



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE CARTELAS
PARA PÓRTICOS A ESCALA REDUCIDA
HECHOS MEDIANTE PIEZAS
ENSAMBLABLES**

Autor:

Arozamena Carretero, Jesús Alfonso

Tutor(es):

Magdaleno González, Álvaro

Lorenzana Ibán, Antolín

**Departamento de C.A., I.T., M.M.C.
y T. de Estructuras**

Valladolid, febrero y 2024.

Resumen

El presente Trabajo Fin de Grado abarca el proceso completo de desarrollo de elementos de unión en pórticos a dos aguas, denominados cartelas, que faciliten el montaje de éstos en una estructura industrial construida con materiales LEGO. Este proceso comienza por el diseño de las cartelas mediante CATIA v5, posteriormente se analiza el comportamiento de las cartelas y finaliza con la fabricación de todos los modelos.

El proyecto trata de ser una ayuda docente para los alumnos del Máster en Ingeniería Industrial, en la asignatura Ingeniería de la Construcción, en la cual simularán la construcción de una nave industrial a escala desde cero y donde estas cartelas facilitarán el montaje de los elementos

Palabras clave: LEGO, estructura a escala, cartela, CATIA, simulación.

Abstract

This Final Degree Project covers the complete process of connection elements' development in structural frames, named gussets, which will make easier the assembly of the frames in an industrial structure built with LEGO materials. This process begins with the design of the elements using CATIA v5, after that the behaviour of the elements is analysed and it ends with the manufacture of all the models.

The project tries to be a teaching help for the students of the Industrial Engineering's Master, in the subject Construction Engineering in which they will simulate the construction of a scale industrial building from scratch and where these gussets will facilitate the assembly of the elements.

Key words: LEGO, scale structure, gussets, CATIA, simulation.

Contenido

Capítulo 1. Introducción	9
1.1. Estructuras industriales, construcción a escala y uso educativo.....	9
1.2. Antecedentes	14
1.3. Objetivo del proyecto	16
1.4. Material y software utilizado	17
1.4.1. Elementos comerciales <i>LEGO</i>	17
1.4.2. Material de fabricación y utillaje de ensayo.....	18
1.4.3. Software de diseño, simulación y fabricación.....	20
Capítulo 2. Diseño de elementos	21
2.1. Metodología de diseño. Modelado paramétrico.....	21
2.1.1. Parámetros del diseño.....	23
2.1.2. Metodología de diseño	26
2.2. Discusión de dimensiones y ángulos. Evolución del diseño.....	34
2.3. Comparación del modelo a escala y real	45
Capítulo 3. Fabricación	49
3.1. Procesos de fabricación	49
3.1.1. Corte por láser	49
3.1.2. Fabricación aditiva	52
Capítulo 4. Prototipaje	57
Capítulo 5. Simulación y ensayo.	63
5.1. Simulación 3D con CATIA V5.....	63
5.1.2. Estudio de convergencia de malla	69
5.2. Ensayo mecánico	71
5.3. Resultados	73
Capítulo 6. Conclusiones	75
6.1. Conclusiones.....	75
6.2. Posibles mejoras y líneas futuras.....	75
6.3. Consideraciones adicionales	76
6.3.1. Planificación temporal del proyecto	76
6.3.2. Presupuesto del proyecto	78
Referencias.....	81
Anexos.....	83

Índice de figuras

Figura 1. Estructura industrial. [1]	9
Figura 2. Pórtico a dos aguas.....	9
Figura 3. Representación de cartela de unión entre viga y pilar [2]	10
Figura 4. Ejemplo de estructura y modelo de cálculo	11
Figura 5. Primeras piezas LEGO de madera.	12
Figura 6. Dimensiones de los elementos LEGO.....	12
Figura 7. Primeros elementos LEGO Technic lanzados en 1977. Grúa (1) y tractor (2).....	13
Figura 8. Fórmula química de los monómeros del ABS.	13
Figura 9. Composición del brick LEGO [5].....	14
Figura 10. Nave industrial hecha mediante piezas LEGO [6]	15
Figura 11. Estructura real con pórtico hastial con pilares intermedios y pórticos centrales acartelados.	15
Figura 12. Uniones entre elementos LEGO de la nave industrial [6].	16
Figura 13. Conjunto de piezas LEGO	18
Figura 14. Célula de carga TCA.315.R4.	19
Figura 15. Medidor láser CPO8MHT80.....	19
Figura 16. Tarjeta de adquisición de datos.....	20
Figura 17. Módulos de CATIA v5	21
Figura 18. Primer diseño de cartela LEGO	21
Figura 19. Comando "Formula"	22
Figura 20. Ventana de fórmulas	22
Figura 21. Comando para crear un nuevo parámetro.....	23
Figura 22. Tipos de parámetros.....	23
Figura 23. Distancia entre pilares	24
Figura 24. Longitud total del dintel.....	24
Figura 25. Tipo de agujero y diámetros.....	25
Figura 26. Desplegable "Tipo_cartela"	25
Figura 27. Código del parámetro "Tipo_cartela"	25
Figura 28. Fórmula para "Angulo_cartela_pilar_dintel"	26
Figura 29. Fórmula para "Angulo_cartela_dintel_dintel"	26
Figura 30. Referencia "Guía"	26
Figura 31. Sketch "BASE"	27
Figura 32. Comando "PAD"	27
Figura 33. Volumen "PAD"	28
Figura 34. Comando "Hole"	28
Figura 35. Posición del taladro central.....	29
Figura 36. Definición del taladro central.....	29
Figura 37. Aplicación del parámetro "Diam_agujero".....	29

Figura 38. Paleta "Patterns"	30
Figura 39. Definición "Pattern" en la primera dirección	30
Figura 40. Aplicación del parámetro "N_lado_corto".....	30
Figura 41. Función distancia entre agujeros	30
Figura 42. Definición "Pattern" en la segunda dirección.....	31
Figura 43. Definición "Pattern" en la tercera dirección	31
Figura 44. Aplicación del parámetro "Altura_cartela".....	32
Figura 45. Regla de existencia del agujero central	32
Figura 46. Cartela tipo "pilar_dintel".....	32
Figura 47. Cartela tipo "dintel_dintel".....	33
Figura 48. Cartela con diámetro modificado	33
Figura 49. Definición de unidad LEGO - "UL" en viga "liftarm"	34
Figura 50. Viga-pilar (1) y viga-dintel (2).....	35
Figura 51. Pórtico sin pilares intermedios.	35
Figura 52. Relación inicial de catetos del pórtico sin pilar intermedio.	36
Figura 53. Relación de catetos del pórtico con pilar intermedio.....	36
Figura 54. Relación de catetos en el primer vano del pórtico.	37
Figura 55. Relación de catetos en el segundo vano del pórtico.....	37
Figura 56. Pórtico generado en Studio 2.0	38
Figura 57. Unión de referencia	38
Figura 58. Desalineamiento de la unión en el hombro.....	39
Figura 59. Desalineamiento de la unión en la cumbrera.....	39
Figura 60. Croquis y distribución de ángulos del pórtico.	40
Figura 61. Módulo Assembly Design	41
Figura 62. Base del pórtico en CATIA v5	41
Figura 63. Pilar lateral (1), pilar intermedio (2) y pilar central (3) del pórtico en CATIA v5	42
Figura 64. Dintel del pórtico en CATIA v5	42
Figura 65. Unión de referencia en CATIA v5	43
Figura 66. Pórtico generado en CATIA v5	43
Figura 67. Desalineamientos del pórtico en CATIA v5	43
Figura 68. Distancias entre elementos en el hombro del pórtico	44
Figura 69. Distancias entre elementos en la cumbrera.....	44
Figura 70. Pórtico en CATIA v5 con cartelas.	45
Figura 71. Desfase entre elementos del pórtico con cartelas.....	45
Figura 72. Dimensiones minifigura LEGO	46
Figura 73. Cartela hombro real (1) y modelada (2)	46
Figura 74. Cartela cumbrera real (1) y modelada (2).....	47
Figura 75. Pórtico y minifigura LEGO	47
Figura 76. Elementos de actuación en el proceso de corte láser [9]	49
Figura 77. Cartela de metacrilato con fallo en zona superior derecha.....	50
Figura 78. Cartela de metacrilato con fallo en la zona superior derecha.....	50
Figura 79. Cartela de metacrilato con fallo en la zona inferior derecha.....	51

Figura 80. Cartela de hombro fabricada en aluminio.	51
Figura 81. Cartela cumbreira fabricada en aluminio.	51
Figura 82. Capas en impresión 3D [15]	52
Figura 83. Ultimaker Cura	52
Figura 84. Comando "Archivo" de Ultimaker Cura	52
Figura 85. Archivo .stl en software Cura.....	53
Figura 86. Menú para agregar impresora en Cura	53
Figura 87. Selección de material y ancho de boquilla en software Cura.....	54
Figura 88. Cartela de hombro mediante fabricación aditiva.	55
Figura 89. Cartela de cumbreira mediante fabricación aditiva.....	55
Figura 90. Cartelas de aluminio con aristas vivas y escoria.....	57
Figura 91. Avellanador utilizado para tratar las cartelas de aluminio.	57
Figura 92. Cartela de hombro con material residual en los taladros.....	58
Figura 93. Cartela de cumbreira con material residual en los taladros.	58
Figura 94. PIN empleado para eliminar material residual de la fabricación aditiva.	59
Figura 95. Pines de conexión en la cartela cumbreira.....	59
Figura 96. Cartela cumbreira montada.	59
Figura 97. Pines de conexión en la cartela del hombro.....	60
Figura 98. Conexión cartela-pilar (1) y conexión cartela-pilar-dintel (2).	60
Figura 99. Eje LEGO	60
Figura 100. Diseño de la cartela cumbreira con cruces.	61
Figura 101. Diseño de la cartela de hombro con cruces.	61
Figura 102. Dimensiones de las cruces LEGO.....	61
Figura 103. Cartela de hombro con cruces.....	62
Figura 104. Cartela de cumbreira con cruces.	62
Figura 105. Cartela con cruces ensamblada.....	62
Figura 106. Desplegable para arrancar el módulo de simulación "Generative Structural Analysis"	63
Figura 107. Pieza seleccionada y comando "Apply Material"	64
Figura 108. Selección del material a aplicar	64
Figura 109. Propiedades del PLA aplicadas en Catia v5	65
Figura 110. Opciones de análisis	65
Figura 111. Tamaño del mallado.....	65
Figura 112. Definición de las condiciones de contorno.....	66
Figura 113. Aplicación de cargas en la primera cara.....	66
Figura 114. Aplicación de cargas en la segunda cara	67
Figura 115. Comando Compute.....	67
Figura 116. Paleta "Image".....	67
Figura 117. Resultado de tensiones de Von Mises.....	68
Figura 118. Resultado de deformaciones.....	68
Figura 119. Resultado de desplazamientos	69
Figura 120. Segundo tamaño del mallado.....	69

Figura 121. Resultado de tensiones Von-Mises con el segundo mallado	70
Figura 122. Tercer tamaño del mallado.....	70
Figura 123. Resultado de tensiones Von Mises con el tercer mallado.....	70
Figura 124. Evolución de tensiones máximas en zona crítica.....	71
Figura 125. Disposición del equipo para el ensayo	72
Figura 126. Procedimiento del ensayo.....	72
Figura 127. Sección de fallo de la viga LEGO	73
Figura 128. Detalle de la sección de rotura de la viga LEGO	73

Índice de tablas

Tabla 1. Materiales LEGO utilizados	17
Tabla 2. Propiedades físicas del aluminio 6061 [7].....	18
Tabla 3. Propiedades del ácido poliláctico, PLA [13]	19
Tabla 4. Software empleado en el proyecto.....	20
Tabla 5. Parámetros de diseño	23
Tabla 6. Características de impresión	54
Tabla 7. Propiedades PLA.....	64
Tabla 8. Características de impresión del modelo ensayado	71
Tabla 9. Resultado de desplazamiento (mm) frente a momento (Nm).....	74
Tabla 10. Planificación temporal del proyecto.....	77
Tabla 11. Planificación temporal del proyecto, diagrama de Gantt	78
Tabla 12. Coste personal anual	78
Tabla 13. Coste imputable de personal del proyecto.....	79
Tabla 14. Coste materiales LEGO	79
Tabla 15. Coste total de fabricación en aluminio	80
Tabla 16. Coste total del proyecto	80

Capítulo 1. Introducción

1.1. Estructuras industriales, construcción a escala y uso educativo

Una estructura industrial (*Figura 1*) es un elemento fundamental en el mundo de la ingeniería y la construcción, principalmente en entornos industriales que requieren resistencia, durabilidad y eficiencia. Están diseñadas para soportar cargas pesadas y proporcionar un espacio funcional en su interior.



Figura 1. Estructura industrial. [1]

Un tipo común de estructura son los pórticos a dos aguas (*Figura 2*), caracterizados por su forma con cubierta inclinada con forma triangular. Este tipo de cubierta proporciona una gran resistencia contra cargas como el peso propio de la estructura, nieve o el viento. Además, el diseño a dos aguas permite evacuar el agua de lluvia y reducir la acumulación de elementos sobre la cubierta.

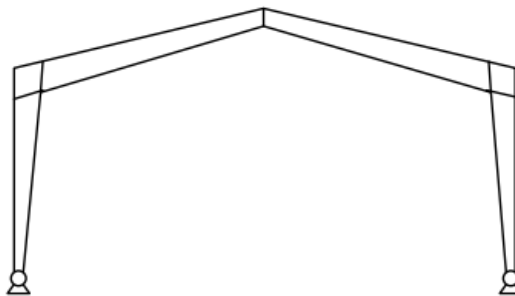


Figura 2. Pórtico a dos aguas.

Entre las distintas variedades de pórticos que se pueden montar en una nave industrial se diferencian dos tipos de elementos, el pórtico hastial y el pórtico intermedio. El pórtico hastial es el que se sitúa en los extremos de la estructura, con variedad de diseños en función de la cantidad de pilares que se incluyan. Este pórtico soportará fuerzas externas como el viento, por lo que es crucial para la resistencia y estabilidad de la estructura. Por otro lado, los pórticos intermedios son los que se sitúan en el interior de la estructura, dando soporte

a lo largo del cuerpo de ésta. La distribución de pórticos intermedios a lo largo de la estructura permitirá distribuir las cargas de manera eficiente y uniforme.

Los elementos estructurales que se encuentran en los extremos de los pilares de un pórtico se denominan cartelas (*Figura 3*). Son elementos de unión cuya función esencial es proporcionar estabilidad y soporte adicional a la estructura, contribuyendo además al diseño y estética de ésta.

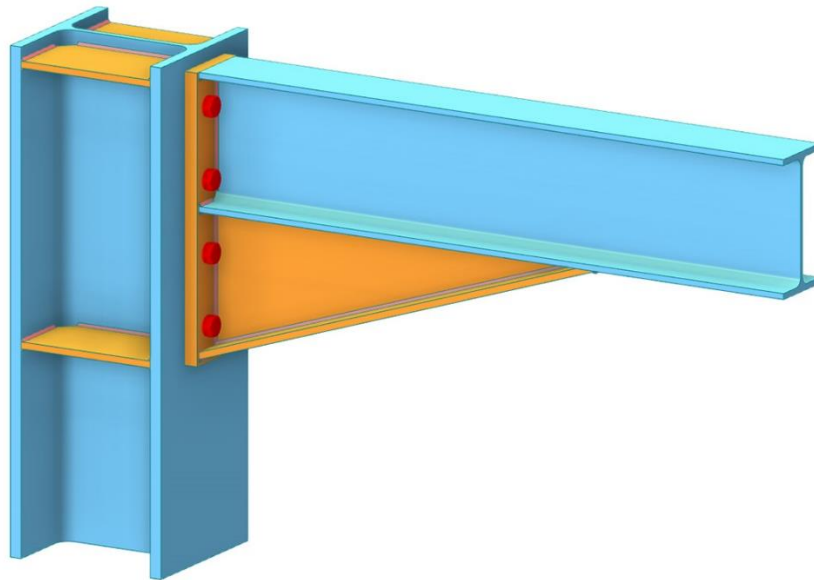


Figura 3. Representación de cartela de unión entre viga y pilar [2]

En el contexto específico de las cartelas, se pueden diferenciar las que se sitúan en el hombro del pórtico y en la cumbre. Las cartelas del hombro facilitan la unión del pilar con el dintel del pórtico, mientras que las cartelas de la cumbre fijarán el ángulo y unión entre dinteles.

En el mundo educativo, la creación a escala de este tipo de estructuras industriales se convierte en una herramienta muy útil, especialmente para estudiantes de ingeniería o estudios relacionados.

Para los estudiantes sirve como oportunidad para aplicar y visualizar todos los conceptos teóricos desarrollados en el aula como la resistencia y elasticidad de los materiales, la distribución de cargas y la estabilidad estructural (*Figura 4*).

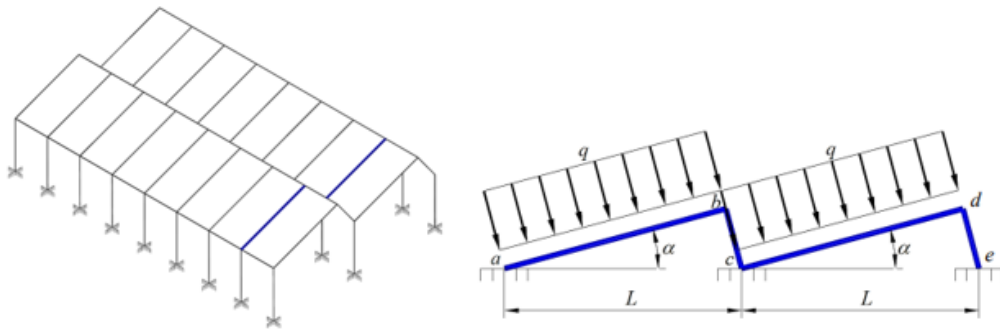


Figura 4. Ejemplo de estructura y modelo de cálculo

Con las estructuras a escala se permite a los estudiantes experimentar directamente cómo diferentes diseños o materiales pueden afectar al rendimiento y estabilidad de una estructura, mientras utilizan diferentes enfoques y pruebas sin el riesgo que genera una estructura a tamaño real. Esto fomenta la creatividad y que el alumno experimente, aprendiendo de los errores y perfeccionando las habilidades de diseño y resolución de problemas.

Además, promueve el trabajo en equipo ya que requiere la colaboración de varios estudiantes. Esto refleja la realidad del trabajo en la industria, donde la colaboración entre compañeros es esencial para el éxito del proyecto.

En definitiva, el estudio de estructuras a escala es una pieza clave para el diseño y la construcción de elementos industriales y la educación de futuros ingenieros, proporcionando una forma efectiva y práctica de comprender los principios de la ingeniería estructural.

Para la construcción de los elementos estructurales se decide utilizar las famosas piezas *LEGO*, concretamente los elementos de la gama *LEGO Technic*, por su versatilidad y facilidad de uso.

Desde su creación por Ole Kirk Christiansen en 1932, utilizando elementos de madera (*Figura 5*) hasta su posterior cambio al plástico en 1949, *LEGO* se ha convertido en una de las marcas más reconocidas y versátiles en todo el mundo. Sentando las bases del fenómeno global que es hoy con el lanzamiento de los *bricks* o bloques de conexión [3].



Figura 5. Primeras piezas LEGO de madera.

Durante los años, *LEGO* ha sido mucho más que un juguete, ha sido un impulsor de la imaginación, una herramienta educativa y una forma de expresar arte e innovación. Los *bricks* *LEGO* no solo han servido como juguete para niños, sino que también han inspirado a generaciones adultas. En la *figura 6* se muestran las dimensiones estandarizadas de estos elementos.

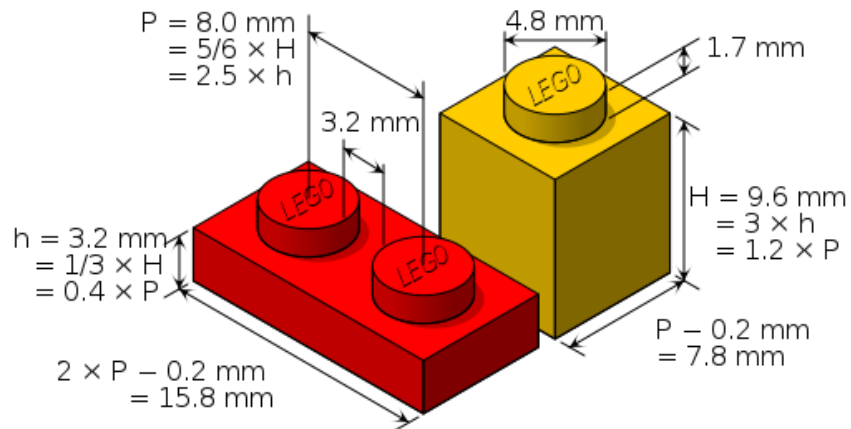


Figura 6. Dimensiones de los elementos LEGO

Una de las evoluciones más significativas de los elementos *LEGO* ha sido la introducción en 1977 de *LEGO Technic*. Esta gama *LEGO* lleva la construcción con estos elementos a un nivel completamente superior al incorporar elementos complejos como engranajes, ejes y motores, permitiendo crear modelos con funciones más técnicas [4].

Los primeros elementos *LEGO Technic* (*Figura 7*) fueron un montacargas, un tractor y una grúa de juguete para niños que buscaban una experiencia de construcción con *LEGO* más desafiante.



Figura 7. Primeros elementos LEGO Technic lanzados en 1977. Grúa (1) y tractor (2).

La evolución de esta gama de elementos ha ido aumentando, incluyendo su uso en el ámbito educativo, concretamente en este proyecto en la construcción de elementos industriales. Estos elementos tienen una resistencia interesante y asumible en la construcción de elementos industriales a escala. Las dos principales características que otorgan esta resistencia son su composición química y su forma [5].

Los elementos *LEGO Technic* están compuestos de ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), un polímero termoplástico compuesto por tres monómeros (Figura 8).

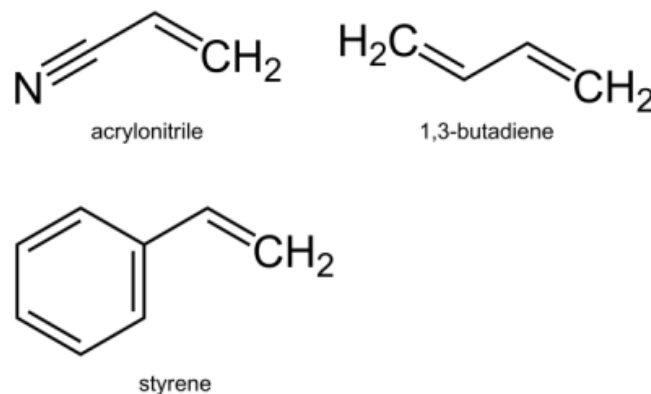


Figura 8. Fórmula química de los monómeros del ABS.


“El primer monómero, el acrilonitrilo, confiere resistencia a los *bricks* LEGO. El segundo, 1,3-butadieno, les da resistencia, es decir, evita que se rompan fácilmente. El tercero, estireno, les otorga una superficie dura y brillante. Para fabricar los elementos, LEGO adquiere gránulos de ABS prefabricados y los inyecta a gran escala”, según el análisis de la estructura química de estos materiales llevado a cabo por J.K.Monash [5].

Chemistry of **LEGO**

Injection-moulded into shapes
Granules of ABS mixed with a colouring agent are melted at 230°C then injected into moulds at extremely high pressure. After about seven seconds, the newly-formed Lego® pieces cool and fall onto a conveyor. Lego® bricks have been injection-moulded this way since 1947. Today, Lego® uses state-of-the-art NX CAD/CAM software to design the moulds to within 2 µm of precision. All Lego® bricks thus lock together perfectly.

'Melts' between 80 and 100°C
Amorphous polymers such as ABS have no definite melting point. Lego® bricks destabilise around 80°C and the "glass point" of ABS is around 105°C. Continued heating causes the brick to decompose, producing toxic CO and HCN gases.

Multicoloured!
Lego® bricks are coloured with thermoplastic colorants such as MACROLEX®. There are 25 different colorants available, many of them structurally similar to food dyes, and the chemists at Lego® mix them into 37 signature colour blends. The dye pictured is a perinone derivative called Red 179, and is used in red Lego® bricks. Most red dyes, including food dyes, are either perinones or azo dyes.




Acrylonitrile butadiene styrene
Lego® bricks are made from ABS, a thermoplastic polymer made from three different monomers:

Monomer 1: acrylonitrile (~25%)
Synthetic monomer produced from propylene and ammonia. Polar nitrile groups on acrylonitrile attract other chains and bind the chains together, which gives the Lego® bricks strength.

Monomer 2: 1,3-butadiene (~15%)
This petroleum hydrocarbon obtained from the C₄ fraction of steam cracking gives Lego® bricks resilience at low temperatures. 1,3-butadiene is also used in the production of synthetic rubber.

Monomer 3: styrene (~60%)
Styrene is made by dehydrogenating ethyl benzene (which, in turn, is made by reacting ethene with benzene). Delocalised electrons in the benzene ring give the Lego® brick a shiny, hard surface. Styrene is also used in the production of polystyrene.

Polymerisation reaction initiator
Potassium peroxydisulfate, K₂S₂O₈, initiates the polymerisation reaction.


July 2014

jameskennedyonash.wordpress.com


Twitter: @VCEasy


Figura 9. Composición del brick LEGO [5].

En resumen, la combinación del área de las estructuras industriales y *LEGO Technic* ofrece una perfecta plataforma para el aprendizaje práctico, esta integración permitirá a los estudiantes desarrollar habilidades críticas para la resolución de problemas.

1.2. Antecedentes

En 2023, el alumno del Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo de Producto de la Universidad de Valladolid, Javier Retortillo González, documentó como Trabajo Fin de Grado la realización de una práctica de *Lean-Construction* de una nave industrial utilizando piezas *LEGO*, desde el proceso de cimentación para las zapatas hasta el cerramiento completo de la estructura [6].

Este proyecto representa un logro significativo en la exploración de diseño y construcción mediante el popular sistema de ensamblaje, obteniendo como

resultado final una más que notable aproximación a una nave industrial real (Figura 10).



Figura 10. Nave industrial hecha mediante piezas LEGO [6]

El resultado final de la nave LEGO mostrado en la Figura 10, se puede definir como el modelo a escala de la estructura real de la Figura 11.



Figura 11. Estructura real con pórtico hastial con pilares intermedios y pórticos centrales acartelados.

En la Figura 11 se observa cómo el pórtico hastial tiene dos pilares intermedios, mientras que los pórticos centrales no tienen pilares intermedios y están acartelados.

Sin embargo, durante el desarrollo del proyecto, surgió una limitación que merece especial atención: la calidad y estética de las uniones entre algunos de los elementos, tal y como se muestra en la *Figura 12*.

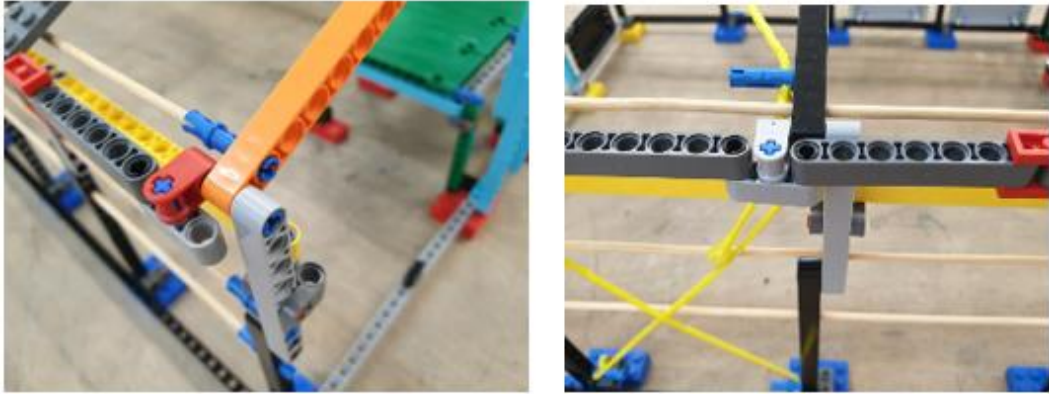


Figura 12. Uniones entre elementos LEGO de la nave industrial [6].

El enfoque en *Lean-Construction* promueve la optimización del proceso de construcción, pero la naturaleza estándar de las piezas *LEGO* a veces presenta estos desafíos estéticos. Estas uniones entre diferentes componentes pueden no reflejar completamente la estética deseada para un entorno industrial, lo que puede afectar a la percepción general del proyecto.

Es por ello, que este inconveniente plantea la oportunidad de innovar en la mejora de las uniones entre piezas *LEGO*, manteniendo los principios de optimización que son esenciales en el enfoque de *Lean-Construction*.

Al abordar soluciones innovadoras para mejorar la calidad y la estética de las uniones, se aspira a elevar el nivel de la aplicación de *Lean-Construction* a proyectos similares en el futuro, demostrando la viabilidad y la efectividad de este enfoque en la construcción industrial utilizando piezas *LEGO*.

En este contexto, surge el presente proyecto, con el objetivo de diseñar y desarrollar piezas de unión personalizadas que resuelvan este desafío específico.

1.3. Objetivo del proyecto

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño y fabricación de modelos de piezas no comerciales compatibles con elementos *LEGO*, que servirán como ayuda en la construcción de una nave industrial a escala reducida, concretamente las cartelas de la estructura.

Esta nave se utilizará para el análisis y puesta en práctica de los conocimientos de la asignatura en las prácticas del departamento de Construcciones

Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno y Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras.

La primera parte del proyecto está dedicada al diseño y discusión de la geometría de los elementos. Se utilizará el software de CATIA v5 para el modelado, los módulos *PartDesign*, *Assembly* y *Drafting* para el diseño y para la simulación posterior el módulo de *Generative Structural Analysis*.

La segunda parte se centrará en la fabricación de las piezas y su ensamblaje, así como los defectos que presentan cada uno de los tipos de fabricación planteados, fabricación aditiva definida mediante el software *UltiMaker Cura* y la impresora *Ultimaker S3*.

Por último, se mostrará una planificación temporal y un estudio económico estimado del proyecto completo.

1.4. Material y software utilizado

En este apartado se van a exponer todos los elementos utilizados en el proyecto, tanto materiales como software empleado.

1.4.1. Elementos comerciales LEGO

Para la construcción física de la estructura se han utilizado distintos tipos de piezas LEGO. A continuación, se muestra la cantidad de cada uno de los tipos de piezas que se ha utilizado (*Tabla 1*), así como una imagen con todos los elementos (*Figura 13*).

MATERIALES LEGO		
Modelo	Color	Cantidad
Pin 2780	Black	9
Pin 6558	Blue	9
Pin 32062	Red	2
Brick 3700	<i>Light Bluish Gray</i>	3
Brick 3894	<i>Red</i>	2
Plate 3023	<i>Red</i>	3
Plate 4282	<i>Black</i>	4
Technic 32017	<i>Yellow</i>	6
Technic 32124	<i>Black</i>	6
Technic 32124	<i>Reddish Brown</i>	2
Technic 32278	<i>Black</i>	5
Technic 32525	<i>Dark Bluish Gray</i>	2
Technic 32316	<i>Red</i>	2
Technic 41239	<i>Dark Azure</i>	5
Technic 99773	<i>Light Bluish Gray</i>	4

Tabla 1. Materiales LEGO utilizados

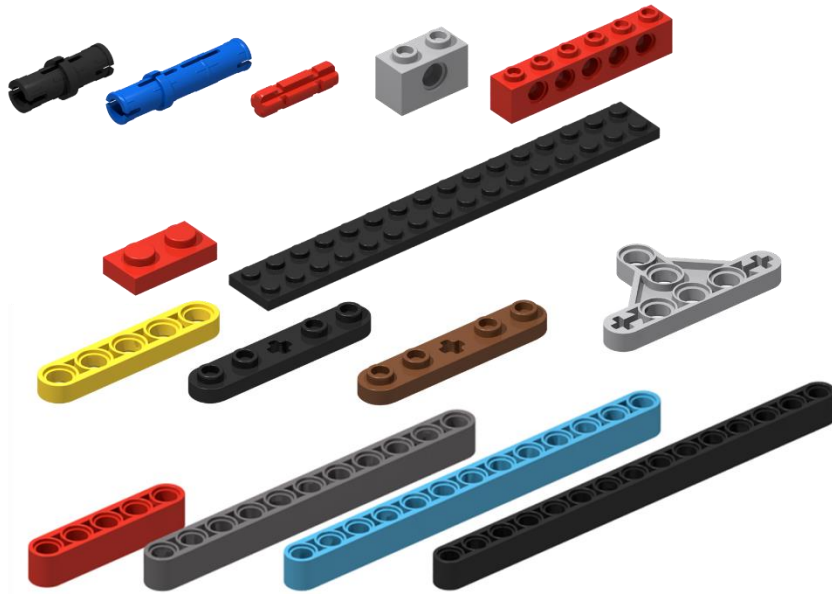


Figura 13. Conjunto de piezas LEGO

1.4.2. Material de fabricación y utillaje de ensayo

1.4.2.1. Aluminio

Para la fabricación por corte láser se ha empleado aluminio 6061 T6-T651 debido a que este aluminio se puede mecanizar fácilmente y tienen un bajo coste de materia prima.

En la *Tabla 2* se muestran sus principales propiedades.

PROPIEDAD	VALOR
Módulo de Young	$6,9 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
Aleantes	Mg y Si
Densidad	2700 kg/m^3
Temperatura fusión	582°C
Límite elástico	$2,7 \times 10^8 \text{ N/m}^2$

Tabla 2. Propiedades físicas del aluminio 6061 [7]

1.4.2.2. Ácido poliláctico, PLA

Para la fabricación aditiva se ha empleado ácido poliláctico (PLA) en forma de filamento. El PLA es un polímero biodegradable y termoplástico que se puede obtener mediante recursos naturales renovables.

En la *Tabla 3* se muestran sus propiedades físicas.

PROPIEDAD	VALOR
Módulo de Young	$3,2 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
Coefficiente de Poisson	0,331
Densidad	1240 kg/m^3
Expansión térmica	$6,84 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{K}$
Límite elástico	$6 \times 10^7 \text{ N/m}^2$

Tabla 3. Propiedades del ácido poliláctico, PLA [13]

1.4.2.3. Utillaje y elementos de ensayo

- Célula de carga **TCA.315.R4** (Figura 14). Este dispositivo está diseñado para medir la fuerza que se ejerce sobre ella, en los [Anexos](#) están especificadas sus características.



Figura 14. Célula de carga TCA.315.R4.

- Medidor láser **CP08MHT80** (Figura 15). Con este dispositivo se medirá la variación del desplazamiento que sufrirán los elementos sometidos a ensayo.



Figura 15. Medidor láser CP08MHT80

- Elemento de adquisición de datos **SIRIUS HD-SGT** (Figura 16). Con este elemento se trasladará toda la información recopilada por los anteriores elementos durante el ensayo. El propio fabricante facilita el software con el que se registran los datos recopilados, de forma que la información queda reflejada rápidamente. Para obtener un manual completo y detallado de su funcionamiento se puede visitar la web del fabricante.



Figura 16. Tarjeta de adquisición de datos

1.4.3. Software de diseño, simulación y fabricación

En la *Tabla 4* se muestra el software que ha sido utilizado para el diseño, simulación y fabricación.

SOFTWARE	
Diseño	
CATIA v5	
	<i>PartDesign</i>
	<i>AssemblyDesign</i>
LEGO Studio 2.0	
Fabricación	
UltimakerCURA	
Simulación	
CATIA v5	
	<i>GenerativeStructuralAnalysis</i>

Tabla 4. Software empleado en el proyecto

Capítulo 2. Diseño de elementos

2.1. Metodología de diseño. Modelado paramétrico

En este apartado se realizará una descripción detallada de la metodología utilizada en el diseño y desarrollo de las soluciones personalizadas para crear las uniones entre los elementos de la nave industrial construida con piezas *LEGO*.

Para el modelado de las piezas, se ha optado por utilizar el software *CATIA v5* debido a su versatilidad y capacidades avanzadas de diseño. Este software proporciona las herramientas necesarias para llevar a cabo el proceso de diseño de manera eficiente y precisa.

Para comenzar el diseño, se ha hecho uso del módulo específico de modelado 3D de *CATIA v5*: *PartDesign* (Figura 17).

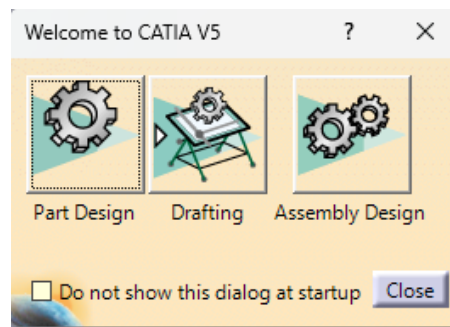


Figura 17. Módulos de *CATIA v5*

A continuación, se muestra el primer modelo generado por el departamento utilizando *CATIA v5*. Este modelo inicial fue diseñado con detalles inspirados en las piezas *LEGO*, los cuales posteriormente se eliminarían para lograr una solución más integrada y personalizada.

El modelo se centra en un solo taladro, acompañado de las cruces *LEGO* típicas (Figura 18).

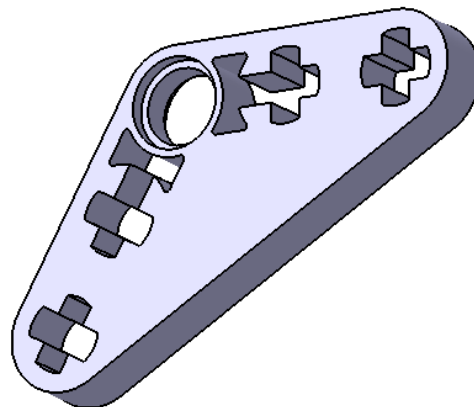


Figura 18. Primer diseño de cartela *LEGO*

Estas características iniciales reflejan la familiaridad con el sistema de *LEGO*, sin embargo, se identificó la necesidad de desarrollar una solución más específica y adaptada a los requisitos estéticos y funcionales de la nave industrial.

Con el objetivo de optimizar el diseño y facilitar su aplicación tanto en cartelas de hombro como en cartelas cumbreiras, se decide implementar una parametrización de forma previa al diseño. Esta medida permite la modificación del modelo según las medidas específicas requeridas para cada aplicación.

Para crear cada uno de los parámetros, se utilizará el comando *Formula* de la paleta *Knowledge* (Figura 19).



Figura 19. Comando "Formula"

Al abrir el comando saldrá una ventana (Figura 20), para crear uno a uno todos los parámetros se debe detallar el tipo de parámetro, si es de valor único o múltiple y pulsar *New Parameter of type* (Figura 21).

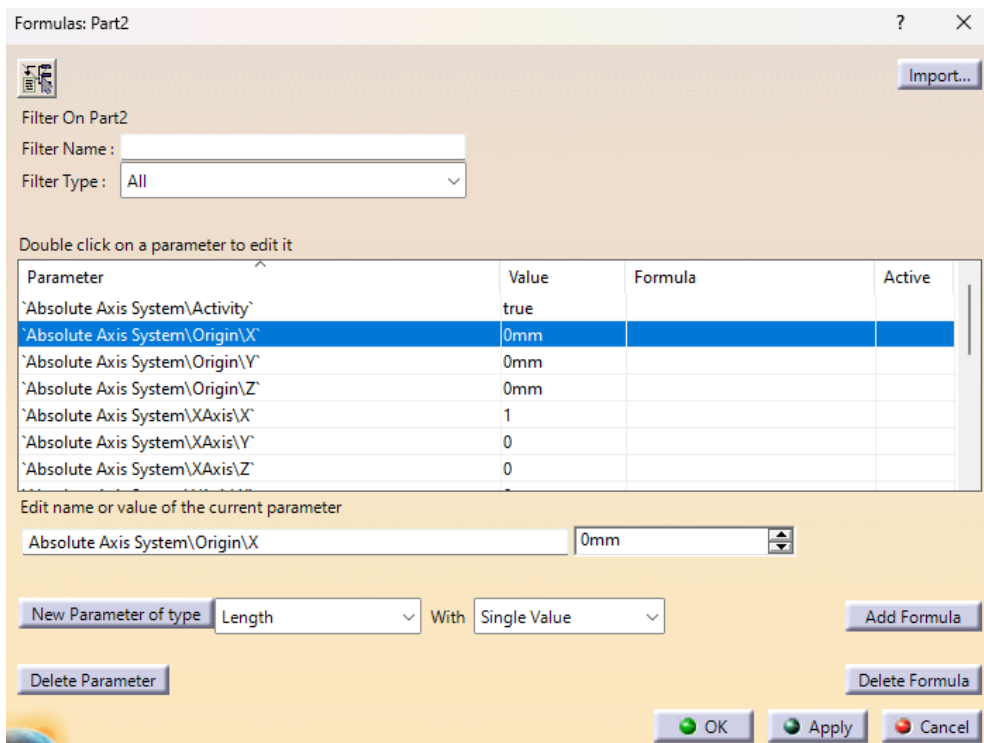


Figura 20. Ventana de fórmulas

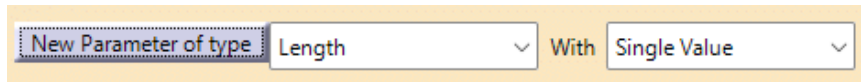


Figura 21. Comando para crear un nuevo parámetro

Se añaden uno a uno todos los parámetros necesarios, en este diseño todos los parámetros utilizados han sido del tipo *Length* o del tipo *Angle* (Figura 22).

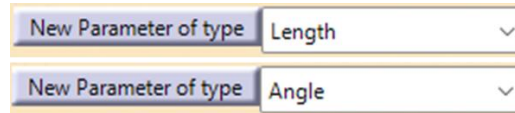


Figura 22. Tipos de parámetros

2.1.1. Parámetros del diseño

En la *Tabla 5* se detalla una lista con cada uno de los parámetros utilizados y posteriormente cómo se ha definido cada uno de ellos.

Parámetros	<i>Tipo_cartela</i>
	<i>Dist_pilares_estructura</i>
	<i>Long_dintel</i>
	<i>Diam_agujero</i>
	<i>N_lado_corto</i>
	<i>Lado_cartela</i>
	<i>Espesor</i>
	<i>Angulo_cartela_pilar_dintel</i>
	<i>Angulo_cartela_dintel_dintel</i>
	<i>h</i>
	<i>Altura_cartela</i>
	<i>Angulo_cartela</i>

Tabla 5. Parámetros de diseño

Los parámetros utilizados pueden ser independientes y configurados manualmente o, dependientes de otros parámetros modificando su valor de forma automática en función de éstos.

Aquellos que se van a configurar manualmente en función de las medidas del pórtico son los siguientes:

- Distancia entre los pilares del pórtico ("*Dist_pilares_estructura*"). En la *Figura 23* se indica la distancia referida.

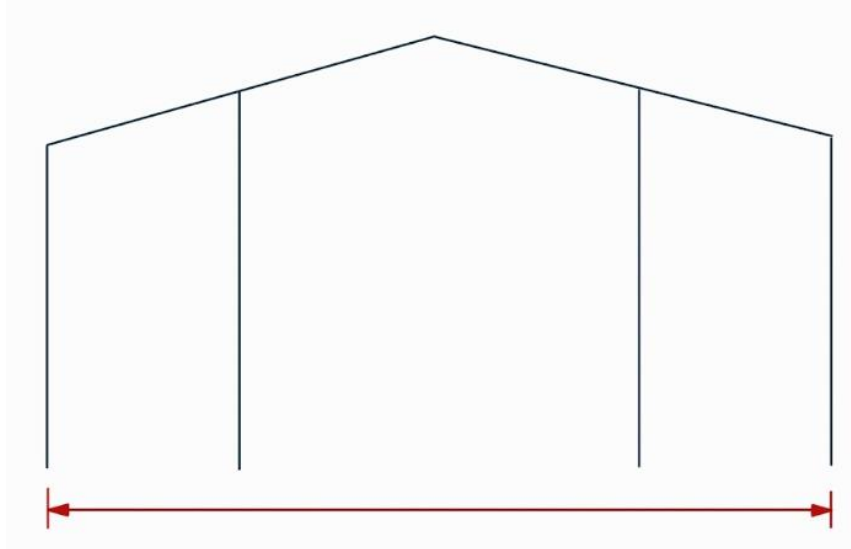


Figura 23. Distancia entre pilares

- Longitud total del dintel (“*Long_dintel*”). En la *Figura 24* se indica la longitud a la que hace referencia el parámetro.

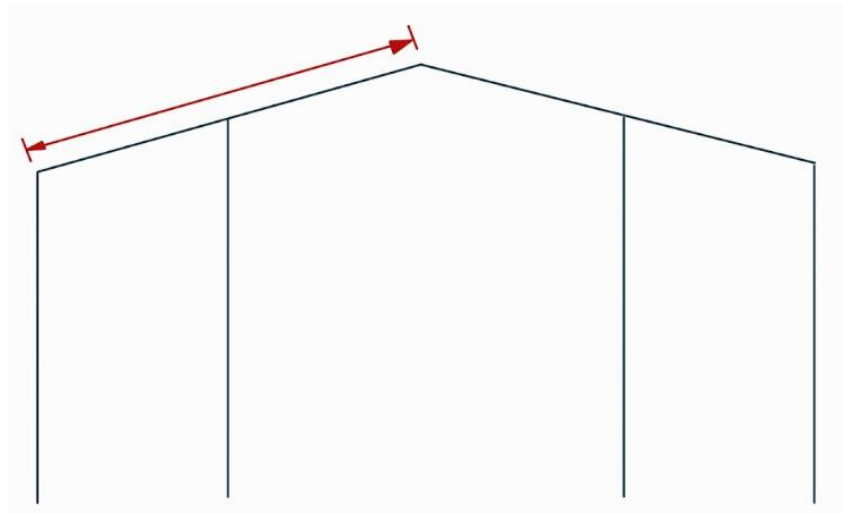


Figura 24. Longitud total del dintel

- Diámetro de los agujeros (*Figura 25*), en función del diseño de la cartela y de las medidas estandarizadas LEGO (“*Diam_agujero*”)

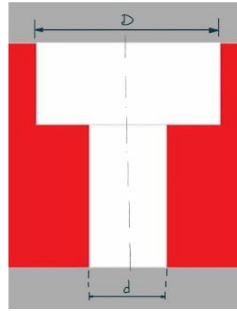


Figura 25. Tipo de agujero y diámetros.

- Número de agujeros (“*N_lado_corto*”)
- Longitud de los lados iguales de la cartela (“*Lado_cartela*”)
- Espesor de la cartela (“*Espesor*”)
- Tipo de cartela que se quiere aplicar (“*Tipo_cartela*”). Este último parámetro dará la opción de elegir entre una cartela de hombro (“*pilar_dintel*”) o cumbrera (“*dintel_dintel*”) (Figura 26).

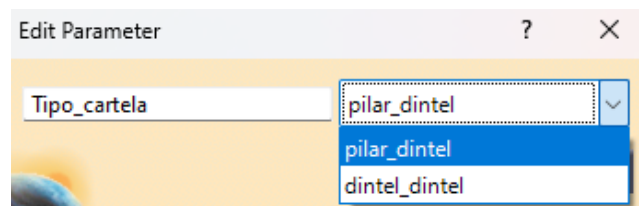


Figura 26. Desplegable “Tipo_cartela”

Por último, en función de estos parámetros y del tipo de cartela elegido se calcula el ángulo que tendrá la cartela (“*Angulo_cartela*”). La regla que define el ángulo se muestra en la Figura 27.

```
/*Rule created by Jesus Arozamena*/  
if Tipo_cartela == "pilar_dintel"  
    Angulo_cartela = Angulo_cartela_pilar_dintel  
else  
    Angulo_cartela = Angulo_cartela_dintel_dintel
```

Figura 27. Código del parámetro “Tipo_cartela”

Donde “*Angulo_cartela_pilar_dintel*” y “*Angulo_cartela_dintel_dintel*” son calculados mediante la geometría del pórtico, tal y como se muestra en la Figura 28 y Figura 29, respectivamente.

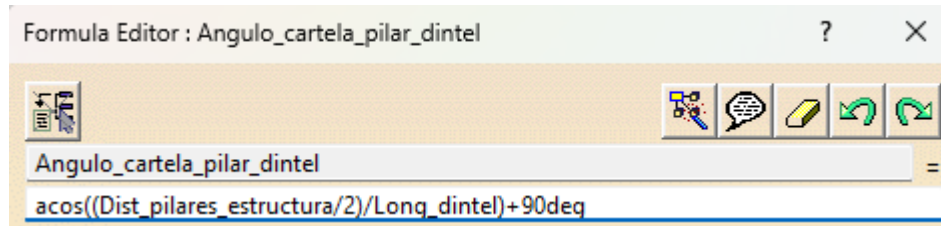


Figura 28. Fórmula para "Angulo_cartela_pilar_dintel"

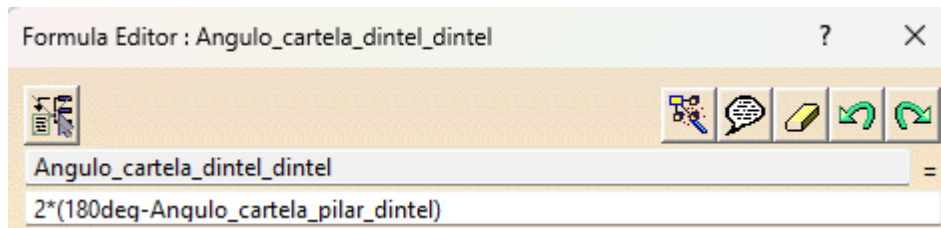


Figura 29. Fórmula para "Angulo_cartela_dintel_dintel"

2.1.2. Metodología de diseño

Una vez definidos todos los parámetros que van a actuar en el modelo, se comienza el diseño paso a paso en CATIA v5.

Primero se crearán unas referencias para poder situar la cartela y definirla. En este caso, una guía que definirá el ángulo de la cartela y el lado de ésta, y un plano que servirá para situar la esquina de la cartela y posteriormente el primer agujero (Figura 30)

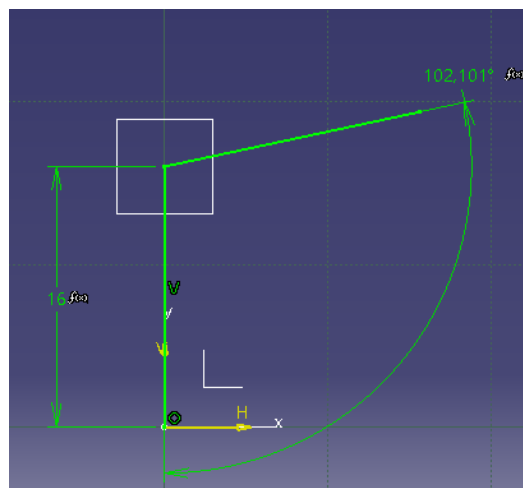


Figura 30. Referencia "Guía"

Donde el ángulo está definido con el parámetro "Angulo_cartela" explicado anteriormente en la Figura 27.

La distancia de ambos lados de la guía también está definida, en este caso según el parámetro “Lado_cartela”.

Tras definir la guía que servirá de apoyo del modelo, se crea un *sketch* (Figura 31) situado en el plano que se ha creado, definiendo un paralelismo de ambos lados con la guía. Al final de cada lado de la guía se genera una circunferencia parcial. Estas circunferencias serán iguales y tangentes a cada lado de la cartela.

Se define con un radio $R=3,75$ mm ya que es la medida estándar de las piezas de *LEGO Technic* y facilitará su ajuste con éstas.

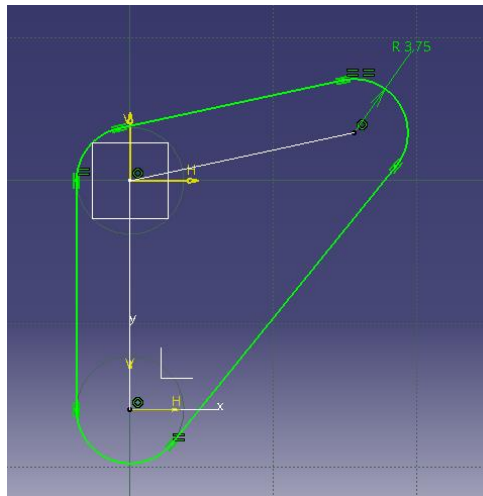


Figura 31. Sketch “BASE”

Tras crear el modelo plano, se define un volumen mediante el comando *PAD* (Figura 32).



Figura 32. Comando “PAD”

Se genera el volumen con el espesor indicado al inicio del diseño. Como se ha creado un plano de referencia se utilizará para que sirva de simetría, por lo que se genera una extensión en ambas direcciones con la opción *Mirrored extent* y definiendo la mitad del espesor (Figura 33)

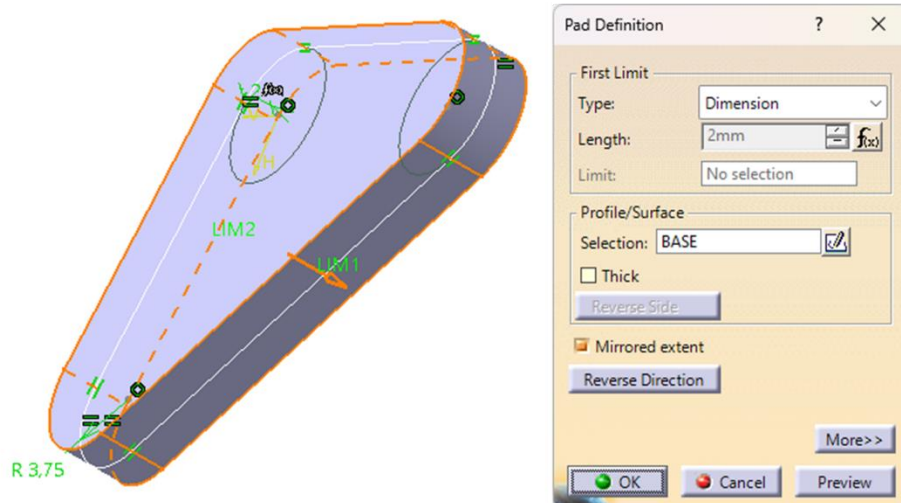


Figura 33. Volumen "PAD"

Una vez generado el volumen de la cartela, se procede a realizar los taladros, en cualquiera de las dos caras del modelo.

El primero será el agujero central, que servirá posteriormente para repetirlo en ambas direcciones de la cartela. Este agujero se genera con el comando *Hole* (Figura 34)



Figura 34. Comando "Hole"

Se define concéntrico a la circunferencia central (Figura 35), para que sea pasante será tipo *Up To Last*, se definirá del tipo *Counterbored* (Figura 36) para poder crear los rebajes estilo *LEGO* y el diámetro será el definido por el parámetro "*Diam_agujero*" (Figura 37)

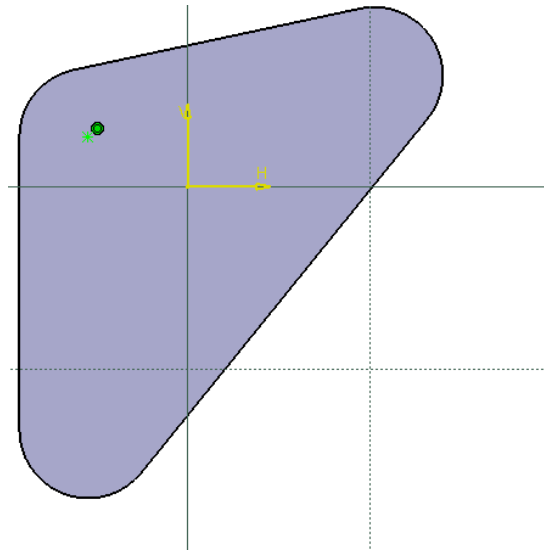


Figura 35. Posición del taladro central

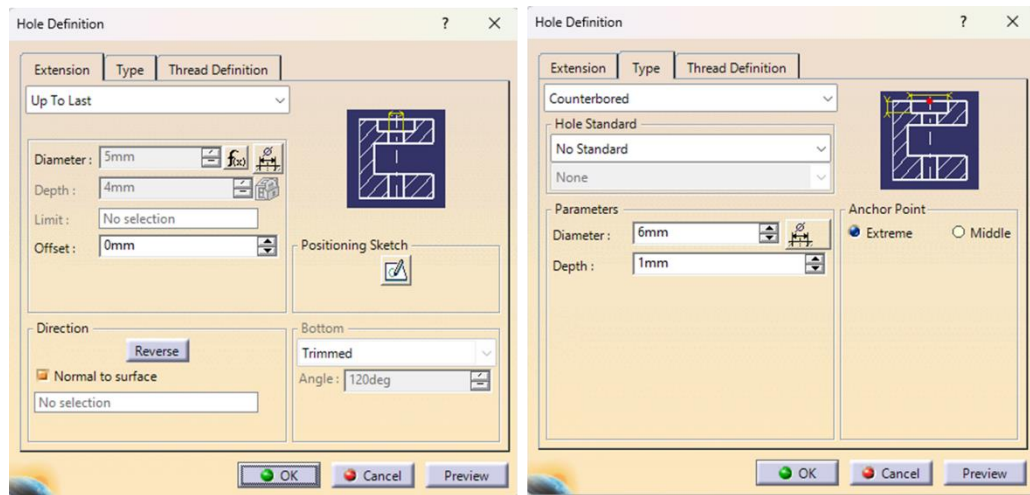


Figura 36. Definición del taladro central

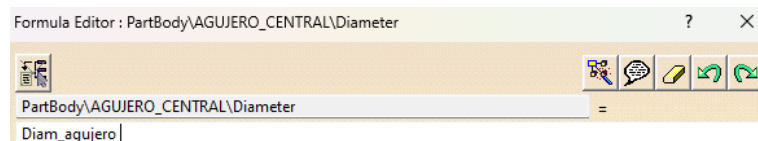


Figura 37. Aplicación del parámetro "Diam_agujero"

Después de generar el primer taladro, se crea un patrón con el comando *Rectangular Pattern* (primer elemento en la paleta de la *Figura 38*) y en ambas direcciones de la guía.

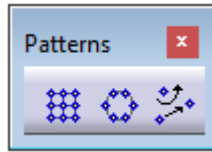


Figura 38. Paleta "Patterns"

El número de repeticiones de este patrón será el definido con el parámetro "N_lado_corto" (Figura 39 y Figura 40). Mediante la función de la Figura 41 se indica la separación entre agujeros.

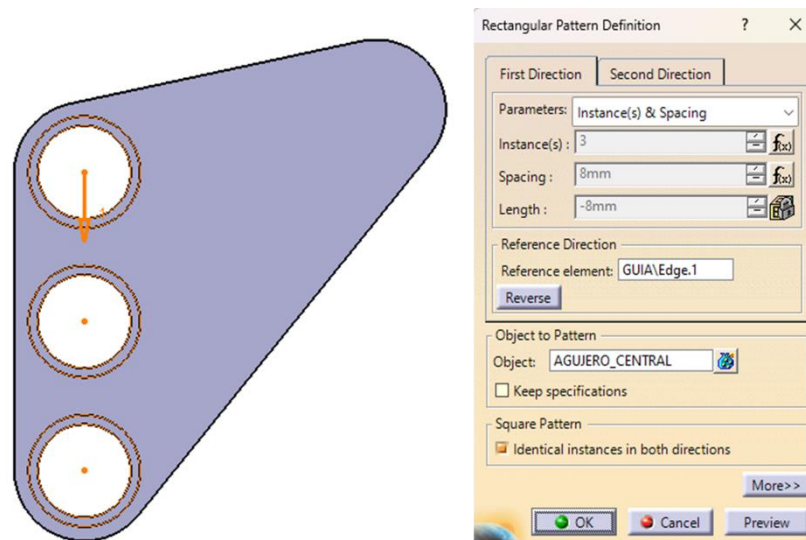


Figura 39. Definición "Pattern" en la primera dirección

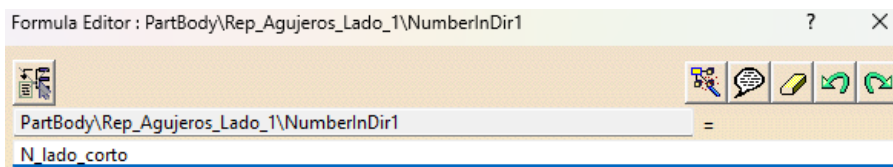


Figura 40. Aplicación del parámetro "N_lado_corto"

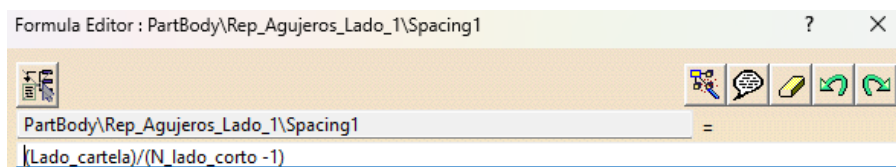


Figura 41. Función distancia entre agujeros

Se repite el paso anterior en la otra dirección de la guía (Figura 42).

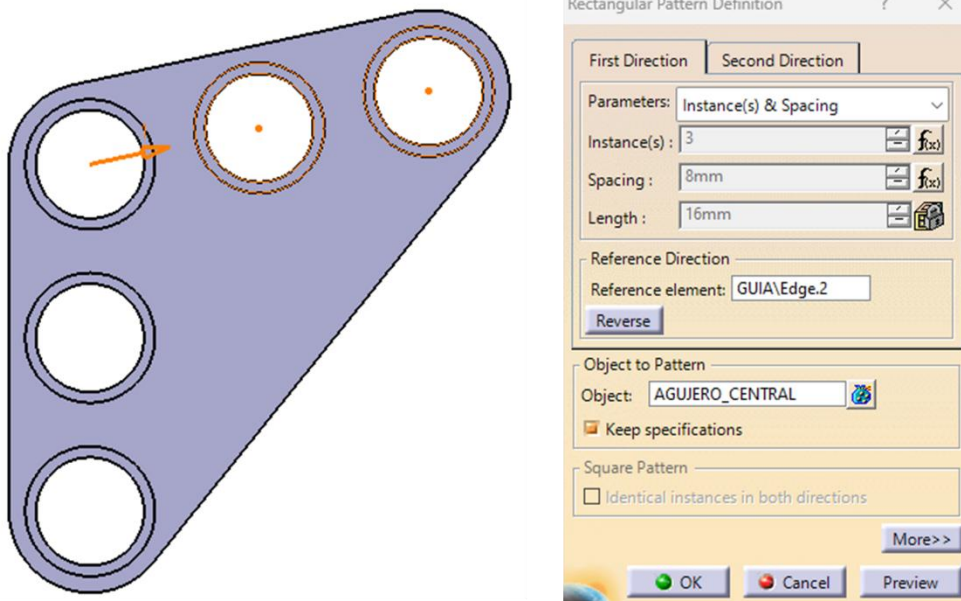


Figura 42. Definición "Pattern" en la segunda dirección

Finalmente, se realiza un último agujero en dirección perpendicular al lado largo de la cartela. Donde la existencia de este agujero está condicionada en caso de que sea una cartela "pilar_dintel" (existe) o "dintel_dintel" (no existe), en función del parámetro "Altura_cartela" (Figura 43).

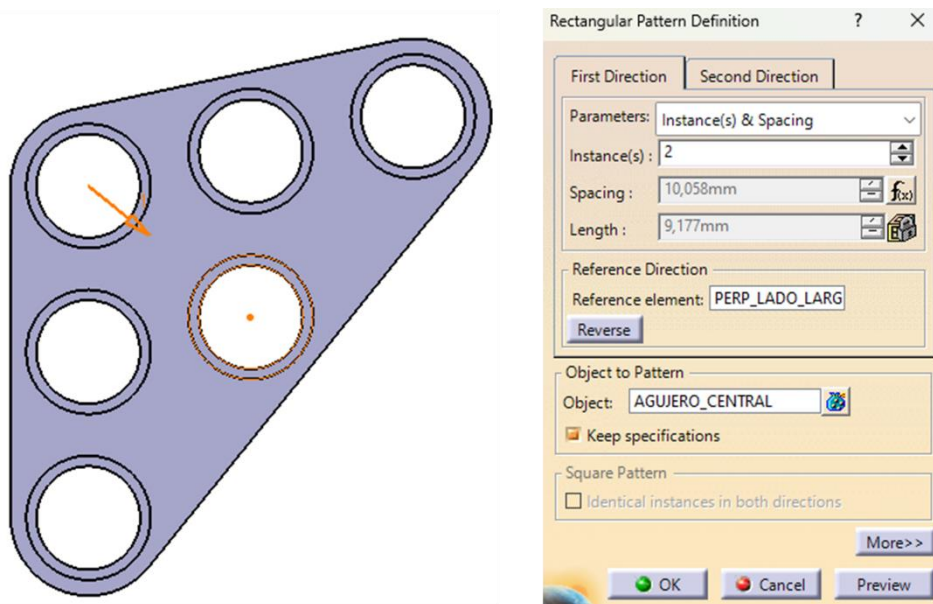


Figura 43. Definición "Pattern" en la tercera dirección

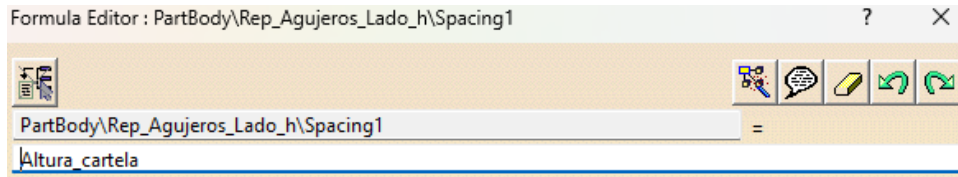


Figura 44. Aplicación del parámetro "Altura_cartela"

```
/*Rule created by Jesus Arozamena*/  
if h > 8mm /*= Diam_agujero*2*/  
    Altura_cartela = h  
else  
    Altura_cartela = 0mm
```

Figura 45. Regla de existencia del agujero central

Una vez creado el modelo parametrizado, se puede comprobar esta parametrización alterando los parámetros con los siguientes ejemplos.

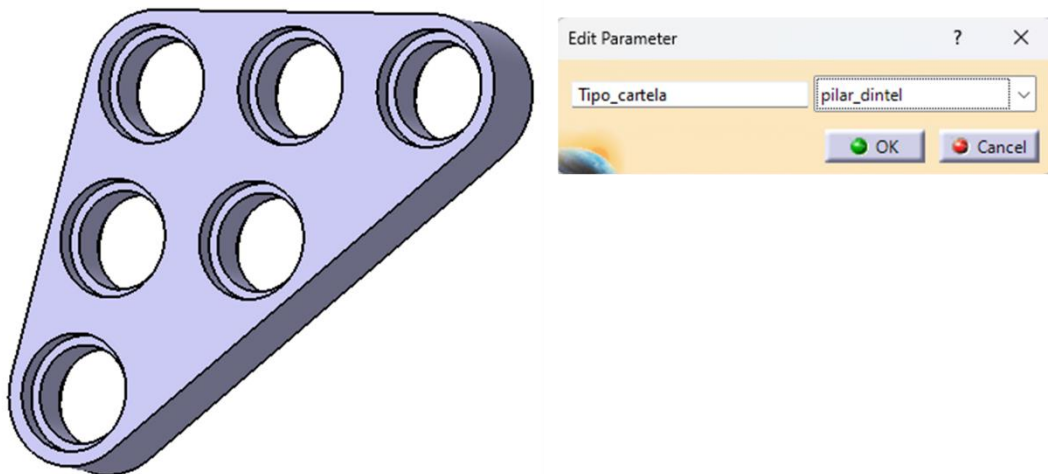


Figura 46. Cartela tipo "pilar_dintel"

Modificando el parámetro "Tipo_cartela" a "dintel_dintel" (Figura 47)

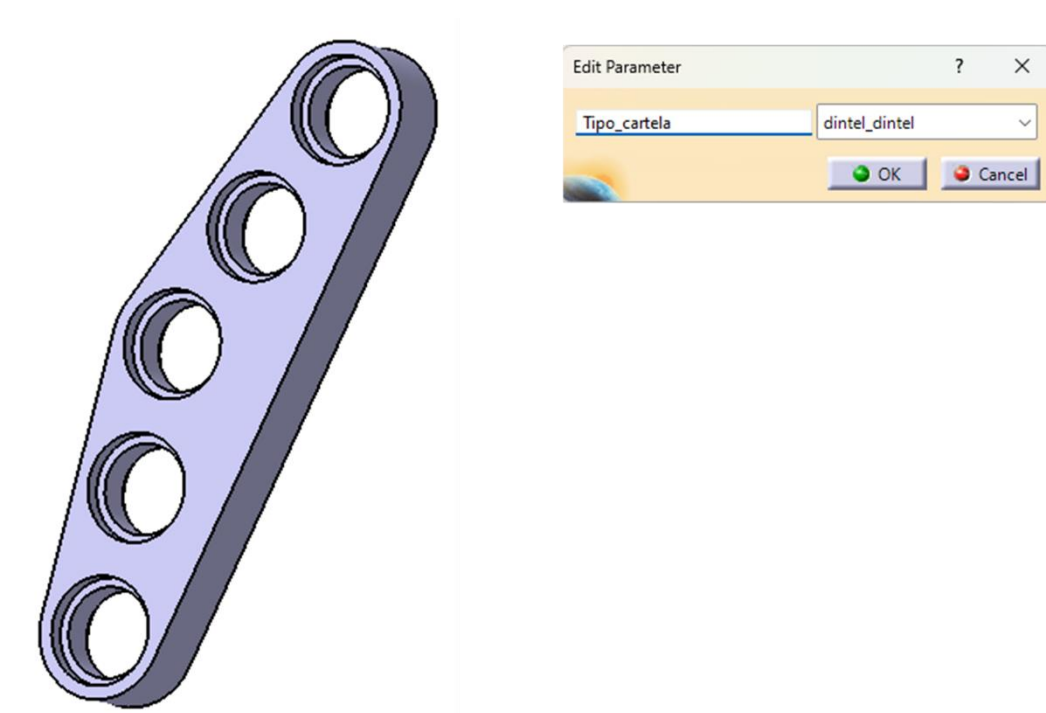


Figura 47. Cartela tipo "dintel_dintel"

Modificando el parámetro "Diam_agujero" (Figura 48)

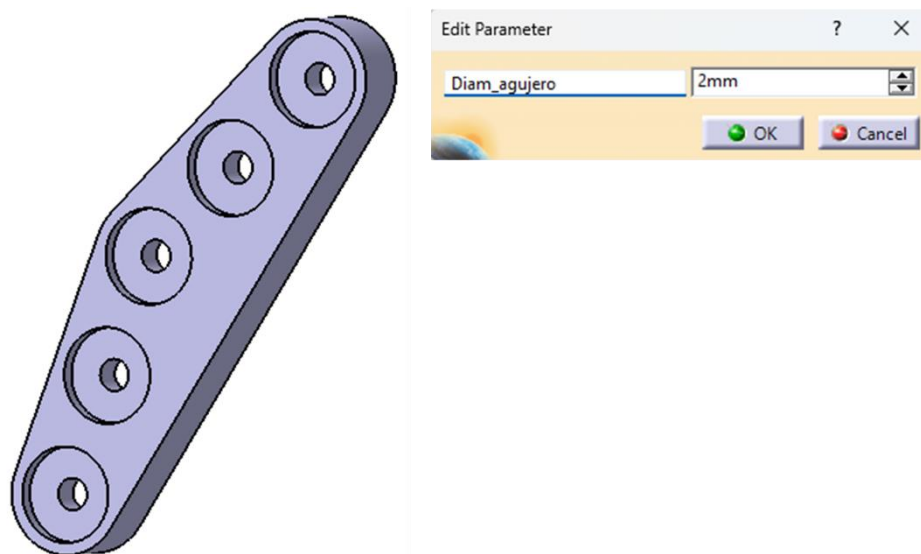


Figura 48. Cartela con diámetro modificado

Tras los anteriores ejemplos se puede verificar la facilidad con la que se puede modificar el modelo.

Toda esta parametrización puede servir como futura mejora, en la que se adapte la totalidad de la pieza a las medidas completas del pórtico mediante parámetros.

En el capítulo de [Anexos](#) se encuentran los planos de ambas cartelas con las medidas definidas para el presente proyecto, así como un modelo 3D de ambas. Para poder visualizar correctamente el modelo 3D es necesario utilizar *Adobe Acrobat*, considerando el documento de confianza y haciendo *click* en el icono emergente de activación.

2.2. Discusión de dimensiones y ángulos. Evolución del diseño

En este apartado se va a introducir y discutir las medidas deseadas del pórtico, afectando a las medidas finales de las cartelas.

Para dimensionar el pórtico y las correspondientes cartelas, se va a tener en cuenta la relación existente entre una persona de tamaño promedio con un pórtico real de una nave industrial. Esta relación será proporcional a la relación entre la figura *LEGO* y el pórtico.

El pórtico tiene una amplia variedad de diseños como se ha comentado anteriormente, contemplando la distancia entre pilares, la altura del dintel o la cantidad de pilares intermedios que se pueden incluir en un pórtico hastial.

En este caso, los pórticos hastiales de la estructura deben llevar pilares intermedios, por lo que al trabajar con medidas *LEGO* habrá una limitación notable afectando a las medidas del resto de pórticos de la estructura.

Partiendo de la estructura inicial, se inicia el proceso mediante la aplicación de técnicas de medición con unidades *LEGO* (a partir de ahora *UL*). Para ello se utiliza como unidad de medida la distancia entre cada agujero de los elementos *LEGO Technic Liftarm* (*Figura 49*). Estos elementos son los que componen principalmente el pórtico, siendo las vigas de cada uno de los elementos de éste.

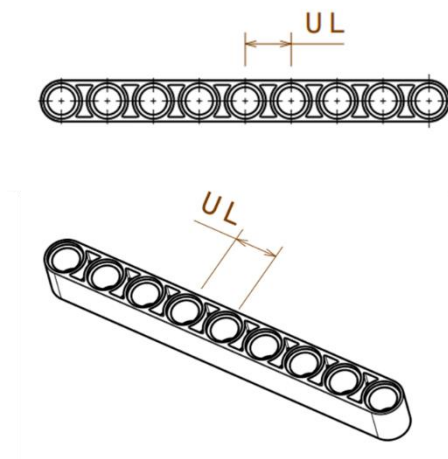


Figura 49. Definición de unidad LEGO - "UL" en viga "liftarm"

Se determinaron las dimensiones nominales de los elementos del pórtico; la viga-pilar (21 UL), la viga-dintel (28 UL) mostradas en la *figura 50*, la distancia nominal entre pilares (55 UL), y la altura del pilar central (28 UL) mostrados en la *figura 51*.



Figura 50. Viga-pilar (1) y viga-dintel (2)



Figura 51. Pórtico sin pilares intermedios.

Una vez determinadas las medidas de los elementos, se analiza la situación actual y las posibles modificaciones.

La disposición de la coronación o dinteles se encuentra elevada a una altura de 5 *UL* por encima del nivel del hombro, mientras que la luz tiene un total de 55 *UL*. Esta configuración da lugar a una relación entre los catetos de 27.5/5, resultando en un cociente de 5,5, tal y como muestra la *figura 52*.

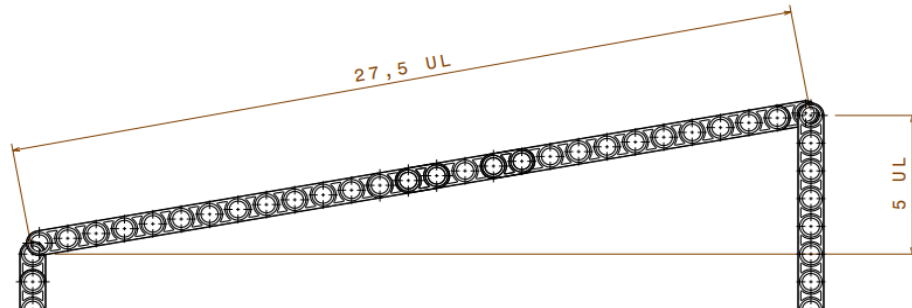


Figura 52. Relación inicial de catetos del pórtico sin pilar intermedio.

En el caso de contemplar la incorporación de pilares intermedios, la consideración de un dintel compuesto por dos segmentos de 13 *UL* cada uno se plantea como una opción viable y realista, teniendo en cuenta que los pilares intermedios deben ser elementos con medidas *UL* enteras, debido a que es evidente que no se puede construir el pilar con piezas *LEGO* incompletas. No obstante, al adoptar esta medida, el pilar central tiene un aumento de 5 *UL*, mientras que los dos pilares restantes del pórtico hastial no logran ganar los 2,5 *UL* necesarios para mantener la relación inicial de catetos de 5,5 (*Figura 53*).

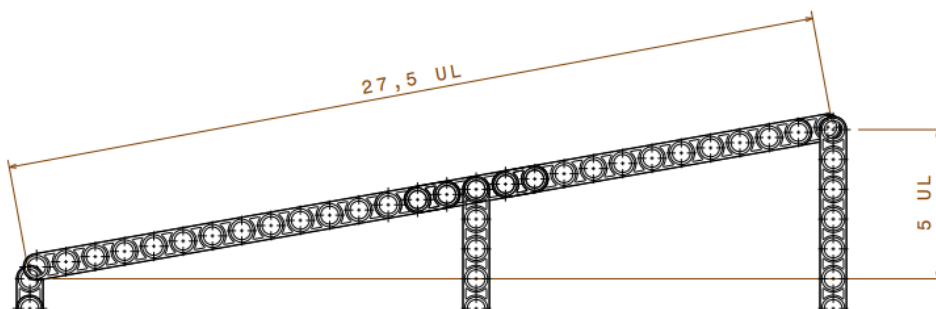


Figura 53. Relación de catetos del pórtico con pilar intermedio

Ante esto, se propone la utilización de un dintel conformado por dos tramos, uno de 15 *UL* y otro de 11 *UL*. De esta manera, en el primer vano la relación de catetos puede calcularse como 15,5/3, según se muestra en la *figura 54*, resultando una relación de 5,16.

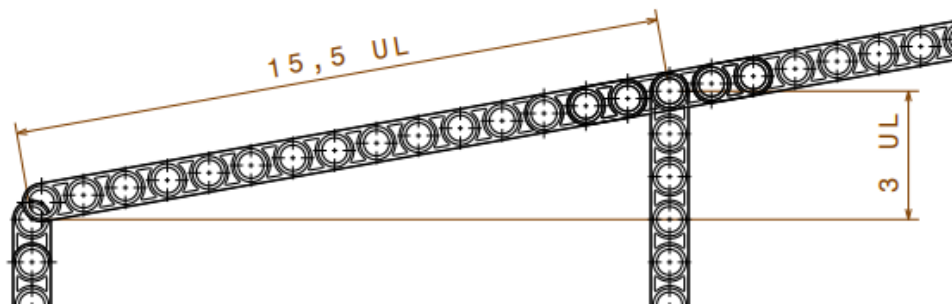


Figura 54. Relación de catetos en el primer vano del pórtico.

Mientras que en el segundo vano la relación sería de $12/2$ (Figura 55), con un resultado de 6.

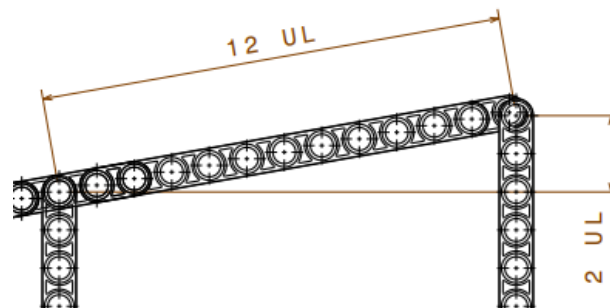


Figura 55. Relación de catetos en el segundo vano del pórtico

A pesar de la aparente diferencia entre los valores de ambas relaciones (5,16 y 6) con respecto al valor original de 5,5, hay que destacar que esta diferencia es apenas perceptible a simple vista.

En esta diferencia de relaciones, es donde se verifica que los elementos no van a cumplir las condiciones de sólido rígido, ya que hay que forzar ligeramente las piezas para que se unan entre sí.

Mediante el software de diseño de *LEGO Studio 2.0*, se va a generar el pórtico con las mismas piezas que tiene el pórtico físico y así verificar cómo deberían ensamblarse las piezas *LEGO* bajo la hipótesis de sólido rígido (Figura 56).

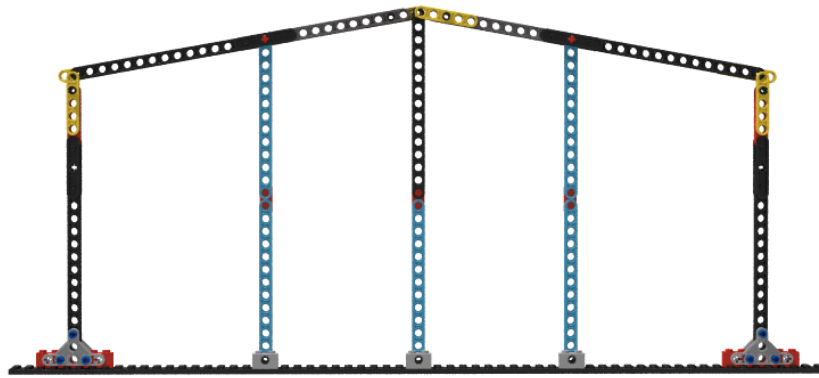


Figura 56. Pórtico generado en Studio 2.0

Para crear el pórtico, la unión que ha servido de referencia ha sido la del primer pilar intermedio con el dintel (Figura 57)

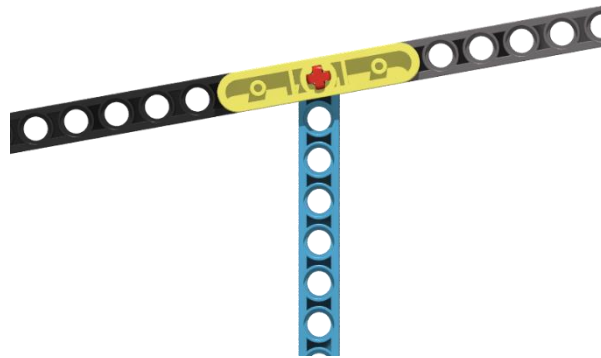


Figura 57. Unión de referencia

Una vez creado el pórtico, se puede observar cómo deberían estar dispuestas las piezas entre sí bajo la hipótesis de sólido rígido [8].

Ampliando las uniones entre pilar y dintel, se puede observar cómo los agujeros de las vigas no son concéntricos y, por tanto, se verifica que no se podría ni siquiera unir ambos elementos mediante un pasador (Figura 58)

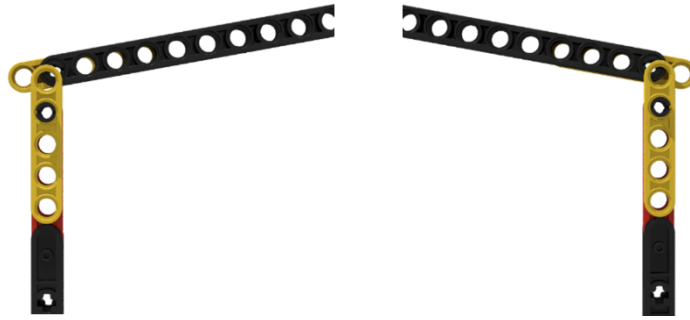


Figura 58. Desalineamiento de la unión en el hombro

Además, la unión entre dinteles y el pilar central también confirma que para poder alinear físicamente las piezas entre sí habría que forzarlas ligeramente, debido al desalineamiento mostrado en la *figura 59*.



Figura 59. Desalineamiento de la unión en la cumbrera

Todo esto se debe a que el software *Studio 2.0* simula la creación de elementos *LEGO* suponiendo que son elementos totalmente rígidos, sin tener en cuenta el comportamiento elástico del material.

Así, en la breve discusión anterior de distancias y ángulos del pórtico, las pequeñas diferencias de relaciones entre catetos o desalineamientos milimétricos no van a afectar físicamente al montaje del pórtico con las cartelas ya que se van a poder forzar ligeramente para adaptar la unión. Esto es debido a que el *ABS*, pese a ser más rígido que otros plásticos, sigue siendo un polímero que se puede deformar bajo presión o tensión, de forma plástica o elástica, en función de la tensión aplicada [5]. En este caso, las fuerzas aplicadas para montar el pórtico serán para adaptar una pieza con otra compensando los desalineamientos milimétricos, por lo que serán de una magnitud mínima.

Finalmente, estas magnitudes nominales y mediante cálculos trigonométricos simples, facilitaron la obtención de los ángulos que conforman los dinteles entre sí y el ángulo entre el pilar y el dintel.

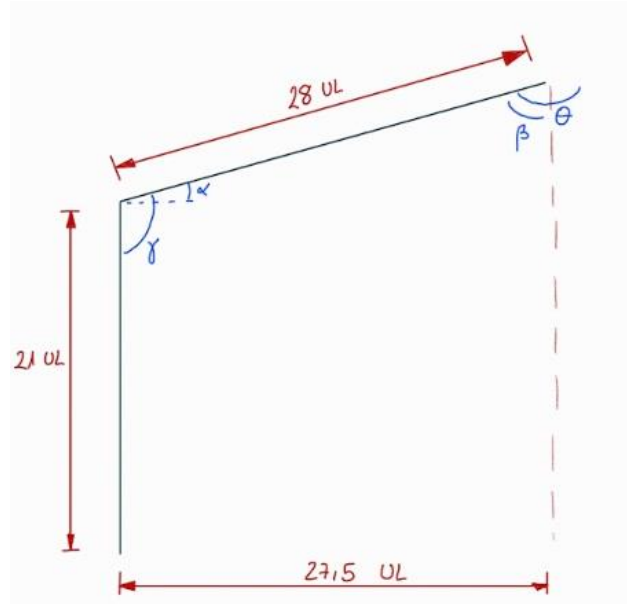


Figura 60. Croquis y distribución de ángulos del pórtico.

Como muestra el croquis de la *figura 60*, los ángulos del pórtico se pueden obtener de la siguiente forma:

$$\cos \alpha = \frac{27,5 \text{ UL}}{28 \text{ UL}}$$

Debido a que las *UL* son distancias entre ejes de agujeros, no son medidas completamente exactas, por lo que el resultado se puede aproximar:

$$\alpha = 10^\circ$$

Por tanto, el ángulo que tendrá la cartela del hombro será:

$$\gamma = \alpha + 90 = 100^\circ$$

Finalmente, para determinar el ángulo de la cumbrera, se tiene en cuenta el triángulo rectángulo que forma el dintel. En función de esto se sabe que la suma de los ángulos de un triángulo siempre es 180° , por tanto:

$$180^\circ = \alpha + \beta + 90^\circ$$

$$\beta = 80^\circ$$

Y según la distribución de ángulos de la *figura 60*, el ángulo de la cartela de la cumbrera será θ , por lo que se tiene:

$$\theta = 2 \cdot \beta$$

$$\theta = 160^\circ$$

Por tanto, el ángulo del hombro será $\alpha=100^\circ$ y el de la cumbrera $\theta=160^\circ$. Según esto se puede determinar que el pórtico tendrá una cubierta de 10° .

Una vez calculados los ángulos, se plantea verificar el diseño anterior en *Studio 2.0* y compararlo. Para ello, se genera el mismo pórtico en *CATIA v5* con elementos comerciales de *LEGO*.

El software *Studio 2.0*, es un software de diseño de modelos *LEGO*, por lo que ya incluye piezas con las que trabajar, en cambio, para el ensamblaje en *CATIA v5* los elementos se obtienen del portal online de elementos 3D de “*GrabCAD*”, verificando previamente las medidas de estos.

Los elementos necesarios, únicamente para generar el pórtico, son: 5 vigas de 15 UL, 5 vigas de 13 UL, 2 vigas de 11 UL y 2 vigas de 5 UL.

Para construir el pórtico se usa el módulo de “*Assembly Design*”(Figura 61) ensamblando las piezas entre sí, siendo los pines los elementos que unen cada una de las vigas.

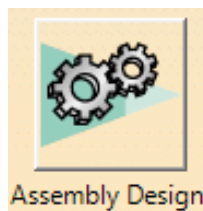


Figura 61. Módulo *Assembly Design*

Para construir el pórtico se ha decidido eliminar los pines de unión por simplicidad a la hora de crearlo, debido a que el módulo *Assembly Design* permite situar los agujeros de forma concéntrica.

Para construir el pórtico con las medidas discutidas anteriormente, se genera una base con cuatro elementos *LEGO* de 16 UL (Figura 62), para posteriormente ubicar los pilares laterales a 55 UL entre sí.



Figura 62. Base del pórtico en *CATIA v5*

Todos los pilares se han generado sobre las zapatas correspondientes que servirán para unirlos junto a la guía anterior. Los pilares laterales se han creado

sobre un *brick* LEGO de 5 UL, mientras que para los pilares intermedios y el pilar central se ha utilizado un *brick* de 1 UL (*Figura 63*).

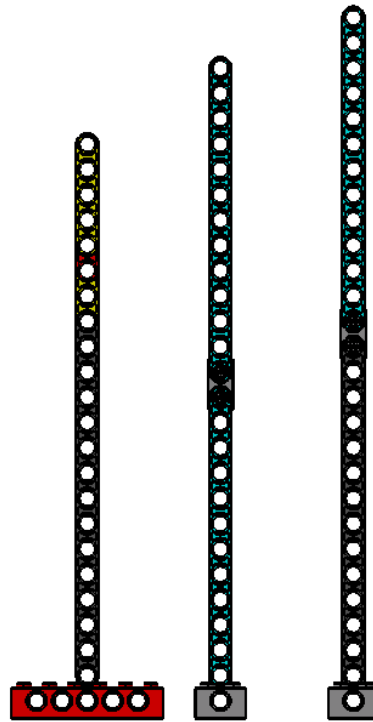


Figura 63. Pilar lateral (1), pilar intermedio (2) y pilar central (3) del pórtico en CATIA v5

Para generar el dintel del pórtico se utilizarán los elementos *liftarm* unidos entre sí mediante restricciones de concetricidad entre agujeros (*Figura 64*)



Figura 64. Dintel del pórtico en CATIA v5

Una vez creado cada elemento del pórtico, se unen entre sí utilizando el mismo procedimiento que con el software *Studio 2.0*, siendo la unión de referencia la del primer pilar intermedio con el dintel (*Figura 65*).

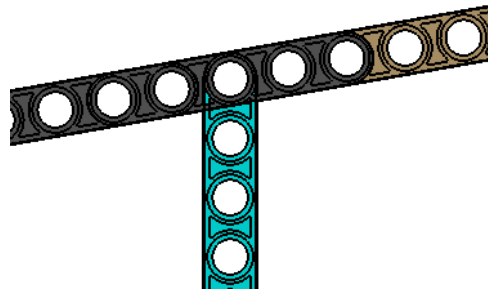


Figura 65. Unión de referencia en CATIA v5

El pórtico creado en CATIA v5 se detalla en la figura 66.

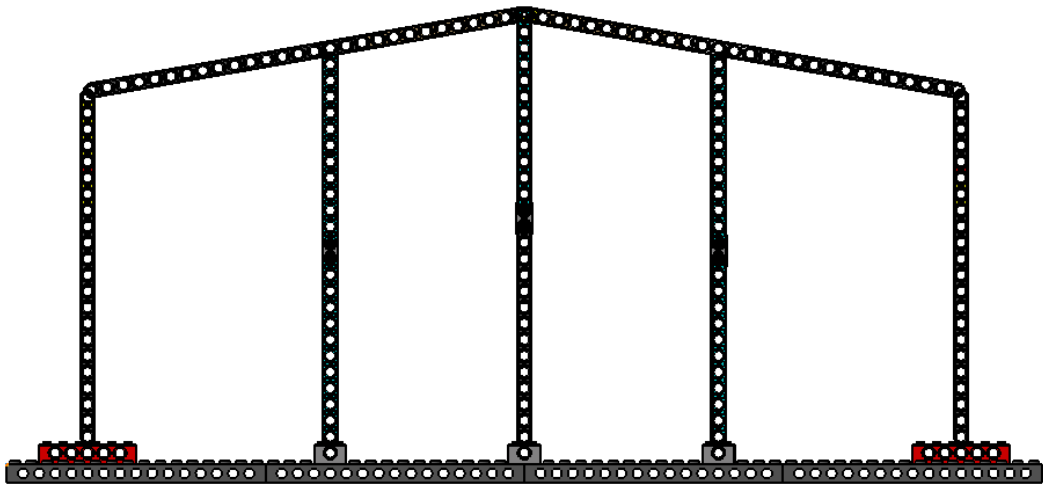


Figura 66. Pórtico generado en CATIA v5

De nuevo se observan los anteriores desalineamientos en el hombro y en la cumbrera (Figura 67)

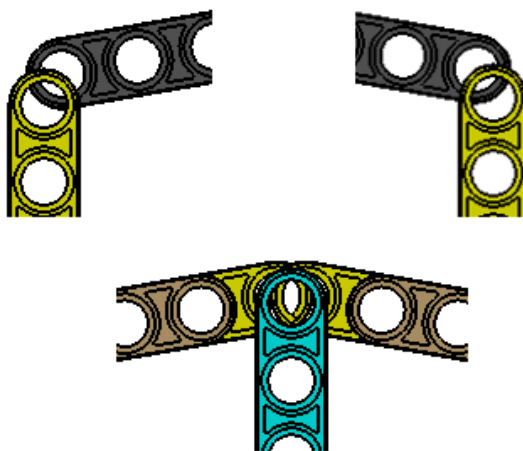


Figura 67. Desalineamientos del pórtico en CATIA v5

Por último, para obtener las medidas y comprobar el grado de desalineamiento, se puede realizar una medición desde el propio *CATProduct* o llevar el modelo a un plano y comprobar las cotas. En este caso, y para utilizarlo como una herramienta más, se realiza un plano con la vista frontal del pórtico. De esta forma se puede verificar las distancias existentes en el hombro y la cumbrera del pórtico.

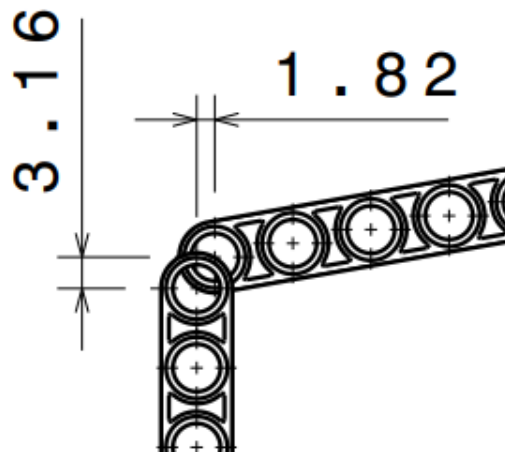


Figura 68. Distancias entre elementos en el hombro del pórtico

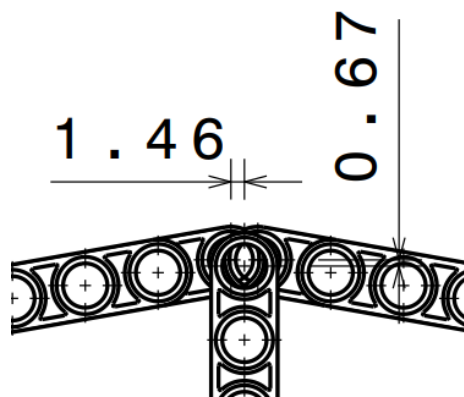


Figura 69. Distancias entre elementos en la cumbrera.

Estas medidas representan cuánto se deberían forzar los elementos físicamente para poder unirlos mediante un pasador. En la *figura 68* se observa que habría que forzar verticalmente hacia abajo el dintel o hacia arriba el pilar 3,16 mm y horizontalmente 1,82 mm. En la *figura 69* muestra los 0,67 mm que habría que forzar el dintel o pilar central verticalmente y 1,46 mm horizontalmente. Estos valores tan bajos son prácticamente inapreciables físicamente.

Tras crear el pórtico completo en *CATIA v5* y comprobar que efectivamente hay que forzar ligeramente las piezas para montarlo, se genera el mismo pórtico

con las cartelas diseñadas, sin utilizar el elemento base anterior, tal y como se muestra en la *figura 70*.

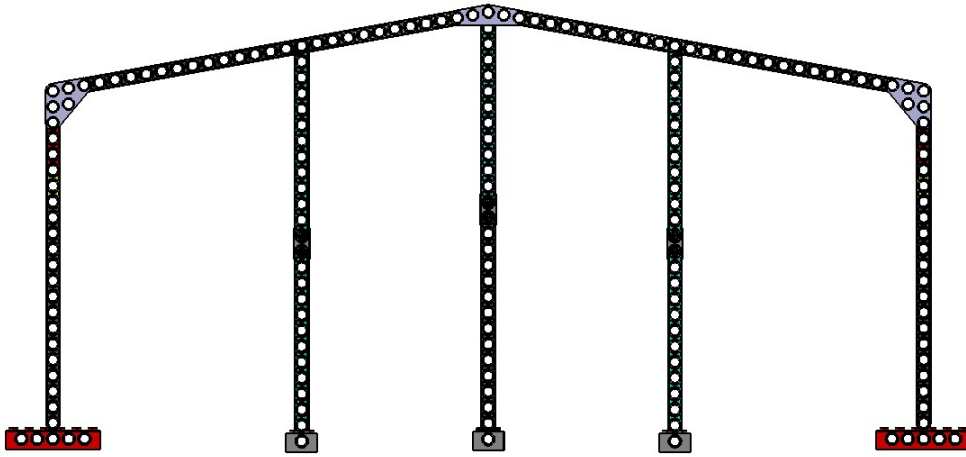


Figura 70. Pórtico en CATIA v5 con cartelas.

El pórtico ha sido creado utilizando como referencia el primer pilar intermedio de igual forma que los pórticos de *Studio 2.0* y el pórtico sin cartelas de *CATIA v5*. De nuevo se comprueba el desfase milimétrico que hay entre elementos, tal y como se muestra en la *figura 71*, verificándose así que también habría que forzar ligeramente las piezas para el ensamblaje.

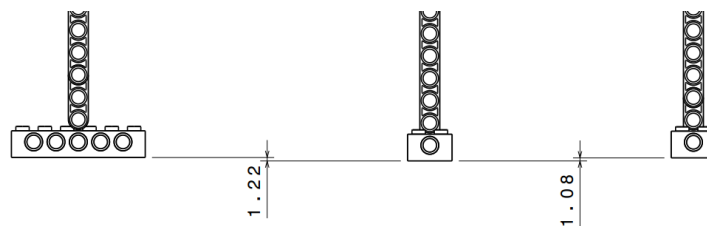


Figura 71. Desfase entre elementos del pórtico con cartelas.

2.3. Comparación del modelo a escala y real

Después de obtener los ángulos de las cartelas, se procedió a comparar estas medidas con las dimensiones de una minifigura LEGO estándar. Así, se ha podido analizar el tamaño proporcional de las cartelas modeladas y la precisión del diseño en escala real, así como las medidas del pórtico.

Primero, para obtener el factor de escala se realizará mediante la relación entre la altura de una minifigura LEGO (5 UL y 40 mm, según se muestra en la *figura 72*) y el tamaño promedio de una persona adulta (180cm).

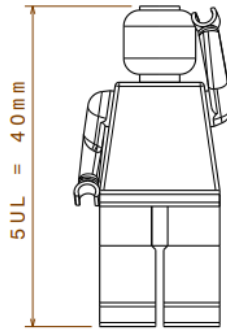


Figura 72. Dimensiones minifigura LEGO

Por tanto, el factor de escala para medidas reales será:

$$\lambda_1 = \frac{1800}{40} = 45$$

Y el factor en dimensiones LEGO (UL):

$$\lambda_2 = \frac{1800}{5} = 360$$

Con ambos factores λ_1 y λ_2 se puede obtener las medidas reales tanto de las cartelas diseñadas como del pórtico completo.

Cada cartela tiene dos lados iguales de 3 UL o 24 mm (0,024 m), por lo tanto:

$$0,024 \times \lambda_1 = 1,08 \text{ m}$$

$$3 \times \lambda_2 = 1,08 \text{ m}$$



Figura 73. Cartela hombro real (1) y modelada (2)

De igual forma se obtiene la cartela para la cumbrera, en este caso al no tener taladros en el lado largo, se obtiene mediante su dimensión nominal:

$$0,036 \times \lambda_1 = 1,62 \text{ m}$$

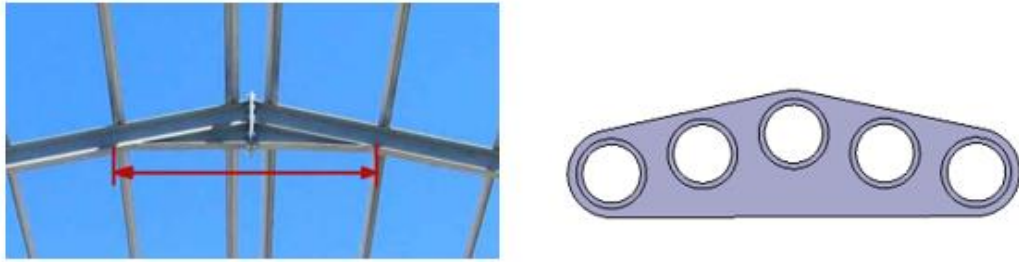


Figura 74. Cartela cumbre real (1) y modelada (2)

Finalmente, el pórtico real que se ha construido con piezas *LEGO* y las cartelas modeladas, tendrá las siguientes dimensiones:

Altura de los pilares laterales:

$$21 \text{ UL} \times \lambda_2 = 7,56 \text{ m}$$

Altura del pilar central:

$$28 \text{ UL} \times \lambda_2 = 10,08 \text{ m}$$

Distancia entre pilares laterales:

$$55 \text{ UL} \times \lambda_2 = 19,80 \text{ m}$$

Según estas dimensiones, el pórtico modelado es perfectamente funcional, ya que generalmente la altura de los pilares laterales ronda entre los 6 y 10 m de altura, la altura cumbre entre los 10 y 15 m, y la distancia entre pilares extremos puede llegar a más de 20 m, por lo que el modelo a escala resultaría el mostrado en la *figura 75*.

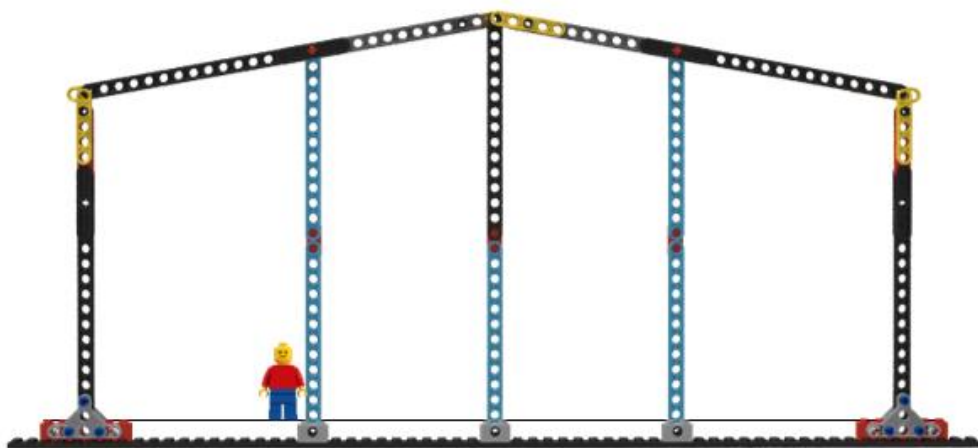


Figura 75. Pórtico y minifigura *LEGO*

Capítulo 3. Fabricación

3.1. Procesos de fabricación

Una vez creado un modelo definitivo, se procederá a fabricarlo.

En base al tamaño y complejidad de la pieza, se concretan dos posibilidades para la fabricación:

- Corte por láser.
- Fabricación aditiva.

3.1.1. Corte por láser

La técnica de corte láser realiza la extracción del material por evaporación del mismo a lo largo de la zona de corte (*Figura 76*). El calor que recibe el material hace que se eleve su temperatura hasta el punto de ebullición, consiguiendo la evaporación [10].

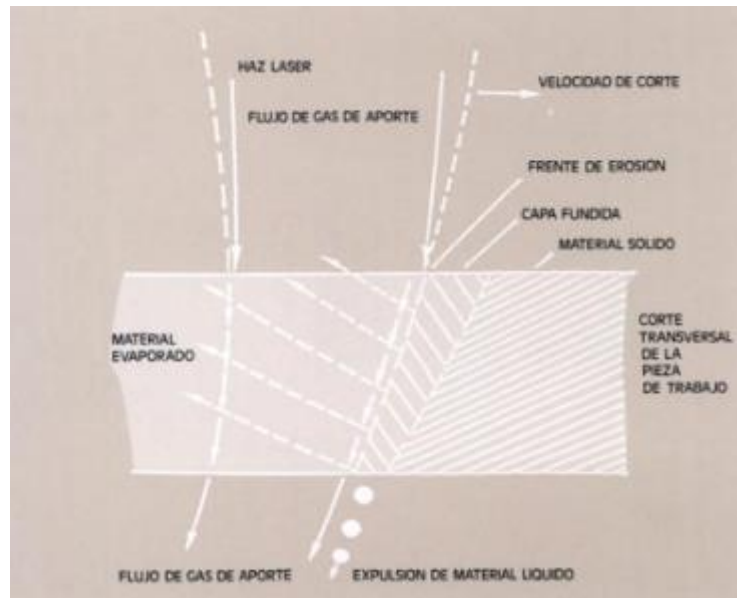


Figura 76. Elementos de actuación en el proceso de corte láser [9]

Entre las ventajas que presenta este tipo de fabricación se encuentran la precisión, velocidad, capacidad de corte de formas complejas, la capacidad de automatizar el proceso y una mínima cantidad de material contaminante [10].

En base a esto, los materiales propuestos para cortar mediante láser son aluminio y plástico.

Respecto al plástico, el material utilizado es el polimetilmetacrilato, comúnmente conocido como metacrilato, debido a que con el corte de metacrilato se va a conseguir los mejores resultados en plásticos [11].

Mediante la utilización de otros plásticos, se consigue una calidad de corte buena, pero produce escoria alrededor de la pieza y hay que tener cuidado puesto que puede manchar la superficie de la pieza [10], así como otros plásticos producen gotas y rebabas en los bordes.

Las primeras piezas fabricadas con metacrilato, con el diseño inicial con cruces, dieron unos resultados poco deseables mediante corte por láser, generando elementos con dimensiones precisas pero que no eran funcionales debido a que al someterlas a una carga baja ya sufrían una rotura frágil (*Figura 77*).



Figura 77. Cartela de metacrilato con fallo en zona superior derecha.

Otras cartelas con zonas de fallo se muestran en la *figura 78* y la *figura 79*.

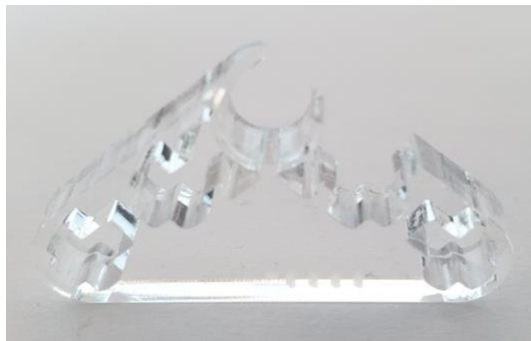


Figura 78. Cartela de metacrilato con fallo en la zona superior derecha

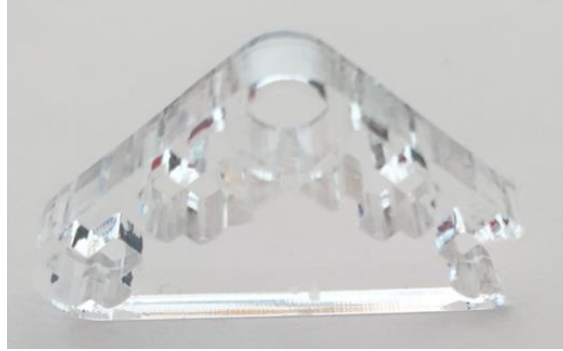


Figura 79. Cartela de metacrilato con fallo en la zona inferior derecha

Para la segunda opción de corte con láser, se ha utilizado aluminio 6061, con un espesor de 3mm. Para llevar a cabo el proceso de fabricación, se utilizó los planos en planta de las cartelas ([Anexos](#)).

El resultado de la fabricación en aluminio es que se muestra en la *figura 80* y *figura 81*.



Figura 80. Cartela de hombro fabricada en aluminio.



Figura 81. Cartela cumbre fabricada en aluminio.

Esta fabricación con aluminio ha dado como resultado unos elementos de una resistencia mucho mayor que el metacrilato.

Se ha podido observar los pequeños defectos que ha generado este proceso, más adelante se comentarán y se explicará cómo se han tratado.

3.1.2. Fabricación aditiva

El proceso de fabricación aditiva consiste en la adición de capas del material, cada capa es una fina sección del modelo creado. Así, cuanto más finas sean las capas más se acercará al modelo original (*Figura 82*)

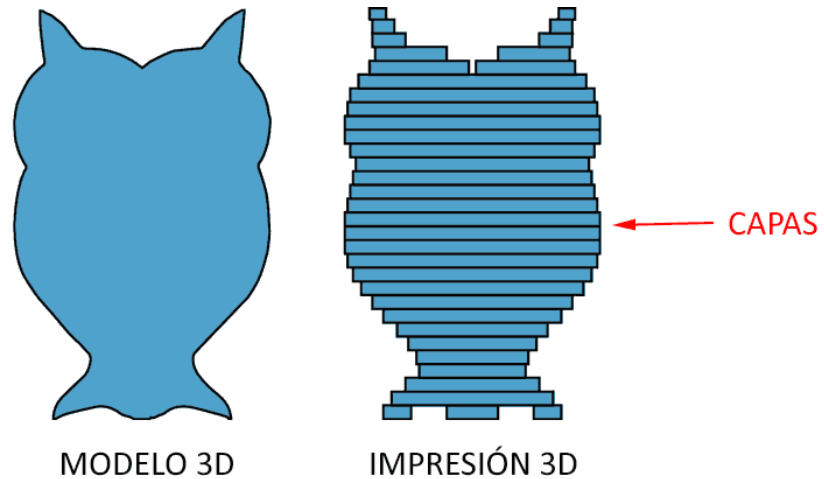


Figura 82. Capas en impresión 3D [15]

Este tipo de proceso permite crear piezas más complejas sin sobrecoste. Además, permite personalizar el diseño y la forma de fabricación del modelo, por lo que para el proyecto actual ha sido idóneo.

El proceso comienza en exportar el modelo CAD a un archivo “.stl ”. Una vez exportado el archivo se procederá a abrirlo en el software de edición para impresión 3D *UltiMaker Cura* (*Figura 83*)



Figura 83. Ultimaker Cura

Con el comando *Archivo* (*Figura 84*) se incluirá el modelo generado (*Figura 85*)



Figura 84. Comando "Archivo" de Ultimaker Cura

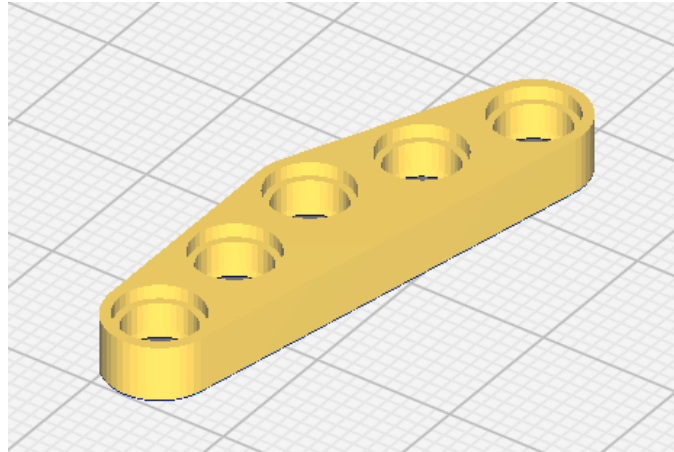


Figura 85. Archivo .stl en software Cura

Una vez incluido el modelo en el software de impresión 3D, hay que editar las distintas opciones en función de cómo se va a fabricar.

Lo primero es añadir la impresora que se ha utilizado, en este caso se ha utilizado el modelo *Ultimaker S3*.

El propio software ya incluye una gran variedad de impresoras, por lo que buscando por la marca de ésta se puede encontrar rápidamente (*Figura 86*)

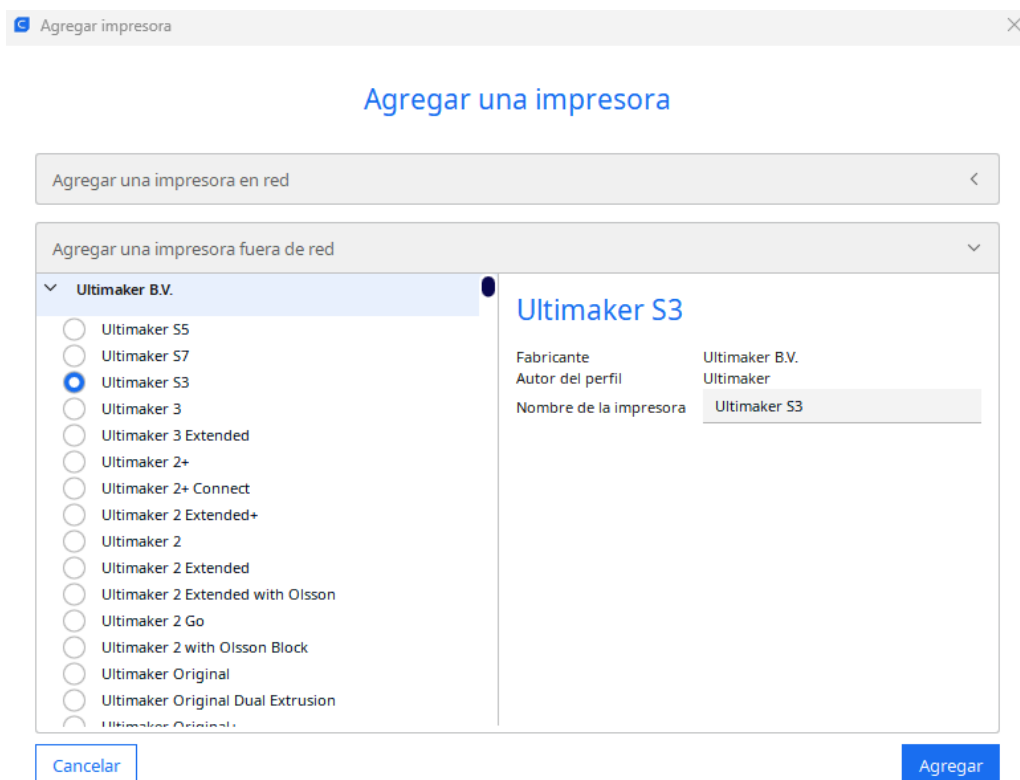


Figura 86. Menú para agregar impresora en Cura

Para configurar la fabricación del modelo, en el desplegable de la ventana principal se escogerá el material con el que imprimir. En este caso se ha utilizado ácido poliláctico (*PLA*).

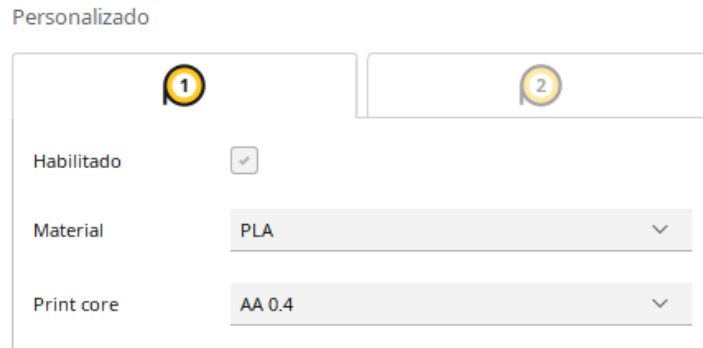


Figura 87. Selección de material y ancho de boquilla en software Cura

Se ha elegido *PLA* por las buenas prestaciones que tiene a la hora de imprimir por su fácil impresión, no tiene una complejidad muy alta de impresión y tiene poca tendencia a deformarse. Además, es un material fácil de conseguir.

Para la fabricación del modelo se han tenido en cuenta parámetros de la *tabla 6*.

CARACTERÍSTICAS DE IMPRESIÓN	
PARÁMETRO	VALOR
Temperatura	Entre 190°C – 220°C
Velocidad de impresión	Entre 30 mm/s – 80 mm/s
Altura de capa	0.2 mm
Espesor de pared y relleno	0.6 mm // Triangular 15%
Soportes	Triangular 5% (45°)

Tabla 6. Características de impresión

Obteniendo el resultado de la *figura 88* y *figura 89*.



Figura 88. Cartela de hombro mediante fabricación aditiva.



Figura 89. Cartela de cumbrera mediante fabricación aditiva.

Capítulo 4. Prototipaje

4.1 Defectos de fabricación

En este apartado se van a tratar las distintas acciones que han sido necesarias con cada una de las fabricaciones realizadas.

En el caso de la fabricación del modelo en aluminio, ha dado como resultado zonas que hay que tratar mecánicamente. Se observa que han quedado aristas vivas (*Figura 90*), esto es debido a que el láser con su movimiento de salida de la pieza genera este defecto [10].

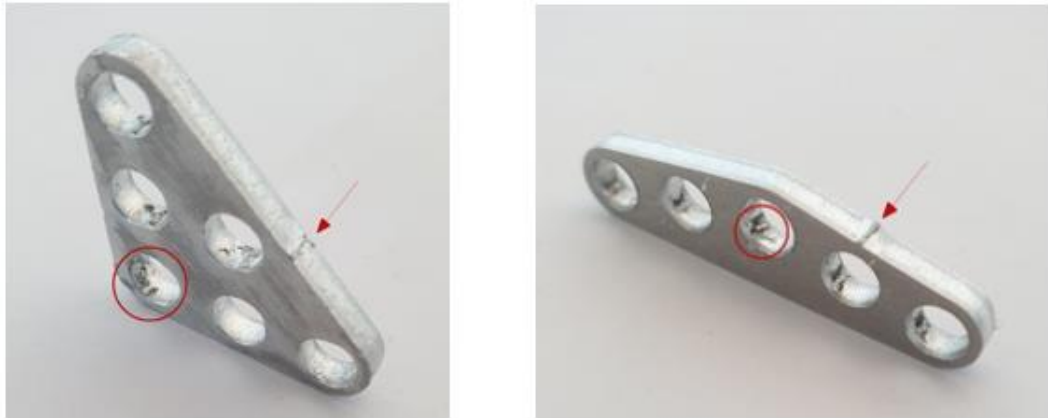


Figura 90. Cartelas de aluminio con aristas vivas y escoria

Este defecto se mecaniza con un avellanador (*Figura 91*), obteniendo un resultado algo más deseable de la pieza, pero se observa que el tratamiento es perjudicial para la herramienta, dejando material residual en ella.



Figura 91. Avellanador utilizado para tratar las cartelas de aluminio.

Esto se debe al desgaste generado por la fricción producida por el taladro. En la norma *ASTM G40-92* se define el desgaste abrasivo como la pérdida de masa tras la interacción entre partículas duras que son forzadas contra una superficie y se mueven a lo largo de ella [17].

Lo que sucede es que el material más duro, al clavarse en el otro, arranca trozos del material, o rompe las crestas del material más blando, la cual desgasta ligeramente el aluminio y al aumentar la temperatura se adhiere a la herramienta [17].

Esta defectología es uno de los posibles temas para tratar en proyectos futuros, mejorando dicho proceso o buscando alternativas para fabricar el modelo en aluminio.

En el caso de fabricación aditiva, solo ha habido que tratar los taladros de las cartelas. En la *figura 92* y *figura 93* se observa un pequeño hilo en cada uno de los taladros, esto se debe a que la impresora tiene un movimiento de ida y vuelta, por lo que cuando termina de imprimir una de las zonas, al retroceder la boquilla deja un hilo de material residual en la pieza.



Figura 92. Cartela de hombro con material residual en los taladros.



Figura 93. Cartela de cumbrera con material residual en los taladros.

Para eliminar este material de las cartelas simplemente se utiliza un pasador que extraiga el hilo. Para simplificar el tratamiento se han utilizado los pines de conexión LEGO (*Figura 94*).



Figura 94. PIN empleado para eliminar material residual de la fabricación aditiva.

Tras eliminar los distintos defectos que presentaban las cartelas, se pueden montar ambas en el pórtico. La cartela cumbre tendrá 4 pines de conexión (2 pin LEGO 6558 azul y 2 pin LEGO 32054 negro) como se muestra en la figura 95, dejando el agujero central libre para montar una viga de atado, según se muestra en la figura 96. La diferencia entre pines se debe a que el pórtico utilizado en la asignatura está plegado, siendo el pin negro el que deben colocar los alumnos para su montaje.

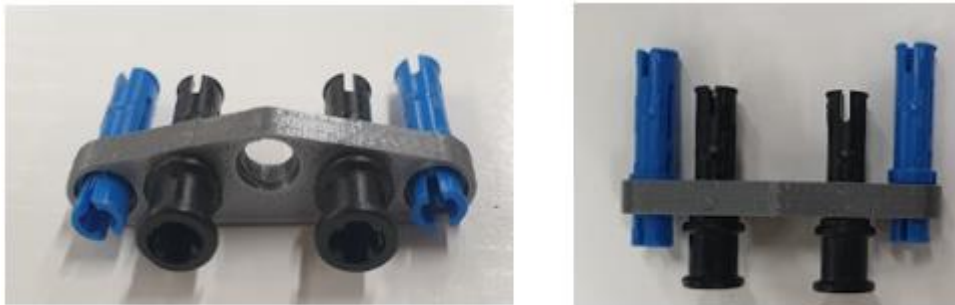


Figura 95. Pines de conexión en la cartela cumbre.



Figura 96. Cartela cumbre montada.

Para la cartela del hombro también se utilizarán 4 pines de conexión, en cambio serán 3 pin LEGO 6558 azul y 1 pin LEGO 32054 negro con la disposición de la figura 97. Así el lado de la cartela conectado al pilar será mediante los 2

pinos azules como se muestra en la *figura 98*. Se dejarán libres los agujeros centrales de igual forma que en el montaje de la cartela cumbre.



Figura 97. Pinos de conexión en la cartela del hombro.

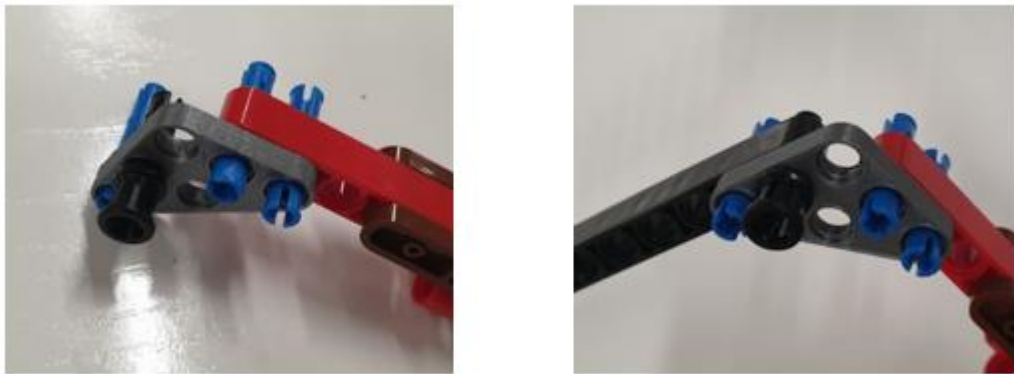


Figura 98. Conexión cartela-pilar (1) y conexión cartela-pilar-dintel (2).

Una vez montadas las cartelas en el pórtico se observa que los pinos no se adaptan a la perfección en los agujeros y es necesario forzar los elementos para ensamblarlos, debido a que los agujeros no son agujeros perfectos *LEGO*, por lo que se plantea cambiar los pinos por otros elementos *LEGO* de unión. En este caso los elementos disponibles son los pinos en forma de cruz de *LEGO*, denominados ejes (*Figura 99*)



Figura 99. Eje LEGO

Las cartelas con los agujeros actuales se pueden unir a estos ejes con forma de cruz, pero se plantea una variedad de diseño para adaptarlos. Este nuevo diseño será modificando varios de los agujeros iniciales por agujeros en forma de cruz tal y como se muestran en la *figura 100* y *figura 101*.



Figura 100. Diseño de la cartela cumbre con cruces.

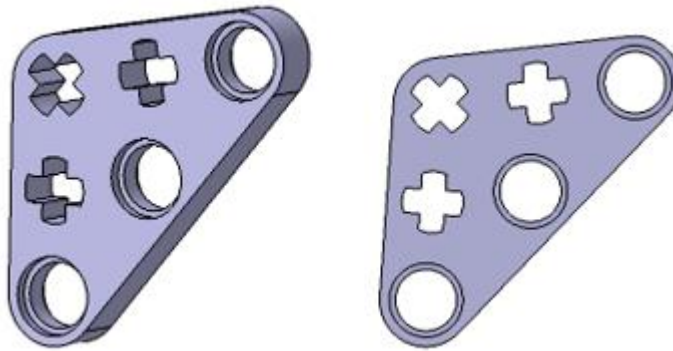


Figura 101. Diseño de la cartela de hombro con cruces.

Las cruces están situadas exactamente donde estaban los anteriores agujeros, situando el centro de estas a 8 mm. Las dimensiones de las cruces se muestran en la *figura 102*.

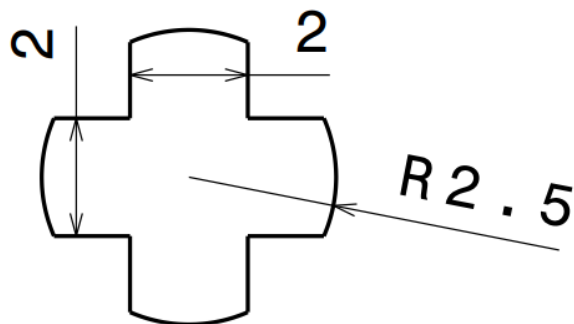


Figura 102. Dimensiones de las cruces LEGO.

Para comprobar esta mejora y por facilidad de fabricación, se decide emplear la fabricación aditiva para ambos diseños con el resultado de la *figura 103* y *figura 104*.

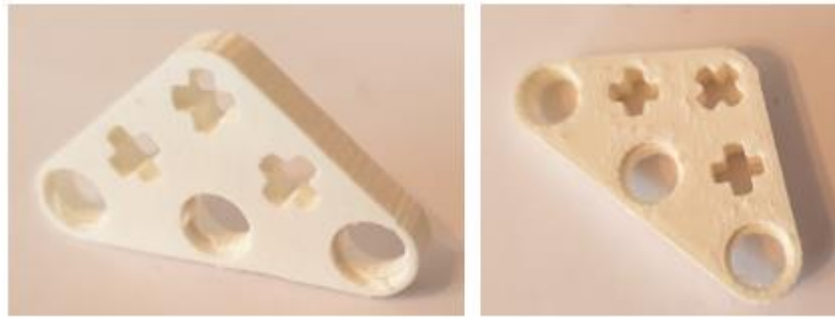


Figura 103. Cartela de hombro con cruces.



Figura 104. Cartela de cumbrera con cruces.

Tras la fabricación de estos modelos, se verifica que los elementos de unión en forma de cruz ensamblan correctamente con el correspondiente eje (Figura 105).



Figura 105. Cartela con cruces ensamblada.

Tras ensamblar todos los elementos, se observa que en la unión entre la cruz de la cartela y el agujero del *liftarm* mediante el eje *LEGO* aparece cierta holgura que podría afectar a la unión.

Capítulo 5. Simulación y ensayo.

5.1. Simulación 3D con CATIA V5

El objetivo de esta simulación va a ser recopilar información del comportamiento de la cartela al aplicar cargas simulando el posible movimiento de una viga en un pórtico real, así como encontrar los puntos débiles y clave del modelo.

Se ha elegido el modelo *dintel_dintel* para la simulación debido a que los ensayos mecánicos se utilizará este modelo y por tanto se podrá realizar una comparación entre simulación y ensayo.

El análisis estructural de la pieza se realizará con el módulo *Generative Structural Analysis* de CATIA v5 (Figura 106).

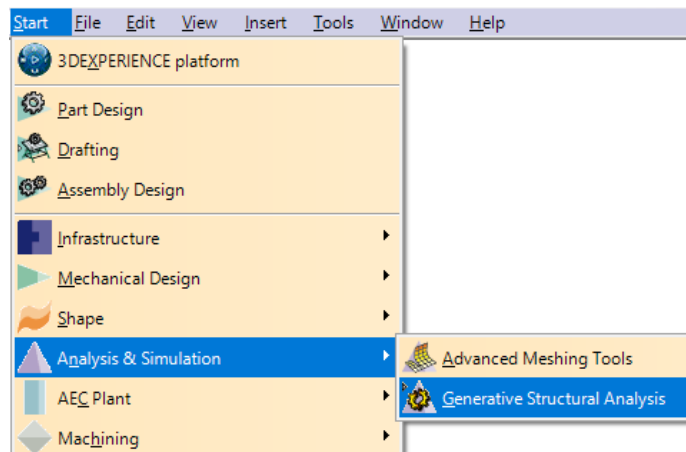


Figura 106. Desplegable para arrancar el módulo de simulación "Generative Structural Analysis"

Antes de comenzar el análisis, la pieza debe tener un material definido. En este caso, y como la fabricación aditiva ha sido con este material, el material que se va a aplicar es el *PLA*.

Para ello, con la pieza seleccionada (Figura 107) en el módulo *PartDesign*, hay que hacer uso del icono *Apply Material*.

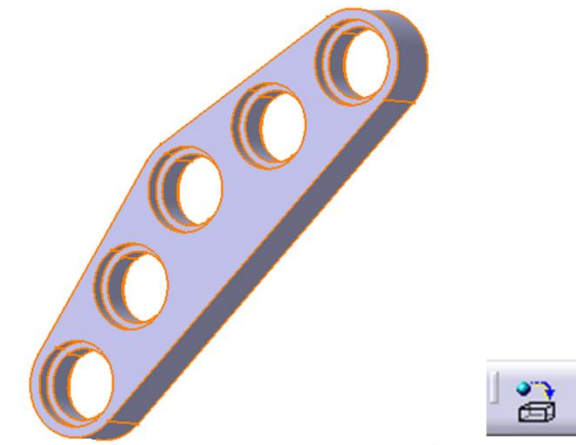


Figura 107. Pieza seleccionada y comando "Apply Material"

De la librería por defecto de CATIA v5 se seleccionará en la pestaña *Other* el tipo de material *Plastic* (Figura 108).

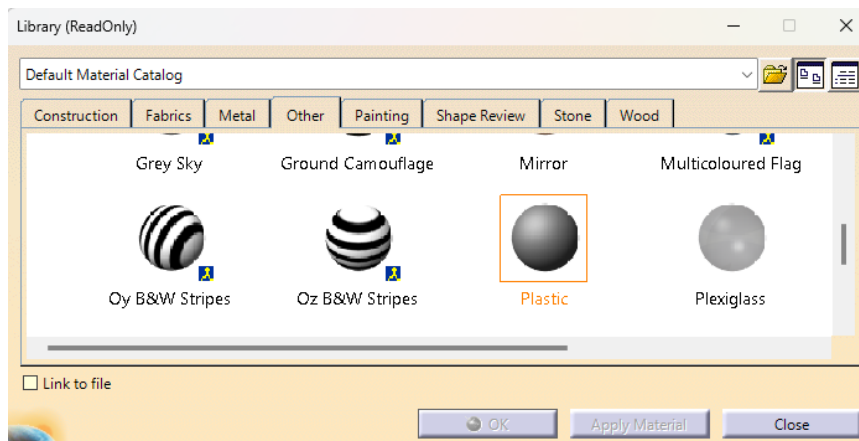


Figura 108. Selección del material a aplicar

Este tipo de material está generalizado, por lo que se modificarán las propiedades para ajustarlas al *PLA* utilizado. En la *Tabla 2* se muestran las propiedades del *PLA* necesarias para el análisis.

PROPIEDAD	VALOR
Módulo de Young	$3,2 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
Coefficiente de Poisson	0,331
Densidad	1240 kg/m^3
Expansión térmica	$6,84 \times 10^{-5} \text{ K}$
Límite elástico	$6 \times 10^7 \text{ N/m}^2$

Tabla 7. Propiedades PLA

Se trasladan las propiedades a CATIA v5 para poder comenzar el análisis (Figura 109).

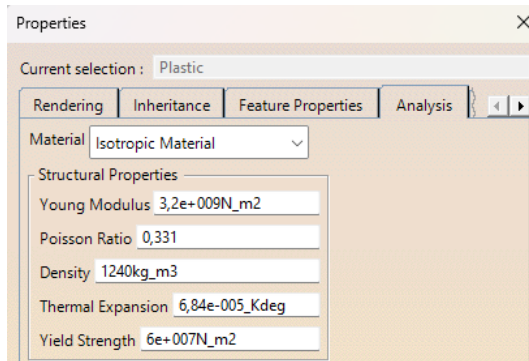


Figura 109. Propiedades del PLA aplicadas en Catia v5

Una vez aplicado el material se abre el módulo *Generative Structural Analysis*, el análisis será estático por lo que se selecciona la opción *Static Analysis* (Figura 110).

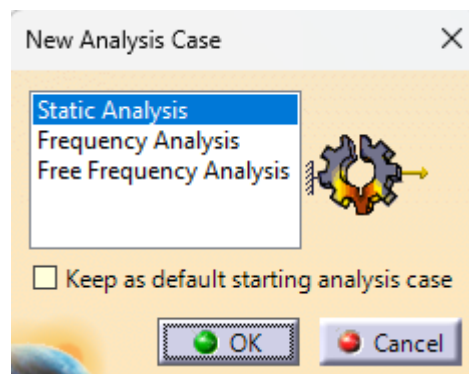


Figura 110. Opciones de análisis

Para el análisis hay que mallar la pieza, se debe tener en cuenta el tamaño de la pieza a la hora de definir el mallado. Dado que las piezas son pequeñas, el mallado deberá ser muy fino, aun así, el resultado se va a escalar, por lo que se utiliza una malla con nodos de la forma *Linear* de *Catia v5* con un tamaño 1 mm (Figura 111).

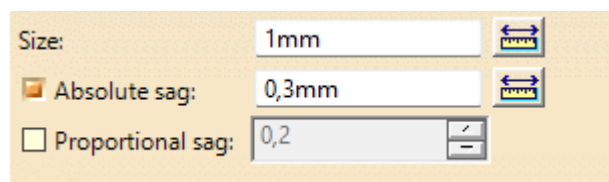


Figura 111. Tamaño del mallado

Se aplican las condiciones de contorno necesarias para el análisis. Como opción al análisis se planteó la simulación del ensamblaje completo de las vigas y cartelas. Debido a la complejidad del análisis se descartó en el presente proyecto, manteniendo la opción como línea futura.

En este caso se busca simular la restricción que generarían los pines *LEGO* al estar conectadas las piezas entre sí.

Se restringe el movimiento y giro en todas las direcciones, salvo el giro en la dirección del eje de cada uno de los agujeros, en este caso en la dirección 3 en coordenadas globales (*Figura 112*).

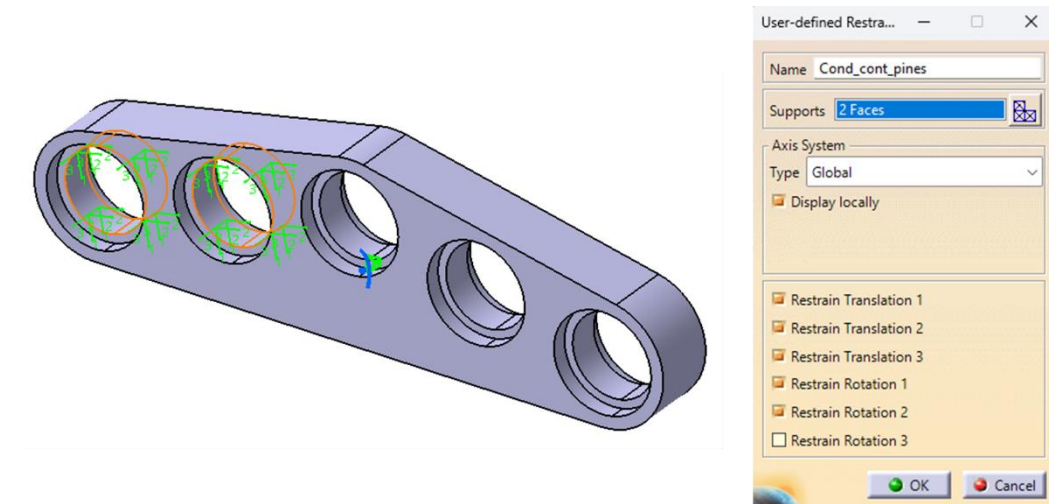


Figura 112. Definición de las condiciones de contorno

Posteriormente, las fuerzas aplicadas en los otros dos agujeros, como se pretende simular el movimiento vertical y hacia abajo de la viga, se aplicará una fuerza vertical positiva en uno de los agujeros y una fuerza opuesta en el otro, así se consigue simular el movimiento en flexión de la viga (*Figura 113* y *Figura 114*).

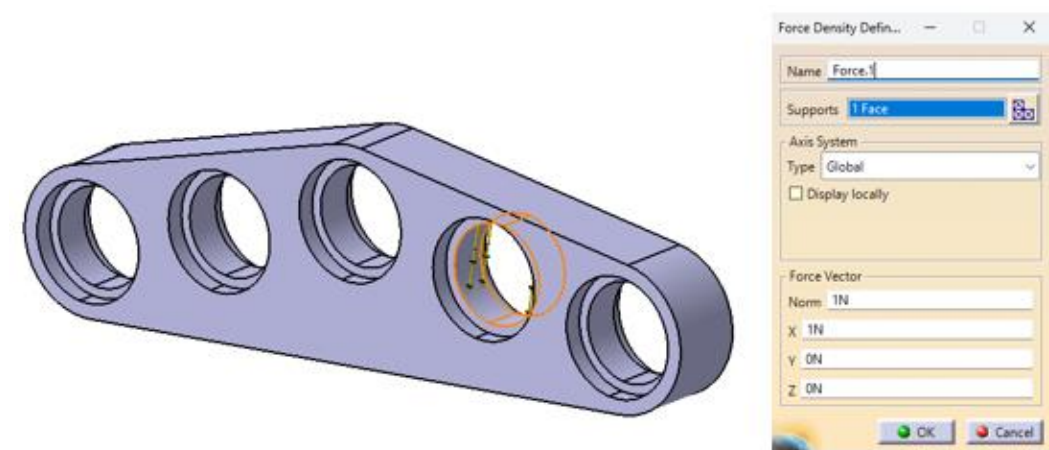


Figura 113. Aplicación de cargas en la primera cara

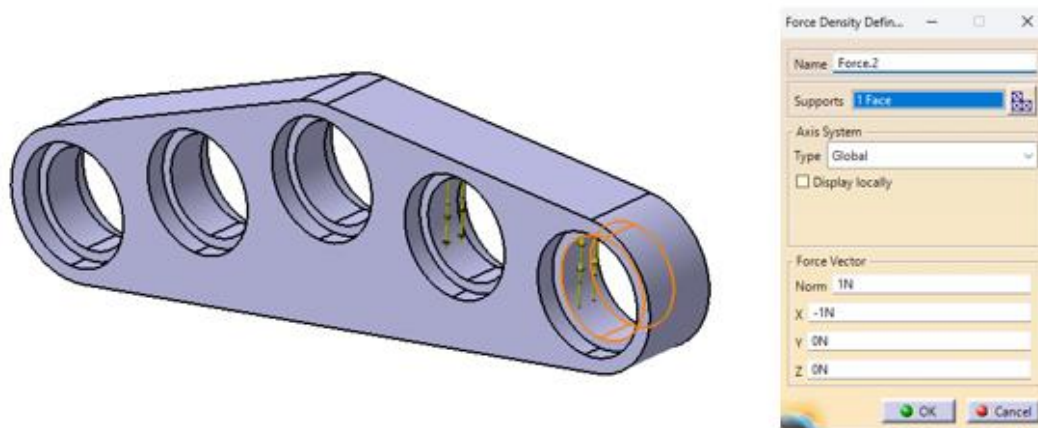


Figura 114. Aplicación de cargas en la segunda cara

Una vez definidas las condiciones de contorno y las fuerzas aplicadas, se realiza la simulación con el comando *Compute* (Figura 115)



Figura 115. Comando Compute

Los resultados de la simulación se pueden ver en la barra de herramientas *Image*, donde se obtendrán las deformaciones, las tensiones de *Von Mises* y los desplazamientos (Figura 116)

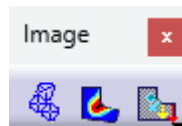


Figura 116. Paleta "Image"

Los resultados de la simulación muestran una relación lineal con la fuerza aplicada, por lo que el comportamiento bajo este tipo de cargas va a ser proporcional y predecible según las condiciones de la simulación.

Por tanto, los resultados obtenidos se podrán escalar y extrapolar para cargas y condiciones similares.

Observando el resultado de tensiones *Von Mises* (Figura 117) se observa cuáles serán las zonas débiles del modelo, siendo la zona interior del agujero central la más solicitada.

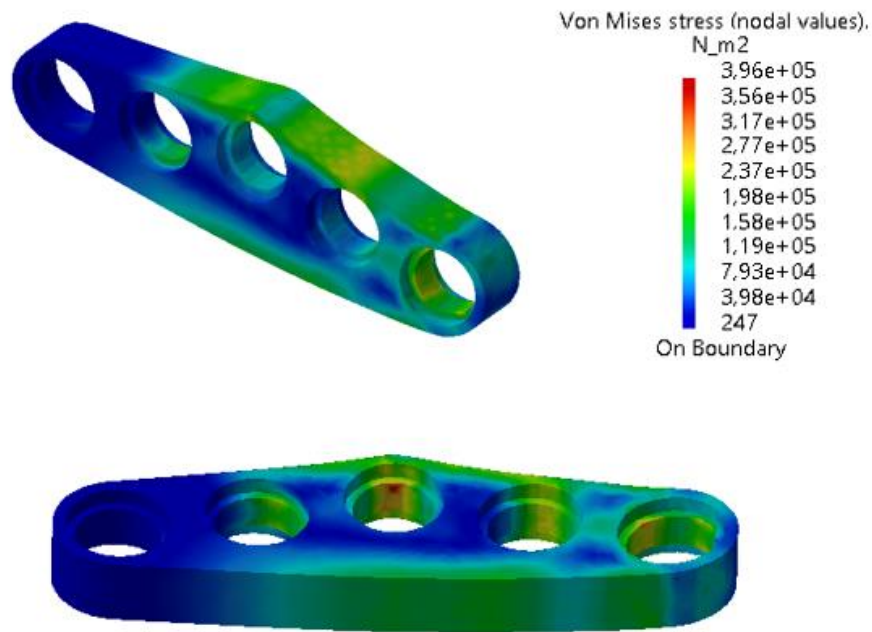


Figura 117. Resultado de tensiones de Von Mises

Debido a que se ha impuesto una restricción total en dos de los agujeros del modelo, la deformación va a aparecer en el lado de aplicación de la carga (Figura 118)

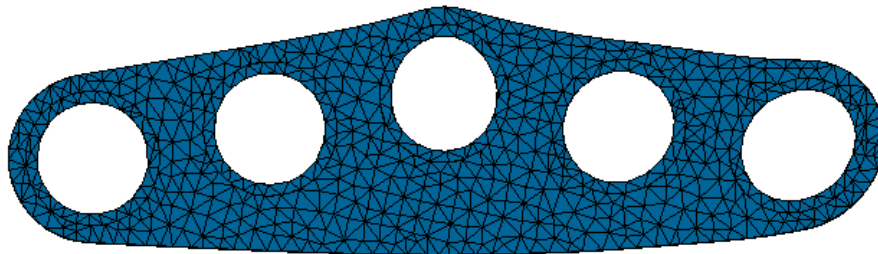


Figura 118. Resultado de deformaciones

El campo de desplazamientos que se obtiene muestra un resultado como las deformaciones, ya que uno de los lados está completamente condicionado y en el otro se aplica la carga (Figura 119)

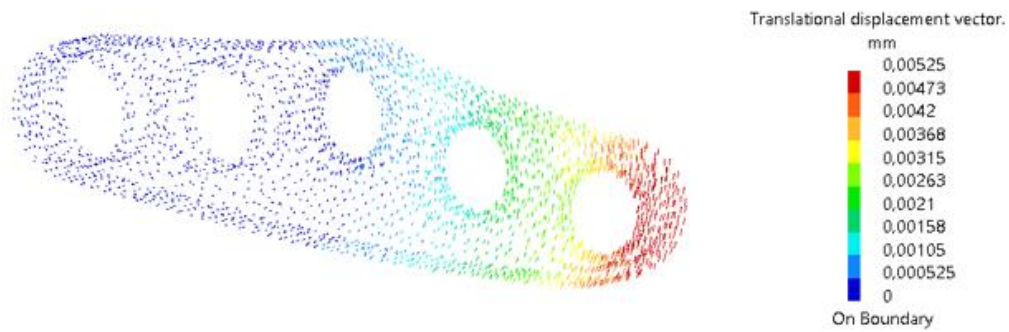


Figura 119. Resultado de desplazamientos

5.1.2. Estudio de convergencia de malla

Los resultados de la simulación revelan que la zona más crítica de la cartela experimenta tensiones máximas cercanas a $4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, equivalente a 0,4 MPa.

Estos valores representan una carga significativa para un componente tan pequeño como son las cartelas, lo que hace plantear la precisión y fiabilidad de los resultados.

En base a esto, se decide hacer un estudio de convergencia de la malla. Este proceso consistirá en ir refinando la malla del modelo e ir viendo cómo varían los valores en función del nivel de refinamiento de la malla.

La primera malla tenía un tamaño de 1 mm (Figura 120), en esta primera variación se aplicará una malla de 0,5 mm.

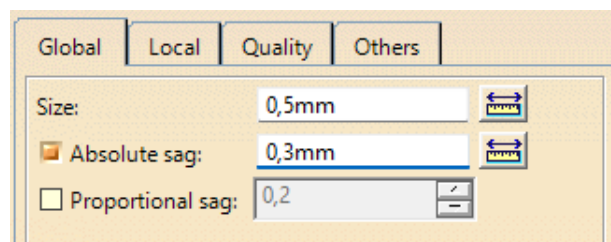


Figura 120. Segundo tamaño del mallado

El resultado de tensiones muestra como el máximo varía en gran magnitud. Sin embargo, las zonas de tensión media (color verde) se mantienen más estables (Figura 121).

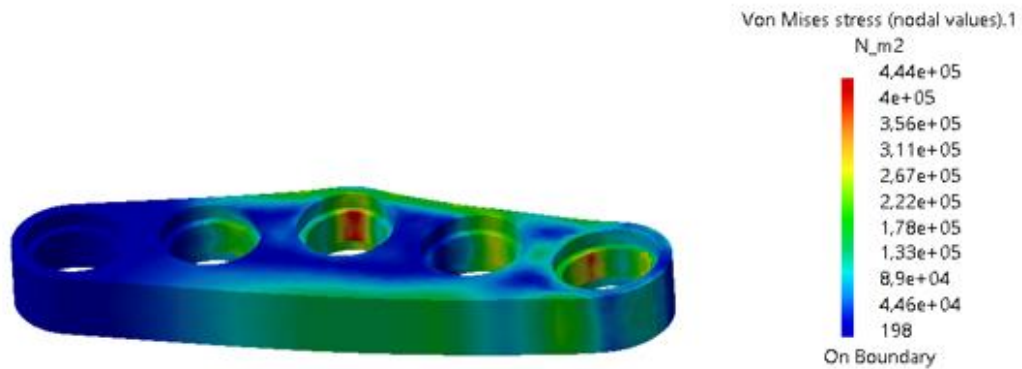


Figura 121. Resultado de tensiones Von-Mises con el segundo mallado

Nuevamente se ajusta el tamaño de malla, ahora de 0,25 mm (Figura 122).

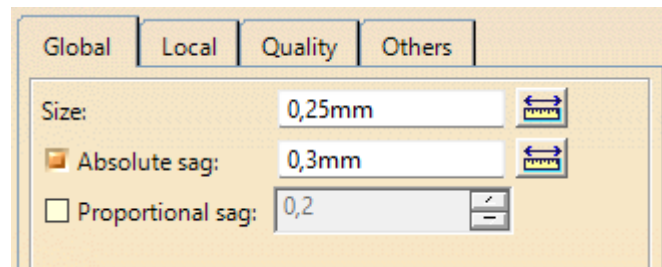


Figura 122. Tercer tamaño del mallado.

Obteniendo el resultado de la figura 123.

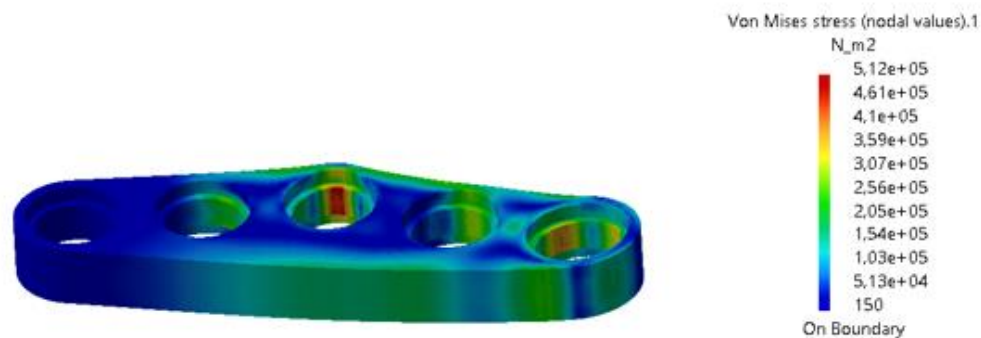


Figura 123. Resultado de tensiones Von Mises con el tercer mallado

Es importante destacar que una malla más fina permite analizar resultados con mayor precisión en detalles locales, lo que podría influir significativamente en los resultados de las tensiones. Sin embargo, también se debe tener en cuenta el equilibrio entre la precisión de la solución y el costo computacional asociado con una malla más fina, en este caso al no realizar una variación exhaustiva en el análisis, los tiempos han sido similares [19].

Tras el análisis, es evidente que la zona crítica de la cartela, donde se producen las tensiones máximas, es pequeña en comparación con el área total de la

cartela. Según se ha ido refinando la malla, se ha ido observando como las tensiones locales de la zona crítica han ido aumentando, evidenciando que es una zona de concentración de tensiones (*Figura 124*).

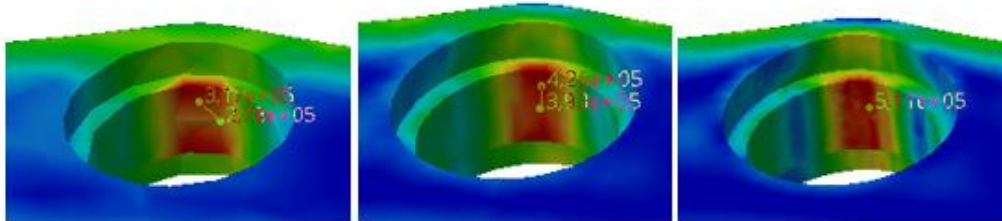


Figura 124. Evolución de tensiones máximas en zona crítica

Por otro lado, los valores de tensión en zonas regularizadas, que representan una medida más generalizada en la cartela, permanecen estables a pesar del refinamiento de la malla. Esto sugiere que la distribución general de tensiones en la cartela no se ve significativamente afectada por el tamaño de los elementos de la malla.

5.2. Ensayo mecánico

Para entender el comportamiento de la pieza mediante fabricación aditiva, se planteó realizar una serie de ensayos para evaluarla. Donde el principal objetivo del ensayo es analizar el comportamiento real de la cartela sometido a cargas externas y evaluar su funcionalidad en la estructura.

El modelo con el que se va a experimentar es la cartela *dintel_dintel*. Para la serie de ensayos, se parte con la pieza fabricada mediante impresión 3D con las características de la *tabla 8*.

CARACTERÍSTICAS MODELO	
Alto de capa	0,12 mm
Espesor de pared	0,6 mm
Relleno	5%

Tabla 8. Características de impresión del modelo ensayado

Este modelo de cartela va a ir acompañado de dos piezas LEGO haciendo de viga, así como los pines que unen éstas con las cartelas. El equipo utilizado es el descrito en el [Capítulo 1, apartado 1.4 \(Utillaje y elementos de ensayo\)](#).

El ensayo se ha llevado a cabo en el laboratorio de Estructuras en la Escuela de Ingenierías Industriales de Valladolid. Antes de realizar el ensayo se ha llevado a cabo la preparación de cada elemento, tratando de situar los elementos de tal manera que su comportamiento simule el que tendría la viga y la cartela en el pórtico de la nave industrial.

Una de las dos vigas LEGO se sitúa sobre la mesa, con la cara plana sin agujeros apoyada en ésta como muestra la *figura 125*.



Figura 125. Disposición del equipo para el ensayo

En la *Figura 125* se puede ver se ha utilizado el sargento para fijar la viga a la mesa, con el apoyo de éste en el extremo más cercano a la cartela. En el extremo opuesto de la otra viga irá situado el gancho, el cual está enganchado de su otro lado a la célula de medición de carga. Esta viga tendrá también la placa acoplada en el primer agujero libre de la viga desde la cartela. Por último, el láser está colocado en la parte inferior, apuntando a la placa. El láser registrará el desplazamiento vertical de la placa.

Una vez configurado el equipo, se procede con el ensayo. Para ello, del extremo inferior de la célula de carga se aplica un ligero esfuerzo hacia abajo (*Figura 126*), en este caso con la propia mano ya que en principio las piezas soportarán cargas bajas.



Figura 126. Procedimiento del ensayo

El ensayo concluye en el momento que falla uno de los elementos, en este caso el elemento que ha fallado ha sido la viga LEGO sobre la que se estaba ejerciendo el esfuerzo.

La sección de fallo ha sido el segundo de los agujeros en los que estaba anclada a la cartela, tal y como muestra la *figura 127* y la *figura 128*.

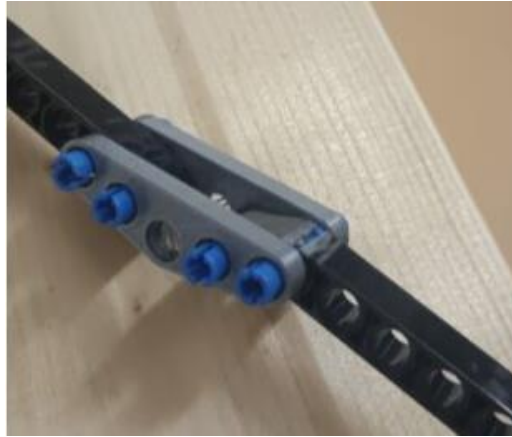


Figura 127. Sección de fallo de la viga LEGO



Figura 128. Detalle de la sección de rotura de la viga LEGO

5.3. Resultados

Se han registrado 1000 datos por segundo para el ensayo, esto ha supuesto trabajo extra ya que a la hora de exportar y analizarlo ha habido que eliminar tanto los datos en los que no se estaba realizando el propio ensayo como el desplazamiento inicial.

Una vez limpiado todos los registros que no aportan ningún valor al estudio, se ha representado el desplazamiento frente al momento, obteniendo el resultado que se muestra en la *tabla 9*, donde se observa que el momento es ligeramente lineal hasta alcanzar 3,4 Nm, tomándose este valor como el máximo momento que soportan los elementos *liftarm* LEGO.

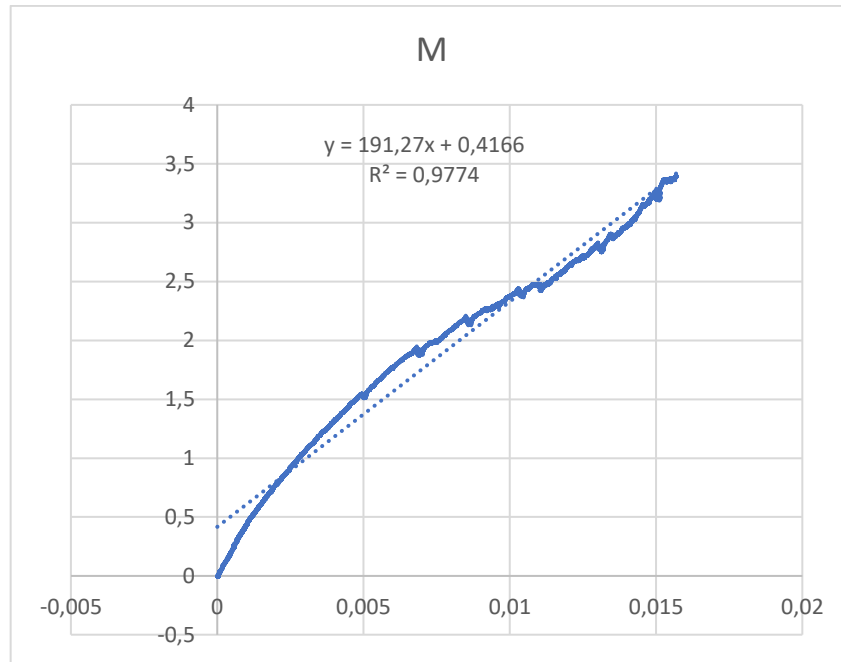


Tabla 9. Resultado de desplazamiento (mm) frente a momento (Nm)

Como conclusión al ensayo es evidente que la cartela diseñada y fabricada es totalmente funcional ya que no rompe frente al *liftarm* LEGO. Se considera que es suficientemente rígida y resistente.

Capítulo 6. Conclusiones

6.1. Conclusiones

En primer lugar, la realización del proyecto destaca que, con unos elementos tan simples como las piezas *LEGO*, generalmente relacionados con el ocio, puede resultar útil para la representación y estudio de modelos a escala de naves industriales o estructuras en general, acercándose a la realidad, tanto en el aspecto visual como en su comportamiento físico.

En lo que se refiere a este proyecto concreto, se puede concluir que los elementos modelados, han resultado totalmente funcionales, cumpliendo con el objetivo de simular el elemento a escala.

Con el resultado de la simulación se puede estimar el comportamiento que tendría cada cartela construida de forma similar y utilizada en una nave industrial, siempre y cuando las cargas a las que esté sometida sean similares a las de la simulación.

6.2. Posibles mejoras y líneas futuras

Una vez terminado todo el proceso de diseño, fabricación y posterior ensayo, se puede recopilar varias mejoras para posibles proyectos futuros comentadas anteriormente.

Para el diseño se puede hacer hincapié en la parametrización de éste, de tal forma que el modelo se actualice completamente con cualquier medida del pórtico, cantidad de pórticos intermedios de la nave deseados o cualquier parámetro que influya en el diseño de la cartela.

En el caso de la fabricación, hacer una búsqueda de alternativas y encontrar una solución óptima para la creación de piezas tan pequeñas.

Finalmente, en el apartado de ensayos y simulación, en este proyecto se ha utilizado únicamente la cartela *dintel_dintel*, por lo que hay un amplio rango de ensayos y simulaciones con los que se podría proceder, desde la cartela dentro del pórtico completo, hasta el caso más amplio simulando y ensayando el comportamiento de la estructura al completo. Esta ampliación se puede llevar a cabo teniendo en cuenta otro tipo de investigaciones que no se han considerado en este proyecto, con el fin de acercar el modelo a situaciones reales.

Una de las posibles ideas sería el análisis de vibraciones de la estructura ya que son importantes de entender para la estabilidad de ésta, o analizar el comportamiento al aplicar cargas térmicas analizando las condiciones meteorológicas que pueden actuar en una estructura real.

Además de todo esto, se puede orientar un futuro proyecto al diseño y cálculo del resto de elementos de unión (unión entre pilares, zapatas...), generando así un diseño personalizado casi completo de la nave utilizando como piezas *LEGO* comerciales únicamente los elementos viga, los pines de unión o las medidas estándar de estas piezas.

6.3. Consideraciones adicionales

En este apartado se va a presentar la planificación temporal total del proyecto, incluyendo un desglose horario por actividades y el diagrama de Gantt correspondiente, así como un presupuesto estimado del proyecto.

6.3.1. Planificación temporal del proyecto

Las actividades que se han ido desarrollando a lo largo del proyecto han sido supervisadas mediante reuniones y contacto diario con los tutores del proyecto Antolín Lorenzana Ibán y Álvaro Magdaleno González, además del soporte facilitado por Álvaro Iglesias Pordomingo y Guillermo Fernández Ordóñez. Cabe destacar que este estudio es una estimación, puesto que la totalidad del proyecto ha sido compaginado con una jornada laboral completa.

A continuación, se muestra de forma esquematizada el desarrollo temporal llevado a cabo para la consecución del proyecto, donde se muestran las principales actividades junto a la duración estimada en horas de cada una de ellas.

1. Estudio previo de la temática (15 noviembre – 5 diciembre)
 - Búsqueda y lectura de antecedentes
 - Recopilación de información relevante
 - Reuniones con el tutor
2. Diseño de los modelos (1 diciembre – 13 diciembre)
 - Diseño de las cartelas en *CATIA v5*
 - Diseño del pórtico en *Studio 2.0*
3. Fabricación de los elementos (16 diciembre – 17 diciembre)
 - Fabricación por corte láser de aluminio
 - Fabricación mediante impresión 3D
4. Prototipado y montaje (18 diciembre – 18 diciembre)
 - Tratamiento mecánico de las cartelas de aluminio
 - Montaje de las cartelas en los pórticos
5. Simulación 3D con *CATIA v5* (7 enero – 13 enero)
6. Ensayos mecánicos (8 enero – 9 enero)
 - Ensayo de la cartela cumbreira
7. Informe final (15 enero – 29 febrero)
 - Redacción del informe
 - Presentación final del proyecto

ACTIVIDAD	DURACIÓN
ESTUDIO PREVIO	83
Búsqueda y lectura de antecedentes	50
Recopilación de información relevante	25
Reuniones con el tutor	8
DISEÑO DE LOS MODELOS	40
Diseño de la cartela en CATIA v5	20
Diseño del pórtico en Studio2.0	20
FABRICACIÓN	15
Corte láser de aluminio	10
Impresión 3D	5
PROTOTIPADO Y MONTAJE	5,5
Tratamiento mecánico de cartelas de aluminio	5
Montaje de cartelas en pórticos	0,5
SIMULACIÓN CATIA v5	15
Simulación de cartela completa	15
ENSAYOS	15
Ensayos mecánicos	15
INFORME FINAL	120
Redacción del proyecto	90
Presentación final del proyecto	30
TOTAL	294

Tabla 10. Planificación temporal del proyecto

El tiempo total estimado del proyecto ha sido de **294 horas**.

En la *tabla 11* se muestra una planificación temporal del proyecto, indicando cada una de las actividades y subactividades.

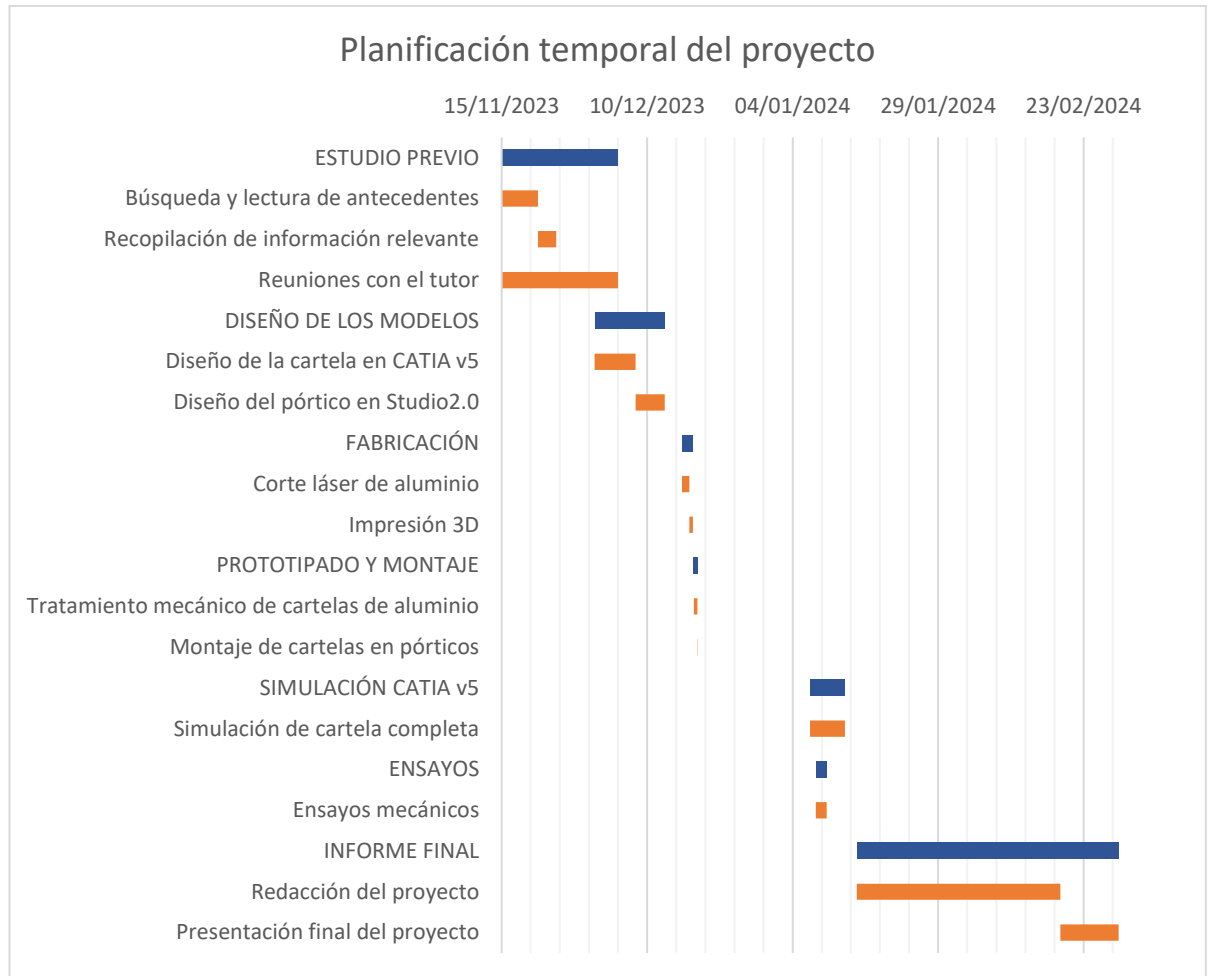


Tabla 11. Planificación temporal del proyecto, diagrama de Gantt

El inicio del proyecto se ha fijado el 15 de noviembre de 2023, tras la realización de todas las actividades el proyecto ha concluido el 29 de febrero de 2024. El proyecto ha tenido una duración total de **106 días**.

6.3.2. Presupuesto del proyecto

Se ha decidido estimar el coste total del proyecto, teniendo en cuenta el salario neto estimado [20] de un ingeniero mecánico recién titulado en función de la duración total de éste. Además, se ha incluido el coste material de las piezas comerciales *LEGO* y de la fabricación en aluminio.

La *tabla 12* muestra el coste de personal estimado.

COSTE DE PERSONAL	
Tipo	Cantidad/año
Sueldo neto	27.500 €
Cotización (28,30%)	7.783 €
TOTAL	35.283 €

Tabla 12. Coste personal anual

Una jornada laboral completa de 8 horas diarias supone anualmente 1826 horas de trabajo. Según esto y el coste anual total del proyecto, el coste unitario total por hora es de 15,06 €/hora.

Por tanto, para una duración total del proyecto de 294 horas se obtiene el coste estimado de la *tabla 13*.

Tipo	Cantidad
Coste unitario por hora	15,06 €
Cotización (28,30%)	4,26 €
TOTAL	5.680,75 €

Tabla 13. Coste imputable de personal del proyecto

Siendo el coste real de personal del proyecto es de **5.680,75 €**.

En la *tabla 14* se detalla el coste por cada elemento *LEGO* y el total de cada uno.

MATERIALES LEGO				
Modelo	Color	Cantidad	Coste ud.	Coste total
<i>Pin 2780</i>	Black	9	0,014 €	0,126 €
<i>Pin 6558</i>	Blue	9	0,024 €	0,216 €
<i>Pin 32062</i>	Red	2	0,016 €	0,032 €
<i>Brick 3700</i>	Light Bluish Gray	3	0,035 €	0,105 €
<i>Brick 3894</i>	Red	2	0,127 €	0,254 €
<i>Plate 3023</i>	Red	3	0,032 €	0,096 €
<i>Plate 4282</i>	Black	4	0,268 €	1,072 €
<i>Technic 32017</i>	Yellow	6	0,164 €	0,984 €
<i>Technic 32124</i>	Black	6	0,048 €	0,288 €
<i>Technic 32124</i>	Reddish Brown	2	0,047 €	0,094 €
<i>Technic 32278</i>	Black	5	0,448 €	2,240 €
<i>Technic 32525</i>	Dark Bluish Gray	2	0,150 €	0,300 €
<i>Technic 32316</i>	Red	2	0,077 €	0,154 €
<i>Technic 41239</i>	Dark Azure	5	0,762 €	3,810 €
<i>Technic 99773</i>	Light Bluish Gray	4	0,116 €	0,464 €

Tabla 14. Coste materiales LEGO

En elementos *LEGO* se ha empleado un total de **10,235€**.

El presupuesto facilitado por la empresa Grupo METASOL de Valladolid (*tabla 15*), para la fabricación de 10 unidades de aluminio mediante corte láser ha sido el siguiente:

Concepto	Cant.	Coste	Total
Fabricación pieza s/p C100 en aluminio e = 3 mm	10	0,444 €	4,440 €
Fabricación pieza s/p C200 en aluminio e = 3 mm	200	0,888 €	177,600 €
TOTAL			182,040 €

Tabla 15. Coste total de fabricación en aluminio

De forma estimada, y en base a otros proyectos de similares características y duración, se ha añadido un coste indirecto total de **300€**, con relación al posible consumo energético, consumo de combustible por desplazamiento, etc.

Los costes totales serán la suma de todos los costes directos más indirectos (tabla 16).

COSTE TOTAL	
Personal	5.680,75 €
Material	192,28 €
Coste indirecto estimado	300,00 €
TOTAL	6.173,03 €

Tabla 16. Coste total del proyecto

El coste total del presente proyecto asciende a **6.173,03€**.

Referencias

- [1] «10 pasos en la Construcción de Naves Industriales» [En línea]. Available: <https://www.mekanaves.com/> [Último acceso: 18 de noviembre de 2023]
- [2] «Software de análisis y dimensionamiento de estructuras» [En línea]. Available: <https://www.dlupal.com/es/descargas-e-informacion/ejemplos-y-tutoriales/modelos-para-descargar/003152> [Último acceso: 12 de febrero de 2024]
- [3] «The LEGO History» [En línea]. Available: <https://www.lego.com/en-us/history> [Último acceso: 2 de diciembre de 2023]
- [4] «¿Qué es LEGO® Technic™?» [En línea]. Available: <https://www.lego.com/es-es/themes/technic/about> [Último acceso: 11 de febrero de 2024]
- [5] J. K. Monash, «Chemistry of Lego,» [En línea]. Available: <https://jameskennedymonash.wordpress.com/2014/07/15/how-arelego-bricks-made-the-chemistry-of-lego/> [Último acceso: 11 febrero de 2024]
- [6] J. Retortillo González, *Propuesta de un puesto de prácticas a escala sobre el desarrollo del proceso constructivo de una nave industrial*, Trabajo Fin de Grado, Universidad de Valladolid, 2023.
- [7] Bohorquez, A C, Sierra C, M, & Lemus, J. *The influence of a aging thermal treatment on the mechanical properties of 6061 T6 and 6063 T5 aluminums*. Chile, 2010.
- [8] Kassimali, A., Galán, A. A. A., & Mellado, J. F. H. *Análisis estructural*. Cengage Learning, 2015.
- [9] Información recopilada de la web <https://grabcad.com/library>
- [10] Bachs, L., J. Cuesta, and N. Carles. *Aplicaciones industriales del láser* / L. Bachs, J. Cuesta, N. Carles. Barcelona: Marcombo, 1988.
- [11] Cuesta, Alberto. *Tecnología láser: aplicaciones industriales* / Alberto Cuesta. Barcelona: Mancorbo, 2010.
- [12] Muñoz Arias, S. *Polimetilmetacrilato (PMMA)*, Universidad EIA, 2022.
- [13] Serna C. L, Rodríguez de S. A, Albán A. F. *Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones*. inycomp, 2011
- [14] Vásquez Angulo, José Antonio. *Análisis y diseño de piezas de máquinas con CATIA V5* / José Antonio Vásquez Angulo. 2a ed. Bilbao: Marcombo, 2012.
- [15] «Diseño para impresión 3D, altura de capa» [En línea]. Available: <https://www.luisllamas.es/altura-de-capas/> [Último acceso: 16 de enero de 2024]

[16] Hernández-Castellano, P. M., Gutiérrez Barcenilla, A., Martínez Rivero, M. D., Marrero-Alemán, M. D., Paz Hernandez, R., Suárez García, L. A., & Ortega García, F. *Tecnologías de fabricación aditiva*. Servicio de Publicaciones y Difusión Científica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2018.

[17] M. Llopis Morales, *Lubricación del contacto aluminioacero con líquidos iónicos en atmósfera controlada*, Trabajo Fin de Grado, Universidad Politécnica de Cartagena, 2016

[18] Bermúdez, M.D., Jiménez, A.E., Martínez, G. *Study of surface interactions of ionic liquids with aluminium alloys in corrosion and erosion–corrosion processes*. Applied Surface Science, 2007.

[19] Eryldiz, M. *Estimating Mechanical Behavior of Scaffolds with Graded Porosity by Finite Element Analysis*. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (28), 515-518, 2021.

[20] Información recopilada de la web <https://www.seg-social.es/wps/portal/wss/internet/Trabajadores/CotizacionRecaudacionTrabajadores/36537> [Último acceso: 18 de febrero de 2024]

Anexos

Anexo 1. Planos

Anexo 2. Modelos 3D

Anexo 3. Fichas Técnicas

Anexo 4. Manual de montaje del pórtico *LEGO*

H G F E D C B A

4

3

2

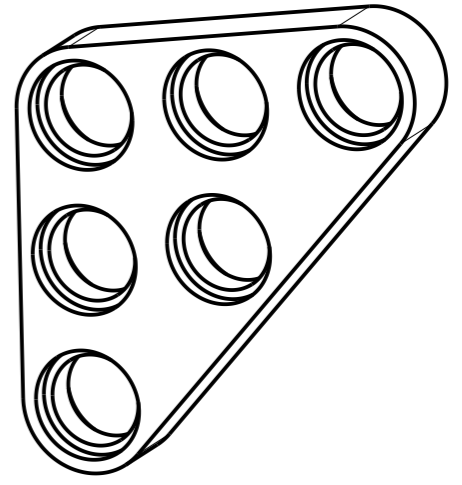
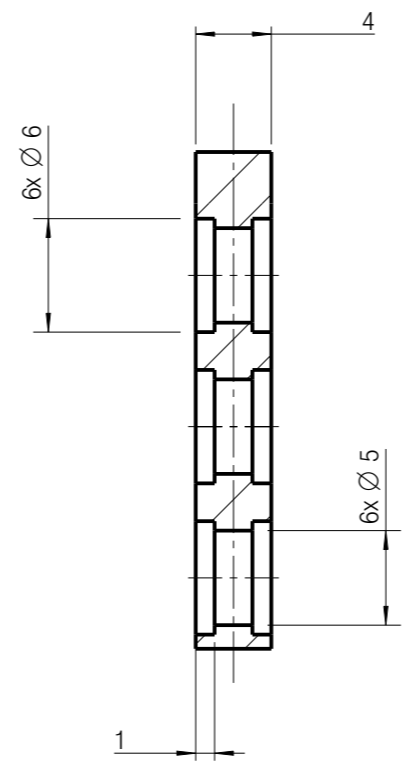
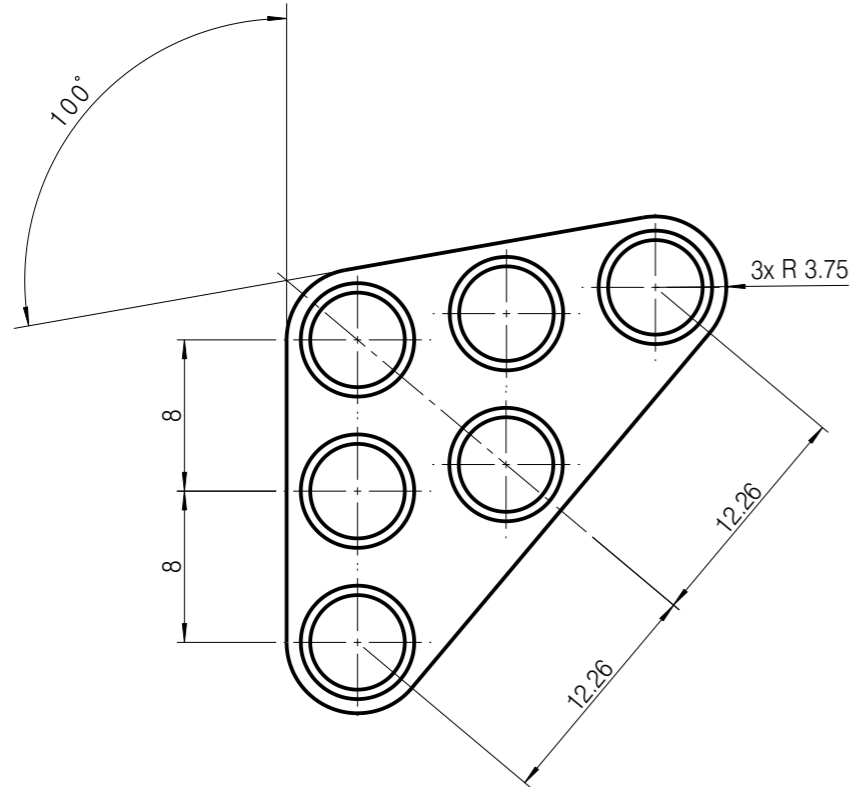
1

4

3

2

1



Component Name: Cartela hombro "pilar_dintel"		Universidad de Valladolid		
		DENOMINACION DISEÑO Y SIMULACIÓN DE CARTELAS PARA PÓRTICOS A ESCALA REDUCIDA HECHOS MEDIANTE PIEZAS ENSAMBLABLES		
SCALE 1:1	DATE 17/12/2023	ASIGNATURA <i>Trabajo Fin de Grado</i>	SHEET 1/1	
	Apellidos y Nombre: AROZAMENA CARRETERO, JESÚS ALFONSO		Titulacion: Ingeniería Mecánica	
			SIZE A3	

H G F E D C B A

H

G

F

E

D

C

B

A

4

3

2

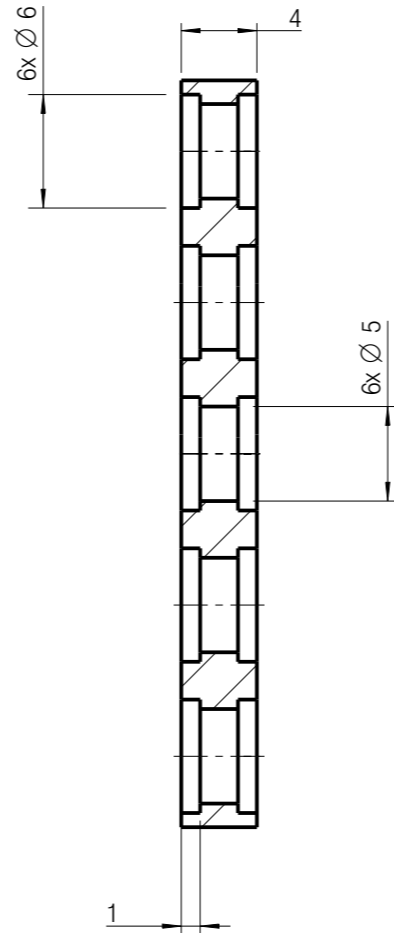
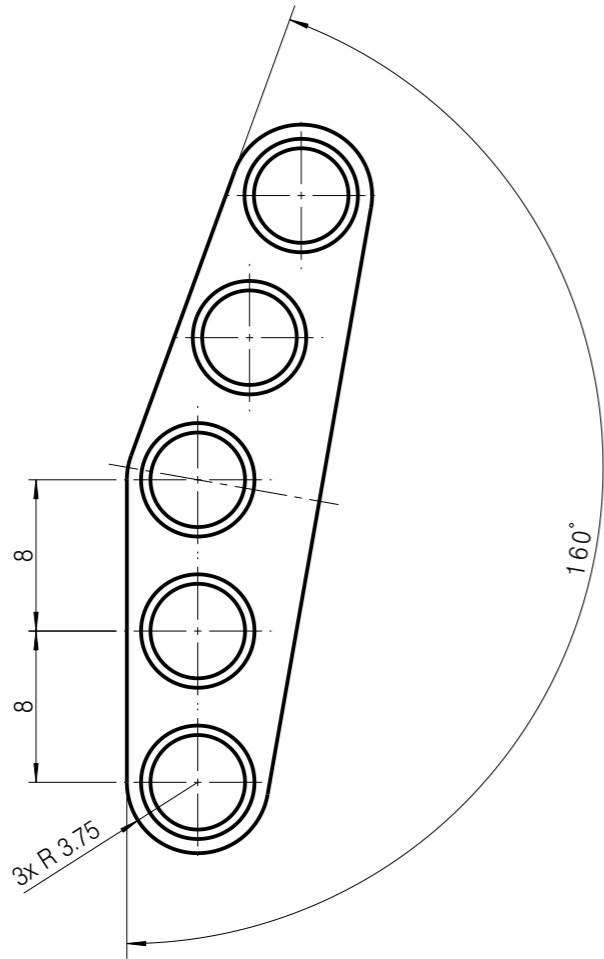
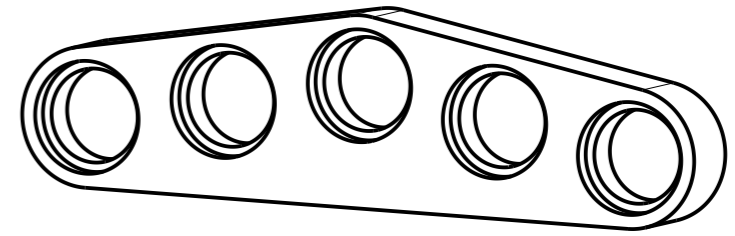
1

4

3

2

1



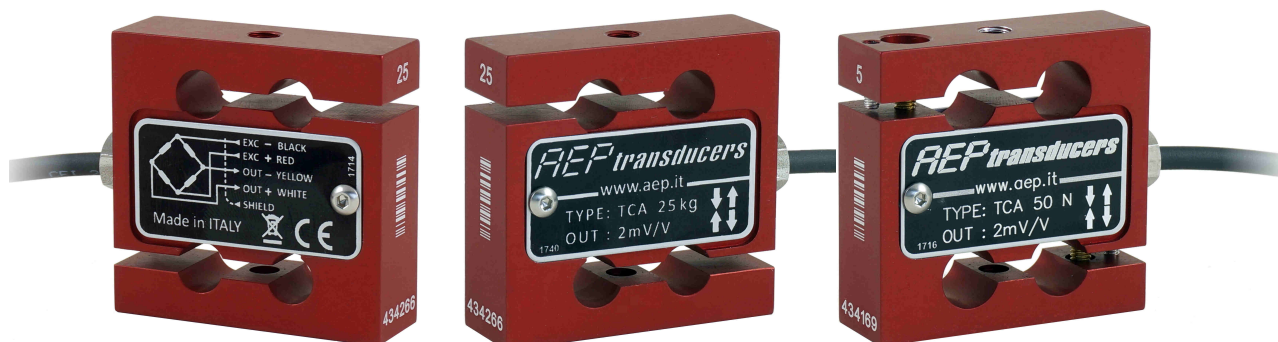
Component Name: Cartela cumbrera "dintel_dintel"		Universidad de Valladolid		
		DENOMINACION DISEÑO Y SIMULACIÓN DE CARTELAS PARA PÓRTICOS A ESCALA REDUCIDA HECHOS MEDIANTE PIEZAS ENSAMBLABLES		
		SCALE 1:1	DATE 17/12/2023	ASIGNATURA <i>Trabajo Fin de Grado</i>
	Apellidos y Nombre: AROZAMENA CARRETERO, JESÚS ALFONSO			Titulacion: Ingeniería Mecánica
				SHEET 01/1
				SIZE A3

H

G

B

A



Linearità - Isteresi
 $\leq \pm 0.03\%$
 Linearity - Hysteresis

STOP PROTEZIONE CONTRO I SOVRACCARICHI
 OVERLOAD PROTECTION

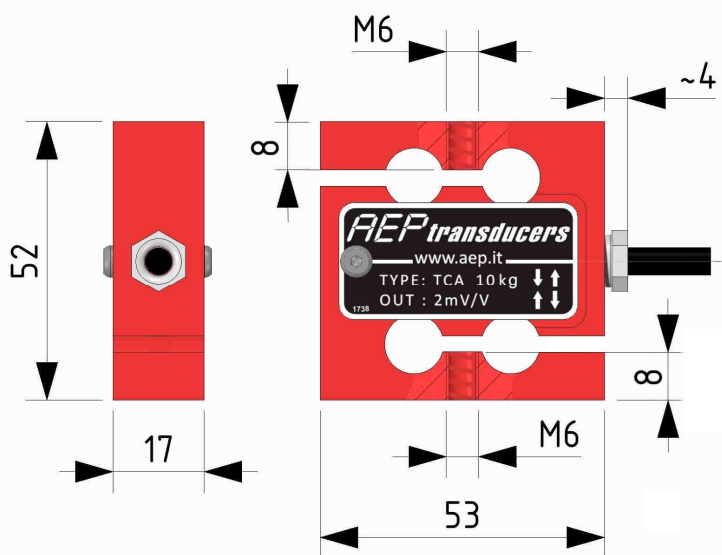
FACILE APPLICAZIONE
 EASY APPLICATION

Download on www.aep.it
CE RoHS

Cella di carico estensimetrica in ALLUMINIO per la misura di carichi statici e dinamici in **COMPRESSIONE** e **TRAZIONE**
 ALUMINIUM strain gages Load cell for the measurement of static and dynamic loads in **COMPRESSION** and **TENSION**

Dimensioni *Dimensions*

[mm]



CODICE <i>CODE</i>	Carico nominale <i>Nominal load</i>	Frequenza naturale <i>Natural frequency</i>
CTCA1K5	1 kg	~ 0.22 kHz
CTCA2K5	2 kg	~ 0.50 kHz
CTCA5K5	5 kg	~ 0.75 kHz
CTCA10K5	10 kg	~ 1.00 kHz
CTCA25K5	25 kg	~ 1.50 kHz
CTCA50K5	50 kg	~ 2.00 kHz

Dati Tecnici

Technical Data

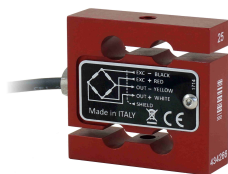


CARICO NOMINALE	NOMINAL LOAD	1 ⁽¹⁾ - 2 ⁽¹⁾ - 5 ⁽¹⁾ kg ⁽²⁾ 10 - 25 - 50 kg ⁽²⁾
SENSIBILITA' NOMINALE	NOMINAL SENSITIVITY	2 mV/V
TOLLERANZA DI CALIBRAZIONE	SENSITIVITY TOLERANCE	≤ ± 0.1%
EFFETTO TEMPERATURA (10 °C)	TEMPERATURE EFFECT (10 °C)	
a) sullo zero	a) on zero	≤ ± 0.025 %
b) sulla sensibilità	b) on sensitivity	≤ ± 0.021 %
LINEARITA'	LINEARITY	≤ ± 0.03 %
ISTERESI	HYSTERESIS	≤ ± 0.03 %
RIPETIBILITA'	REPEATABILITY	≤ ± 0.01 %
RESISTENZA DI INGRESSO	INPUT RESISTANCE	440 ± 20 Ω
RESISTENZA DI USCITA	OUTPUT RESISTANCE	350 ± 2 Ω
RESISTENZA DI ISOLAMENTO	INSULATION RESISTANCE	>5 GΩ
BILANCIAMENTO DI ZERO	ZERO BALANCE	≤ ± 1 %
ALIMENTAZIONE DI RIFERIMENTO	RECOMMENDED SUPPLY VOLTAGE	10 V
ALIMENTAZIONE NOMINALE	NOMINAL SUPPLY VOLTAGE	1-15 V
ALIMENTAZIONE MAX.	MAXIMUM SUPPLY VOLTAGE	18 V
VALORI MECCANICI LIMITE RIFERITI AL CARICO NOMINALE:	MECHANICAL LIMIT VALUES REFERRED TO NOMINAL LOAD:	
a) carico di servizio	a) service load	120 %
b) carico limite	b) max permissible load	150 %
c) carico di rottura	c) breaking load	>300 %
d) massimo carico trasversale	d) max transverse load	50 %
e) carico dinamico limite	e) max permissible dynamic load	50 %
FRECCIA MAX. AL CARICO NOMINALE	DISPLACEMENT AT NOMINAL LOAD	~ 0.3 mm
TEMPERATURA DI RIFERIMENTO	REFERENCE TEMPERATURE	+23 °C
CAMPO NOMINALE DI TEMPERATURA	TEMPERATURE NOMINAL RANGE	-10 / +40 °C
TEMPERATURA DI ESERCIZIO	SERVICE TEMPERATURE	-20 / +70 °C
TEMPERATURA DI STOCCAGGIO	STORAGE TEMPERATURE	-20 / +80 °C
PESO	WEIGHT	~ 0.3 kg
CLASSE DI PROTEZIONE (EN 60529)	PROTECTION CLASS (EN 60529)	IP20
MATERIALE DELLA CELLA	EXECUTION MATERIAL	Alluminio / Aluminium
LUNGHEZZA CAVO	CABLE LENGTH	3 m
TESTE A SNODO SFERICO CONSIGLIATE	RECOMMENDED KNUCKLE JOINTS	DURBAL EM6

⁽¹⁾ Complete di protezione contro i sovraccarichi in TRAZIONE e COMPRESSIONE (Max. 500% F.S.).
Supplied with overload protection TENSION and COMPRESSION (Max. 500% F.S.).

⁽²⁾ A richiesta calibrazioni in N.
N calibrations on request

Collegamenti Elettrici Electrical Connections



Load Cell	OUTPUT	CABLE	CAVO
	EXCITATION+ EXCITATION - OUTPUT+ OUTPUT-	Red Black White Yellow Shield ⁽³⁾	Rosso Nero Bianco Giallo Schermo ⁽³⁾

⁽³⁾ Collegato al corpo della cella di carico
Connected to the body of the load cell.

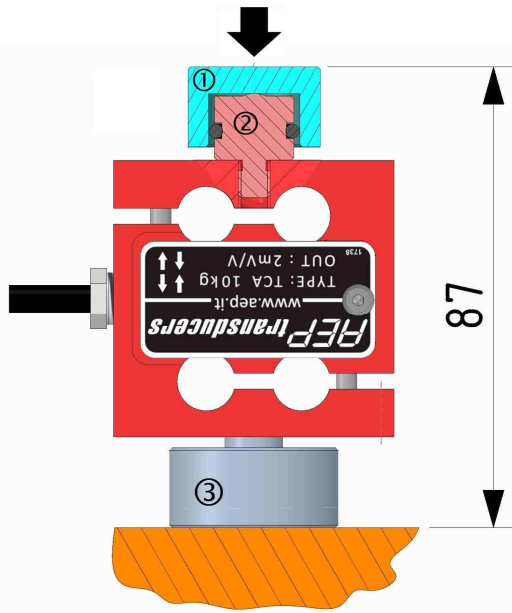
Cavo schermato PVC 70°C, Ø 4.2mm a 4 conduttori stagnati

PVC 70°C shielded cable, \varnothing 4.2mm with 4 tinned conductors.

Applicazioni

Applications

COMPRESSIONE COMPRESSION

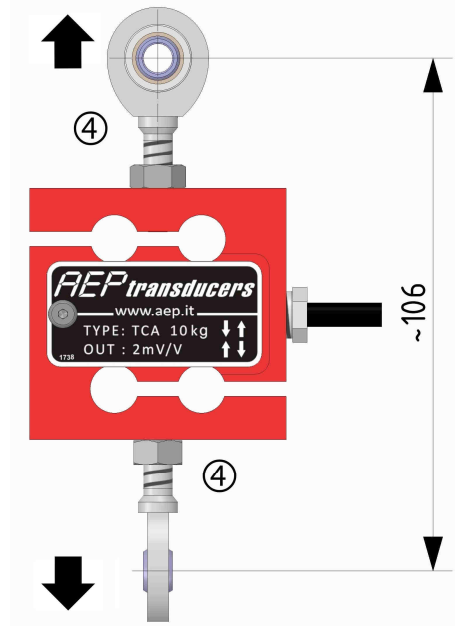


ATTENZIONE

Verificare che la forza generata durante il montaggio degli accessori non superi il carico nominale.

Il peso del cavo può influire sulla misura, è pertanto consigliabile posizionarlo nella zona fissa, dalla parte opposta al carico.

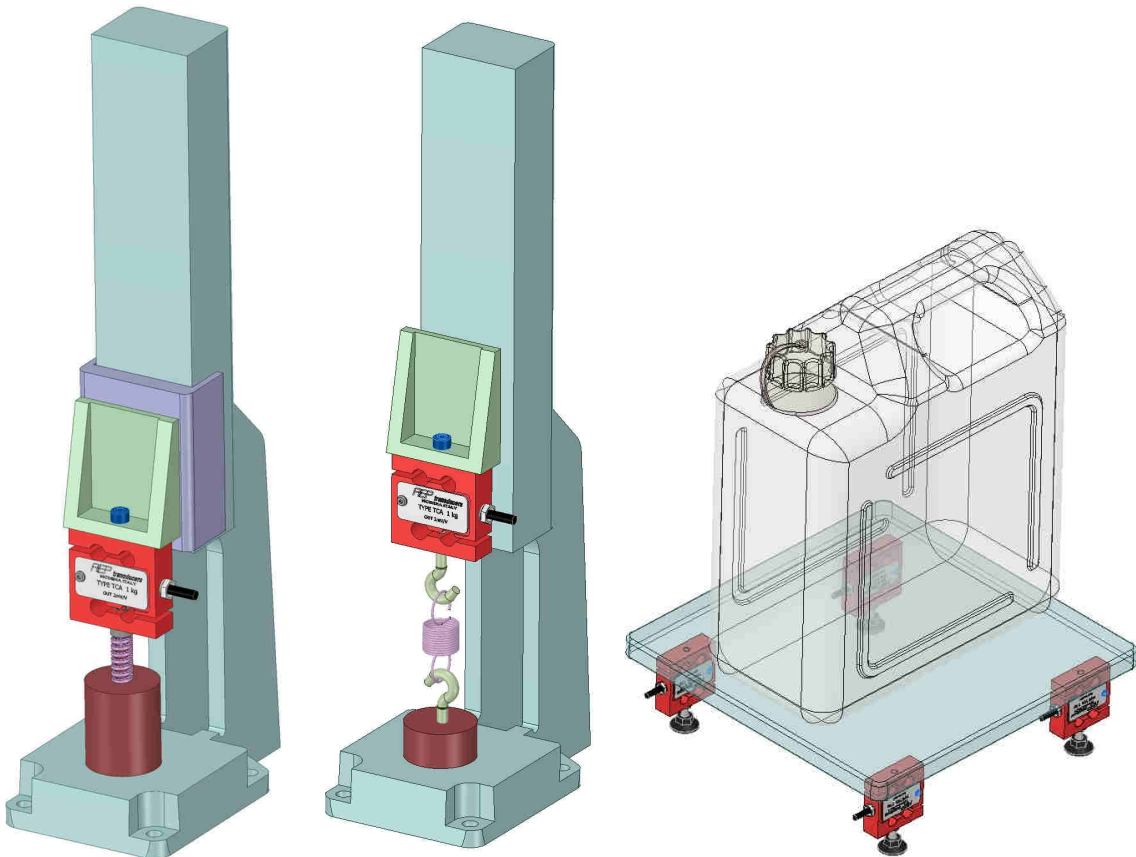
TRAZIONE TENSION



WARNING

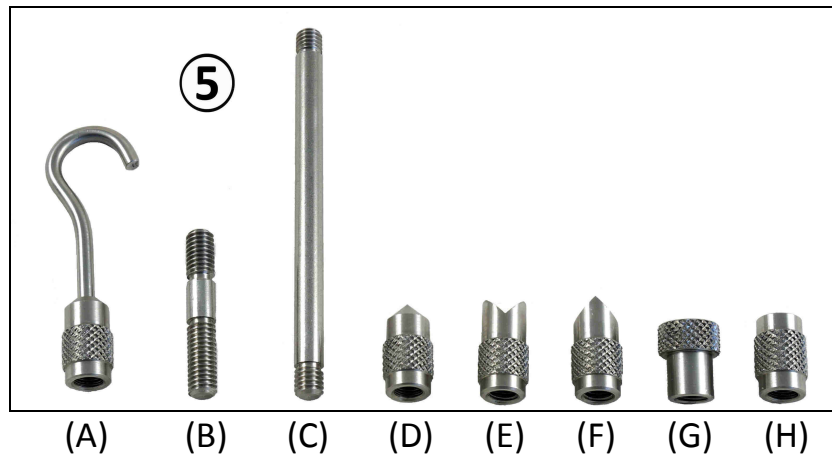
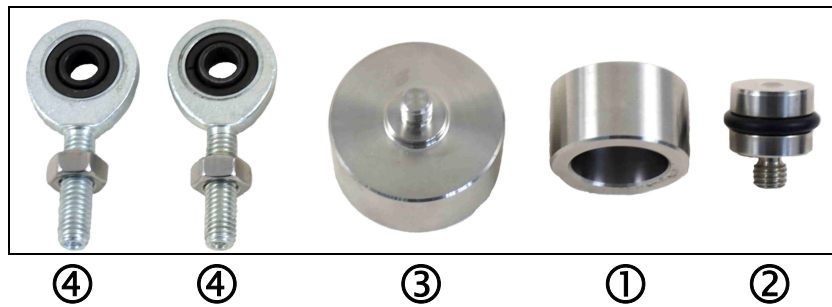
Be sure that the force exerted when assembling accessories does not exceed nominal load.

Cable weight can influence measurement, it is therefore recommended to place it at the opposite site of the load.





CODE:		ACCESSORI (opzionali)	ACCESSORIES (optional)
CTIC13	①	Testa di carico.	Loading head.
CTS18M6	②	Testa di carico sferica.	Spherical loading head.
CBC32M6	③	Base di carico.	Mounting plate.
CACCEM6	④	Teste a snodo sferico.	Knuckle joints.
KITCT	⑤	<p>KIT di accessori per eseguire prove in COMPRESSIONE e TRAZIONE sui materiali.</p> <p>(A) Gancio per prove a trazione. (B) Prolunga filettata corta. (C) Prolunga filettata lunga. (D) Punta conica per prove a compressione. (E) Punta dentata per prove a compressione. (F) Punta a scalpello per prove a compressione. (G) Punta piana per prove a compressione. (H) Bussola filettata.</p>	<p>Accessory KIT for TENSION and COMPRESSION test of materials.</p> <p>(A) Hook for tension test. (B) Short extension threaded. (C) Long extension threaded. (D) Conical tip for compression test. (E) Notched tip for compression test. (F) Chisel tip for compression test. (G) Flat Tip for compression test. (H) threaded sleeve.</p>



CP08MHT80 OCP801H0180

CP24MHT80 OCP162H0180

CP35MHT80 OCP352H0180

High-Performance Distance Sensor



Operating Instructions

3. Technical Data

	CP08MHT80	CP24MHT80	CP35MHT80
Optical Data			
Working Range	30...80 mm	40...160 mm	50...350 mm
Measuring Range	50 mm	120 mm	300 mm
Resolution	< 8 μm	< 20 μm	< 50 μm
Resolution (Speed-Mode)	< 12 μm	< 30 μm	< 80 μm
Linearity	0,1 %	0,1 %	0,15 %
Linearity (Speed-Mode)	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Light Source	Laser (red)	Laser (red)	Laser (red)
Wave Length	660 nm	660 nm	660 nm
Laser Class	2	2	2
Service Life (25 °C)	100000 h	100000 h	100000 h
max. Ambient Light	10000 Lux	10000 Lux	10000 Lux
Electrical Data			
Supply Voltage	18...30 V DC	18...30 V DC	18...30 V DC
Light Spot Size at begin working range	0,5×1 mm	0,5×1,2 mm	0,6×1,5 mm
Light Spot Size at end working range	1×2 mm	1×2,5 mm	1,5×4 mm
Current Consumption (U _b = 24 V)	< 80 mA	< 80 mA	< 80 mA
Measuring rate	1500/s	1500/s	800/s
Response Time	660 μs	660 μs	1250 μs
Response Time (Resolution-Mode)	1660 μs	1660 μs	2500 μs
Temperature Drift	< 5 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$	< 10 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$	< 25 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$
Temperature Range	-25...50 °C	-25...50 °C	-25...50 °C
Analog Output	0...10 V	0...10 V	0...10 V
Current Output Load Resistance	< 1 mA	< 1 mA	< 1 mA
Analog Output	4...20 mA	4...20 mA	4...20 mA
Current Output Load Resistance	< 500 Ohm	< 500 Ohm	< 500 Ohm
Voltagedrop PNP-Error Output	< 2,5 V	< 2,5 V	< 2,5 V
Switching Current PNP-Error Output	< 200 mA	< 200 mA	< 200 mA
Short-Circuit Protection	yes	yes	yes
Reverse Polarity Protection	yes	yes	yes
Interface	RS-232	RS-232	RS-232
Baud Rate	38400 Bd	38400 Bd	38400 Bd
Protocol	8 N 1	8 N 1	8 N 1
Mechanical Data			
Adjustment	Teach-In	Teach-In	Teach-In
Housing	Plastic	Plastic	Plastic
Protection Mode	IP67	IP67	IP67
Connection	M12×1	M12×1	M12×1
Protection Class	III	III	III
FDA Accession Number	0820588-000	0820589-000	0820590-000

Reference material: Kodak white 90 % remission

	OCP801H0180	OCP162H0180	OCP352H0180
Optical Data			
Working Range	30...80 mm	40...160 mm	50...350 mm
Measuring Range	50 mm	120 mm	300 mm
Resolution	< 8 μm	< 20 μm	< 50 μm
Resolution (Speed-Mode)	< 12 μm	< 30 μm	< 80 μm
Linearity	0,1 %	0,1 %	0,15 %
Linearity (Speed-Mode)	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Light Source	Laser (red)	Laser (red)	Laser (red)
Wave Length	660 nm	660 nm	660 nm
Laser Class	1	1	1
Service Life (25 °C)	100000 h	100000 h	100000 h
max. Ambient Light	10000 Lux	10000 Lux	10000 Lux
Electrical Data			
Supply Voltage	18...30 V DC	18...30 V DC	18...30 V DC
Light Spot Size at begin working range	0,5×1 mm	0,5×1,2 mm	0,6×1,5 mm
Light Spot Size at end working range	1×2 mm	1×2,5 mm	1,5×4 mm
Current Consumption (U _b = 24 V)	< 80 mA	< 80 mA	< 80 mA
Measuring rate	1000/s	1000/s	500/s
Response Time	1000 μs	1000 μs	2000 μs
Response Time (Resolution-Mode)	2000 μs	2000 μs	4000 μs
Temperature Drift	< 5 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$	< 10 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$	< 25 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$
Temperature Range	-25...50 °C	-25...50 °C	-25...50 °C
Analog Output	0...10 V	0...10 V	0...10 V
Current Output Load Resistance	< 1 mA	< 1 mA	< 1 mA
Analog Output	4...20 mA	4...20 mA	4...20 mA
Current Output Load Resistance	< 500 Ohm	< 500 Ohm	< 500 Ohm
Voltagedrop PNP-Error Output	< 2,5 V	< 2,5 V	< 2,5 V
Switching Current PNP-Error Output	< 200 mA	< 200 mA	< 200 mA
Short-Circuit Protection	yes	yes	yes
Reverse Polarity Protection	yes	yes	yes
Interface	RS-232	RS-232	RS-232
Baud Rate	38400 Bd	38400 Bd	38400 Bd
Protocol	8 N 1	8 N 1	8 N 1
Mechanical Data			
Adjustment	Teach-In	Teach-In	Teach-In
Housing	Plastic	Plastic	Plastic
Protection Mode	IP67	IP67	IP67
Connection	M12×1	M12×1	M12×1
Protection Class	III	III	III
FDA Accession Number	1120734-000	1120717-000	1120723-000

Reference material: Kodak white 90 % remission



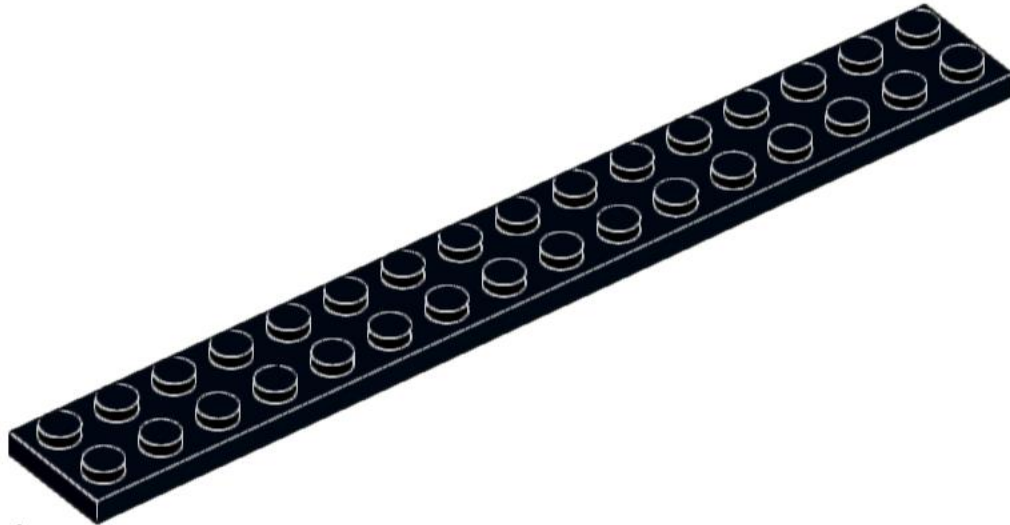
9x
2780
Black



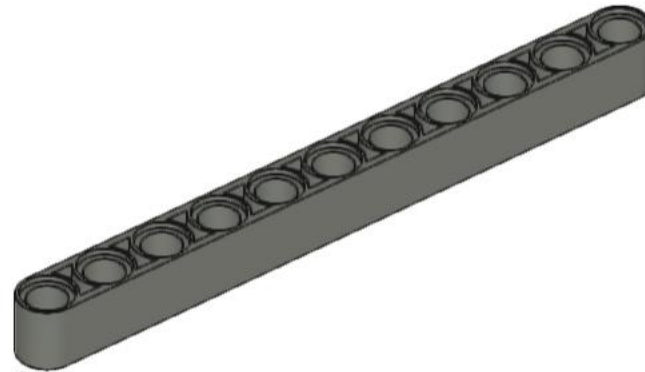
6x
32124
Black



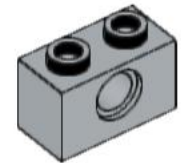
5x
32278
Black



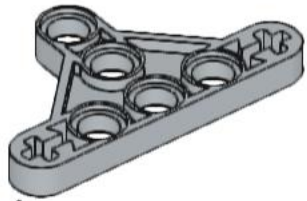
4x
4282
Black



2x
32525
Dark Bluish Gray



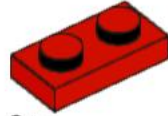
3x
3700
Light Bluish Gray



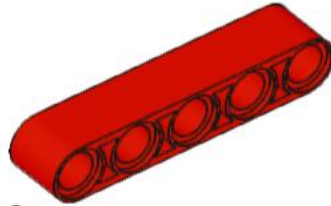
4x
99773
Light Bluish Gray



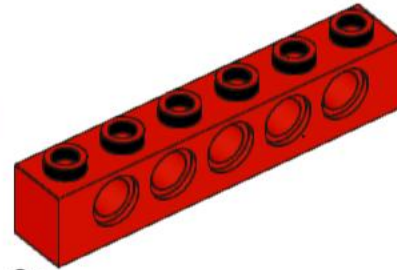
2x
32062
Red



3x
3023
Red



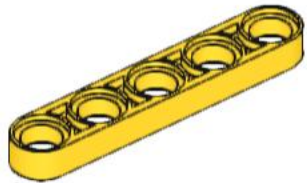
2x
32316
Red



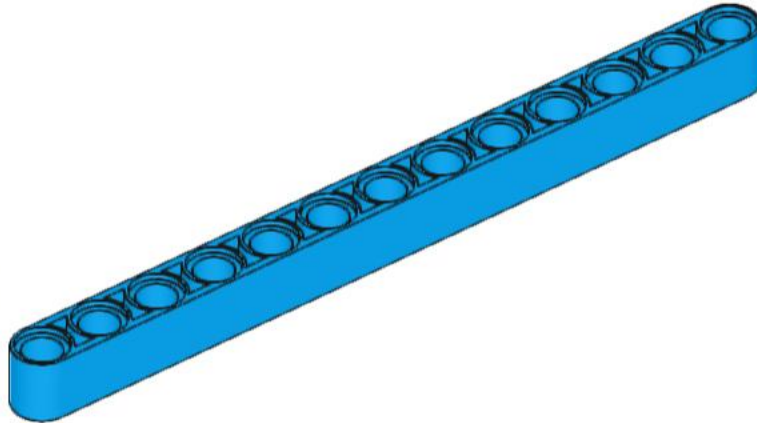
2x
3894
Red



2x
32124
Reddish Brown



6x
32017
Yellow

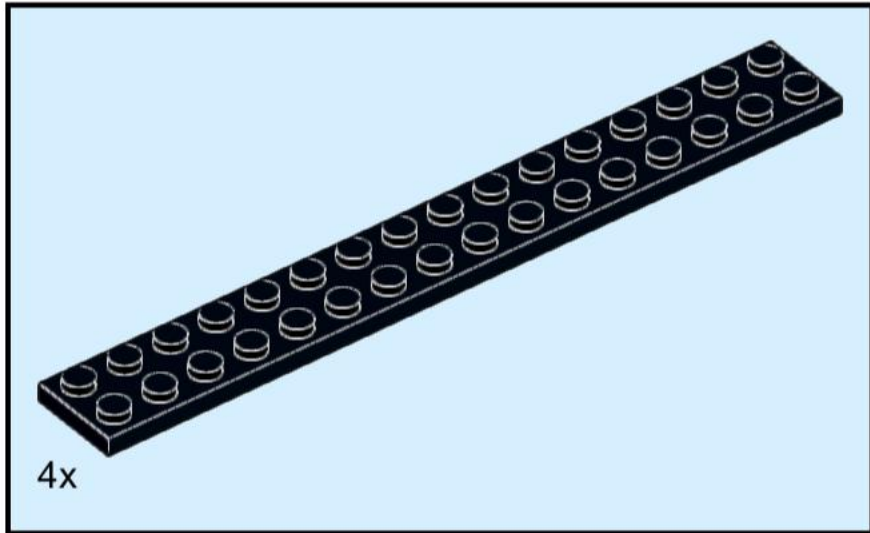
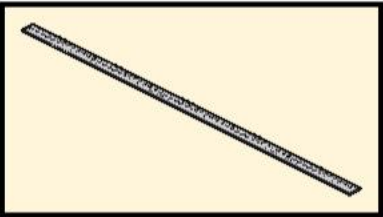
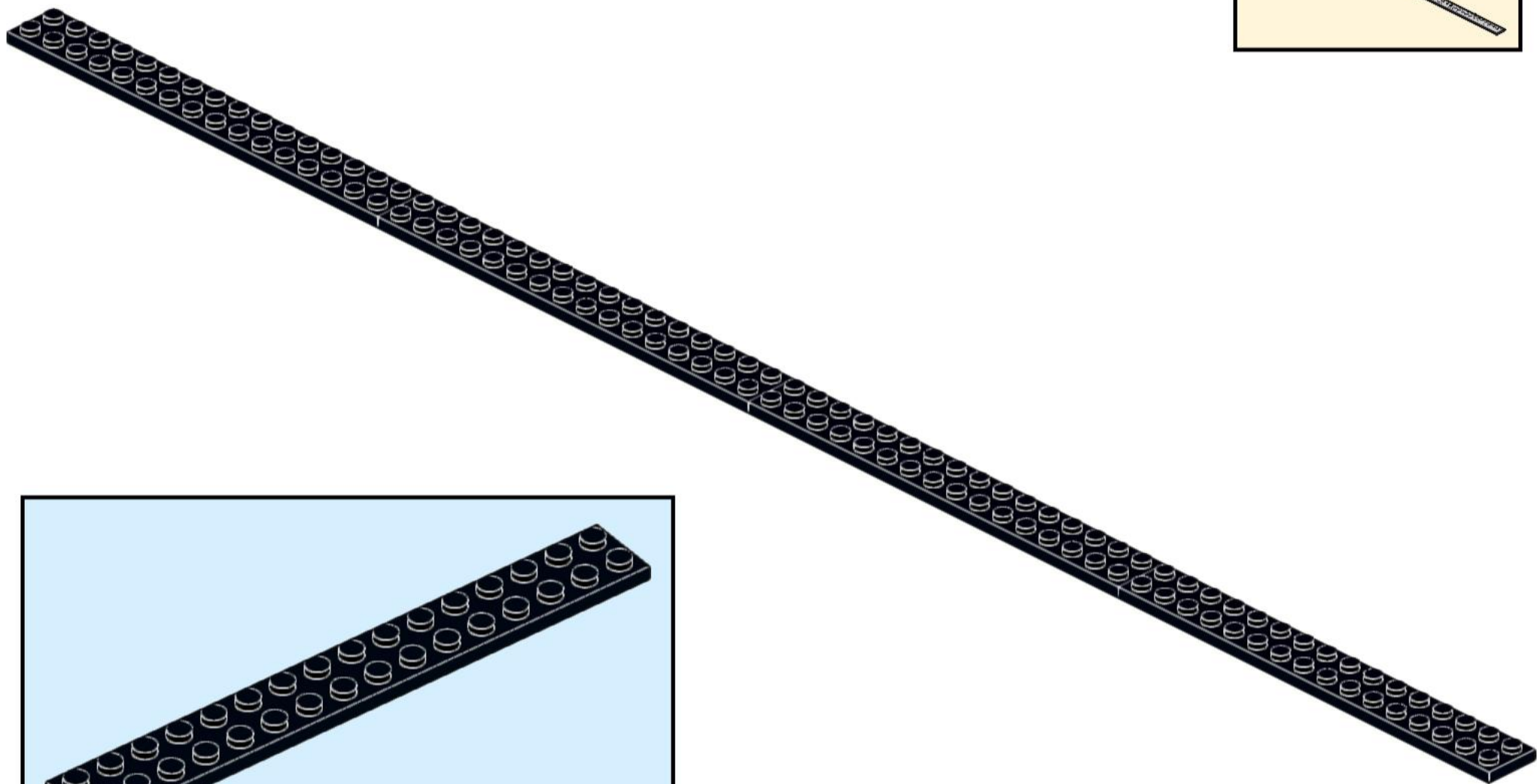


5x
41239
Dark Azure



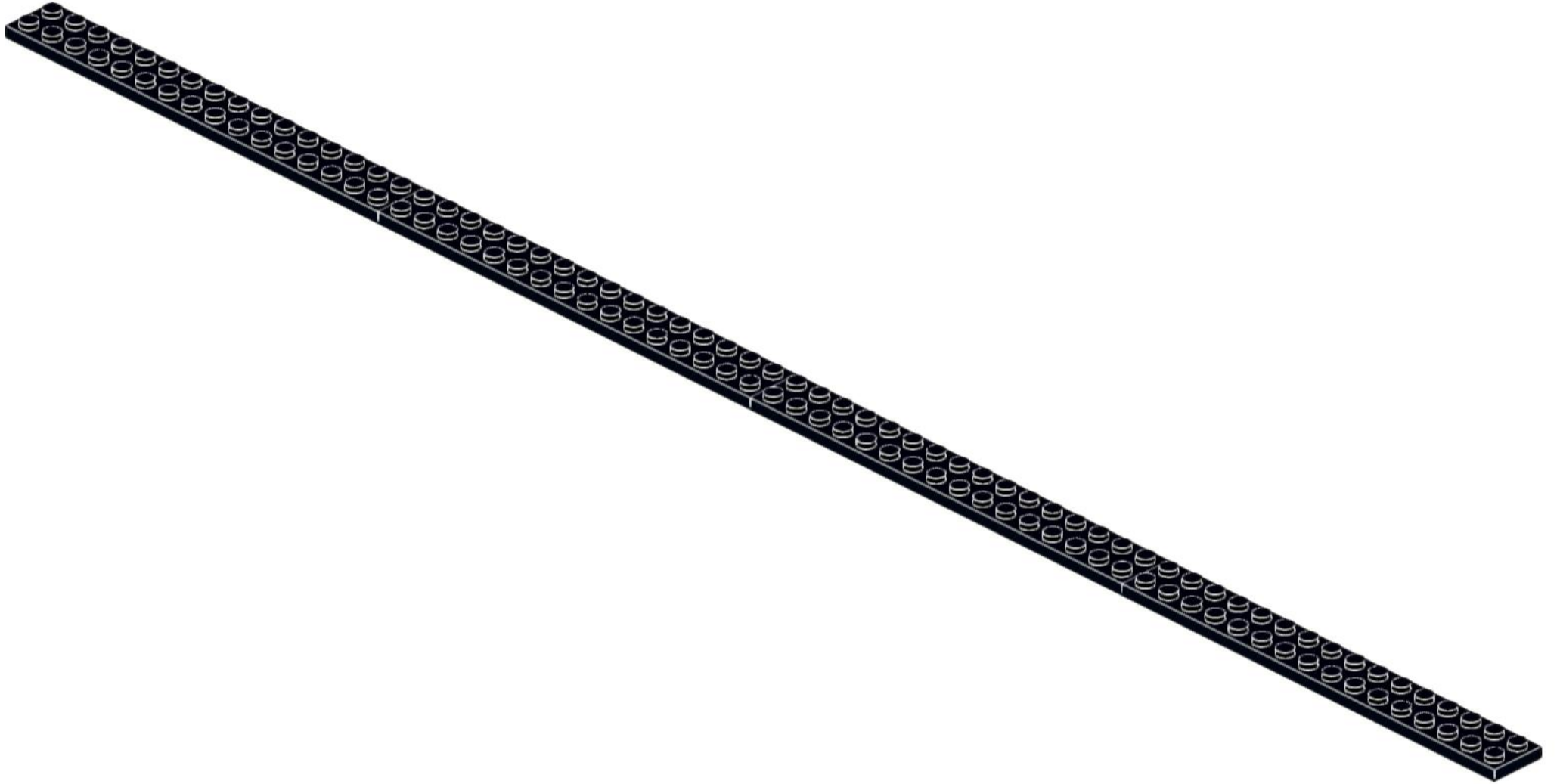
9x
6558
Blue

1

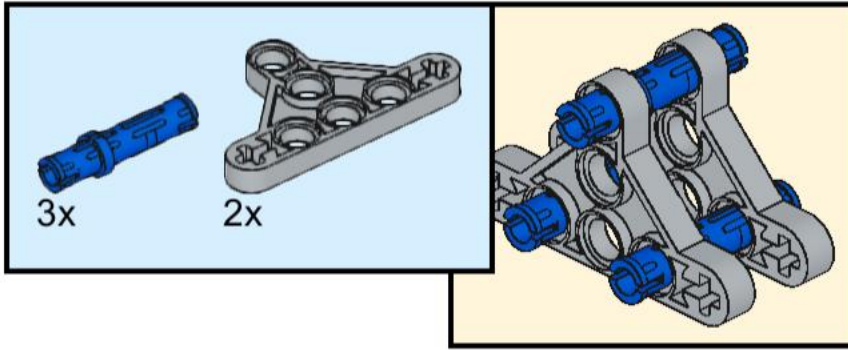


4x

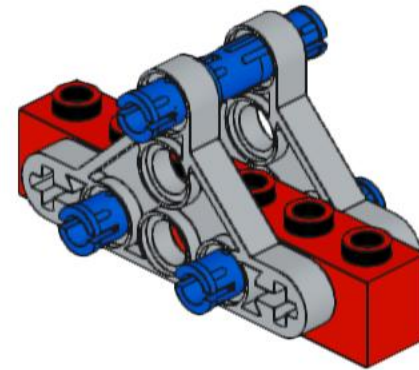
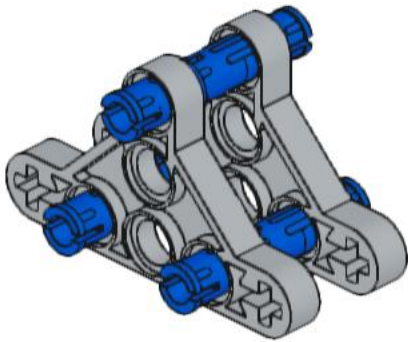
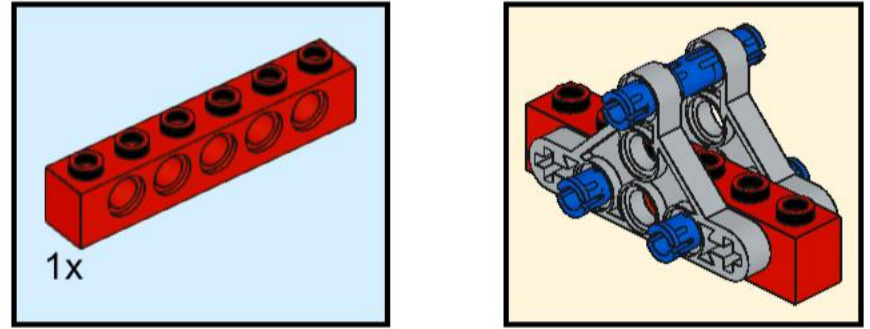
2



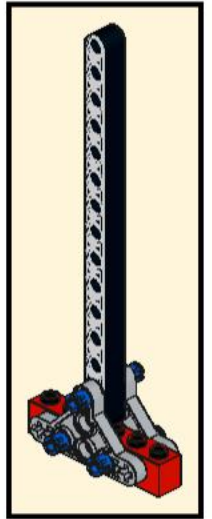
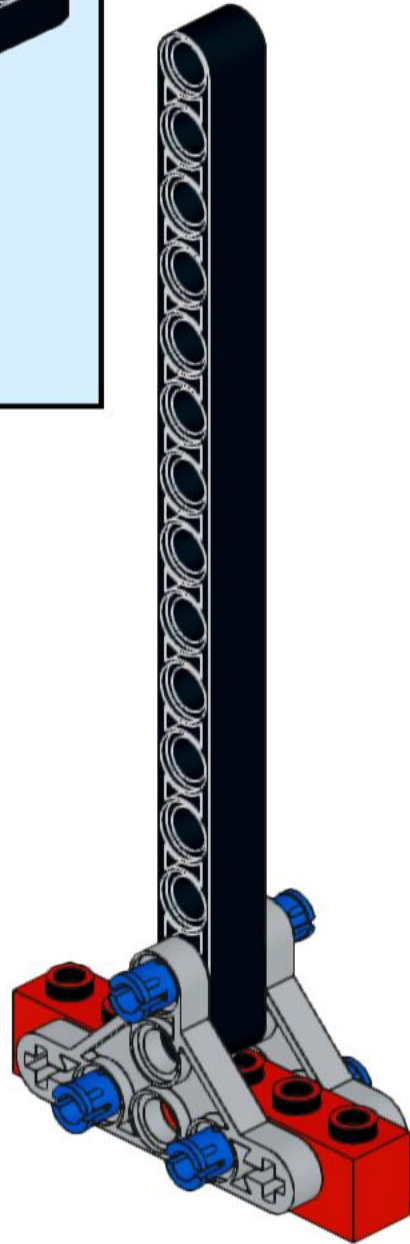
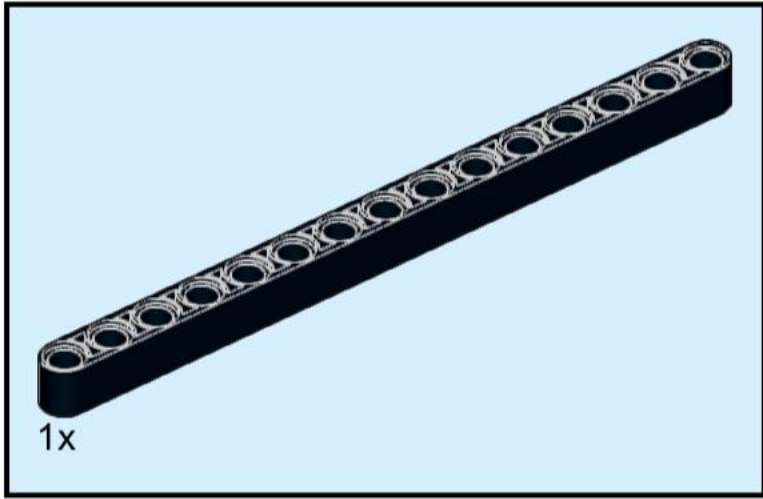
3



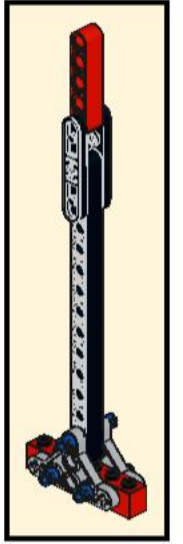
4



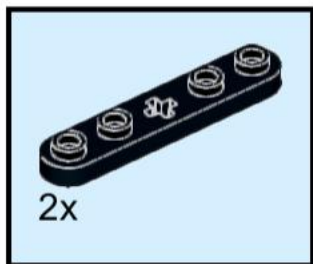
5



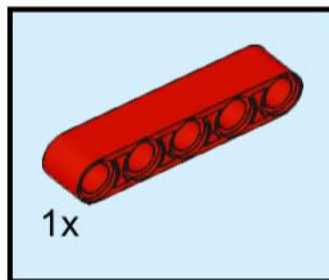
6



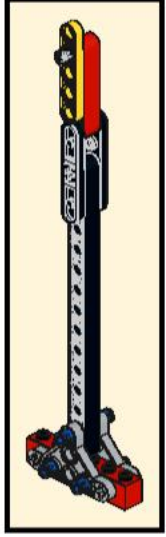
7



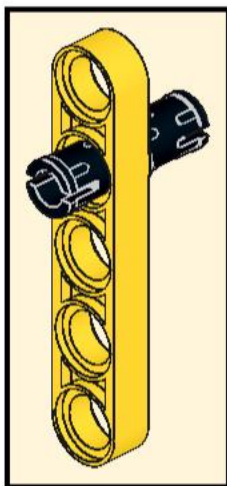
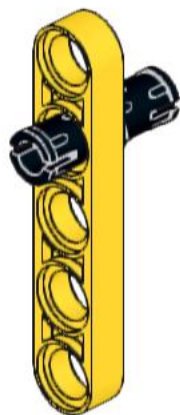
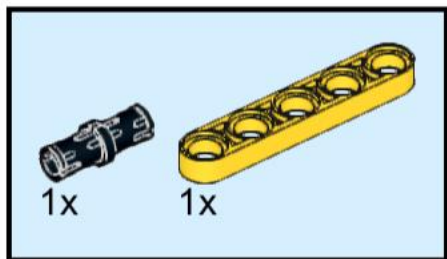
8



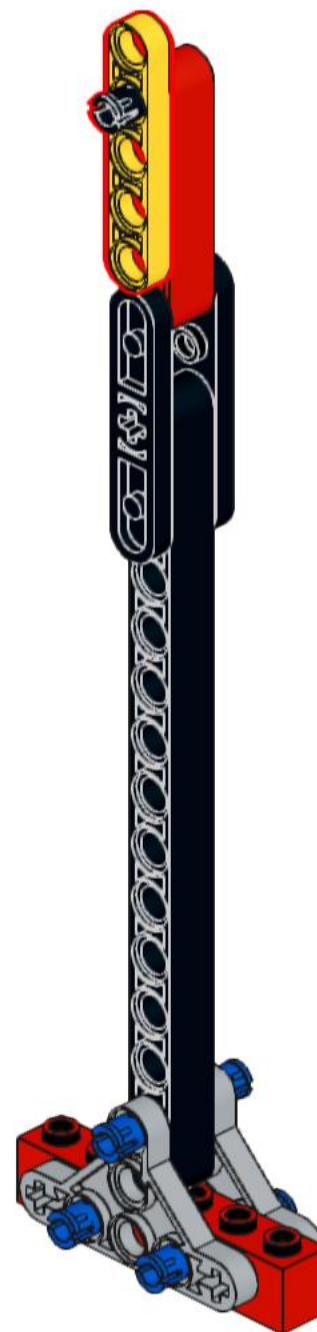
9



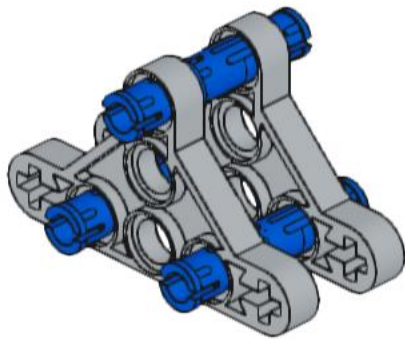
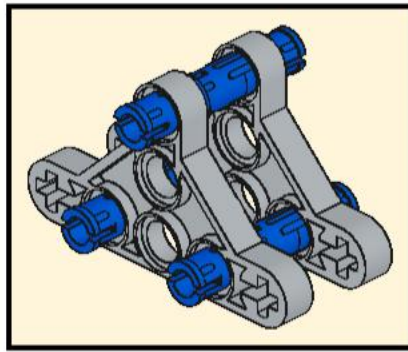
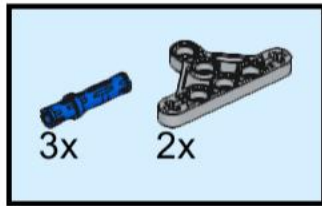
10



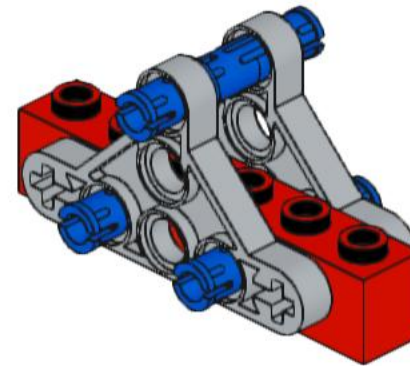
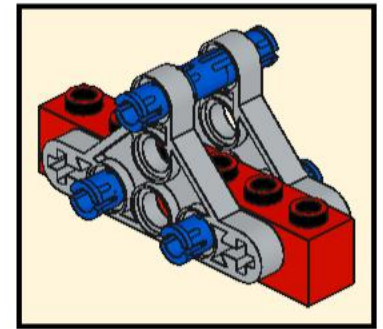
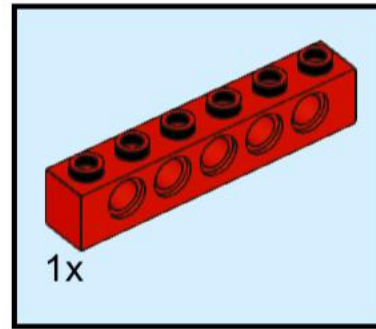
11



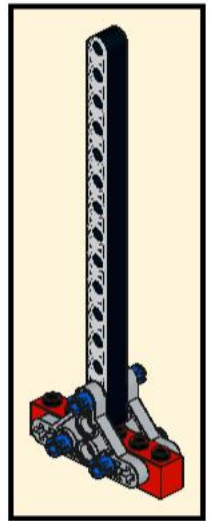
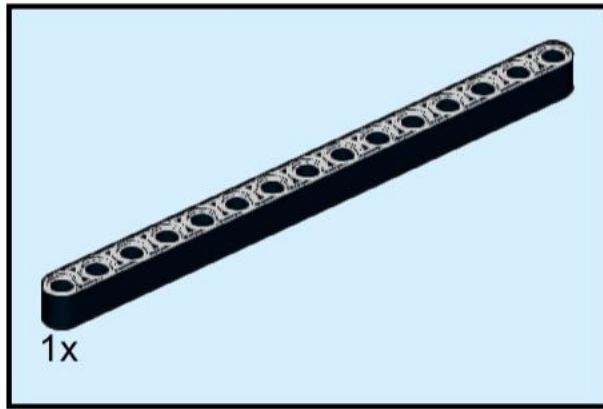
12



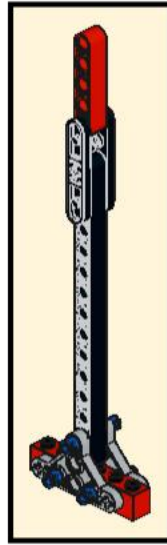
13



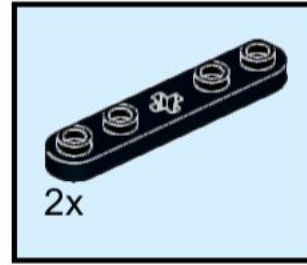
14



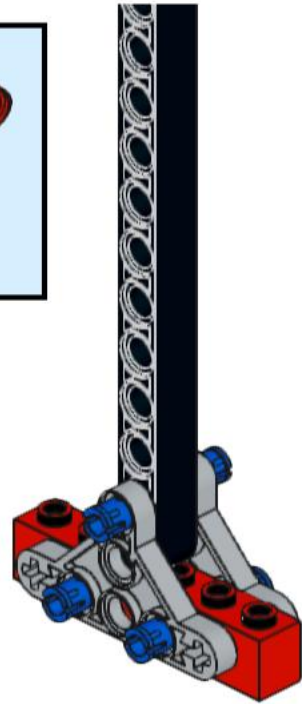
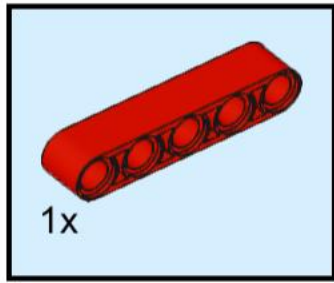
15



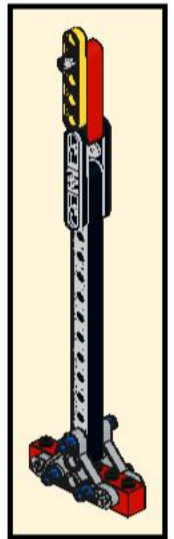
16



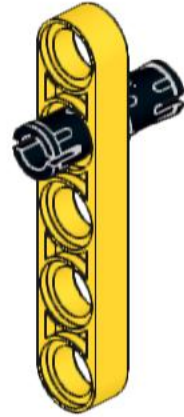
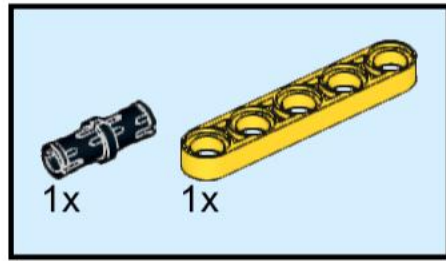
17



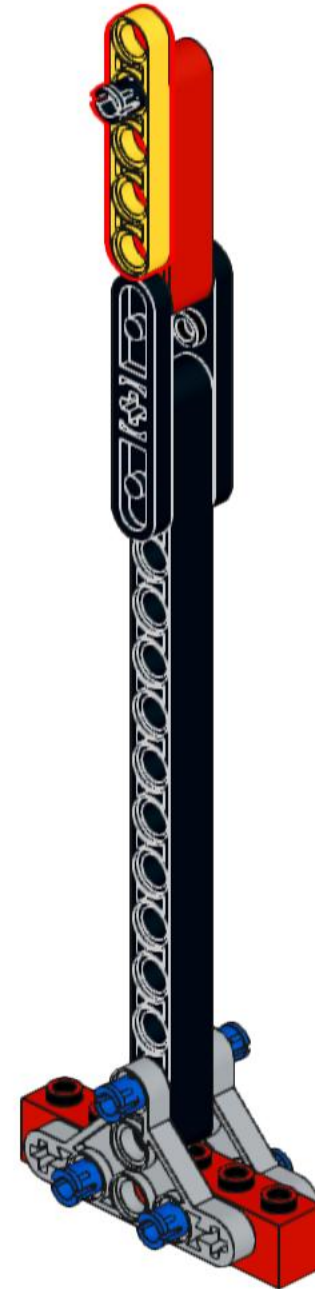
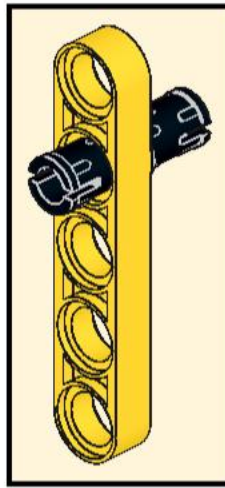
18



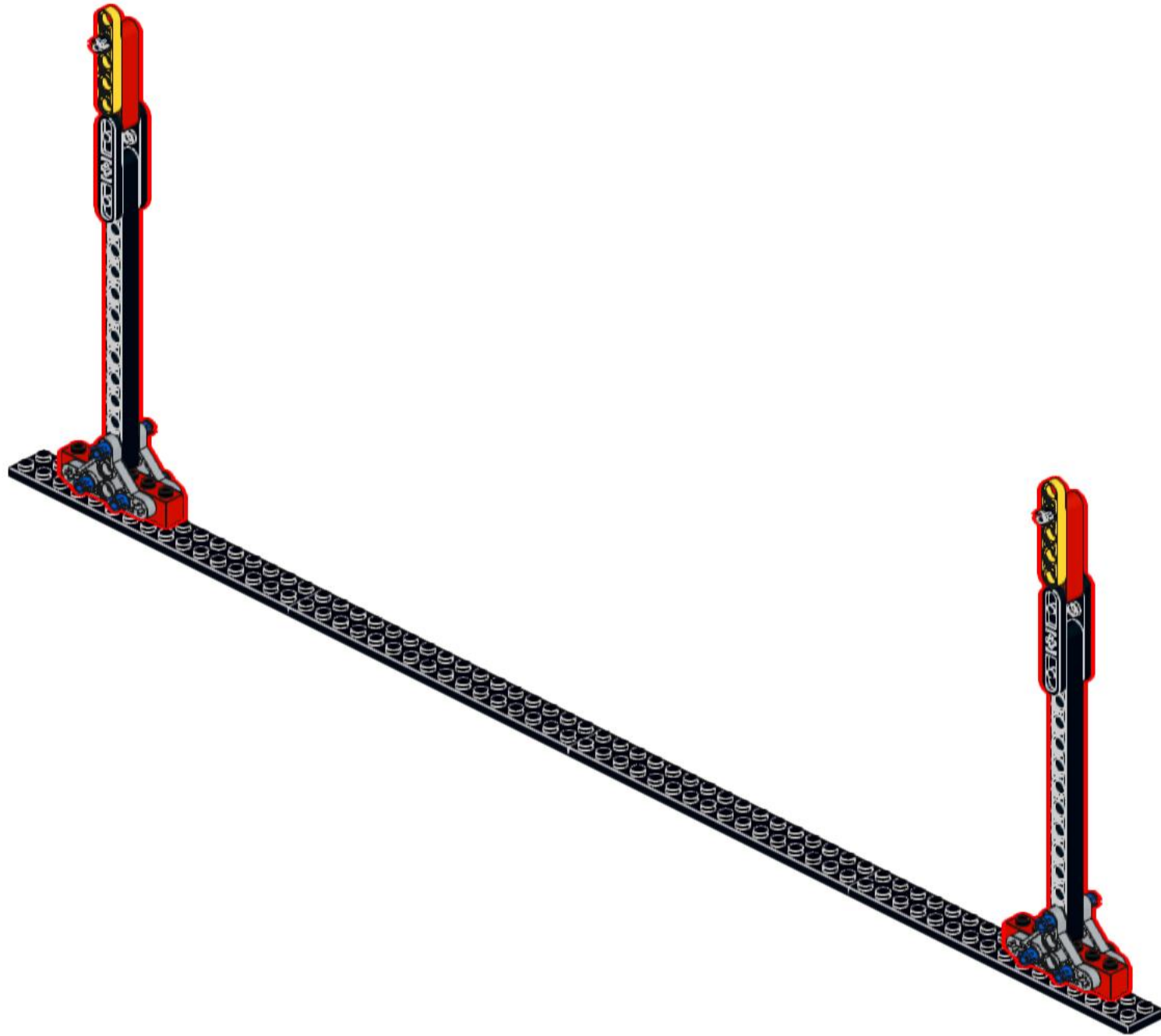
19



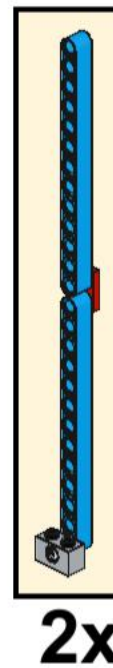
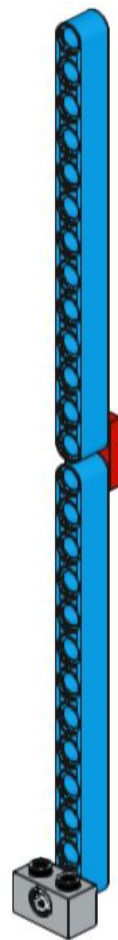
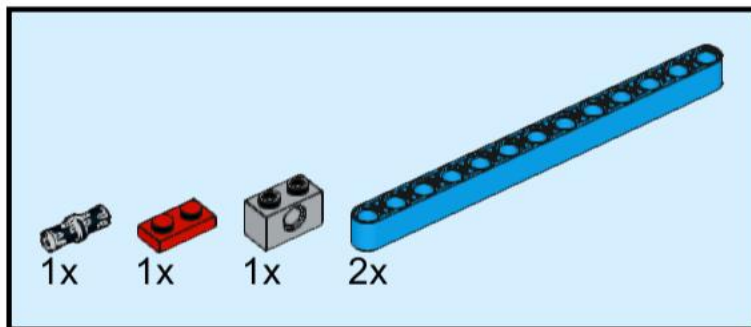
20



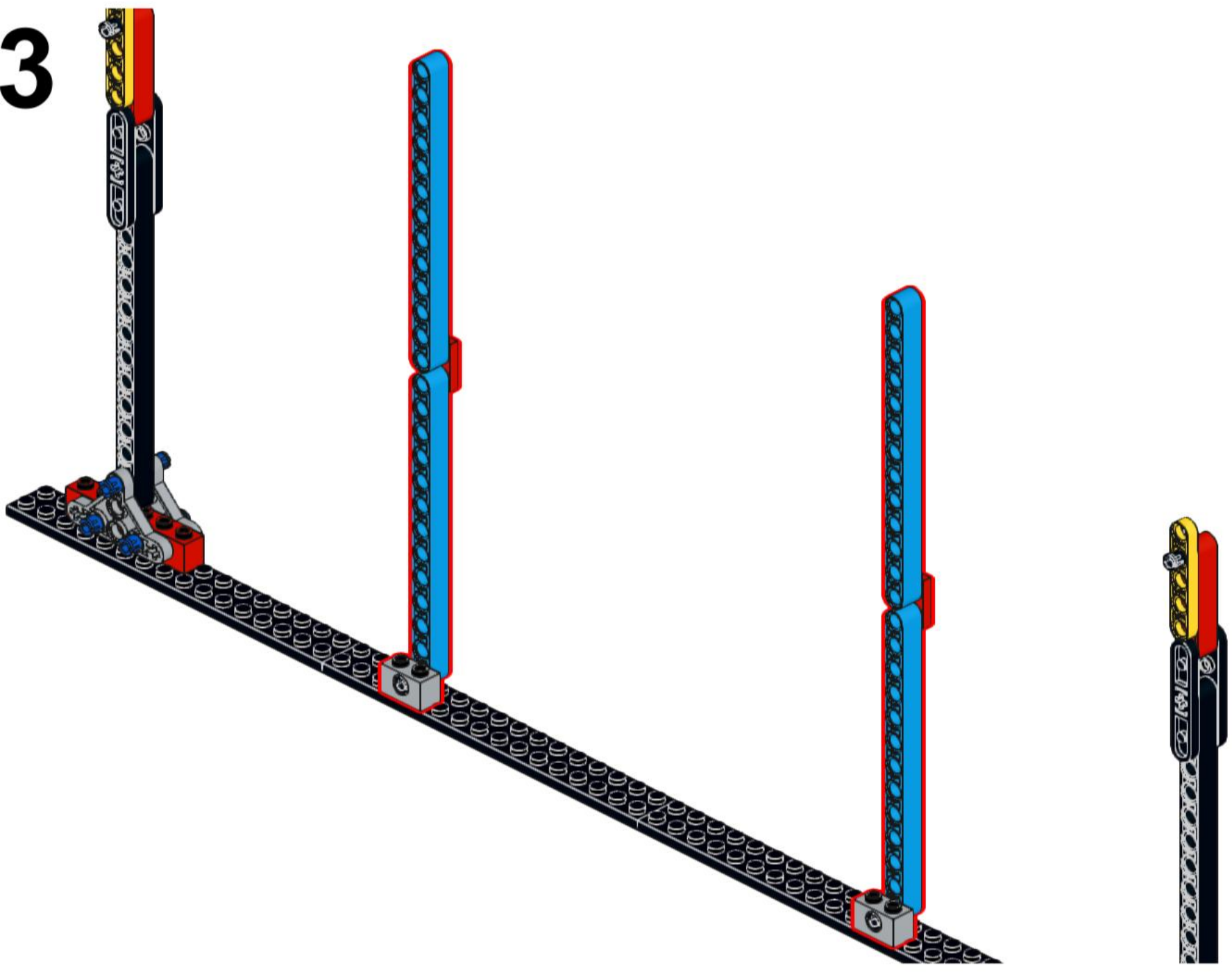
21



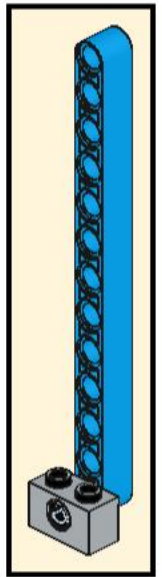
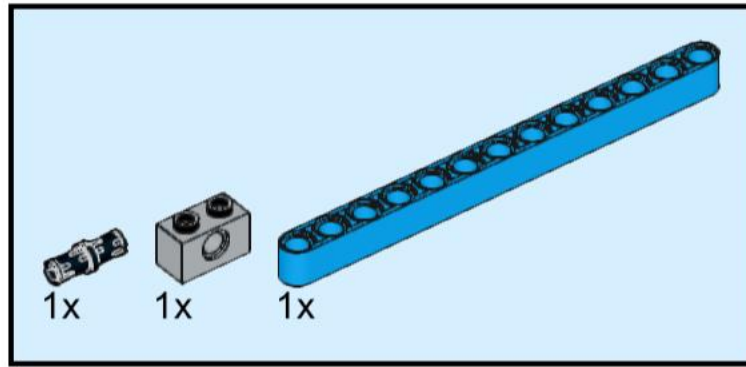
22



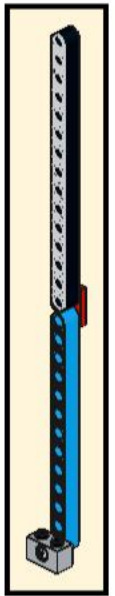
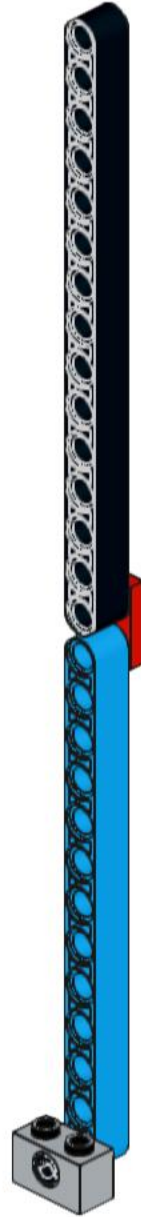
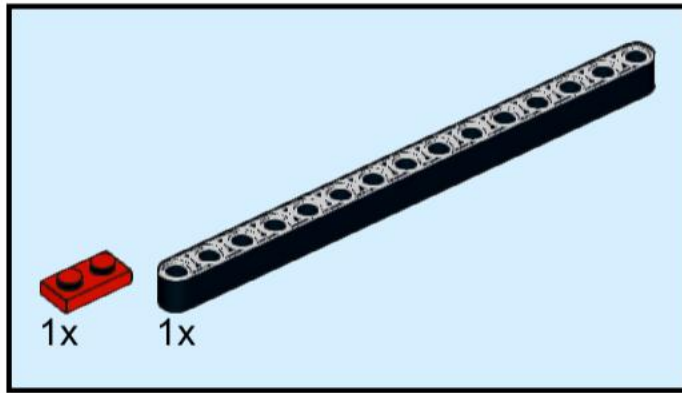
23



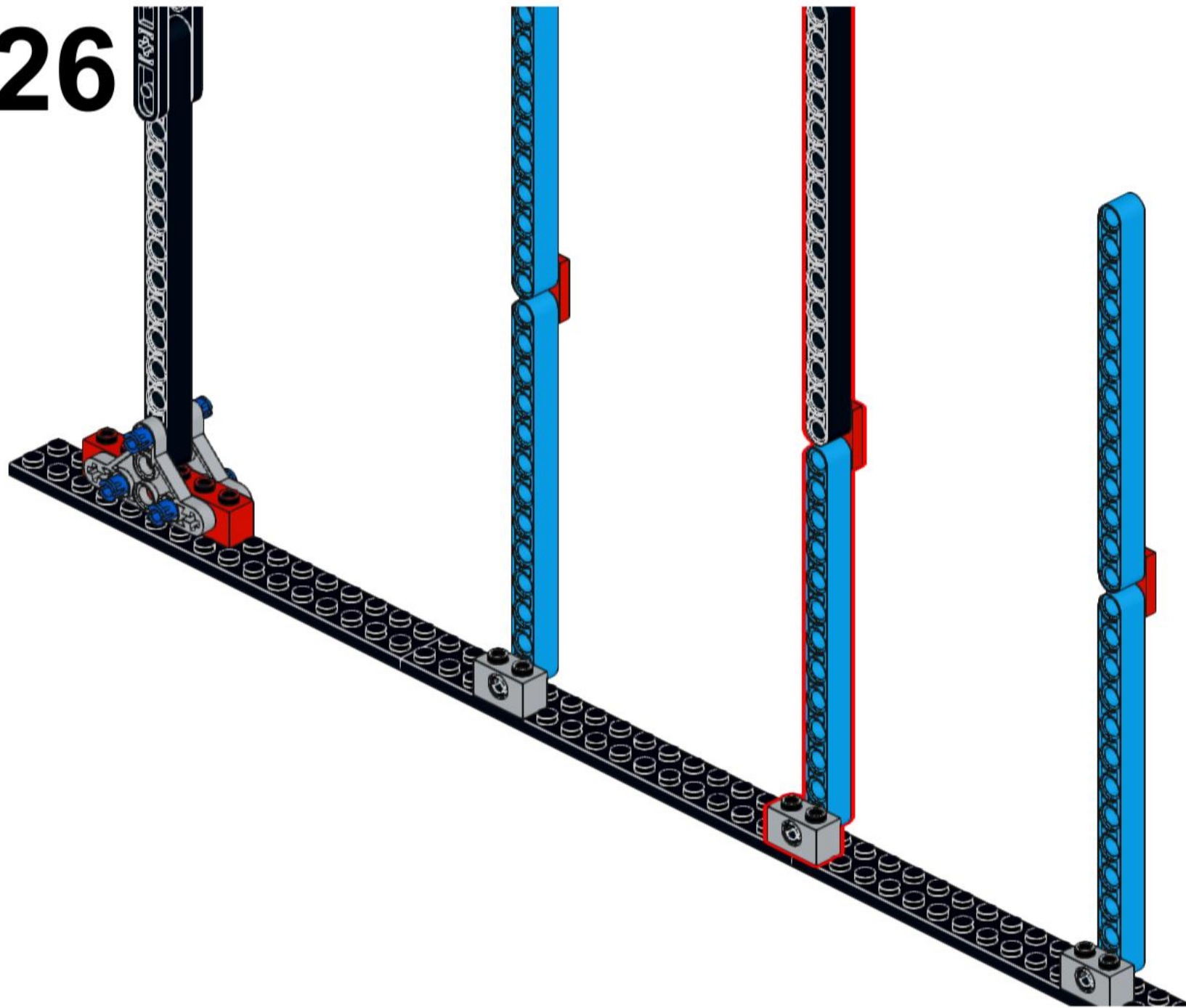
24



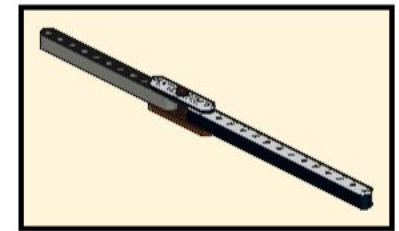
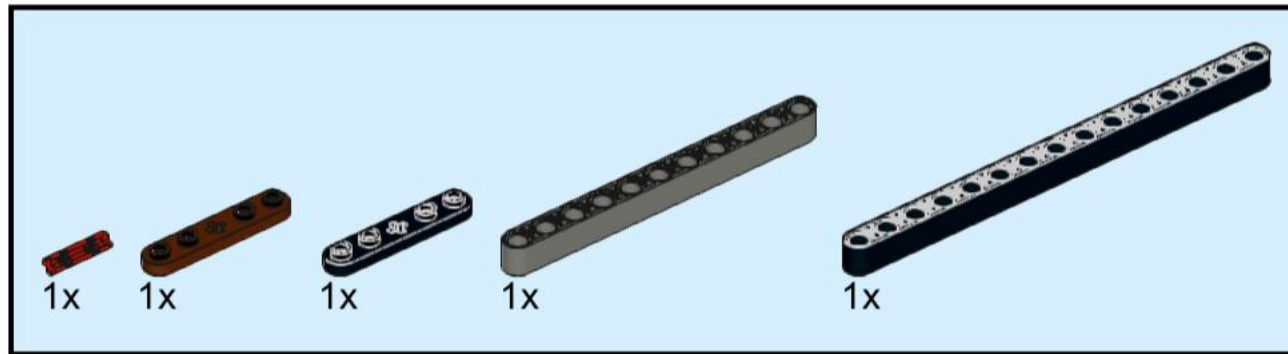
25



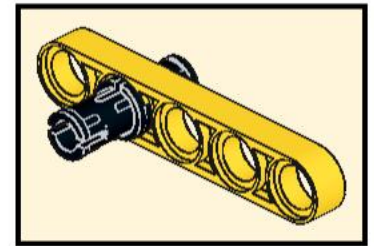
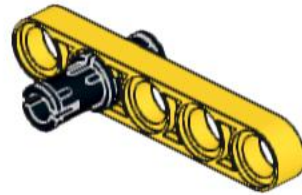
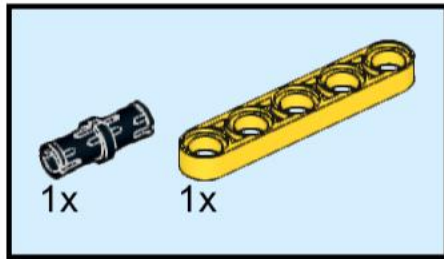
26



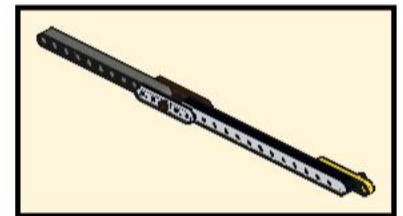
27



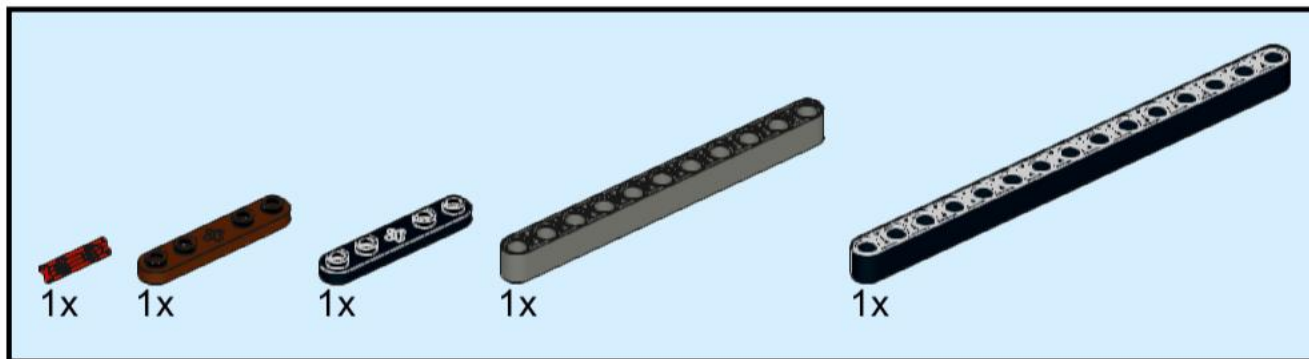
28



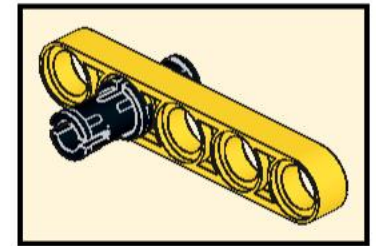
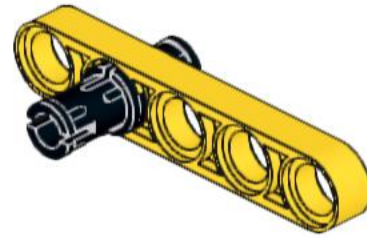
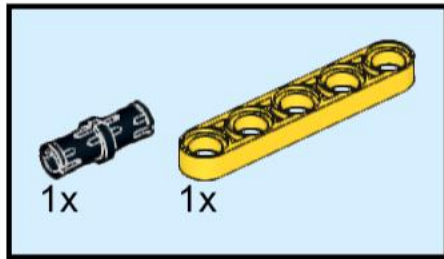
29



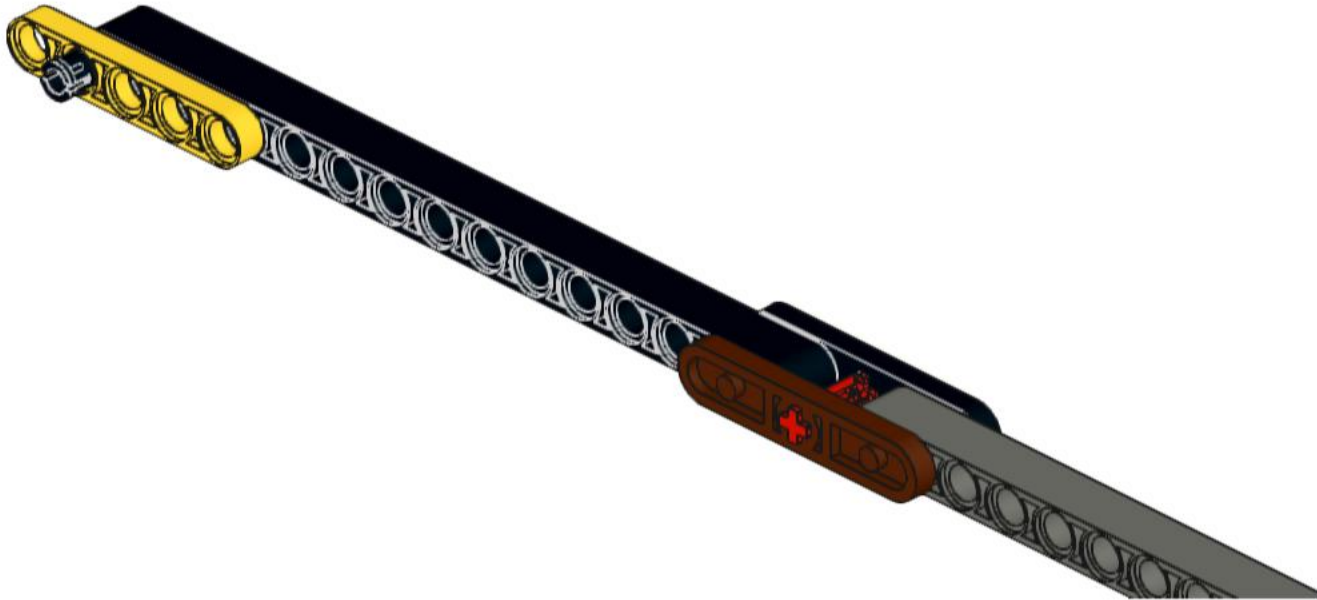
30



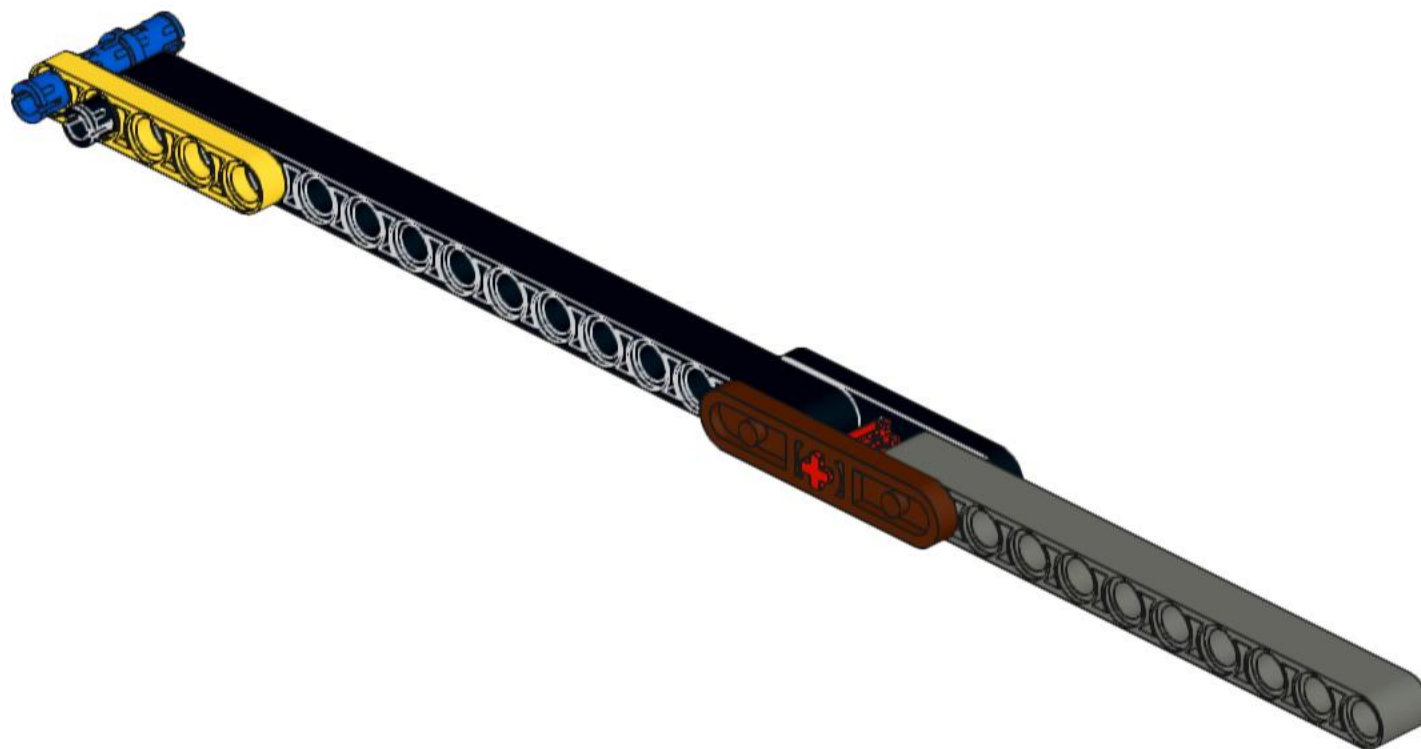
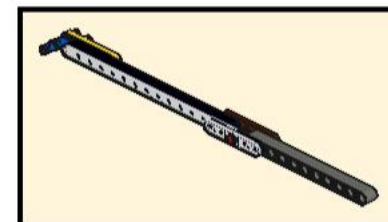
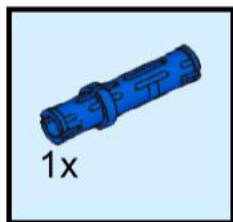
31



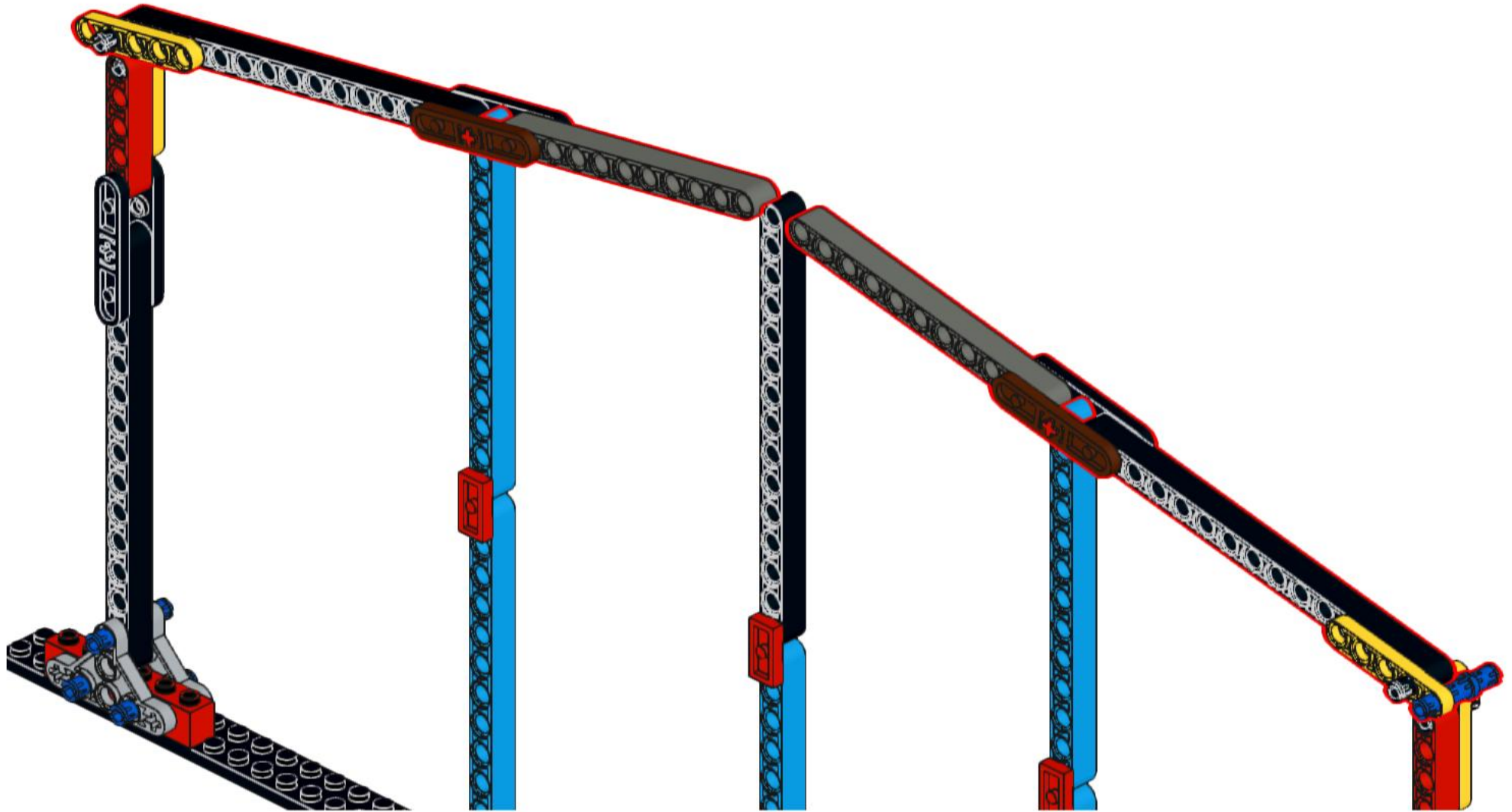
32



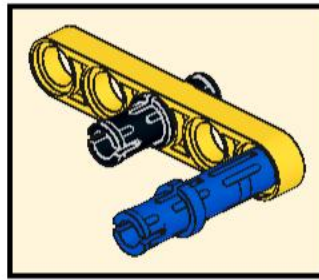
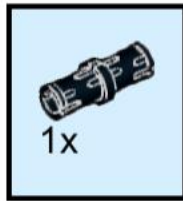
33



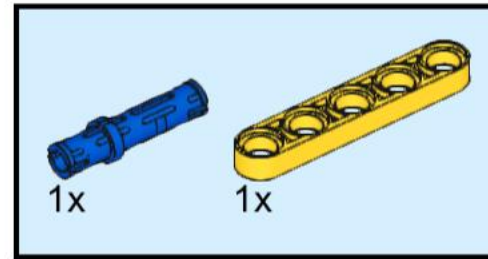
34



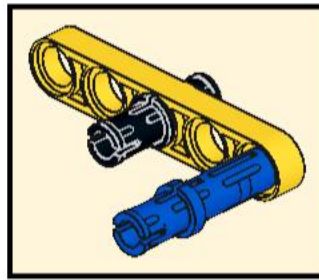
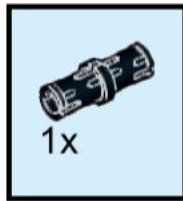
35



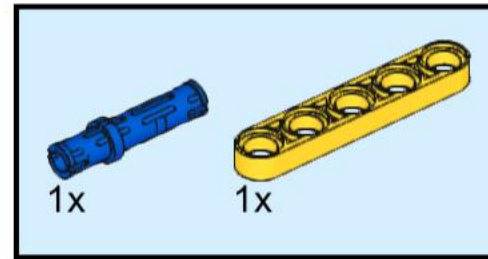
36



37



38



39

