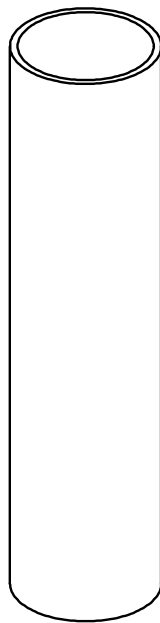
2	Pletina inferior			23		F-1140	1,1	2,2
Nº Piezas	Denominación y Observaciones			Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
							Peso	
	Fecha	Nombre	Firma	 UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO 				
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra						
Comprobado:								
	Escala	PLETINA INFERIOR			DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO Plano Nº. 21 Nº Planos. 26			
Tol. gen.	1/1							



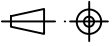
1'



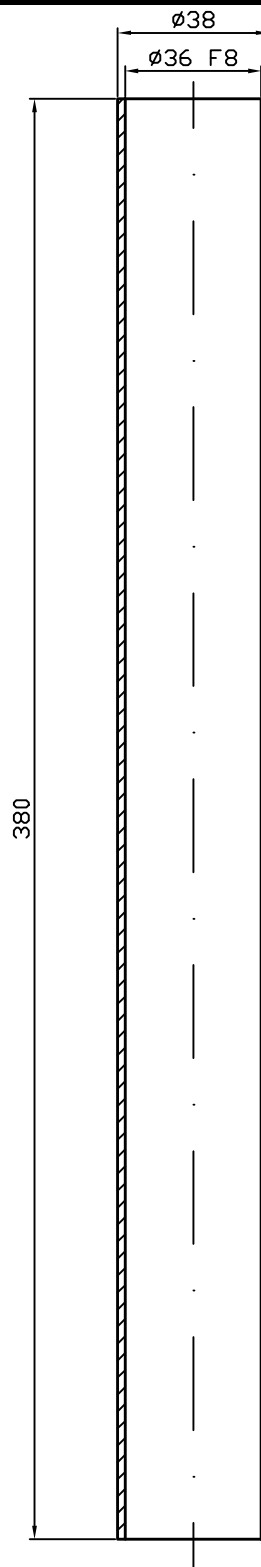
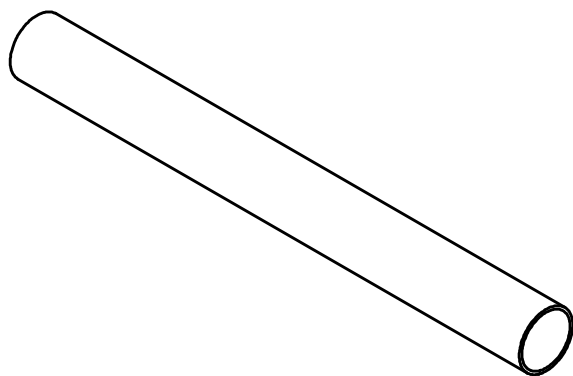
117	Tubo $\varnothing 38$ 160 mm		1'		Composite	0,3	35,1
N° Piezas	Denominación y Observaciones		Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
						Peso	
	Fecha	Nombre	Firma	 UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO 			
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra					
Comprobado:							
 Tol. gen.	Escala 1/1	TUBO $\varnothing 38$ 160mm		DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO			
				Plano N°. 22			
				N° Planos. 26			



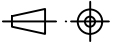
2'



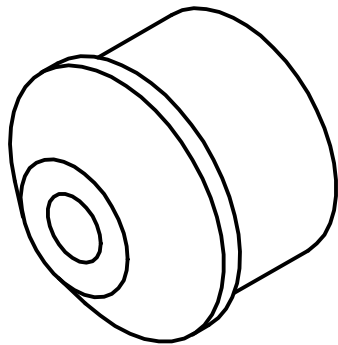
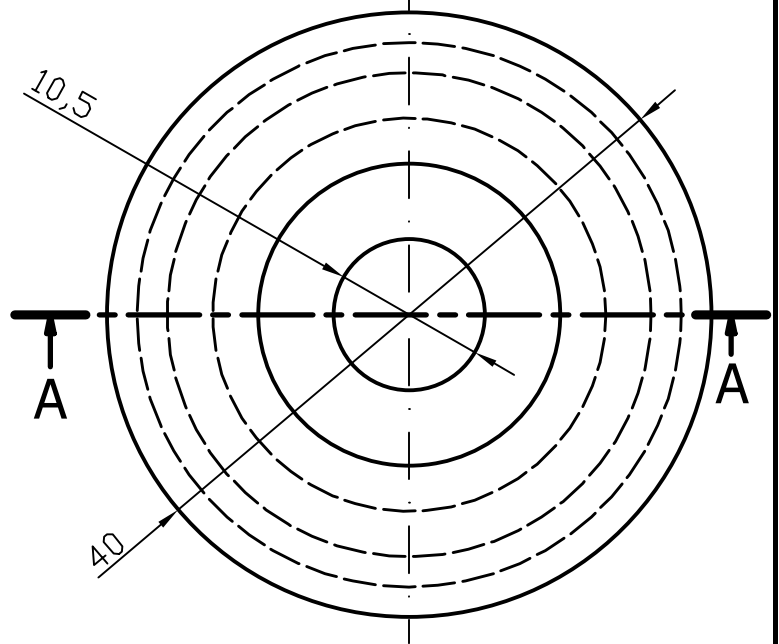
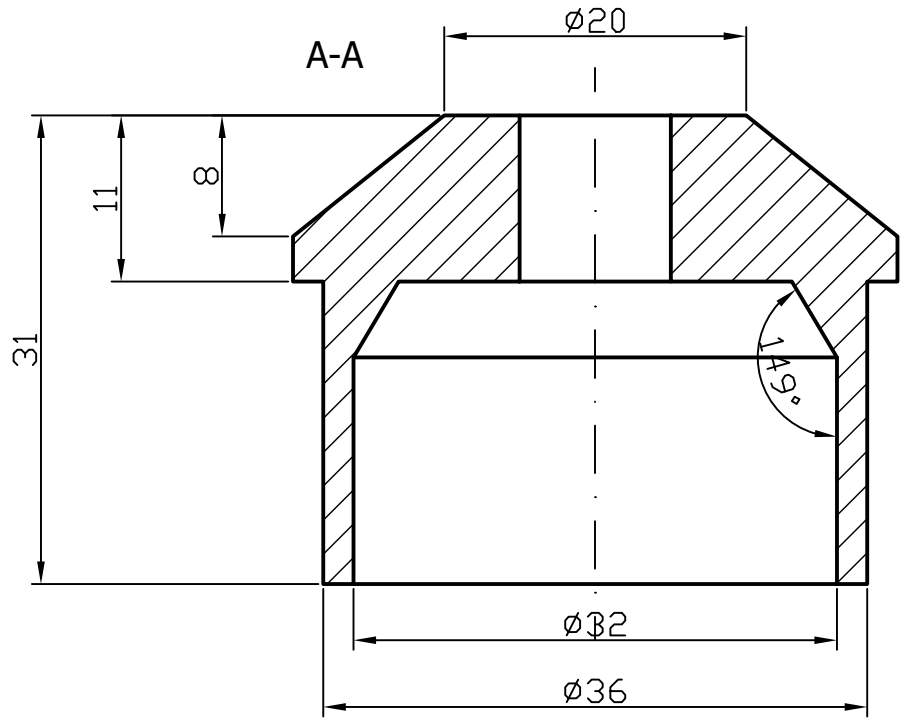
36	Tubo $\varnothing 38$ 284 mm		2'		Composite	0,051	1,84
N° Piezas	Denominación y Observaciones		Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
						Peso	
	Fecha	Nombre	Firma	 UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO 			
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra					
Comprobado:							
 Tol. gen.	Escala 1/2	TUBO $\varnothing 38$ 284mm		DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO			
				Plano N°. 23 N° Planos. 26			



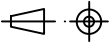
3'



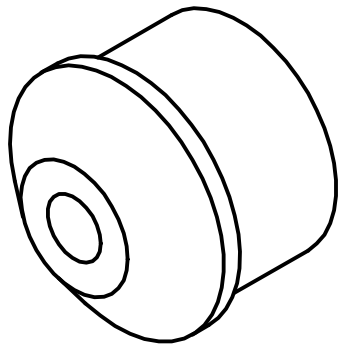
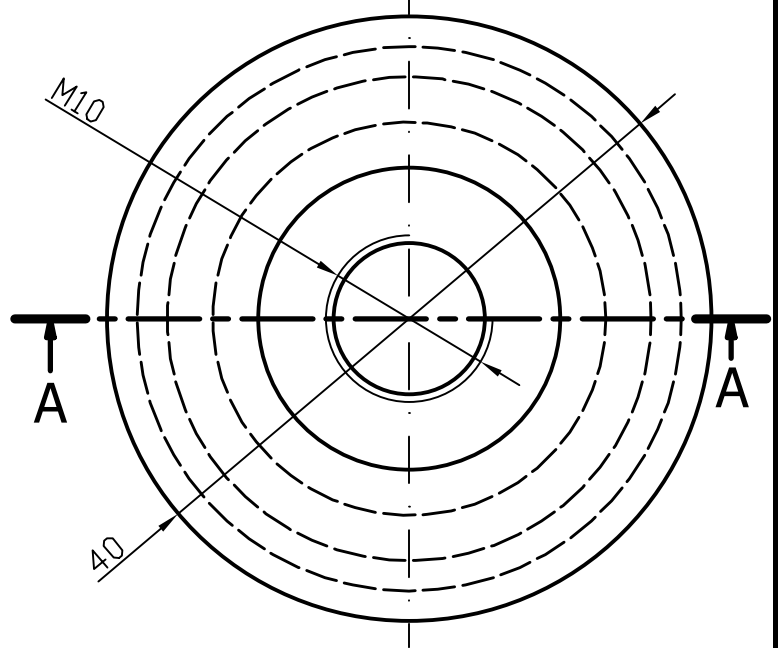
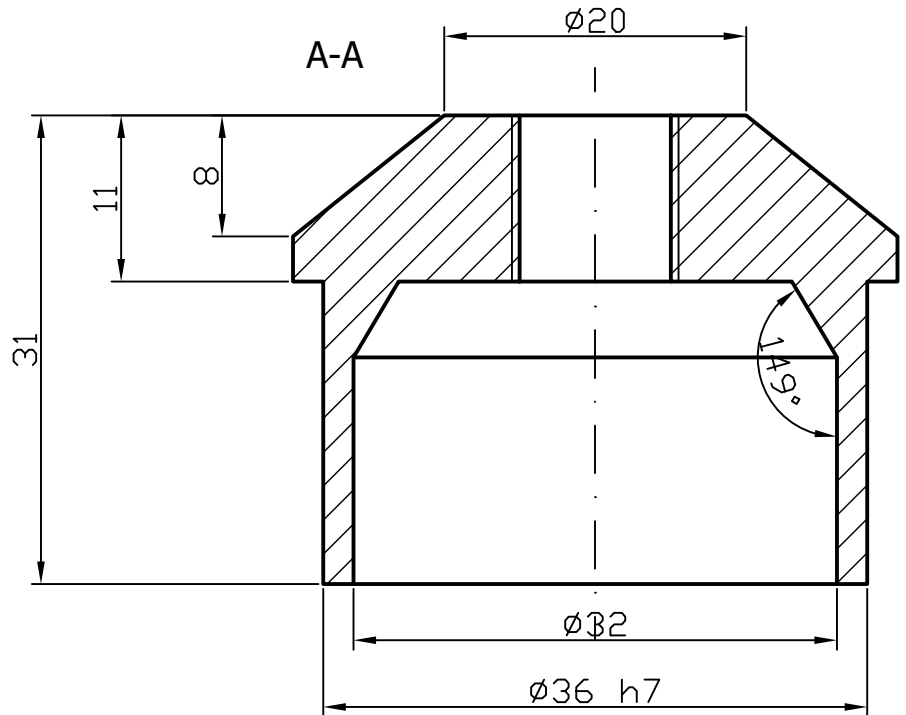
2	Tubo $\phi 38$ 380 mm		3'		Composite	0,068	0,14
N° Piezas	Denominación y Observaciones		Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
						Peso	
	Fecha	Nombre	Firma	 UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO 			
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra					
Comprobado:							
 Tol. gen.	Escala 1/2	TUBO $\phi 38$ 380mm		DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO			
				Plano N°. 24			
				N° Planos. 26			



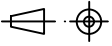
6' N9



117	Cono alargado		6'		6061-T6	0,037	4,34
Nº Piezas	Denominación y Observaciones		Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
						Peso	
	Fecha	Nombre	Firma	 UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO 			
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra					
Comprobado:							
	Escala	CONO ALARGADO		DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO Plano Nº. 25 Nº Planos. 26			
Tol. gen.	2/1						

7' N9/



193	Cono alargado roscado		7'	6061-T6	0,037	7,14	
Nº Piezas	Denominación y Observaciones		Marca	Norma Plano	Material	Unit.	Total
						Peso	
	Fecha	Nombre	Firma	 UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL. BILBAO 			
Dibujado:	10/07/19	Pablo Mazo Uyarra					
Comprobado:							
 Tol. gen.	Escala	CONO ROSCADO ALARGADO		DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA FLEXIBLE NODOS/BARRA PARA ENSAMBLAJE AERONÁUTICO			
	2/1			Plano Nº. 26			
				Nº Planos. 26			

ANEXO II

CATÁLOGOS DE ELEMENTOS COMERCIALES

- Actuador RA-38
- Tornillos DIN 933
- Tornillo DIN 912
- Tuercas DIN 934
- Perno esférico DIN 71803
- Junta universal RS PRO
- Tubos acero S235JR
- Tubos composite

Standard Configurations

Available strokes-BID	RA 38 1000			RA 38 2000				
Strokes (mm)	37	73	100	37	50	73	80	100
Min. Built-in Dimension (mm)	230	230	256	230	276	230	276	296

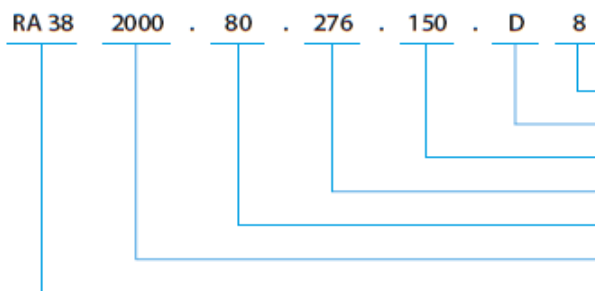
Standard Options

Min. Built-in Dimension	156mm + stroke
Cable Length	150, 500mm
Rear Mounting Hole	8.1 mm
Front Bracket	Standard (8.1 mm) or Clevis (10.1 mm)
Connector	Molex 39-01-2066
Color	Anodized black

Customizable upon request

- Stroke lengths
- Built-in dimensions
- Anodized colors
- Connectors
- Cable lengths
- Front/rear brackets

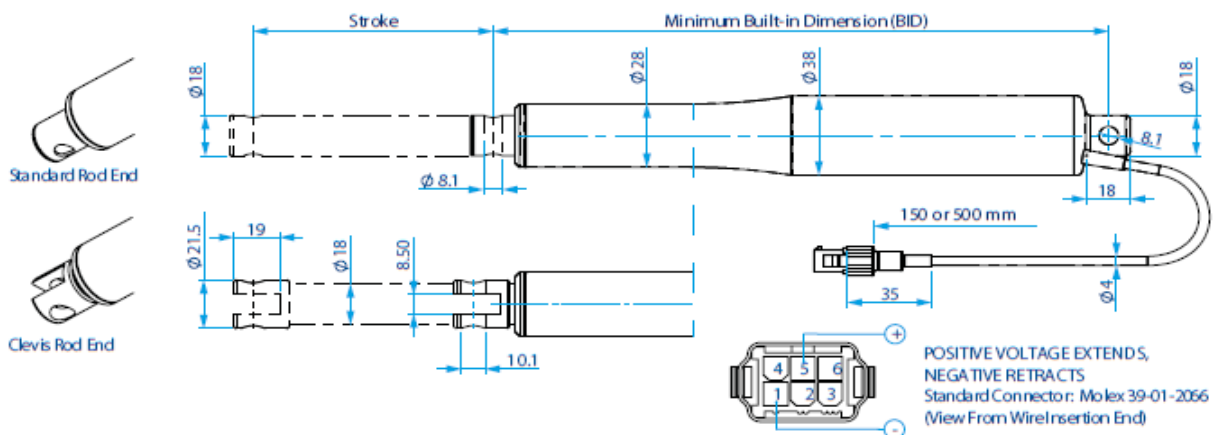
Ordering Example



- Front Assembly Hole Diameter (mm)
- Front Rod End (D=standard / H=clevis)
- Cable Length (mm)
- Min. Built-in Dimension (mm)
- Stroke Length
- Max. Load (N)
- Actuator Type

Please contact
info@regner.es
for customized
configurations.

Dimensions (mm)



Quality

Forging ahead to achieve high quality

• We apply high quality components, semi-automatic production and rigorous testing to verify and validate each motion control solution before leaving our premises. Our continuously audited management systems ensure optimized agile manufacturing. All these measures make for high quality products.

RA 38 Quality control

• Every single RA 38 goes through a strict quality control before leaving production in order to guarantee an optimum performance and durability.

Certifications

- ISO 9001 : 2008 *Quality management*
- ISO 14001 : 2004 *Environmental management system*
- ISO 13485 : 2012 *Medical devices*

Descripción del artículo/Imágenes del producto



Descripción

Material:

Acero.

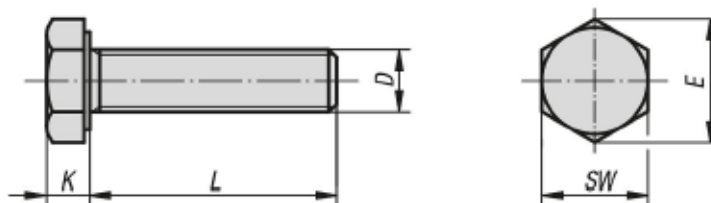
Versión:

Acero con clase de resistencia 8.8, negro o cincado mediante procedimiento galvánico.

Acero con clase de resistencia 10.9, negro o cincado mediante procedimiento galvánico.

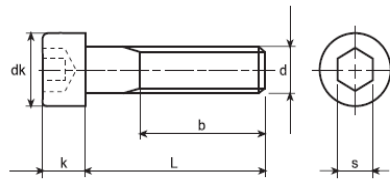
Acero con clase de resistencia 12.9, negro.

Planos



Nuestros productos

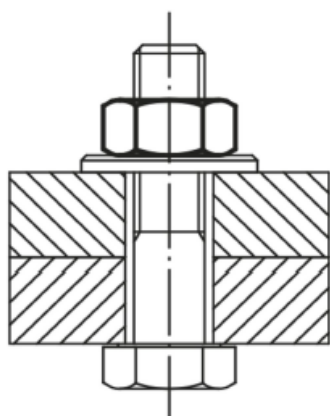
Referencia	Material	Color del cuerpo de base	Clase de resistencia	D	L	SW	E	K
07171-08X35	Acero	Negro	8.8	M8	35	13	14,38	5,3
07171-08X40	Acero	Negro	8.8	M8	40	13	14,38	5,3
07171-08X45	Acero	Negro	8.8	M8	45	13	14,38	5,3
07171-08X50	Acero	Negro	8.8	M8	50	13	14,38	5,3
07171-08X60	Acero	Negro	8.8	M8	60	13	14,38	5,3
07171-08X70	Acero	Negro	8.8	M8	70	13	14,38	5,3
07171-08X80	Acero	Negro	8.8	M8	80	13	14,38	5,3
07171-08X90	Acero	Negro	8.8	M8	90	13	14,38	5,3
07171-08X100	Acero	Negro	8.8	M8	100	13	14,38	5,3
07171-10X16	Acero	Negro	8.8	M10	16	17	18,9	6,4
07171-10X18	Acero	Negro	8.8	M10	18	17	18,9	6,4
07171-10X20	Acero	Negro	8.8	M10	20	17	18,9	6,4
07171-10X25	Acero	Negro	8.8	M10	25	17	18,9	6,4
07171-10X30	Acero	Negro	8.8	M10	30	17	18,9	6,4
07171-10X35	Acero	Negro	8.8	M10	35	17	18,9	6,4
07171-10X40	Acero	Negro	8.8	M10	40	17	18,9	6,4
07171-10X45	Acero	Negro	8.8	M10	45	17	18,9	6,4
07171-10X50	Acero	Negro	8.8	M10	50	17	18,9	6,4
07171-10X60	Acero	Negro	8.8	M10	60	17	18,9	6,4
07171-10X70	Acero	Negro	8.8	M10	70	17	18,9	6,4
07171-10X80	Acero	Negro	8.8	M10	80	17	18,9	6,4
07171-10X90	Acero	Negro	8.8	M10	90	17	18,9	6,4
07171-10X100	Acero	Negro	8.8	M10	100	17	18,9	6,4
07171-12X20	Acero	Negro	8.8	M12	20	19	21,1	7,5

DIN 912**Tornillos de cabeza cilíndrica con hueco hexagonal**

ISO 4762 EN

d	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M14	M16	M18
P	0,5	0,7	0,8	1	1,25	1,5	1,75	2	2	2,5
b	18	20	22	24	28	32	36	40	44	48
dk (max)	5,5	7	8,5	10	13	16	18	21	24	27
k (max)	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18
s	2,5	3	4	5	6	8	10	12	14	14
L	(5-30)	(6-40)	(9-50)	(10-60)	(12-80)	(16-100)	(20-120)	(25-140)	(25-160)	(30-160)
d	M20	M22	M24	M27	M30	M33	M36	M42	M48	M56
P	2,5	2,5	3	3	3,5	3,5	4	4,5	5	6,5
b	52	56	60	66	72	78	84	96	108	124
dk (max)	30	33	36	40	45	50	54	63	72	84
k (max)	20	22	24	27	30	33	36	42	48	56
s	17	17	19	19	22	24	27	32	36	41
L	(30-200)	(35-220)	(40-260)	(45-260)	(45-300)	(50-300)	(55-300)	(60-300)	(70-300)	(160-300)
	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8 ●	10.9 ●	12.9 ●	A2 ●	A4 ●

Descripción del artículo/Imágenes del producto



Descripción

Material:

Acero o acero inoxidable (A 2).

Versión:

Acero con clase de resistencia 8, acabado natural o cincado.
Acero con clase de resistencia 10, acabado natural o cincado.
Acero con clase de resistencia 12, acabado natural.
Acero inoxidable A 2-70, acabado natural.

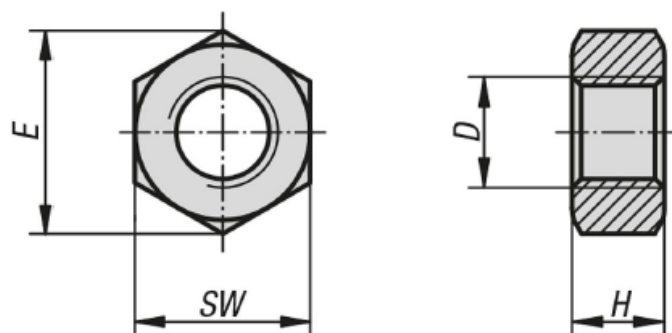
Indicación:

La clase de resistencia de la tuerca debe ser siempre igual o mayor que la clase de resistencia del tornillo. Es decir, a un tornillo con clase de resistencia 8.8 le corresponde una tuerca con clase de resistencia 8 (o superior, pero nunca inferior).

A petición:

Anchos de llave según DIN ISO 272.

Planos



Nuestros productos

Referencia	Material	Clase de resistencia	Superficie cuerpo de base	D	E	H	SW
07210-03	Acero	8	Acabado natural	M3	6,01	2,4	5,5
07210-04	Acero	8	Acabado natural	M4	7,66	3,2	7
07210-05	Acero	8	Acabado natural	M5	8,79	4	8
07210-06	Acero	8	Acabado natural	M6	11,05	5	10
07210-08	Acero	8	Acabado natural	M8	14,38	6,5	13
07210-10	Acero	8	Acabado natural	M10	18,9	8	17
07210-12	Acero	8	Acabado natural	M12	21,1	10	19
07210-14	Acero	8	Acabado natural	M14	23,9	11	22
07210-16	Acero	8	Acabado natural	M16	26,76	13	24
07210-20	Acero	8	Acabado natural	M20	32,95	16	30
07210-22	Acero	8	Acabado natural	M22	35	18	32
07210-24	Acero	8	Acabado natural	M24	39,6	19	36
07210-27	Acero	8	Acabado natural	M27	45,2	22	41

K0713**Pernos esféricos para articulaciones angulares DIN 71803**

Descripción del artículo/Imágenes del producto

**Descripción****Material:**

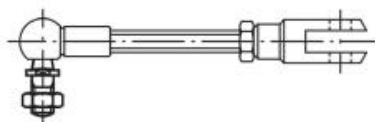
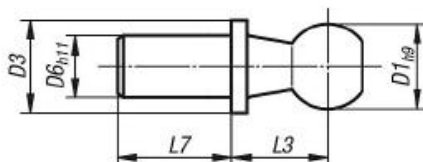
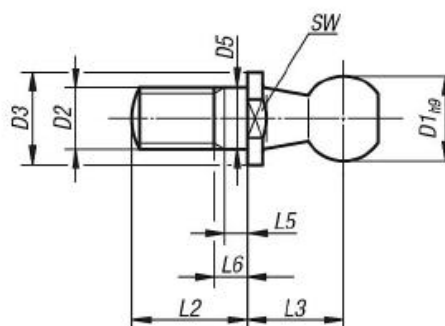
Acero.

Versión:

cincado y pasivado.

Indicación:

Los pernos esféricos son piezas de repuesto para articulaciones angulares DIN 71802.

**Planos**Forma B
con perno remachadoForma C
con vástago roscado y ancho de llave**Nuestros productos****Perno esférico para articulaciones angulares DIN 71803**

Referencia	Forma	Versión	D1	D2	D3	D5	D6	L2	L3	L5 mín.	L6 máx.	L7	SW
K0713.1308	C	-	13	M8	13	8	-	16,5	13	1,5	5,3	-	11
K0713.1610	C	-	16	M10	16	10	-	20	16	2,5	7,3	-	13
K0713.1612	C	-	16	M12	16	12	-	20	16	2,5	7,3	-	13
K0713.1914	C	-	19	M14x1,5	19	14	-	28	20	5	10,8	-	16



ENGLISH

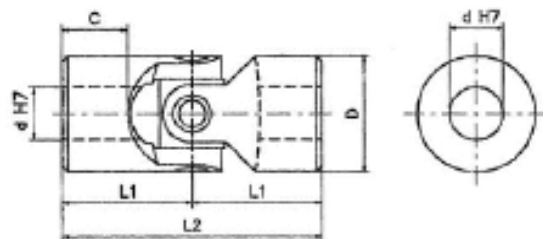
Product Datasheet

Single Universal Joint with Plain Bearing



UJSP Properties

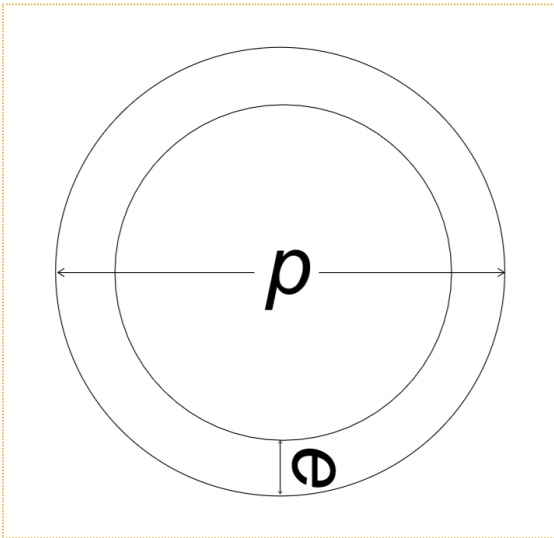
Maximum working angle	45 degrees
Maximum speed	1000 rpm
Maximum power	6 kW
Maximum torque	600 Nm



Dimensions in mm

RS Stock No	Manufacturers part No.	Bore d	Diameter	Overall length	Pivot centre	Hub length	Weight	Gaiter RS Stock No
		H7	D	L2	L1	C	KG	
7906699	UJSP16X6	6	16	34	17	8	0.05	7906832
7906693	UJSP16X8	8	16	40	20	11	0.05	7906832
7906703	UJSP22X10	10	22	48	24	12	0.1	7906839
7906706	UJSP25X12	12	25	56	28	13	0.1	7906848
7906700	UJSP28X14	14	28	60	30	14	0.2	7906841
7906719	UJSP32X16	16	32	68	34	16	0.3	7906845
7906712	UJSP36X18	18	36	74	37	17	0.45	7906854
7906716	UJSP42X20	20	42	82	41	18	0.6	7906857
7906725	UJSP45X22	22	45	95	47.5	22	0.95	7906851
7906728	UJSP50X25	25	50	108	54	26	1.2	7906860

NB : It is recommended that all plain bearings be used with a protective gaiter to assist lubrication and arrest the ingres of dirt.



Precio Barra de 6 metros:

14.67€

17.75€(IVA incluido)
 (*)Precio por metro 2.44€/mt.

✔ Producto disponible
 Salvo rotura de stocks.

Cantidad:

Añadir

MATERIAL CORTADO A MEDIDA

Puede especificar la cantidad y medidas que necesita y el sistema calculará las barras y el coste del corte (Cálculo basado en barras de 6mts y una pérdida por corte de 3mm).
 Para medidas superiores a 3000mm el coste del transporte sufre un incremento considerable. Los restos siempre se cortaran para no superar este límite.

Cantidad Longitud(mm)

+ Añadir línea

Cálculo

Para compras de grandes cantidades rogamos solicite presupuesto en el siguiente enlace:

Tubo redondo 40x2 mm.

Kilos: **1,94 kg/m.**

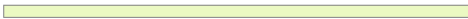
Longitud: **6000 mm.**

Sección en mm. 'p' Diametro: **40 mm.**

Sección en mm. 'e' Espesor: **2 mm.**

Acero:**S235JR**

Tubo redondo 40x2 mm.





Crosslite™ Carbon fibre tube 38/36 mm, L200 cm

Crosslite™ is a carbon fibre tube series, which is made of Pullwinding production technology. The material of the tubes is a mix of carbon fiber and epoxy resin.

Outer diameter of the tube is 38 mm and inner 36 mm. Delivery length of the tube is 200 cm and color of the tube is black (RAL 9011).

Application Ideas: Different support structures, measuring devices, telescopic poles, the camera's feet, tool handles, microphone legs, audio equipment pedestals."

Note! Carbon fibre conducts electricity.

Technical Specifications

SKU	40042282_200
Diameters (mm)	38/36 mm
Outer diameter (mm)	38
Wall thickness (mm)	01
Weight (kg)	0.3600
Weight (kg) / m	0.180
Stiffness (GPa)	180
Bending Strength (MPa)	600
Product shape	Round tube
Brand	CROSSLITE
Material	Carbon fibre, Epoxy
Structure	UCUCC
Colour	Black
Surface finish	Crosslite
Maximum length (mm)	2000

[▲ View Less](#)

Attachment Files

	Material safety data sheet	.pdf 	124.22 KB
	Tuotteiden työstöohje putket ja teleskoopit	.pdf 	258.13 KB
	Instructions for use and machining of tubes and telescopes	.pdf 	259.03 KB



ANEXO III

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

- Acero S235JR
- Acero AISI 304
- Acero AISI 316
- Acero F-1120 (AISI 1020)

ACERO ESTRUCTURAL

ACEROS EN PERFILES Y CHAPAS

Según Documento Básico SE-A Acero e Instrucción de acero estructural EAE

Denominación de los aceros

Designación	Grado			
	JR	J0	J2	K2
S235	S 235 JR	S 235 J0	S 235 J2	-
S275	S 275 JR	S 275 J0	S 275 J2	-
S355	S 355 JR	S 355 J0	S 355 J2	S 355 K2
S450	-	S 450 J2	-	-

NOTA:

Los aceros se designan con una S (steel, acero en inglés) seguida de un número que indica el valor mínimo especificado del límite elástico en MPa (1 MPa= 1 N/mm²), para el menor intervalo de espesor. El uso de los distintos grados del acero es el siguiente:

Grado JR: aplicación en construcción ordinaria

Grado J0: aplicación en construcción con altas exigencias de soldabilidad

Grado J2: aplicación en construcción con especiales exigencias de resistencia, resiliencia y soldabilidad

Características mecánicas

CTE DB SE-A (aceros en chapas y perfiles) Designación	espesor nominal t (mm)			
	Tensión de límite elástico f_y (N/mm ²)			Tensión de rotura f_u (N/mm ²)
	t ≤ 16	16 < t ≤ 40	40 < t ≤ 63	3 ≤ t ≤ 100
S235	235	225	215	360
S275	275	265	255	410
S355	355	345	335	470
S450	450	430	410	550

EAE (Aceros laminados en caliente) Designación	espesor t ≤ 40 mm		40 mm < espesor t ≤ 80 mm	
	Límite elástico	Tensión de rotura	Límite elástico	Tensión de rotura
	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)
S 235	235	360 < f_u < 510	215	360 < f_u < 510
S 275	275	430 < f_u < 580	255	410 < f_u < 560
S 355	355	490 < f_u < 680	335	470 < f_u < 630

Las siguientes son características comunes a todos los aceros:

Módulo de Elasticidad	Módulo de Rigidez	Coefficiente de Poisson	Coefficiente de dilatación térmica	Densidad
E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	ν	α (°C) ⁻¹	ρ (Kg/m ³)
210.000	81.000	0,3	1,2 · 10 ⁻⁵	7.850

TABLA DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ACERO INOXIDABLE

SERIE 300 -

Acero al Cromo Níquel

DESIGNACIÓN		TIPO ASTM (AISI)	301	302	303	304	304 L	321	
COMPOSICIÓN QUÍMICA			C% 0,15 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 16,0018,00 Ni% 6,008,00	C% 0,15 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 17,0019,00 Ni% 8,0010,00	C% 0,15 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 17,0019,00 Ni% 8,0010,00 S% 0,15 Min.	C% 0,08 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 18,0020,00 Ni% 8,0010,50	C% 0,030 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 18,0020,00 Ni% 8,0012,00	C% 0,08 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 17,0019,00 Ni% 9,0012,00 Ti% >5xC%0,07	
PROPIEDADES FÍSICAS	PESO ESPECÍFICO	(g/cm ³)	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	
	MÓDULO DE ELASTICIDAD	(N/mm ²)	193.000	193.000	193.000	193.000	193.000	193.000	
	ESTRUCTURA		AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	
	CALOR ESPECÍFICO A 20C	(J/Kg K)	500	500	500	500	500	500	
	CONDUCTIBILIDAD TÉRMICA (W/m K)								
		a 100 C	16	16	16	16	16	16	
		a 150 C	21	21	21	21	21	21,5	
COEFICIENTE DE DILATACIÓN TÉRMICO MEDIO (x 10 ⁶ C ⁻¹)									
		0100 C	16,92	17,28	17,3	17,30	17,30	16,74	
		0300 C	17,10	17,82	17,8	17,80	17,80	17,10	
		0500 C	18,18	18,36	18,4	18,40	18,40	18,54	
	0700 C	18,72	18,72	18,7	18,80	18,80	19,26		
INTERVALO DE FUSIÓN	(C)	13981420	13981420	13981420	13981454	13981454	13981427		
PROPIEDADES ELÉCTRICAS	PERMEABILIDAD TÉRMICA EN ESTADO SOLUBLE RECOCIDO		AMAGNÉTICO 1,02	AMAGNÉTICO 1,008	AMAGNÉTICO 1,008	AMAGNÉTICO 1,008	AMAGNÉTICO 1,008	AMAGNÉTICO 1,008	
	CAPACIDAD DE RESISTENCIA ELÉCTRICA A 20C	(μΩmm)	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	
PROPIEDADES MECÁNICAS A 20°	DUREZA BRINELL	RECOCIDO HB	135185	135185	130180	130150	125145	130185	
		CON DEFORMACIÓN EN FRÍO HB	210330	180330	180330	180330	-	-	
	DUREZA ROCKWELL	RECOCIDO HRB	7592	7090	7090	7088	7085	7088	
		CON DEFORMACIÓN EN FRÍO HRC	2541	1035	-	1035	-	-	
			1/4 DURO-DURO						
	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN CON DEFORMACIÓN EN FRÍO Rm(N/mm ²)	RECOCIDO	590750 8701200	560720 8801180	530700 -	500700 7001180	500680 -	520700 -	
			1/4 DURO-DURO						
	ELASTICIDAD CON DEFORMACIÓN EN FRÍO Rp (0.2)(N/mm ²)	RECOCIDO	215340 500900	205340 340900	205340 350900	195340 340900	175300 -	205340 -	
			1/4 DURO-DURO						
	RECOCIDO Rp(1) (N/mm ²) MÍNIMO		225	245	255	235	215	245	
ALARGAMIENTO 50mm. A(%)		8555 258	8050 5010	8050 -	8550 5010	8550 -	8040 -		
		1/4 DURO-DURO							
ESTRICCIÓN	RECOCIDO Z (%)	7060	7555	Min. 50	7560	7560	6550		
RESILIENCIA	KCUl (J/cm ²)	130	160	Min. 100	160	160	120		
	KVL (J/cm ²)	140	180	-	180	180	130		
PROPIEDADES MECÁNICAS EN CALIENTE	ELASTICIDAD DIFERENTES TEMPERATURAS	Rp(0.2) (N/mm ²)	a 300 C	-	-	-	125	115	150
			a 400 C	-	-	-	97	98	135
			a 500 C	-	-	-	93	88	120
	Rp(1) (N/mm ²)	a 300 C	-	-	-	147	137	186	
		a 400 C	-	-	-	127	117	161	
		a 500 C	-	-	-	107	108	152	
LÍMITE DE FLUENCIA	a 500 C	-	-	-	68	58,5	102		
	a 600 C	-	-	-	42	36	64		
	a 700 C	-	-	-	14,5	10,5	16,5		
	a 800 C	-	-	-	4,9	3,9	5,8		
	σ1 / 100.000/ t (N/mm ²) a 800 C								
TRATAMIENTOS TÉRMICOS	RECOCIDO COMPLETO	(8C)	ENFR. RÁPIDO	ENFR. RÁPIDO	ENFR. RÁPIDO	ENFR. RÁPIDO	ENFR. RÁPIDO	ENFR. RÁPIDO	
	RECOCIDO INDUSTRIAL	(I)	10081120	10081120	10081120	10081120	10081120	9531120	
	TEMPLE		NO COGE TEMPLE	NO COGE TEMPLE	NO COGE TEMPLE	NO COGE TEMPLE	NO COGE TEMPLE	NO COGE TEMPLE	
	INTERVALO DE FORJA	TEMPER. INICIAL TEMPER. FINAL	1200 925	1200 925	1200 925	1200 925	1200 925	1175 925	
TEMPERATURA FORMACIÓN CASCARILLA	SERVICIO CONTINUO	900	900	-	925	925	900		
	SERVICIO INTERMITENTE	810	810	815	840	840	810		
OTRAS PROPIEDADES	SOLDABILIDAD		MUY BUENA	MUY BUENA	NO ACONSEJABLE	MUY BUENA	MUY BUENA	BUENA	
	MAQUINABILIDAD COMPARADO CON UN ACERO BESSEMER PARA a. B1112		45%	45%	55%	45%	45%	36%	
	EMBUTICIÓN		BUENA	BUENA	REGULAR	MUY BUENA	MUY BUENA	BUENA	

AUSTENÍTICO							SERIE 400 - FERRÍTICO		
Acero al Cromo - Níquel - Molibdeno				Acero refractario			Acero al Cromo		
316	316 S	316 L	316 Ti	309	310	310 S	409	420	430
C% 0,08 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 16,0018,00 Ni% 10,0014,00 Mo% 2,02,50	C% 0,08 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 16,0018,00 Ni% 12,0014,00 Mo% 2,503,00	C% 0,03 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 16,0018,00 Ni% 10,0014,00 Mo% 2,002,50	C% 0,08 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 16,0018,00 Ni% 10,0014,00 Mo% 2,002,50 Ti5xC% 0,80	C% 0,20 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 22,0024,00 Ni% 12,0015,00	C% 0,25 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,50 Máx. Cr% 24,0026,00 Ni% 19,0022,00	C% 0,08 Máx. Mn% 2,00 Máx. Si% 1,50 Máx. Cr% 24,0026,00 Ni% 19,0022,00	C% 0,08 Máx. Mn% 1,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 10,511,75 Ti6xC% 0,75	C% 0,15 Min. Mn% 1,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 12-14	C% 0,10 Máx. Mn% 1,00 Máx. Si% 1,00 Máx. Cr% 16,0018,00
7,96	7,96	7,96	7,96	7,9	7,9	7,9	7,7	7,75	7,7
193.000	193.000	193.000	193.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000
AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	FERRÍTICO	MARTENSÍTICO	FERRÍTICO
500	500	500	500	500	500	500	460	460	460
16 21	16 21	16 21	16 21	12,5 17,5	12,5 17,5	12,5 17,5	- -	28 -	26 27
16,02 16,20 17,46 18,54	16,02 16,20 17,46 18,54	16,02 16,20 17,46 18,54	16,50 18,00 19,00 -	14,9 16,7 17,3 18, -	15,9 16,2 16,9 17,5	15,2 16,6 17,6 18,5	11,7 - - 13	10,2 10,8 11,7 12,2	10,4 11, - 11,4 11,9
13711398	13711398	13711398	1370	13981454	13981454	13981454	14271510	14541510	14271510
AMAGNÉTICO 1,008	AMAGNÉTICO 1,008	AMAGNÉTICO 1,008	AMAGNÉTICO 1,02	AMAGNÉTICO 1,008	AMAGNÉTICO 1,008	AMAGNÉTICO 1,008	FERRO- MAGNÉTICO	FERRO- MAGNÉTICO	FERRO- MAGNÉTICO
0,74	0,74	0,74	0,75	0,78	0,79	0,79	0,59	0,55	0,60
130185 -	130185 -	120170 -	130190 -	140185 -	145210 -	145210 -	120150 -	160190 520225 con tratamiento térmico	135180 180230
7085 -	7085 -	7085 -	7085 -	7085 -	7085 -	7085 -	6580 -	23 -	7588 -
540690 -	540690 -	520670 -	540690 -	540690 -	540690 -	520670 -	360420 -	67 84154 con tratamiento térmico	440590 610900
205410 -	205410 -	195370 -	215380 -	215370 -	215370 -	205370 -	205330 -	205330 -	250400 400860
245	245	235	255	265	265	255	235	235	275
6040 -	6040 -	6040 -	6040 -	5540 -	5540 -	6040 -	3025 -	3025 -	3022 202
7560	7560	7565	7560	7050	7050	7055	-	6055	7060
160 180	160 180	160 180	120 130	160 180	160 180	160 180	95 95	8070 6010	50 65
140 125 105	140 125 105	138 115 95	145 135 125	160 150 145	156 147 137	165 156 147	- - -	- - -	245 215 155
166 147 127	166 147 127	161 137 117	176 166 156	- - -	- - -	181 171 137	- - -	- - -	- - -
82 62 20 6,5	82 62 20 6,5	71 53 15,5 5	82 62 20 6,5	- 49 13,6 4,9	- 70,6 30 15,5	- 58,5 19,5 5	- - - -	- - - -	29,42 16,67 5,88 -
ENFR. RÁPIDO 10081120	ENFR. RÁPIDO 10081120	ENFR. RÁPIDO 10081120	ENFR. RÁPIDO 10201070	ENFR. RÁPIDO 10361120	ENFR. RÁPIDO 10361149	ENFR. RÁPIDO 10361149	ENFR. AL AIRE 885	ENFR. LENTO 843899	ENFR. AL AIRE 750815
NO COGE TEMPLE	NO COGE TEMPLE	NO COGE TEMPLE	NO COGE TEMPLE	NO COGE TEMPLE	NO COGE TEMPLE	NO COGE TEMPLE	NO COGE TEMPLE	9821030C Rev. 149371C	NO COGE TEMPLE
1200 925	1200 925	1200 925	1150 750	1175 980	1175 980	1175 980	1150 750	10931149C (retardar enfriamiento)	1060 650
925 840	925 840	925 840	925 840	1090 1000	1120 1035	1120 1030	800 850	648 809	840 890
MUY BUENA	MUY BUENA	MUY BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA UNIÓN FRÁGIL	BUENA UNIÓN FRÁGIL	BASTANTE BUENA UNIÓN FRÁGIL
45%	45%	45%	-	45%	45%	45%	50%	45%	55%
BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BASTANTE BUENA	MEDIOCRE	BASTANTE BUENA

Laminados en Caliente
Aceros bajo, medio y alto carbono - Placa
Especificación SAE 1020

Grado de Acero	Composición Química (% en peso)											Espesor		Requerimientos Físicos (Típicos)					
	C	Mn	P	S	Si	Cu	Cb	V	Ni	Cr	Mo	Pulg.	mm	Limite de Fluencia Min.		Resistencia a la Tensión Min.		Elongación % Min.	
	Máx.		Máx.	Máx.	Máx.									KSI	MPA	KSI	MPA	EN 8"	EN 2"
	SAE 1020	0.17 - 0.23	0.30 - 0.60	0.030	0.035	(*)	---	---	---	---	---	---	0.187 - 2.500	4.7 - 63.5	30	210	55	380	N/A
Prueba de Impacto CVN					Prueba de Dobleces					Dureza (RB)	Grados equivalentes: AISI 1020								
Espesor Pulg. (mm)	Temperatura de Prueba		Promedio Min. en 3 Probetas Ft-Lb (Joules)	Promedio Min. Individual Ft-Lb (Joules)	Espesor		Angulo												
	°F	°C			Pulg.	mm	Longit.	Transv.											
NO APLICA																			

Características:

Acero medio carbono bajo la norma SAE.

Por su contenido de carbono estos aceros se utilizan para la fabricación de piezas estructurales de mediana resistencia.

Observaciones:

Garantía; Solo se garantiza el análisis químico.

(*) Cuando el silicio (Si) es requerido, los siguientes rangos son los mas comúnmente usados:
 Si = 0.10 máximo Si = 0.10 - 0.20 % Si = 0.15 - 0.35 %

Propiedades y pruebas físicas (Típicas):

Los valores de propiedades físicas son típicas y no se garantizan solo sirven como referencia.

Algunes propietats de l'acer AISI 1020 són:

- DENSITAT → 7860 Kg / m³.
- MÒDUL YOUNG → 207 GPa.
- COEFICIENT DILATACIÓ → 11,7 °C⁻¹ · 10⁻⁶.
- CONDUCTIVITAT TÈRMICA → 52 W / m · °C.
- CALOR ESPECIFIC → 500 J / Kg · °K.
- MÒDUL TALLANT → 8 · 10⁹ N / m².
- RESISTÈNCIA FLUÈNCIA → 295 (MPa).
- COEFICIENT POISSON → 0,3.