



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo de Producto

**PROPUESTA DE UN PUESTO DE PRÁCTICAS A ESCALA
SOBRE EL DESARROLLO DEL PROCESO CONSTRUCTIVO
DE UNA NAVE INDUSTRIAL**

Autor:

Retortillo González, Javier

Tutores:

Lorenzana Iban, Antolín

Magdaleno Martín, Jesús

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

Valladolid, Junio 2023.

Resumen

El presente trabajo se enfoca en la realización de una práctica de *Lean-Construction* de una nave industrial utilizando piezas de LEGO. La construcción con LEGO es reconocida como una herramienta educativa versátil y popular, que permite a los estudiantes aprender de manera práctica y creativa.

Este estudio se realiza como Trabajo de fin de Grado en colaboración con el personal del Laboratorio de Estructuras para la asignatura "Ingeniería de la Construcción" del Máster en Ingeniería Industrial.

El objetivo principal de esta simulación es brindar a los estudiantes la oportunidad de aplicar conceptos teóricos de la ingeniería en un entorno realista y atractivo. A través de la construcción de una nave industrial con LEGO, los participantes pueden explorar desafíos relacionados con el diseño de estructuras, la distribución espacial, la optimización de recursos y la planificación de procesos.

Palabras clave: LEGO, *lean construction*, estructura, modelo, simulación de actividades.

Abstract

This work focuses on the implementation of a Lean Construction practice for an industrial building using LEGO bricks. Construction with LEGO is recognized as a versatile and popular educational tool that allows students to learn in a practical and creative way.

The study is carried out as a Degree's Final Project in collaboration with the staff of the Structures Laboratory for the subject "Construction Engineering" of the Master's Degree in Industrial Engineering.

The main objective of this simulation is to provide students with the opportunity to apply theoretical engineering concepts in a realistic and engaging environment. Through the construction of an industrial unit with LEGO, participants can explore challenges related to structural design, spatial distribution, resource optimization, and process planning.

Key words: LEGO, lean construction, structure, scale model, activities simulation.

Índice de contenidos

1.	Introducción	11
1.1.	Contexto.....	11
1.2.	Objetivo del proyecto	11
1.3.	LEGO en el ámbito universitario	12
1.4.	Metodología de trabajo.....	13
1.5.	Estructura del trabajo	14
2.	Consideraciones previas	15
2.1.	“Lean Construction”	15
2.2.	LEGO. Conceptos básicos y aplicación.....	18
2.3.	Nave industrial. Dimensiones y escala.....	23
2.4.	Búsqueda de alternativas existentes.	25
3.	Construcción del modelo físico.....	27
3.1.	Base de trabajo (terreno)	27
3.2.	Planteamiento inicial	32
3.3.	Cimentación	33
3.3.1.	Zapatas.....	34
3.3.2.	Riostras longitudinales.....	35
3.3.3.	Riostras transversales.....	35
3.4.	Estructura	38
3.4.1.	Pilares.....	38
3.4.2.	Dinteles	39
3.4.3.	Vigas de atado	40
3.4.4.	Cruces de San Andrés	41
3.4.5.	Vigas carril.....	43
3.4.6.	Correas	43

3.4.7. Forjado.....	44
3.5. Cerramiento.....	45
3.6. Cubierta	46
3.7. Maquinaria	47
4. Modelo digital	53
4.1. Elección del software.....	54
4.2. Limitaciones del programa.....	56
4.3. Resultado final	57
4.4. Simulación del proceso constructivo.....	58
5. Conclusiones.....	59
5.1. Conclusiones finales.....	59
5.2. Líneas de mejora	60
5.3. Consideraciones adicionales	63
5.3.1. Planificación del trabajo. Diagrama de Gantt.....	63
5.3.2. Coste en horas del trabajo.....	64
5.3.3. Aspectos a tener en cuenta durante el montaje.....	64
5.3.4. Seguridad y medio ambiente	65
5.3.5. Aspectos económicos.....	66
Referencias bibliográficas.....	67
ANEXO I: Manual de montaje.....	69
ANEXO II: Listado de piezas y costes.....	81
ANEXO III: Stud.io, conceptos básicos.....	93
ANEXO IV: Plano cimentación.	95

Índice de figuras

Figura 1. Tiempo desperdiciado en fabricación y construcción. [2]	16
Figura 2. Medidas básicas LEGO. [3]	18
Figura 3. Medidas pieza beam 1x5. [4]	19
Figura 4. Regular brick 1x2. [5]	20
Figura 5. Technic brick 1x2. [5]	20
Figura 6. Placa 2x8. [5]	20
Figura 7. Beam 1x11. [5]	21
Figura 8. Pin de fricción 2L. [5]	21
Figura 9. Conector. [5].....	22
Figura 10. Eje 2L. [5].....	22
Figura 11. Panel 1x3x11. [5]	22
Figura 12. Elementos de la nave industrial. [6]	23
Figura 13. Ejemplo de forjado. [7].....	23
Figura 14. Medidas LEGO minifigure. [8].....	24
Figura 15. Modelo de fábrica LEGO. [9].....	25
Figura 16. Maqueta de nave industrial. [10].....	26
Figura 17. Cimentación de nave industrial. [11].....	27
Figura 18. Útiles para recortar XPS.....	28
Figura 19. Planteamiento de la nave sobre XPS.....	29
Figura 20. Aplicación del pirógrafo en XPS.....	29
Figura 21. Carriles para riostras.....	30
Figura 22. Zapatas excavadas manualmente.....	30
Figura 23. Plancha de espuma de PE. [12]	31
Figura 24. Planteamiento inicial de la práctica.....	32
Figura 25. Zapata principal.....	34
Figura 26. Zapata secundaria.....	34
Figura 27. Riostra longitudinal.....	35
Figura 28. Riostra transversal trasera.....	36
Figura 29. Riostra transversal frontal.....	36
Figura 30. Excavación (modelo físico).....	37
Figura 31. Cimentación (modelo físico).....	37

Figura 32. Pilar.	38
Figura 33. Dintel (pórtico intermedio).	39
Figura 34. Dintel (pórtico hastial).	40
Figura 35. Viga de atado.	40
Figura 36. Cruces de San Andrés.	41
Figura 37. Montaje de los pasos 4, 5, 6 y 7.	42
Figura 38. Viga carril.	43
Figura 39. Forjado.	44
Figura 40. Instalación del cerramiento.	45
Figura 41. Montaje de la cubierta.	46
Figura 42. Camión de asistencia (60073). [5]	47
Figura 43. Máquinas de construcción (42023). [5]	48
Figura 44. Máquina compactadora.	48
Figura 45. Excavadoras de obra (60385) (60152). [5]	49
Figura 46. Hormigonera (7990). [5]	49
Figura 47. Fratasadora.	50
Figura 48. Niveladora.	50
Figura 49. Grúa móvil (60324). [5]	51
Figura 50. Cesta elevadora.	51
Figura 51. Elementos no representados en el modelo digital.	56
Figura 52. Modelo digital de la nave. Exterior.	57
Figura 53. Modelo digital de la nave. Interior.	57
Figura 54. Código QR del vídeo.	58
Figura 55. Mejora del suelo (modelo físico).	61
Figura 56. Ejemplo de piezas solapadas.	61
Figura 57. Propuesta de unión mediante cartela.	62
Figura 58. Interfaz del programa Stud.io.	93

Índice de tablas

Tabla 1. Diagrama de Gantt.....	63
Tabla 2. Desglose zapata principal.	81
Tabla 3. Desglose zapata forjado.....	81
Tabla 4. Desglose riostra longitudinal.....	81
Tabla 5. Desglose riostra transversal (sin forjado).	81
Tabla 6. Desglose riostra transversal (forjado).	82
Tabla 7. Desglose cabio.	82
Tabla 8. Desglose pórtico intermedio.	83
Tabla 9. Desglose pórtico hastial.	84
Tabla 10. Desglose viga de atado.	85
Tabla 11. Desglose viga carril.....	85
Tabla 12. Desglose murete.....	85
Tabla 13. Desglose cubierta.	86
Tabla 14. Desglose conectores cruces de San Andrés.....	86
Tabla 15. Desglose forjado.	87
Tabla 16. Desglose total de piezas.	89
Tabla 17. Coste por subconjunto.	90
Tabla 18. Resumen.	91

1. Introducción

1.1. Contexto

El presente trabajo de fin de grado, en adelante TFG, se desarrolla en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno y Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras. El trabajo se realiza como conclusión a los estudios del Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo de Producto.

El trabajo se realiza como complemento de una práctica realizada en el Máster de Ingeniería Industrial orientada al estudio del proceso constructivo de naves industriales. Dicha práctica se titula “Secuenciación de actividades II. Lean Construction” y se desarrolla en su mayoría en el laboratorio de estructuras de la EII, sede Paseo del Cauce.

Parte del trabajo realizado durante el desarrollo del TFG se ha llevado a cabo previo al comienzo de dicha práctica. Sin embargo, debido a los diferentes tiempos con los que se desarrollan cada una de las partes implicadas, el resto del trabajo se ha completado después de que los estudiantes realizasen la práctica en cuestión.

1.2. Objetivo del proyecto

El objetivo principal del TFG consiste en realizar un simulador a escala de una obra de construcción de una nave industrial con el que poder analizar procesos y tiempos. Para ello es necesario comprender los principios fundamentales del proceso constructivo, incluyendo las etapas de planificación, organización y ejecución del proyecto.

La intención es que el modelo de nave industrial creado durante este trabajo pueda ser utilizado en futuras ocasiones, ya sea en el mismo contexto que esta vez o incluso en otro tipo de prácticas o asignaturas. El trabajo en cuestión establece una base de trabajo que permite que el modelo creado pueda evolucionar con el tiempo y adaptarse a diferentes situaciones ya que resulta fácilmente modificable.

El presente TFG pretende mostrar cómo lo que para mucha gente es tan sólo un simple juguete para niños puede resultar en una herramienta valiosa en el ámbito educativo. El uso de las piezas LEGO fomenta un aprendizaje práctico que permite comprender conceptos abstractos de manera concreta, facilitando la retención de la información adquirida, además de implementar la colaboración y el trabajo en equipo de los estudiantes durante el desarrollo de la práctica.

1.3. LEGO en el ámbito universitario

Son varias las entidades educativas que han implementado trabajos o prácticas en las que se emplean los bloques de construcción LEGO como hilo conductor, debido a las ventajas que esto presenta, previamente comentadas. Concretamente, en Reino Unido, son ya varias las universidades que cuentan con programas activos relacionados con la construcción de modelos LEGO, una opción cada vez más reconocida por los estudiantes. Algunas de las universidades que disponen de este tipo de programas son la de Nottingham o la de Oxford, entre otras.

En España también se empiezan a ver ejemplos de universidades que se adentran en el ámbito de las piezas LEGO. Por ejemplo, son varias las universidades que recientemente han empezado a colaborar con la FLL (*First LEGO League*), “un programa internacional que promueve el interés por el aprendizaje entre los jóvenes”. De este modo se autodescribe la organización encargada de organizar proyectos y competiciones con el objetivo de promover el interés por la ciencia y la tecnología, siempre desde un enfoque creativo. La Universidad de Burgos o la Universidad Politécnica de Madrid, entre otras, colaboran con este proyecto.

La propia empresa también es consciente de este creciente interés mostrado por una gran cantidad de entidades educativas en incluir este tipo de prácticas en su metodología, y así lo demuestra con su programa *LEGO Serious Play*. Esta metodología consiste en la solución de problemas complejos gracias al trabajo en equipo, fomentando en todo momento una participación activa por parte de los participantes y un pensamiento creativo. La Universidad de Sussex es un ejemplo de la aplicación de este tipo de métodos.

Dicha universidad ha realizado un estudio con el objetivo de demostrar su valía, en muchos casos despreciada por estudiantes y profesores. El estudio consistía en organizar una serie de talleres llevados a cabo por estudiantes universitarios en los que se utilizaba la metodología *LEGO Serious Play*, para después analizar los resultados. Las conclusiones obtenidas fueron que los estudiantes percibían estos talleres como un entorno más seguro para ellos, pudiendo compartir sus ideas con mayor facilidad y afianzando el trabajo en equipo. Los propios estudiantes aseguraron comprender mejor los conceptos teóricos que les fueron explicados, siendo capaces de poder explicarlos con facilidad llegando a mejorar su rendimiento académico durante ese curso.

El estudio llevado a cabo por la Universidad de Sussex fue claramente influenciado por las autoras Chrissi Nerantzi y Alison James, quienes en 2019 escribieron una guía sobre la metodología *LEGO Serious Play* titulada “LEGO® for university learning: Inspiring academic practice in higher education” (“LEGO® para el aprendizaje universitario: práctica académica inspiradora en la educación superior”). En dicha publicación [1] se describe en profundidad la experiencia de las autoras en este ámbito, a través del desarrollo del aprendizaje de los estudiantes en prácticas académicas o profesionales.

1.4. Metodología de trabajo

La primera parte del trabajo realizado se ha desarrollado de manera presencial en el propio laboratorio de estructuras. Esta parte consistió en idear y diseñar el modelo de nave industrial que más adelante se muestra en su forma definitiva. El proceso requirió experimentar con las piezas LEGO e ir probando diferentes alternativas hasta dar con las soluciones adecuadas. Ya que ese proceso es puramente práctico, se fue documentando a través de fotografías que se irán mostrando a lo largo del documento como evidencias del trabajo realizado. Es por ello que todas las imágenes del proceso mostradas tienen una gran importancia en el trabajo, visibilizando la parte de más experimental y práctica del TFG, que de otro modo no podría ser apreciada.

De manera simultánea con el trabajo previamente descrito, se fue creando un modelo digital de la nave industrial mediante programas informáticos especializados. Dicho modelo digital se iba adaptando en función de la evolución que el modelo físico iba sufriendo. El modelo digital permite obtener una visión de la nave diferente, fácil de manipular y que ofrece una serie de posibilidades que un modelo físico no ofrece. Véase imágenes renderizadas más nítidas, listados de piezas automáticos, vídeos animados del proceso constructivo, etc.

Una vez los modelos tanto físico como digital, se encontraban ya creados de forma definitiva, se procedió con la redacción del presente trabajo. Explicando el desarrollo completo del trabajo y plasmando toda la información recogida durante el proceso que aporte un valor añadido al TFG.

1.5. Estructura del trabajo

El siguiente documento recoge el proceso de trabajo seguido durante la realización del TFG. En él se tratan todas las etapas del trabajo, desde las fases previas, consistentes en la búsqueda de información, hasta la generación de los modelos en sí mismos, tanto de manera física como de manera digital.

De este modo se explican con detalle todos y cada uno de los elementos de la nave industrial representados en el puesto a escala, así como los procesos llevados a cabo en la simulación y la maquinaria empleada para ello.

Posteriormente se expone el proceso completo de desarrollo del modelo digital de la nave industrial. Para ello se justifica la elección del software, teniendo en cuenta sus limitaciones, y se muestran los resultados finales obtenidos gracias al programa.

Además, el último apartado del documento explica las conclusiones obtenidas una vez realizado ya el trabajo, así como una serie de aspectos a mejorar de cara al futuro, especialmente sobre el modelo físico de la nave. Finalmente se han añadido una serie de anexos que amplían el contenido del trabajo: un manual de montaje, un listado de piezas y costes, una explicación sobre el *software* empleado y un plano de la cimentación de la obra.

2. Consideraciones previas

2.1. “Lean Construction”

La metodología *lean* es un método innovador cuyo principal reside en la optimización de los procesos productivos de una empresa utilizando la mejora continua como uno de sus pilares fundamentales.

Esta filosofía de trabajo surge en los años 80 en Japón, de la mano del ingeniero Taiichi Ohno, considerado como el padre del sistema productivo de la empresa automovilística Toyota. Este novedoso sistema de producción consiguió aumentar significativamente la eficiencia productiva de la empresa, creando así un sistema que sería replicado en numerosas ocasiones por otras empresas posteriormente. Hoy en día este sistema también es conocido como *Just in Time* y se basa en ajustar la producción en función de la demanda y reducir los desperdicios al mínimo.

Según esta metodología existen ocho tipos de desperdicios diferentes (*Muda*, en japonés) que las empresas deben intentar reducir al máximo para optimizar su producción:

1. Defectos de producción
2. Sobreproducción
3. Exceso de inventario
4. Esperas
5. Transporte
6. Movimientos innecesarios
7. Sobreprocesos
8. Desperdicio de talento humano

Tal y como se ha indicado anteriormente, la producción en este tipo de procesos se ajusta en función de la demanda de la empresa, es decir siguen una metodología *pull-push*. Esto significa que a diferencia de los procesos convencionales dónde los recursos son “empujados hacia delante” en la línea productiva esperando a ser procesados, es el propio puesto de trabajo el que se encarga de indicar la cantidad de recursos necesaria a producir por el puesto inmediatamente anterior al mismo, evitando así problemas de esperas o cuellos de botella.

Si trabajamos en un entorno industrial relacionado con la fabricación de productos estaremos hablando de una metodología denominada *Lean Manufacturing*. Si en cambio estamos trabajando en un entorno relacionado con la construcción, como se trata en este trabajo, hablaremos entonces de *Lean Construction*.

La diferenciación entre ambos conceptos tiene su origen en las particularidades propias de la industria de la construcción, basadas principalmente en que el producto coincide con el lugar de trabajo, son las máquinas y los trabajadores los que se adaptan al producto y además está sometido a las inclemencias meteorológicas.

También conocida como construcción sin pérdidas, esta metodología plantea una nueva forma de trabajo basada en una correcta planificación de los proyectos, el cumplimiento de los plazos y un buen uso de los recursos. Este se trata de un sistema aún sin asentar completamente en España, pero que poco a poco se va introduciendo en los proyectos y empresas del sector.

Tal como se muestra en la figura 1, acorde al estudio que aparece en la publicación “BIM Handbook¹”, el 57% de la actividad llevada a cabo en los proyectos constructivos es totalmente desperdiciada. Tan sólo el 33% representa actividad útil y el 10% restante se traduce en actividades que intentar aportar un valor añadido al proyecto. Sin embargo, en los proyectos industriales la actividad desperdiciada representa un porcentaje mucho menor, y la mayor actividad restante se ve implicada en añadir valor al proyecto. Esto se debe a que la metodología *lean* lleva mucho más tiempo aplicada en este sector, en comparación con el constructivo.

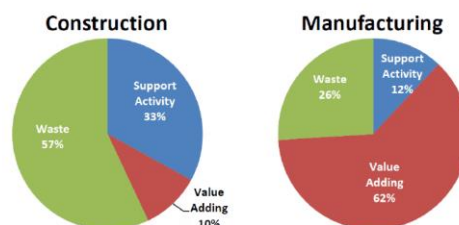


Figura 1. Tiempo desperdiciado en fabricación y construcción. [2]

¹ “BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors”, escrito por Chuck Eastman, Paul Teicholz, Rafael Sacks y Kathleen Liston, proporciona una visión integral y práctica del Modelado de Información de Construcción y su aplicación (BIM). Este manual sirve habitualmente de referencia para profesionales que buscan ampliar sus conocimientos acerca de esta metodología.

Por lo tanto, el principal objetivo del *Lean Construction* se encuentra en potenciar las actividades que realmente le aporten valor a un proyecto, mientras se intenta eliminar o reducir toda aquella que no lo hace.

A diferencia de la metodología tradicional, donde continuamente surgen problemas que es necesario resolver, este nuevo enfoque permite llevar a cabo una completa planificación previa con la que intentar predecir dichos problemas. Esto provoca también que los retrasos en las entregas sean menos habituales, ya que las empresas se encuentran preparadas para afrontar los posibles problemas.

Además de la planificación, también es importante mejorar los procesos de transformación (minimizar al máximo los flujos de recursos) y control del proyecto (asegurar el cumplimiento de cada actividad en la secuencia prevista) para aumentar su eficiencia.

Los resultados tras aplicar esta metodología *lean* en los proyectos constructivos son varios, siempre favorables y aportando un valor añadido que el cliente pueda apreciar:

Repercusión económica. Pese a que inicialmente es necesario llevar a cabo una inversión económica en nuevos equipos y tecnología, a largo plazo se realizan procesos más eficientes con mayor rentabilidad económica mediante el buen uso de los recursos disponibles. Además, la aplicación de este método suele llevar consigo un mayor cumplimiento del presupuesto del proyecto.

Mejora de la productividad. La intención de estos métodos es aumentar la producción mientras se reduce el tiempo empleado, sin que la calidad del resultado final se vea afectada. Esto se consigue mediante cambios en la asignación de tareas y equipos, además de las nuevas tecnologías antes mencionadas.

Mejora de la calidad. Tomando la mejora continua como base, cada proyecto se ve realimentado gracias a la experiencia con los anteriores, que sumado al hecho de atender las necesidades del cliente para que se encuentre satisfecho provoca una clara mejoría de la calidad final.

Mejora de la seguridad. Gracias a esta metodología se fomenta un espacio ordenado y limpio que permite aumentar la seguridad de los trabajadores en cuestión. Normalmente esto se consigue mediante métodos como el de las 5 eses.

2.2. LEGO. Conceptos básicos y aplicación.

La base fundamental de este trabajo consiste en la utilización de los bloques de construcción LEGO, reconocidos como uno de los juguetes más populares y versátiles del mundo, para llevar a cabo la simulación del proceso constructivo.

Para comprender mejor la aplicación de este tipo de piezas al trabajo es indispensable conocer tanto sus medidas más básicas como el tipo de piezas del que disponemos, ya que la empresa LEGO ofrece una amplia variedad de opciones entre sus productos.

La unidad más básica en LEGO se conoce como *stud*, cuya traducción se puede entender como pin o taco, y es importante para transformar una medida en LEGO a una medida decimal de longitud.

La distancia entre centros de dos pines es igual a ocho milímetros y se suele asignar con la letra P. Tomando esta medida como referencia es posible obtener el resto de las dimensiones de cada pieza tal y como se muestra en la figura 2.

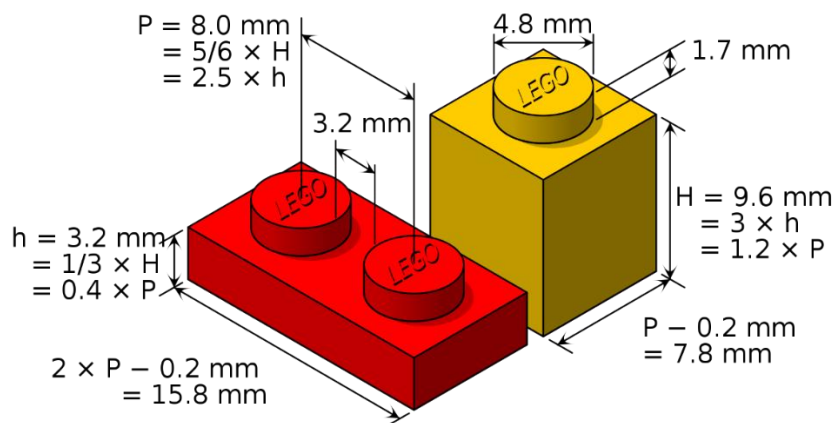


Figura 2. Medidas básicas LEGO. [3]

La altura de una pieza básica como la amarilla es igual a 1,2 veces P, sin embargo, una pieza fina como la roja es tres veces más baja. El ancho de las piezas está determinado siempre por la misma fórmula: el número de pines multiplicado por P menos un valor fijo de 0,2 milímetros.

A parte de las piezas más básicas y conocidas, LEGO ofrece también otras gamas de productos que utilizan un tipo de piezas más especiales o complejas que aportan nuevas cualidades o funciones a los modelos creados.

En este trabajo se han utilizado piezas de LEGO Technic, una línea especializada que se centra en la construcción de modelos más complejos y realistas, diseñados para enfatizar la funcionalidad y la ingeniería. Esta línea está dirigida tanto a niños mayores como a adultos entusiastas de la ingeniería y la mecánica.

A diferencia de los sets de LEGO convencionales, LEGO Technic utiliza piezas especiales que permiten la construcción de mecanismos y sistemas más avanzados. Estas piezas incluyen engranajes, ejes, poleas, resortes, motores y otros elementos técnicos que permiten la creación de modelos con movimientos y funciones específicas.

Además, LEGO Technic es compatible con otros sistemas de construcción LEGO, lo que significa que las piezas Technic se pueden combinar con las piezas regulares de LEGO para ampliar aún más las posibilidades de construcción y creatividad.

En la figura 3 se muestran las medidas básicas de una de estas piezas, concretamente un *beam* de cinco agujeros de largo por uno de ancho.

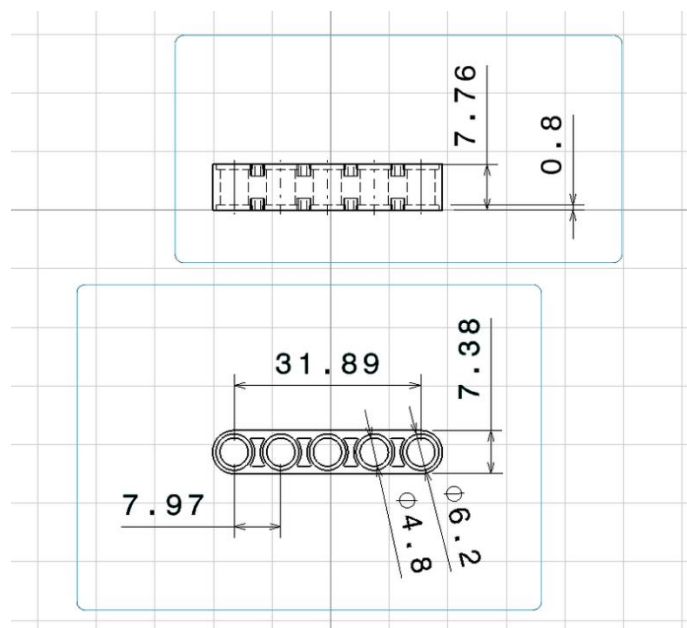


Figura 3. Medidas pieza beam 1x5. [4]

Las piezas LEGO se pueden agrupar en diferentes familias en función de sus formas y funciones principales. A continuación, se indican los tipos de piezas utilizadas durante el trabajo:

- Ladrillos con agujero o *technic bricks*

Se trata de una modificación de los ladrillos básicos (*regular bricks*) que surge con la aparición de la gama LEGO Technic, antes mencionada. La principal diferencia tiene lugar en el lateral de la pieza, donde aparecen unos agujeros que permiten la unión con otras piezas. Además, los *studs* superiores son huecos en este tipo de piezas, con el objetivo de mejorar la unión con otras.

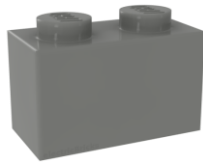


Figura 4. Regular brick 1x2. [5]



Figura 5. Technic brick 1x2. [5]

- Placas o *plates*

Son piezas planas, exactamente un tercio del grosor de una pieza convencional, de modo que tres placas superpuestas equivalen a un ladrillo básico. Existen en diferentes tamaños e incluso hay placas con modificaciones.

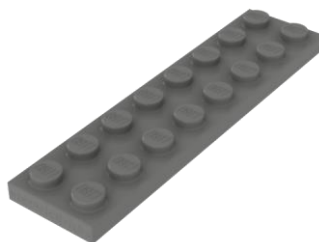


Figura 6. Placa 2x8. [5]

- *Beams*

Estas piezas también surgen con la aparición de la gama Technic. Son piezas similares a los ladrillos convencionales con anchura de un pin en cuanto a tamaño, pero con los bordes redondeados y con agujeros en el eje vertical, sin *studs*. Existen dos variantes en función del grosor de la pieza, *thick* y *thin*. En este caso usaremos la versión más gruesa con una unidad de altura. También es posible conocer estas piezas como vigas y es importante destacar que tan sólo se encuentran en longitudes impares desde 3 hasta 15 unidades (a excepción de 2).

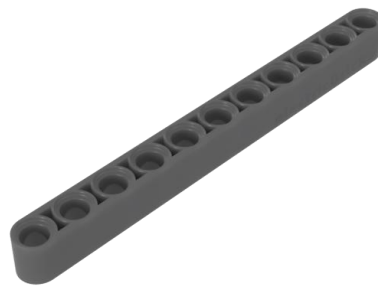


Figura 7. Beam 1x11. [5]

- Conectores

Dentro de esta categoría existen varios subgrupos de piezas diferentes, todos ellos para conseguir la unión de dos o más piezas. En este caso usaremos dos de ellos, pines de fricción y piezas de unión.

Los pines de fricción son piezas longitudinales, que varían en cuanto a forma y dimensión, pero que siempre deberán tener uno de sus extremos en forma cilíndrica. El otro extremo puede tener la misma forma o tener forma axial.



Figura 8. Pin de fricción 2L. [5]

Por otra parte, también utilizaremos piezas conocidas como uniones. Estas sirven principalmente para conectar dos o más pines o ejes entre sí. Hay muchos tipos dependiendo de su forma y las piezas a unir.



Figura 9. Conector. [5]

- Ejes o *axles*

Se trata de piezas longitudinales con sección en forma de cruz. Están destinadas principalmente a transmitir el giro entre piezas o conseguir lograr una unión rígida.

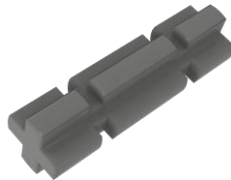


Figura 10. Eje 2L. [5]

- Paneles

Son una de las muchas piezas especiales que ofrecen los productos LEGO. En este caso hablamos de una pieza considerablemente más grande que las anteriores que dispone de varios agujeros en las tres direcciones dispuestos sobre diferentes superficies de la pieza, lo cual ofrece una gran versatilidad a la hora de conectarla con otras piezas diferentes o con otros paneles iguales.



Figura 11. Panel 1x3x11. [5]

2.3. Nave industrial. Dimensiones y escala.

La nave industrial referida durante el trabajo se trata de una construcción con cubierta a “dos aguas”, formada por un total de seis pórticos. Los elementos representados en el puesto de prácticas se asemejan a los que se muestran en el siguiente esquema.

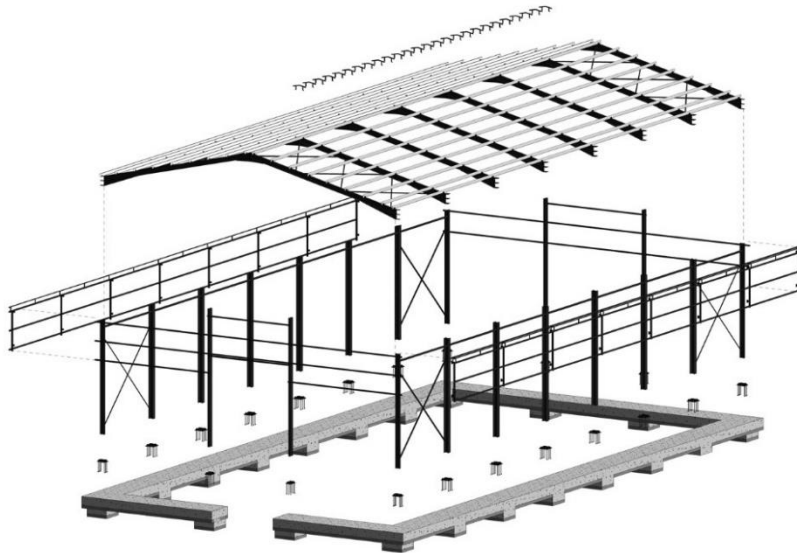


Figura 12. Elementos de la nave industrial. [6]

Además, la nave con la que trabajamos cuenta también con una estructura interior de forjado, que ofrece un espacio añadido a diferente altura que puede tener diversas aplicaciones como la presencia de oficinas, entre otras.



Figura 13. Ejemplo de forjado. [7]

Atendiendo a la clasificación de naves industriales que ofrece el Reglamento de Seguridad contra Incendios en los Establecimientos Industriales (RSCIEI), podríamos hablar de una nave tipo C, es decir aquella que ocupa la totalidad del edificio y se encuentra separada de otras edificaciones a una distancia mínima de tres metros. Este espacio intermedio deberá estar libre de cualquier elemento capaz de propagar un incendio.

Como se ha indicado anteriormente, el modelo de la práctica cuenta con un total de seis pórticos, siendo dos de ellos hastiales que rematan las fachadas frontal y de fondo de la nave en cuestión.

Dicho modelo tiene unas medidas de 79 x 54 x 32 pines LEGO (largo x ancho x alto), sin tener en cuenta la profundidad de las zapatas que irían colocadas bajo el terreno. Si tenemos en cuenta que un pin LEGO equivale a unos ocho milímetros, el modelo tiene unas medidas de 632 x 432 x 256 mm. La figura de LEGO común tiene una altura de cuatro centímetros. Tomando 180 centímetros como altura media de un trabajador podemos establecer una escala de 1:45.

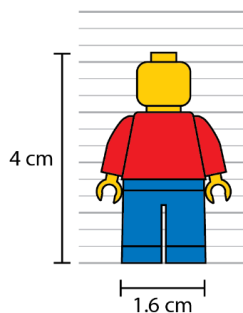


Figura 14. Medidas LEGO minifigure. [8]

Aplicando dicha escala sobre las medidas del modelo obtenemos las siguientes medidas reales de la nave, que en números redondos correspondería dimensionalmente a la típica nave de 20 m de luz, 9 m de altura de pilar, 12 m de altura máxima, 30 m de fondo y por tanto $30 / (\text{seis pórticos}-1) = 6$ m de módulo (separación entre pórticos).

Largo: $632 \text{ mm} \times 45 = 28440 \text{ mm} = 28,44 \text{ m}$ (**30 m**)

Ancho: $432 \text{ mm} \times 45 = 19440 \text{ mm} = 19,44 \text{ m}$ (**20 m**)

Alto: $256 \text{ mm} \times 45 = 11520 \text{ mm} = 11,52 \text{ m}$ (**12 m**)

2.4. Búsqueda de alternativas existentes.

Antes de construir el modelo en LEGO de la nave industrial, se ha realizado una búsqueda de posibles alternativas que ya existieran previamente en el mercado. La búsqueda se ha orientado en dos direcciones diferentes: construcciones en LEGO similares y modelos o maquetas de naves industriales fabricadas con otros métodos.

En cuanto a los modelos de LEGO ya creados, no existe nada similar a una nave industrial como la que se construye en este trabajo. Pese a que la marca ofrece una gama de productos relacionada con las construcciones (*LEGO Architecture*), está más enfocada a la recreación de edificios históricos o famosos y no aparece ninguno con ese enfoque industrial.

Lo más parecido que existe es este modelo de una conocida industria inglesa de neumáticos ubicada en Birmingham. Sin embargo, ni siquiera es un modelo oficial de la marca, sino que se trata de una versión creada por un usuario particular que ha sido añadida a un repositorio *online*.



Figura 15. Modelo de fábrica LEGO. [9]

Por otra parte, la mayoría de los modelos de nave industrial que existen en el mercado hacen referencia a maquetas utilizadas como muestra en el trabajo correspondiente. Generalmente están fabricadas en materiales más frágiles y delicados como cartón pluma, esto se debe a que estos modelos suelen estar pensados únicamente para ser expuestos pero no para ser manipulados.

Además, estas maquetas presentan una gran cantidad de detalles tanto exteriores como interiores, lo cual ayuda a cumplir su objetivo inicial, pero que no es necesario para una práctica como la que se plantea en este trabajo.



Figura 16. Maqueta de nave industrial. [10]

Es por ello que no se han encontrado modelos que cumplan los requerimientos de la práctica que se plantea en el trabajo. Las maquetas de naves industriales que se han encontrado no cuentan con ese carácter educativo necesario, tan sólo son expositivas y no permiten la manipulación de sus elementos ni observar el proceso constructivo, pese a representar modelos reales como el que se trabaja.

Tampoco los modelos de LEGO encontrados cumplen las expectativas, pese a que estos si son perfectamente manipulables y desmontables, ninguno se asemeja a la construcción representada en este trabajo.

Por tanto, la creación de nuestro modelo desde cero ofrece una serie de características que no reúne ningún otro modelo que ya exista, creando así una propuesta original que ofrece una solución práctica para la práctica planteada:

- El modelo final construido es dimensionalmente fiel al modelo real de una nave industrial.
- No dispone de detalles irrelevantes que no aportan valor a la práctica.
- El material utilizado, las piezas de LEGO, resultan familiares para todo el mundo.
- El modelo es fácilmente manipulable y robusta sin que exista riesgo que este se rompa.
- Permite incidir en el proceso de montaje y construcción de la nave.
- Se trata de un modelo que puede evolucionar con el tiempo y adaptarse a diferentes situaciones que se planteen.

3. Construcción del modelo físico

3.1. Base de trabajo (terreno)

Para llevar a cabo la construcción del modelo de manera correcta es necesario disponer de una base sobre la que trabajar y colocar la nave y que, además, se intente asemejar al terreno correspondiente a una construcción real lo máximo posible. Para ello se probaron diferentes técnicas y materiales hasta dar con la solución más adecuada para el trabajo.

A continuación, se describe el proceso creativo que se siguió hasta encontrar dicha solución:

La idea original consistía en utilizar una plancha de poliestireno extruido (XPS) de 125 cm de largo por 60 cm de ancho, con unos 20 mm de espesor. Se trata de un material de origen plástico con diversas aplicaciones, como embalaje o aislante en construcción. Las ventajas de este material residen en la combinación de ligereza y durabilidad, es muy importante que las planchas sean fácilmente manejables pero que a su vez perduren en el tiempo y no pierdan su forma. Este material además es resistente a la humedad y a diversos productos químicos, propiedades que pueden parecer menos importantes pero que también aportan valor.

Lo más interesante para el desarrollo de la práctica es poder “excavar” en el terreno las zapatas y riostras, tal y como ocurre en una construcción real para poder llevar a cabo la simulación del proceso al completo.



Figura 17. Cimentación de nave industrial. [11]

Sin embargo, fue en este punto dónde la plancha de XPS empezó a presentar ciertos inconvenientes. Las propiedades del material parecían adecuadas para la práctica, pero su manufactura no resultaba tan sencilla como se pensó en una primera instancia.

La primera idea para llevar a cabo la “excavación” consistía en utilizar un pirógrafo para realizar las hendiduras necesarias en el material. Para ello se iban a utilizar dos útiles diferentes acoplados al propio pirógrafo, uno para las zapatas y otro para las riostras, que siendo calentados a una temperatura alta pudieran quemar y retirar el material excedente sin ningún tipo de problema. Dichos útiles estaban hechos con hilo de cobre, con el objetivo de transmitir bien el calor y con la forma correspondiente del carril o de la zapata.



Figura 18. Útiles para recortar XPS.

Las primeras pruebas realizadas en trozos de XPS sobrantes parecían exitosas, sin embargo, al intentar aplicar la misma técnica en el panel definitivo nos dimos cuenta de que era imposible hacerlo de tal manera debido a que este era mucho más denso que los trozos que previamente se habían probado. Esto, sumado a que el pirógrafo no era capaz de calentar lo suficiente los útiles mostrados, resultó en que no era viable conseguir la profundidad necesaria para excavar las zapatas.

Una vez descartado el pirógrafo para las zapatas, se intentó hacer mediante otras técnicas como el uso de un taladro eléctrico o hacerlo manualmente con herramientas de corte como un cúter. Con ninguno de esos métodos se consiguió obtener un resultado aceptable, por lo que ambos fueron descartados.

Pese a no obtener los resultados esperados, el uso del pirógrafo se mantuvo para la realización de los carriles para las riostras. Sin embargo, esta vez se iba a aplicar sin ningún tipo de acople en su extremo ya que el diámetro de la punta nos permitía obtener una anchura adecuada para las piezas LEGO usadas como riostras. Para ello fue necesario marcar previamente las líneas y utilizar una regla metálica o similar como guía. El resultado obtenido parecía adecuado y acorde a lo que buscábamos, tan sólo faltaba hacer los agujeros para alojar las zapatas.

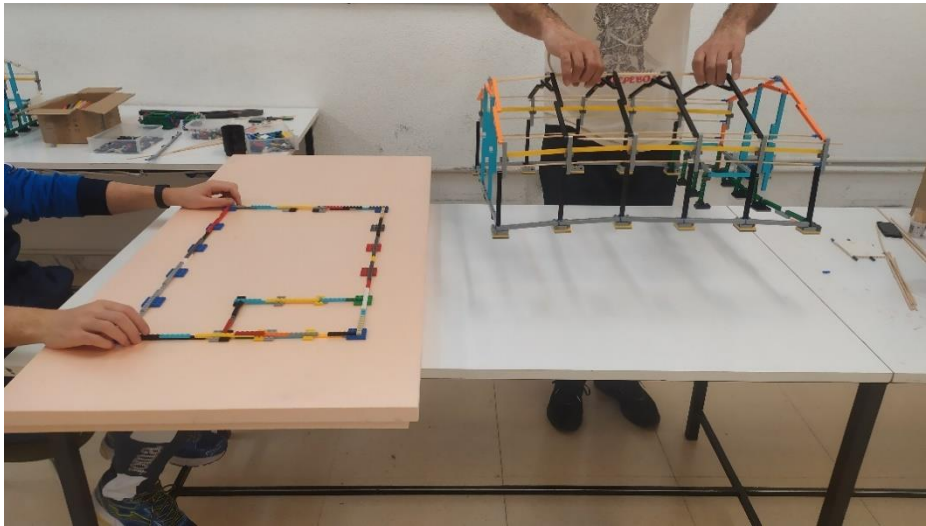


Figura 19. Planteamiento de la nave sobre XPS.

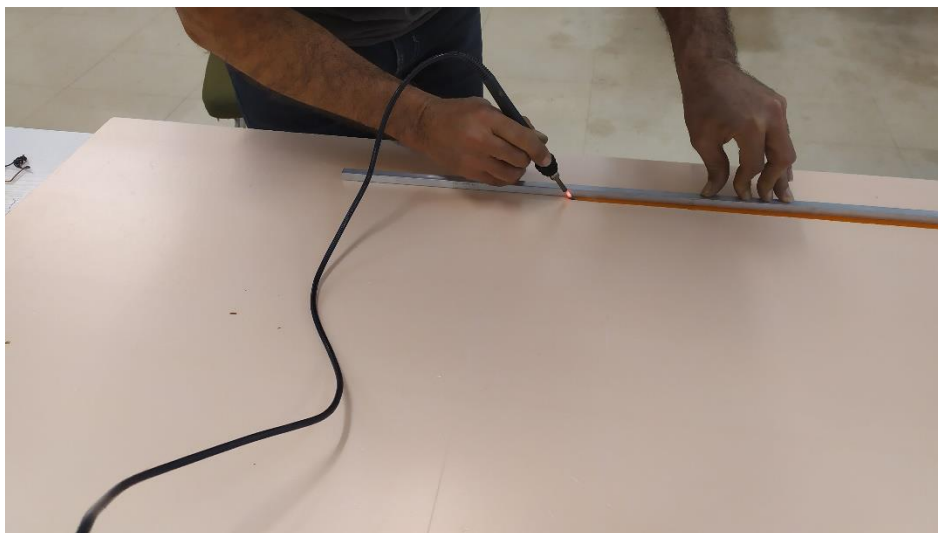


Figura 20. Aplicación del pirógrafo en XPS.

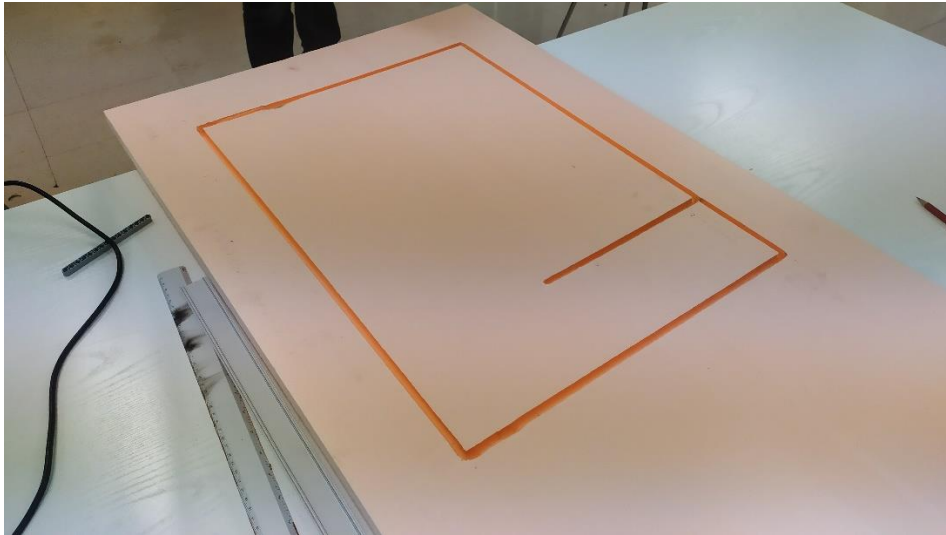


Figura 21. Carriles para riostras.

Para hacer los agujeros de las zapatas se optó por la utilización de una herramienta similar a un formón, que aplicada de manera manual parecía que podía ofrecer un acabado apropiado a nuestras necesidades. El proceso sin embargo resultó ser algo más laborioso de lo previsto, lo cual provocó que el acabado de alguna zapata fuera algo irregular y dañado dado que la herramienta empleada no aportaba demasiada precisión. Otro inconveniente era que el material retirado quedaba prácticamente inutilizable, lo cual era perjudicial para la práctica, ya que lo más conveniente era poder conservarlo para poder simular mejor el proceso de excavado.

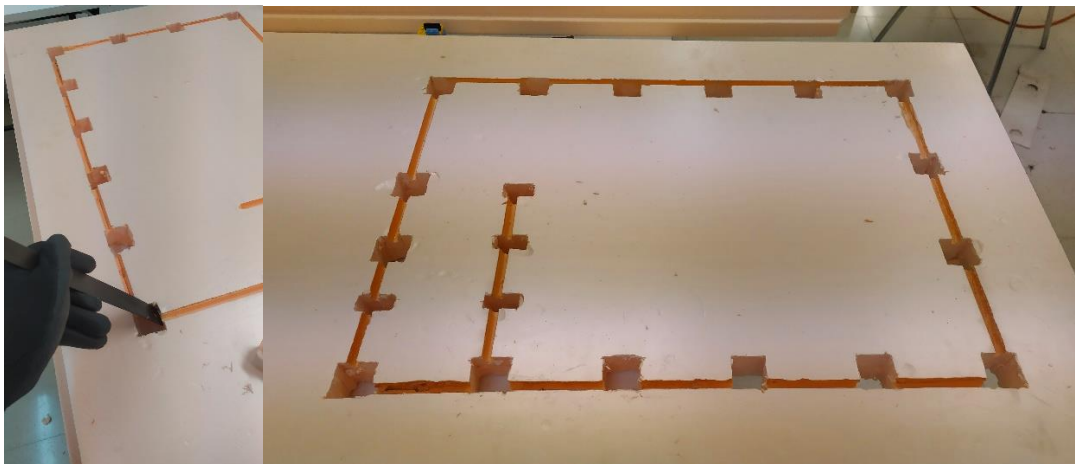


Figura 22. Zapatas excavadas manualmente.

Debido a que el resultado obtenido con la plancha de poliestireno extruido no fue el esperado, se optó por descartar por completo este material. En su lugar se pasó a utilizar una plancha de espuma de polietileno de 8 mm de espesor como la que se muestra a continuación. Al igual que el material anterior, este también resultaba ser ligero y manejable, no obstante, presenta una clara ventaja frente al poliestireno extruido: es más fácil de trabajar.

Este tipo de planchas pueden ser cortadas de manera mucho más sencilla, tan sólo con una herramienta de corte como un cúter se pueden obtener resultados más precisos con un buen acabado. Es por ello que finalmente se eligió este material de manera definitiva como base de trabajo para simular el terreno de la construcción.

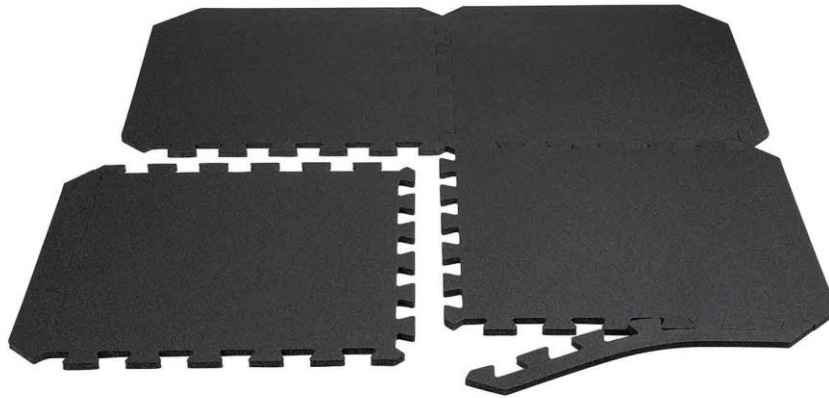


Figura 23. Plancha de espuma de PE. [12]

3.2. Planteamiento inicial

Antes de comenzar la práctica, los estudiantes tienen a su disposición todas y cada una de las piezas necesarias para llevar a cabo la construcción de la nave, agrupadas según el elemento del conjunto al que pertenezcan. Pese a que tanto materiales como maquinaria se utilizan a escala, explicada con anterioridad, las estimaciones de tiempo deben realizarse como si de una obra real se tratase.

Para ello es necesario seguir los pasos de un proceso constructivo real:

1. Acondicionamiento del terreno.
2. Geometría de zapatas y vigas riostras.
3. Hormigonado de zapatas y vigas riostras.
4. Izado de pilares de pórticos.
5. Montaje de dinteles.
6. Ensamblado de vigas de atado.
7. Instalación de cruces de San Andrés.
8. Instalación de vigas carril.
9. Instalación de correas en la cubierta y fachada.
10. Forjado
11. Montaje de paneles de cerramiento.
12. Montaje de cubierta.



Figura 24. Planteamiento inicial de la práctica.

3.3. Cimentación

La cimentación supone la primera etapa del proceso constructivo de una nave industrial y se ajusta a las tres primeras fases descritas en el apartado anterior. El proceso llevado a cabo durante la práctica es una simplificación del proceso real.

(1) Acondicionamiento del terreno.

En una situación real es necesario retirar la capa vegetal existente en el terreno, nivelar la porción de superficie correspondiente y compactarlo. Sin embargo, estas labores no son simuladas por los estudiantes durante la práctica ya que resulta difícil alcanzar ese nivel de detalle con los medios propuestos. De este modo los estudiantes deberán asumir dichas tareas como si ya hubieran sido realizadas previamente.

(2) Geometría de zapatas y vigas riostras.

Realizar el replanteo tanto de zapatas como de riostras. Pese a que en este caso este proceso se haya realizado previamente, es necesario tener en cuenta sus tiempos y recursos necesarios como ocurre con el resto de las etapas. El plano con las medidas exactas del terreno se encuentra en los anexos de este mismo documento (ANEXO IV).

(3) Hormigonado de zapatas y vigas riostras.

En primer lugar, se vierte el hormigón de limpieza, se colocan las armaduras y se hormigona contra el terreno. Estos procesos tan sólo son supuestos por los estudiantes, ya que cuando las zapatas son colocadas en el terreno se entiende que ya han sufrido los procesos correspondientes de armado, hormigonado y fraguado. La siguiente etapa del proceso sería colocar las esperas a pilares, no obstante, este proceso es omitido en la práctica ya que dichas esperas son representadas directamente por los propios *studs* o salientes de las piezas.

A continuación, se describen con más detalle los elementos que intervienen durante estas fases: las zapatas y las riostras, longitudinales y transversales. Todo ello será montado sobre la base de polietileno que se encuentra previamente cortada con las medidas exactas de modo que los estudiantes tan sólo deberán retirar las porciones de material correspondientes que permitirán colocar las piezas correctamente.

3.3.1. Zapatas

Este elemento forma parte de la base de la estructura de la nave industrial, soportando junto con las riostras el peso de esta, conformando la cimentación de la obra. En nuestro modelo existen dos tipos de zapata diferentes, las principales y las secundarias.

Las zapatas principales forman un perímetro rectangular que delimita las dimensiones de la nave, habiendo un total de 16 zapatas de este tipo. Por otro lado, encontramos las zapatas secundarias, que permiten situar el forjado (elemento que se explicará más adelante) en la posición correspondiente. Estas son algo más estrechas que las zapatas principales y hay un total de 4.

Ambos tipos de zapata están contruidos del mismo modo: apilando tres placas sobre si mismas para conseguir una altura total de un ladrillo convencional (9,6 mm). En el caso de las zapatas principales las placas son de un tamaño 4x4, mientras que las zapatas secundarias están formadas por placas 4x2.



Figura 25. Zapata principal.

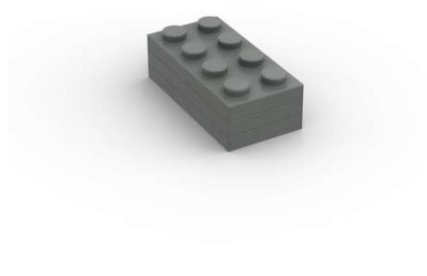


Figura 26. Zapata secundaria.

3.3.2. Riostras longitudinales

Las riostras, también como parte de la cimentación de la nave industrial, son los elementos que unen las zapatas entre sí. En este caso al tratarse de las riostras longitudinales estas se encuentran situadas en los laterales de la nave.

Este elemento ha sido representado mediante una pieza tipo *beam* de 15 pines de longitud (120 mm) y hay un total de 10, cinco por cada lado. La pieza se une a las zapatas mediante un solape de dos pines, por lo que la distancia entre zapatas laterales es de 11 pines (88 mm).



Figura 27. Riostra longitudinal.

3.3.3. Riostras transversales

Las riostras transversales por el contrario se encuentran situadas en los lados frontal y trasero de la nave. Cada una está construida de manera diferente debido a requerimientos del diseño a la hora de incluir el forjado.

La pieza trasera es la más sencilla de las dos. Está formada por tres piezas tipo *beam* de longitud 13, es decir 104 mm.

En el caso de la parte frontal, la riostra está formada por un total de 4 piezas *beam* de diferentes longitudes (9, 11, 13, y 15 pines respectivamente) conectadas como se muestra en la figura 29.

Podemos observar como la disposición de las zapatas en este caso es diferente al anterior, las dos zapatas principales situadas en la parte central se encuentran algo más juntas y aparece una zapata secundaria. Esto se debe a la necesidad de colocar el forjado en esta zona, ajustando el resto de los elementos a sus medidas, como ya se ha comentado anteriormente.



Figura 28. Riostra transversal trasera.



Figura 29. Riostra transversal frontal.

Una vez definidos todos los elementos que forman parte de la cimentación de la nave, estos deben ser montados sobre la plancha de polietileno, previamente excavada. Como podemos observar en la figura 30, también aparecen otros elementos como un puesto de vigilancia y una cabina sanitaria. Además, se incluye todo tipo de personal necesario durante el desarrollo de la obra como operarios de obra, personal de seguridad, entre otros.

La maquinaria necesaria será tratada en un apartado independiente más adelante. Todos estos elementos se incluyen para aportarle realismo a la simulación e intentar que el proceso se asemeje lo máximo posible a una obra de construcción real.



Figura 30. Excavación (modelo físico).



Figura 31. Cimentación (modelo físico).

3.4. Estructura

La construcción de la estructura abarca desde el paso tercero hasta el décimo. En este proceso no se tiene en cuenta el cimentado, explicado en el apartado anterior, ni la instalación del cerramiento con los paneles perimetrales.

3.4.1. Pilares

Los pilares son el primer elemento que se instala de la estructura de la nave tras su cimentación, siguiendo con la misma secuencia:

(4) Izado de pilares de pórticos.

Es necesario colocar un total de 12 pilares, a razón de seis por lado, en cada una de las zapatas principales situadas en los laterales de la estructura. Los pilares de uno y otro lado son simétricos respecto al eje longitudinal de la nave.

Para llevar a cabo su construcción se utilizan dos piezas tipo *beam*, uno de 15 pines y otro de 9, como elementos principales además de un ladrillo tipo *Technic* en su base para que los pilares puedan ser unidos a las zapatas. Además, es necesario utilizar una serie de conectores, pines y ejes para completar la construcción del pilar y que este permita la unión de otros elementos futuros.



Figura 32. Pilar.

3.4.2. Dinteles

Esta se trata de la quinta etapa del proceso de construcción de la nave:

(5) Montaje de dinteles.

Los dinteles son un elemento algo complejo debido a dos factores diferentes: están formados por un gran número de piezas LEGO y hay dos tipos de dintel en función de que estos formen parte de un pórtico hastial o de un pórtico intermedio. Además, el dintel perteneciente al pórtico hastial frontal y el perteneciente al trasero, tienen alguna ligera diferencia provocada por la configuración de las zapatas en la zona frontal de la nave.

Ambos tipos de dinteles basan su construcción en los mismos principios, un total de cinco piezas tipo *beam* de 15 pines de longitud conectadas entre sí de modo que forman una estructural triangular que se adapta a la forma del tejado de la nave. El ángulo central del tejado es de unos 135 grados, con una pendiente de la cubierta de un 37,5%.



Figura 33. Dintel (pórtico intermedio).

Los dinteles que forman parte de los pórticos hastiales disponen también de dos elementos verticales a modo de pilares, formados por tres piezas *beam* de 13 pines cada uno, que conectan el propio dintel con las zapatas de la zona inferior. En la parte frontal de la nave, estos nuevos pilares se encuentran más juntos que en la parte trasera, debido a la diferente configuración de las zapatas como ya se ha explicado.



Figura 34. Dintel (pórtico hastial).

3.4.3. Vigas de atado

Tras la instalación de los pilares se procede a ensamblar las vigas de atado sobre los hombros de estos, sexta fase del proceso:

(6) Ensamblado de vigas de atado.

El modelo cuenta con un total de 10 vigas de este tipo, representadas mediante dos piezas tipo *beam* de 7 pines y dos placas de tamaño 1x2 utilizadas a modo de conectores.

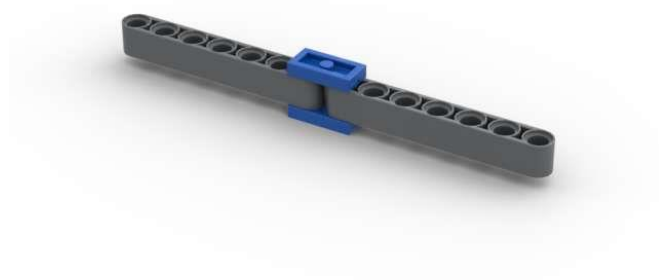


Figura 35. Viga de atado.

3.4.4. Cruces de San Andrés

La siguiente etapa de la construcción se corresponde con la siguiente:

(7) Instalación de cruces de San Andrés.

Este se trata del primero de los elementos que no pueden ser representados en su totalidad mediante piezas LEGO y que, por tanto, requieren de otro tipo de materiales. En este caso, para reproducir el funcionamiento de los cables tensados propios de este elemento se han utilizado pequeños trozos de cuerda de lona. Para ensamblar las cruces con el resto de la estructura se utilizan dos conectores que, unidos a los extremos de la cuerda, permiten crear una unión fácilmente desmontable.

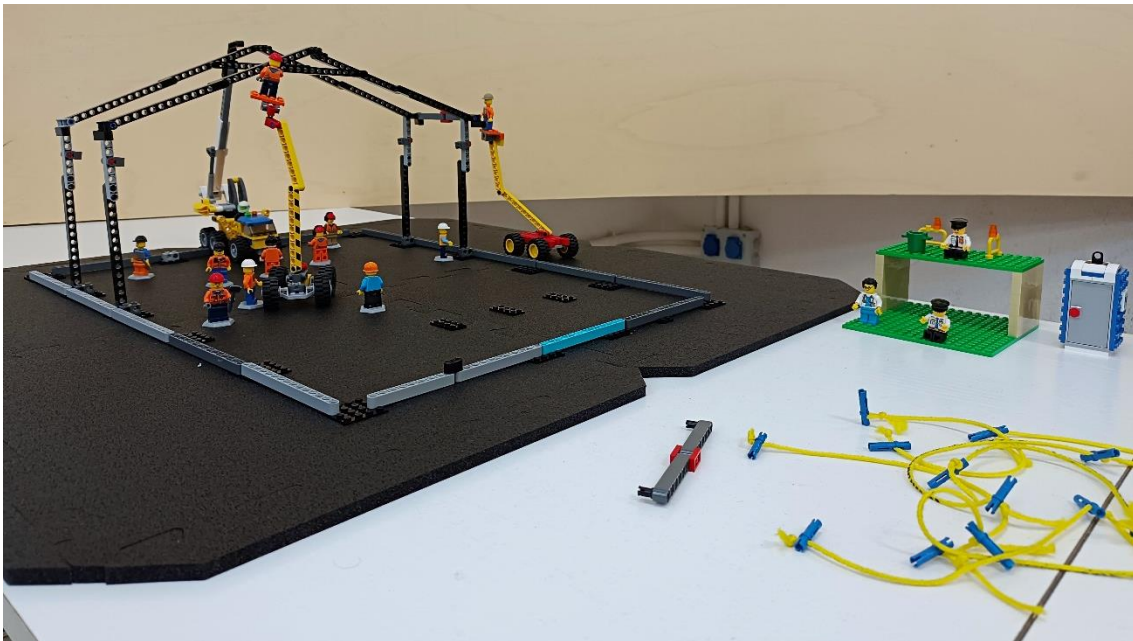


Figura 36. Cruces de San Andrés.

Es importante aclarar que las etapas cuarta, quinta, sexta y séptima no se realizan de manera puramente secuencial, sino que se llevan a cabo de forma solapada. Es decir, no es necesario esperar a que un paso termine para comenzar con el siguiente, se realizan de manera simultánea en la medida de lo posible.

Como se puede apreciar en la figura 37, no se han instalado todos los pilares para empezar con el ensamblaje de los dinteles, sino que se van montando pórticos completos y cuando hay varios se instalan las vigas de atado y cruces de San Andrés correspondientes. Es importante también asegurar la estabilidad de la estructura en todo momento durante la ejecución de estas etapas, ya que podría ser algo inestable al encontrarse en pleno proceso de construcción.

Además, durante este proceso también se lleva a cabo la instalación de un cabio entre dos de los pórticos intermedios ya colocados. Dicho elemento está formado por una pieza *beam* de 11 unidades de longitud y otras dos de longitud 5, con sus correspondientes conectores que aseguren la unión de las piezas entre sí y del elemento con el resto del montaje.



Figura 37. Montaje de los pasos 4, 5, 6 y 7.

3.4.5. Vigas carril

Una vez completados los pasos anteriores, procedemos a instalar las vigas carril (paso octavo):

(8) Instalación de vigas carril.

Este se trata de un elemento sencillo, únicamente formado por una pieza tipo *beam* de longitud 15 sobre la que se colocan dos conectores pin-eje en sus extremos para poder asegurar una conexión sencilla con el resto de la nave. Al igual que con las vigas de atado, se colocan un total de 10 a razón de cinco por cada lado.

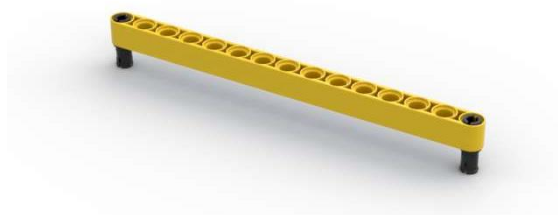


Figura 38. Viga carril.

3.4.6. Correas

Este es otro de los elementos en los que intervienen materiales diferentes a las piezas LEGO, se corresponde con el paso noveno de la construcción.

(9) Instalación de correas en la cubierta y fachada.

Para ello se utilizan palillos de madera con una longitud similar a la de la nave, aproximadamente 60 centímetros, y un diámetro de unos tres milímetros. Ya que se han utilizado piezas tipo *beam* en la mayor parte de la estructura, y estas cuentan con agujeros pasantes, los palillos pueden ser introducidos por dichos agujeros para simular el funcionamiento de las correas. Cada palillo lleva a su vez colocado en uno de sus extremos un conector LEGO, cuya función es evitar que los palillos queden fijados en la posición correcta y no puedan desplazarse más de la cuenta, ya que el agujero de las piezas cuenta con un diámetro mayor que el del palillo.

3.4.7. Forjado

Por último, completando la construcción de la estructura de la nave, se realiza la instalación del forjado como paso décimo.

(10) Forjado.

La estructura del forjado cuenta con sus propios pilares y vigas. Se colocan un total de ocho pilares, formados principalmente por una pieza *beam* de 9 pines de longitud y un ladrillo en la parte inferior. Cuatro de estos pilares se apoyan sobre las cuatro zapatas secundarias que se colocaron previamente. Los cuatro pilares restantes aprovechan las zapatas principales ya instaladas.

Por su parte, hay un total de ocho vigas diferenciadas en dos tipos en función de su longitud. Dos vigas colocadas en la dirección longitudinal de la nave, de longitud 13, y 6 vigas colocadas transversalmente, de 9 pines de longitud. Ambas se constituyen mediante piezas tipo *beam* y sus correspondientes conectores.

El forjado se completa con otro tipo de conectores LEGO que permiten unir vigas y pilares entre sí, además de un total de tres piezas tipo panel que cubren la estructura apoyándose sobre la parte superior como si de los paneles utilizados en una obra real se tratase.



Figura 39. Forjado.

3.5. Cerramiento

Una vez completada la construcción de la estructura principal de la nave, es necesario instalar también los elementos encargados de cubrir dicha estructura tanto en las fachadas como en los laterales de la nave.

(11) Montaje de paneles de cerramiento.

Si se tratara de una construcción real, podríamos diferenciar los paneles empleados en las fachadas (metálicos) y los empleados en los laterales de la nave (tipo *sándwich*). Sin embargo, en el modelo de la práctica ambos se representan de la misma manera, cambiando únicamente el color de las piezas. Cada panel está formado por una pieza tipo plancha 1x5x11 y una serie de conectores. En la figura 40 se puede observar la disposición de estos, y cómo se podrían añadir más niveles hasta completar el cerramiento de la nave al completo.



Figura 40. Instalación del cerramiento.

3.6. Cubierta

El último de los pasos consiste en llevar a cabo el montaje de los elementos encargados de cubrir el tejado de la nave industrial.

(12) Montaje de cubierta.

Cada pieza de la cubierta está formada por una serie de piezas tipo placa de 2 unidades de ancho y de las siguientes longitudes: dos piezas de 16, dos de 12 y dos de 4 pines. Además, también es necesario utilizar dos piezas modificadas para realizar la unión de ambas “alas” en su parte más alta con el ángulo correspondiente. Dichas piezas consisten en dos placas 1x2, una de ellas con un asa el lateral y la otra con dos clips abiertos. Las piezas de la cubierta únicamente se colocan apoyadas sobre las correas de la nave, no disponen de una unión LEGO específica.



Figura 41. Montaje de la cubierta.

3.7. Maquinaria

Durante todo el proceso constructivo de la nave se han utilizado, a parte de los materiales propuestos, una serie de máquinas que serían indispensables en un proceso real. Dichas máquinas también están construidas con piezas LEGO, la mayoría de ellas son modelos ya existentes en el mercado creados por la propia marca. Sin embargo, no todas las máquinas necesarias para llevar a cabo el proceso al completo existen son ofrecidas por LEGO, por lo que algunas de ellas han sido creadas por nosotros mismos de manera simplificada con las piezas que estaban a nuestra disposición.

A continuación, se explicará la maquinaria empleada, los procesos en los que estas intervienen y su funcionamiento de manera sencilla. Todo ello siguiendo el orden de aplicación en el proceso de construcción:

- Camión de asistencia.

Está involucrado en todo el proceso de construcción. Cuenta con un pequeño camión con grúa que puede ayudar en labores de transporte de material. Además, incluye una cabina sanitaria que al igual que ocurre en una obra real, es un elemento necesario que debería estar siempre presente.



Figura 42. Camión de asistencia (60073). [5]

- Máquinas de construcción.

El siguiente conjunto de vehículos está compuesto por una máquina excavadora, una pala cargadora y un volquete. Todas ellas intervienen durante el proceso de cimentado de la nave. En primer lugar, es necesario acondicionar el terreno retirando la vegetación existente y compactando la zona en cuestión. La pala cargadora es la encargada de retirar el material excedente que será transportado fuera del lugar de trabajo mediante el camión volquete.



Figura 43. Máquinas de construcción (42023). [5]

- Compactadora.

Esta máquina se encarga únicamente de realizar la labor de compactado del terreno mencionada anteriormente. LEGO no ofrece una máquina con estas características por lo que la hemos creado desde cero con otras piezas.



Figura 44. Máquina compactadora.

- Máquinas excavadoras.

Para llevar a cabo el excavado tanto de las zapatas como de las riostras se han utilizado las siguientes máquinas excavadoras para hacer los huecos y zanjas necesarios. Para retirar el material sobrante se utiliza el mismo volquete que se utilizó anteriormente. Los modelos mostrados cuentan con diferentes accesorios como palas de diferente tamaño o un martillo neumático.



Figura 45. Excavadoras de obra (60385) (60152). [5]

- Hormigonera.

Posteriormente se utiliza un camión hormigonera como el que se muestra a continuación para llevar a cabo el vertido de material para formar tanto las zapatas como las vigas riostras.



Figura 46. Hormigonera (7990). [5]

- Fratasadora.

Después de haber vertido el hormigón y antes de que este se encuentre totalmente fraguado, se utiliza una máquina fratasadora que se va desplazando por toda la superficie para mejorar el acabado superficial de esta. El objetivo de esta máquina es alisar el hormigón para conseguir una capa lisa y uniforme. Su funcionamiento consiste en el uso de una serie de cuchillas giratorias que se encuentran en la parte inferior de la máquina y entran en contacto con el suelo.



Figura 47. Fratasadora.

- Niveladora para soleras.

Con un objetivo similar al de la fratasadora (mejorar la superficie hormigonada), se emplea una máquina niveladora para conseguir una superficie todavía más uniforme que no tenga defectos y se encuentre perfectamente igualada y equilibrada.

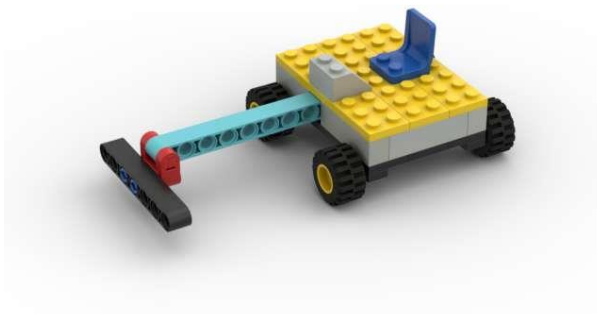


Figura 48. Niveladora.

- Grúa móvil.

Para llevar a cabo el izado y colocación de los diferentes elementos que conforman la estructura de la nave se utiliza una grúa móvil como la que se muestra a continuación. Esta máquina consta de un vehículo que dispone de un elemento de elevación acoplado sobre su chasis que mediante diferentes sistemas de propulsión consigue alcanzar alturas elevadas y cargar con elementos pesados.



Figura 49. Grúa móvil (60324). [5]

- Cesta elevadora.

Por otra parte, es necesario que los operarios también puedan trabajar a la altura que requiera la instalación en cada determinado momento. Para ello se emplea una cesta elevadora, una máquina similar a la anterior que cuenta con una plataforma que permite a los operarios trabajar a diferentes alturas de manera segura.



Figura 50. Cesta elevadora.

4. Modelo digital

Como complemento del modelo físico de la nave ya creado y explicado con detalle, se ha creado de manera simultánea un modelo digital de la misma nave. Con ello se aumentan las posibilidades de estudio y análisis de la nave en cuestión, ofreciendo una visión diferente de la misma.

El hecho de disponer de un modelo digital permite explorar nuevas ideas y diseños de manera sencilla sin necesidad de manipular las piezas reales, ni siquiera es necesario que dispongas de ellas. De este modo se pueden probar diferentes técnicas de construcción, combinaciones de piezas o incluso colores, si nos interesa un resultado más estético. Todo ello sin necesidad de montar y desmontar el modelo físico de manera repetida.

Además, la utilización de un *software* de diseño LEGO supone un posible ahorro de recursos y tiempo, ya que es posible que se detecten errores en el modelo digital antes de empezar a construir el modelo físico. Esto también permite una mejor planificación del trabajo.

Por otra parte, el hecho de disponer de un modelo digital nos permite conservar la construcción por un periodo de tiempo indefinido, algo que no siempre es posible con los modelos físicos debido a diferentes limitaciones (espacio, tiempo, etc). También es posible compartir el modelo con otras personas al alcance de un solo *click*, independientemente de dónde estas se encuentren.

Por último, los programas de este tipo utilizados habitualmente ofrecen la creación de otro tipo de archivos complementarios a la construcción en si misma. Esto hace referencia a manuales de instrucciones, imágenes detalladas o animaciones constructivas, entre otras. Todo ello no sería posible si el modelo fuera construido tan sólo de manera física.

4.1. Elección del software

Para crear el modelo virtual de la nave se ha utilizado el *software* de diseño 3D Stud.io, desarrollado por la empresa BrickLink. Esta compañía se dedica completamente a la venta y distribución de piezas LEGO, además de otorgar a los usuarios una plataforma *online* donde compartir y descargar los modelos digitales creados por la comunidad. El *software* que ofrece es totalmente gratuito.

Antes de comenzar con la creación del modelo utilizando dicho programa, se valoraron otras opciones que también permitían la creación de este tipo de modelos. Concretamente se tuvieron en cuenta otros dos programas, a parte del ya mencionado: LEGO Digital Designer y LDCad. A continuación, se indican las virtudes de cada uno y el porqué de la elección definitiva.

- LEGO Digital Designer

Se trata del *software* original desarrollado por la propia compañía de LEGO. Es el programa más sencillo y básico de los tres, lo cual permite que la primera toma de contacto con este tipo de programas resulte agradable. Sin embargo, es tal su sencillez que el programa se quedaba corto para nuestros propósitos, especialmente comparándolo con el resto de las opciones. Además, desde el año 2021 la empresa ha dejado de dar soporte oficial al programa y este ha dejado de recibir actualizaciones, pese a que todavía se puede utilizar. Lo más destacado del programa consiste en la experiencia básica que este otorga al usuario.

- LDCad

Como su propio nombre indica, este programa consiste en un *software* de diseño asistido por ordenador (*Computer Assisted Design*), por lo que se trata de un programa más complejo que el anterior. Pese a que su objetivo sea el mismo, la creación de modelos virtuales de LEGO, este programa ofrece un mayor grado de precisión a la hora de construir dichos modelos. El programa también ofrece la posibilidad de editar las propias piezas a nivel de vértice y borde, esto provoca un total control del modelo y sus piezas. La interfaz de este programa, acorde con sus características

funcionales, resulta más complejo y extenso. El programa ofrece otras técnicas como la generación de instrucciones o la posibilidad de trabajar con varios modelos de manera simultánea. En resumen, LDCad se trata de un programa mucho más completo que está enfocado en lograr la mayor precisión posible.

- Bricklink Stud.io

Por último, el programa Stud.io de la empresa BrickLink. Finalmente se optó por esta opción debido a que el programa se encuentra en un punto medio entre la excesiva sencillez de LEGO Digital Designer y la precisión de LDCad. Pese a no ser tan complejo como este último, Stud.io ofrece una serie de funciones como la posibilidad de crear un manual de instrucciones completo, el análisis de la estabilidad del modelo creado o la detección de colisionado de piezas. Todo ello a través de una interfaz completa, pero a su vez intuitiva. El programa dispone de una amplia biblioteca de piezas, llegando a ofrecer incluso la posibilidad de conocer el precio del modelo y comprar las piezas necesarias para su construcción a través del propio programa.

Lo que hizo que nos decantáramos por este programa, frente al resto de opciones disponibles, fue que este dispone de un menú bastante completo de renderizado y visualización 3D. Con ello podíamos obtener de manera sencilla imágenes del modelo en buena calidad e incluso animaciones del proceso constructivo. Todo ello sin necesidad de exportar el modelo a un formato diferente para trabajar con un programa externo, como ocurría con el resto de los programas mencionados.

En el ANEXO III se explican con algo más de detalle algunos de los conceptos básicos del programa y sus funciones principales. En dicho anexo se destacan especialmente las opciones del programa que han sido utilizadas durante el desarrollo del presente trabajo.

4.2. Limitaciones del programa

Pese a la amplia variedad de funciones que ofrecen cada uno de los programas mencionados anteriormente, ninguno consigue representar al completo los siguientes aspectos constructivos de la nave:

Las piezas que en el modelo físico están construidas con elementos que difieren de las piezas LEGO, no pueden ser representados digitalmente en el programa. Esto hace referencia a las correas, representadas con palillos de madera, y a las cruces de San Andrés, representadas mediante cuerda.

Por otra parte, los elementos que forman parte de la cubierta sí están formados en su totalidad por piezas LEGO, sin embargo, tampoco ha sido posible representarlos en el modelo virtual. Esto es debido a que se trata de elementos que el modelo real no se encuentran unidos al resto de la estructura, sino que simplemente se apoyan sobre las correas. Por tanto, este elemento sí podría ser construido en el programa informático, pero no ser colocado en su posición correspondiente al no estar presentes las correas, por lo que se ha optado por no incluirlas en el modelo digital.

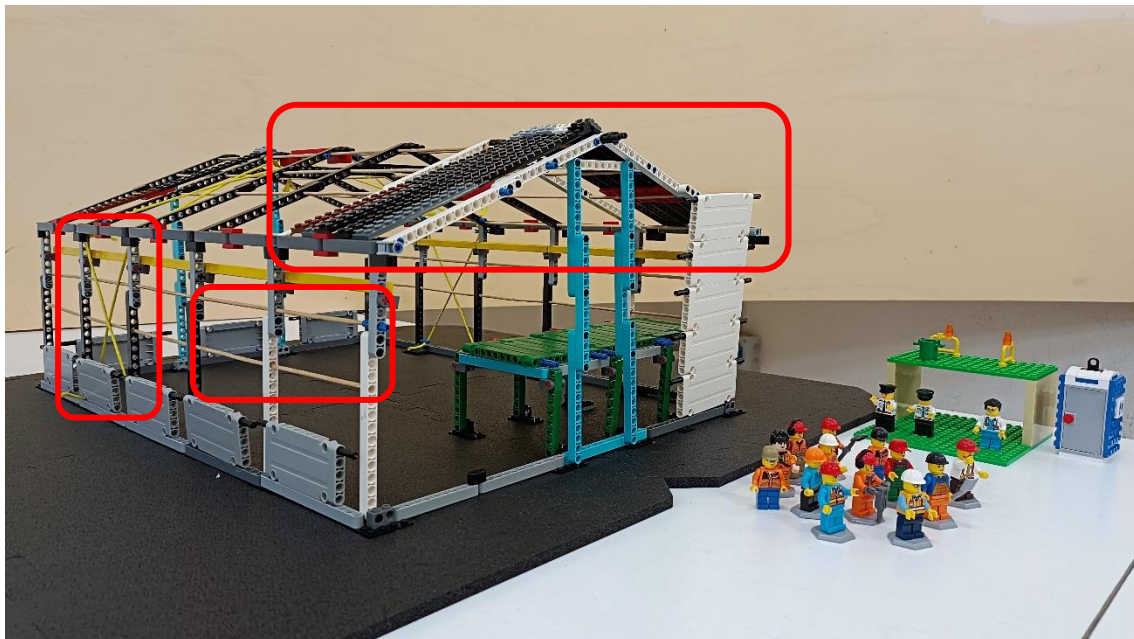


Figura 51. Elementos no representados en el modelo digital.

4.3. Resultado final

A continuación, se muestra el modelo digital obtenido visto desde diferentes perspectivas para poder apreciar todos sus detalles constructivos. Las imágenes han sido creadas con el programa Stud.io sin necesidad de otros programas externos.



Figura 52. Modelo digital de la nave. Exterior.



Figura 53. Modelo digital de la nave. Interior.

4.4. Simulación del proceso constructivo

Por último, se ha realizado un vídeo que muestra el proceso constructivo al completo, indicando cada una de las fases. El vídeo está dividido en tres partes claramente diferenciadas. Una primera en la que se muestra la simulación llevada a cabo por los propios estudiantes durante el desarrollo de la práctica. Esta parte ha sido creada a partir de fotografías realizadas sobre el modelo físico real de la nave a modo de *time-lapse*. El resto del vídeo ha sido creado gracias al modelo virtual de la nave.

La segunda parte del vídeo consiste en un recorrido aéreo que muestra con detalle todas las partes de la nave industrial, tanto exterior como interiormente. Esto ha sido realizado mediante un visor 3D *online* en el que se ha manipulado el modelo digital de la nave.

La última parte muestra de nuevo el proceso de montaje, en un entorno mucho más sencillo y minimalista propio del modelo virtual de la nave. Esto ha sido creado con el programa utilizado durante el diseño del modelo (Stud.io), ya que este ofrece la posibilidad de crear este tipo de animaciones como ya se ha comentado en apartados anteriores.

El resultado ha sido publicado en la plataforma de vídeo YouTube. Es posible acceder al vídeo a través del siguiente enlace o bien escaneando el código QR mostrado en la figura 54:

<https://youtu.be/B-ajVyQxsw4>



Figura 54. Código QR del vídeo.

5. Conclusiones

Durante el presente trabajo se han tratado diversos aspectos relacionados con la creación del modelo a escala de una nave industrial necesario para el desarrollo de una práctica orientada al estudio de construcciones industriales llevada a cabo por los estudiantes del Máster en Ingeniería Industrial.

El trabajo ha cubierto diferentes etapas hasta lograr el resultado final mostrado, desde la concepción de la idea, el desarrollo del modelo físico llevado a cabo presencialmente en el laboratorio de estructuras o el trabajo realizado de forma autónoma consistente en el realizar el modelo digital de la nave y el correspondiente vídeo que muestra el proceso a llevar a cabo durante su montaje.

En el siguiente apartado se explican las conclusiones obtenidas una vez realizadas todas las etapas anteriores, en relación con los objetivos propuestos inicialmente antes de comenzar con la realización de trabajo en sí, comentados en el primero de los apartados del presente documento.

5.1. Conclusiones finales

El trabajo realizado demuestra que es posible realizar un modelo a escala de una construcción compleja como una nave industrial, de manera simplificada y sencilla mediante el uso de los bloques de construcción LEGO, mejorando la comprensión de los conocimientos teóricos por parte de los estudiantes relacionados con el proceso constructivo llevado a cabo en una situación real. El modelo creado cumple además con el requisito propuesto inicialmente de ser versátil y duradero en el tiempo, pudiendo ser perfectamente modificable y adaptable a diferentes situaciones requeridas.

Se ha podido comprobar también cómo la aplicación de este tipo de metodologías tienen grandes repercusiones en el desarrollo de habilidades comúnmente conocidas como *soft skills*, tales como liderazgo, creatividad, trabajo en equipo o pensamiento crítico, entre otras.

Por último, gracias al estudio realizado durante la realización del trabajo especialmente previa la construcción del modelo se ha podido comprobar que el uso de LEGO se encuentra en auge durante los últimos años, siendo utilizado como una muy útil herramienta educativa empleada por diversas entidades.

Son cada vez más las instituciones que implementan este tipo de prácticas o proyectos, lo cual demuestra un cambio en la percepción general de las mismas. Hace no demasiado tiempo la aplicación de este tipo de metodologías era causante de controversia y rechazo por parte del público general. Esto poco a poco está cambiando, tal y como podemos ver en las universidades mencionadas en este trabajo, por ejemplo.

5.2. Líneas de mejora

A continuación, se indican los aspectos del trabajo que podrían ser mejorados de cara a futuras ocasiones. Este apartado se centrará en la mejora del modelo físico de la nave industrial, tratando especialmente tres aspectos fundamentales de la misma:

- Mejora del terreno

Debido al material del que disponíamos durante el desarrollo del trabajo tan sólo se utilizó una plancha de espuma de polietileno para simular el terreno de construcción. De este modo las zapatas quedan enrasadas con la base como si estas estuvieran totalmente excavadas en el terreno, debido a que la plancha utilizada tiene un grosor similar al de la altura de las piezas LEGO, 8 mm.

Para futuras ocasiones se propone utilizar dos planchas iguales para conseguir una superficie con un total de 16 mm de espesor. Las riostras quedarían también excavadas y de este modo conseguiríamos que todos los elementos que conforman la cimentación de la nave queden enrasados en la superficie, obteniendo un mejor resultado que se ajusta más a un proceso constructivo real.

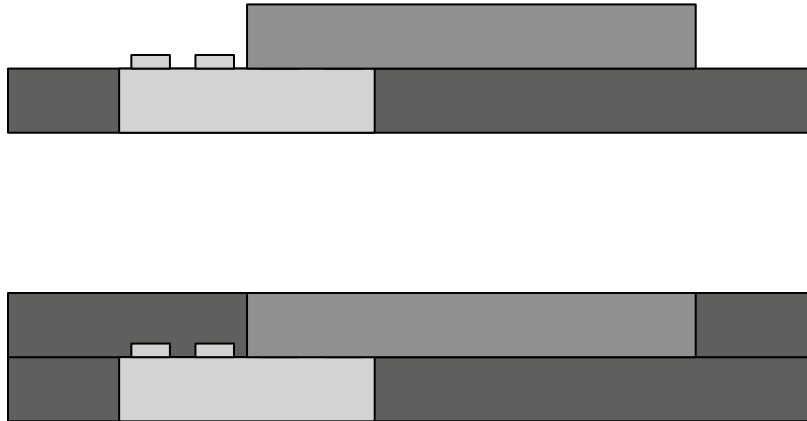


Figura 55. Mejora del suelo (modelo físico).

- Evitar solapes de piezas

Actualmente, el modelo cuenta con algunos elementos que se encuentran contruidos mediante la unión de varias piezas tipo *beam* diferentes, conectadas entre sí mediante pines de fricción básicos de longitud 2L. Este tipo de unión provoca, irremediamente, que se presenten piezas solapadas debido a que es necesario que sus caras laterales entren en contacto para poder ser atravesadas por el conector. Los elementos que están contruidos de este modo (pilares y dinteles) tienen entonces una anchura total del equivalente a dos piezas LEGO, debido al solape explicado.

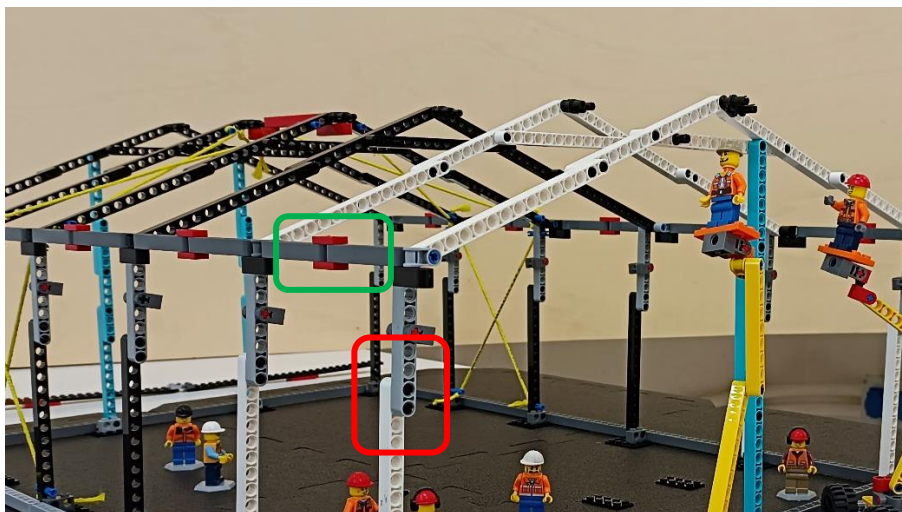


Figura 56. Ejemplo de piezas solapadas.

Para futuras ocasiones se propone que dichos elementos se construyan siguiendo el modelo utilizado en las vigas de atado. Es decir, que las piezas se coloquen a continuación de la anterior y estas sean unidas lateralmente mediante una pieza estrecha tipo placa. De este modo se conseguiría que la anchura de los elementos en cuestión fuera de tan sólo una unidad, consiguiendo un modelo mucho más uniforme constructivamente ya que irían acorde al resto de elementos presentes.

- Mejorar la unión entre pilares y dinteles

Por último, se propone también una posible mejora en la unión de los pilares y los dinteles entre sí. En el modelo actual dicha unión, debido a las piezas elegidas para llevarla a cabo, se encuentra articulada. Sin embargo, el diseño de la nave no requiere que estos elementos sean articulados ni puedan tener movimiento, por lo que para futuras ocasiones se propone eliminar este aspecto.

Para ello se propone establecer una unión mediante cartela similar a que se muestra en la figura 57. Con este tipo de unión se podría eliminar la articulación que actualmente aparece entre el pilar y el dintel.



Figura 57. Propuesta de unión mediante cartela.

Todos estos cambios requerirían de un proceso de rediseño del modelo LEGO de la nave, ya que es posible que al intentar implementar estas nuevas medidas aparezcan pequeños errores de medida o que sea necesario modificar la unión de alguna otra pieza, pero sin necesidad de cambiar piezas y aplicando tan sólo pequeños cambios o ajustes que permitan el correcto montaje del modelo.

5.3. Consideraciones adicionales

5.3.1. Planificación del trabajo. Diagrama de Gantt.

En este apartado se explica cómo ha sido el desarrollo del trabajo realizado, desde su comienzo a principios del año 2023 hasta su finalización en Julio del mismo año. Para ello se ha utilizado un diagrama de Gantt para poder entender mejor las diferentes etapas del proceso y su extensión en el tiempo.

El diagrama muestra en la primera columna el listado de tareas resumida que se han realizado durante el trabajo. El eje horizontal muestra el avance temporal, dividiendo el diagrama en los meses y semanas correspondientes. Las semanas mostradas en amarillo hacen referencia al tiempo durante el que tuve los exámenes ordinarios del grado y no pude dedicar tiempo al trabajo de fin de grado. Los números hacen referencia a fechas importantes relacionadas con el trabajo:

1. Primera reunión con los tutores.
2. Propuesta del tema del trabajo.
3. Primer modelo digital de la nave.
4. Fin del trabajo presencial en el laboratorio.
5. Creación del modelo digital definitivo.
6. Vídeo definitivo del proceso constructivo.

	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO
Planificación. Propuesta de ideas.	1	2					
Trabajo presencial (laboratorio).			4				
Desarrollo modelo digital.		3			5		
Desarrollo del vídeo.						6	
Redacción del trabajo.							
Desarrollo de la presentación.							

Tabla 1. Diagrama de Gantt.

5.3.2. Coste en horas del trabajo

Atendiendo a la división de tareas planteada en el apartado anterior para el diagrama de Gantt, a continuación, se realiza una estimación del total de las horas invertidas durante la realización del presente trabajo. También se llevará a cabo la conversión de dichas horas a euros, en función del salario estimado de un ingeniero en formación. La distribución de horas de trabajo queda de la siguiente manera:

- Planificación, propuesta de ideas e investigación: 20h de trabajo.
- Trabajo presencial en el laboratorio: 80h de trabajo.
- Desarrollo del modelo virtual de la nave: 45h de trabajo.
- Desarrollo del vídeo explicativo: 30h de trabajo.
- Redacción del tomo y elaboración de la presentación: 150h de trabajo.

Esto supone un total de 325 horas dedicadas a la elaboración completa del presente TFG. El salario de un ingeniero en formación es de unos 20.450€ anuales. Según el Boletín Oficial del Estado la jornada laboral anual máxima en el año 2023 será de 1.770 horas. Mediante un sencillo cálculo sabemos entonces que precio de una hora de trabajo es de 11.55€.

Por tanto, la inversión de trabajo realizada supondría un coste total de 3.754€ aproximadamente, lo cual es rentable debido a los conocimientos obtenidos durante el desarrollo del TFG y el resultado obtenido que podrá ser utilizado en futuras ocasiones.

5.3.3. Aspectos a tener en cuenta durante el montaje.

Durante el proceso de montaje del modelo físico de la nave, es importante tener en cuenta las siguientes consideraciones para evitar cualquier tipo de problema que pudiera ocasionarse: seguridad y orden.

El proceso al completo requiere del uso de herramientas de corte en varias de las etapas de este. Es necesario utilizar un cúter, o una herramienta de corte similar, para realizar los huecos correspondientes a las zapatas y a las riostras sobre las planchas de polietileno. Los usuarios también deberán cortar la cuerda empleada en las cruces de San Andrés a la medida correspondiente y realizar pequeños cortes en

el extremo de los palillos de madera utilizados como correas para reducir ligeramente su diámetro y que estos puedan ser introducidos en los conectores LEGO. Es importante tomar las precauciones necesarias durante estos procesos para garantizar un espacio de trabajo seguro que evite posibles lesiones.

A su vez, es importante mantener en todo momento el espacio de trabajo ordenado y limpio. Esto facilita el correcto desarrollo de la práctica mejorando la eficiencia de los procesos a desarrollar, reduciendo los tiempos de búsqueda de piezas y aumentando la productividad. Esto también reduce la posibilidad de pérdida de piezas, algo que puede ser habitual cuando se trabaja con elementos pequeños como las piezas de LEGO. Además, esto fomenta las habilidades organizativas entre los usuarios, cualidad que será estrictamente necesaria cuando se trate de un proceso constructivo real. La organización de los recursos y el correcto orden de proceso son aspectos a tener en cuenta en ambos casos, tanto en el proceso real como en el proceso simulado, por lo que este último servirá de aprendizaje de cara a futuros proyectos.

5.3.4. Seguridad y medio ambiente

La realización del trabajo no implica la utilización de materiales peligrosos ni perjudiciales para el medio ambiente durante su uso y aplicación. Dichos materiales hacen referencia a las planchas de polietileno y los diferentes componentes del modelo de la nave: las piezas LEGO, cuerda y palillos de madera.

En cambio, es importante prestar atención al reciclado de los materiales cuando estos se acerquen al final de su vida útil. Las planchas utilizadas en la solera son de espuma de PE, un material con un tiempo de degradación alto. Este material puede ser reciclado unas 4 o 5 veces en centros especializados mediante procesos térmicos y de compactado.

La cuerda empleada en las cruces de San Andrés, previsiblemente fabricada mediante fibras de poliéster, puede ser reciclada mediante un proceso de desmenuzado de fibras. Posteriormente se mezclan fibras recicladas con fibras nuevas para generar otros productos. Por otra parte, los palillos utilizados como

correas no presentan ningún problema al tratarse de un material completamente orgánico como la madera.

En el caso de las piezas LEGO están fabricadas en polímeros termoplásticos (ABS), un material que presenta una alta resistencia térmica y química, buen comportamiento frente a la fatiga por compresión y rigidez y una larga duración. Según diversos estudios se ha podido comprobar que estas piezas serían capaces de tener una vida útil de cientos de años. Esto permite que el modelo creado pueda ser utilizado sin ningún tipo de inconveniente durante varios años, sin que sus propiedades se vean negativamente afectadas. Pese a su larga duración, la compañía actualmente está buscando formas de reciclar sus ladrillos de forma sostenible. Como aspecto negativo encontramos la producción del ABS, la cual puede llegar a ser contaminante. Por ello LEGO busca también la posibilidad de implementar nuevos materiales en sus productos, pero se trata de una idea más a largo plazo que un cambio inmediato.

5.3.5. Aspectos económicos.

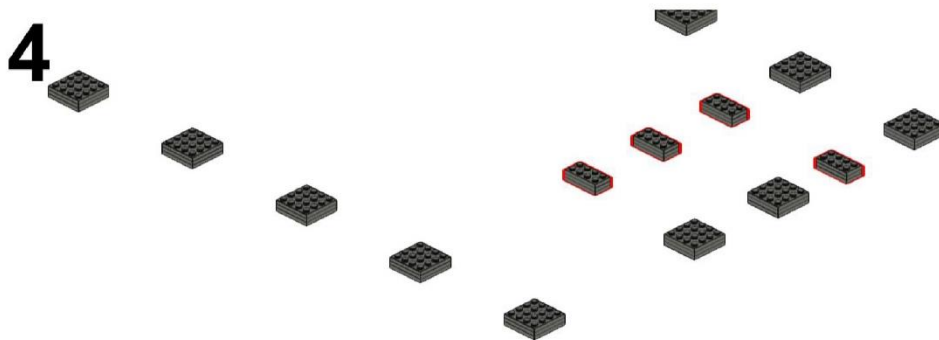
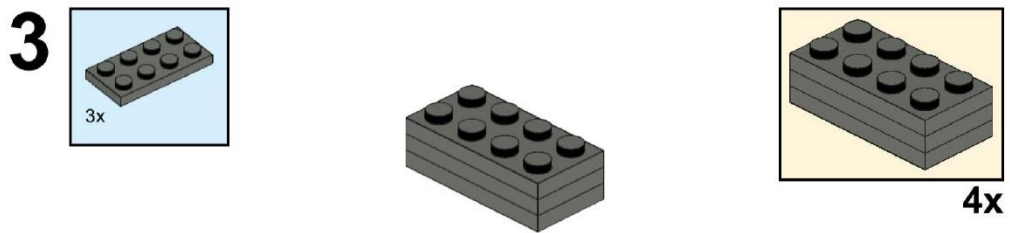
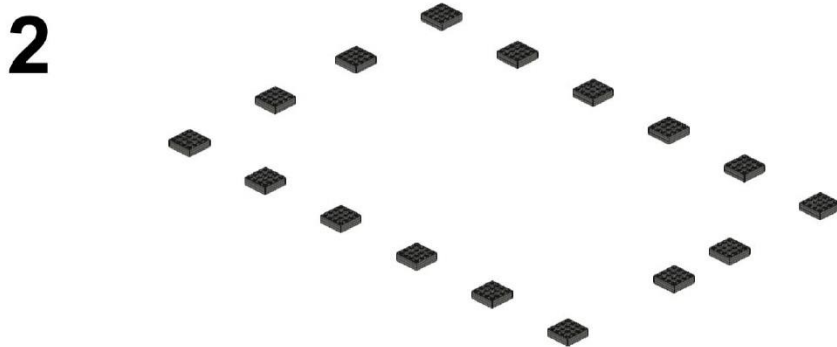
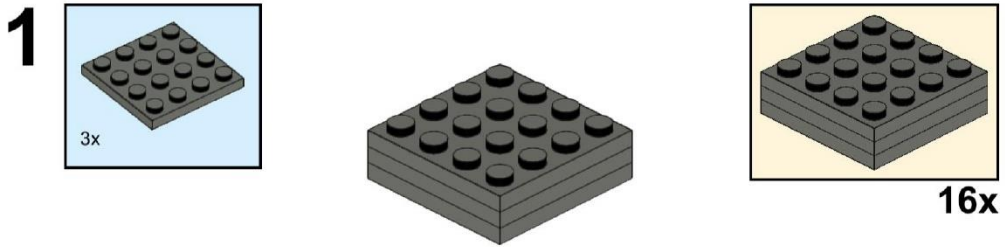
El coste del modelo de la nave, teniendo en cuenta únicamente el precio de las piezas LEGO, asciende a una cantidad de 126,80 €. Hay que tener en cuenta que dicho precio ha sido calculado con el modelo construido que dispone de un total de seis pórticos (incluyendo los dos pórticos hastiales). Dado que el diseño es perfectamente modificable, se podrían añadir los pórticos que el usuario considere, por lo que el precio podría variar en ese caso a razón de 11,66€ por cada pórtico intermedio añadido. Los cálculos detallados del precio del modelo se encuentran en el ANEXO II del presente documento.

Ha dicho precio habría que añadirle el coste de la plancha de polietileno utilizada como solera. El precio de esta es de unos 15€ por unidad. El modelo mostrado cuenta con tan sólo una plancha, pero como se ha explicado en el apartado “líneas de mejora” lo ideal sería emplear dos, por lo que el precio sería de 30€.

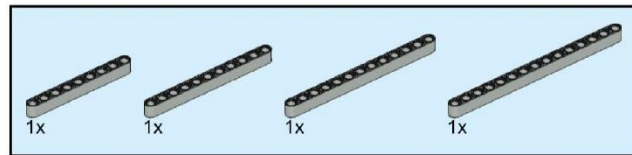
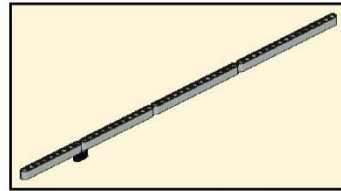
Referencias bibliográficas

- [1] Nerantzi, Chrissi and James, Alison, LEGO® for university learning: Inspiring academic practice in higher education. Zenodo, 2019. doi: 10.5281/zenodo.2813448.
- [2] C. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks y K. Liston, Bim Handbook. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2011.
- [3] Colaboradores de los proyectos Wikimedia. "LEGO (empresa) - Wikipedia, la enciclopedia libre". Wikipedia, la enciclopedia libre. [https://es.wikipedia.org/wiki/LEGO_\(empresa\)](https://es.wikipedia.org/wiki/LEGO_(empresa)) (accedido el 24 de junio de 2023).
- [4] "What are the size of lego technic parts?" Bricks. <https://bricks.stackexchange.com/questions/2066/what-are-the-size-of-lego-technic-parts> (accedido el 24 de junio de 2023).
- [5] "ElectricBricks - LEGO, Playmobil y robótica educativa". electricBricks: LEGO shop guide and database. <https://www.electricbricks.com/index.php> (accedido el 24 de junio de 2023).
- [6] "Naves industriales | proyectos llave en mano | LA ingenieros". LA ingenieros. <https://laingenieros.com/naves-industriales/> (accedido el 24 de junio de 2023).
- [7] "Cálculo de estructuras metálicas y hormigón para naves". Nube ingeniería. <http://nubeingenieria.es/calculo-estructuras-metalicas-hormigon-naves/> (accedido el 24 de junio de 2023).
- [8] "LEGO figures in Scale models - BRICK ARCHITECT". BRICK ARCHITECT. <https://brickarchitect.com/scale/> (accedido el 24 de junio de 2023).
- [9] "Fort Dunlop from BrickLink". BrickLink - Buy and sell LEGO Parts, Sets and Minifigures. <https://www.bricklink.com/v3/studio/design.page?idModel=53937> (accedido el 24 de junio de 2023).
- [10] "Nave industrial. puerto de la rapita". MAQUETAS & MODELOS. <http://maquetasandmodelos.blogspot.com/2014/11/nave-industrial-puerto-de-la-rapita.html> (accedido el 24 de junio de 2023).
- [11] "Obra de construccion de nave industrial en Alicante - Araque Maqueda". Araque Maqueda. <https://www.araquemaqueda.com/blog/nave-industrial-en-alicante-proyecto/> (accedido el 24 de junio de 2023).
- [12] "Otros accesorios | Lidl". Compra Online | Lidl. <https://www.lidl.es/es/otros-accesorios/c1829> (accedido el 24 de junio de 2023).

ANEXO I: Manual de montaje.



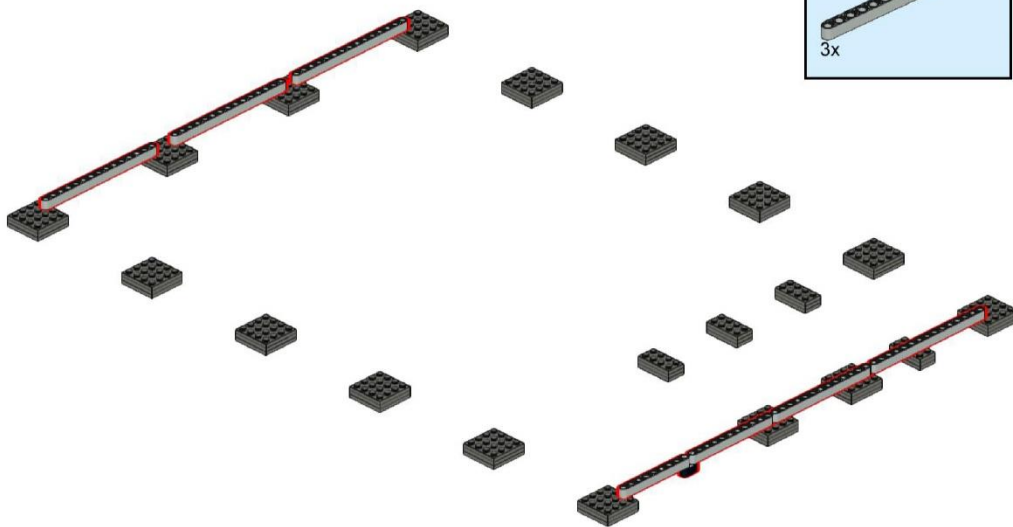
5

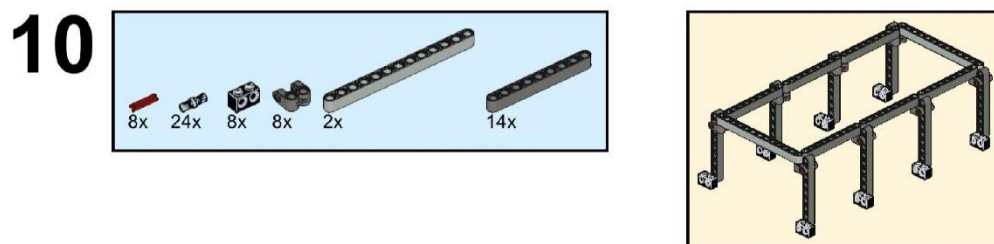


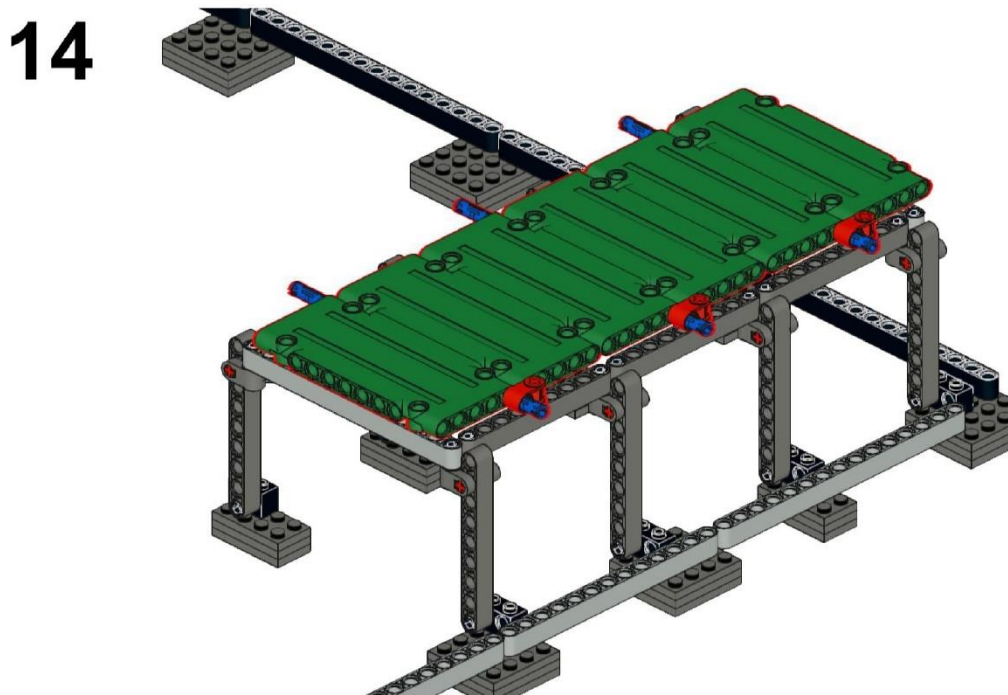
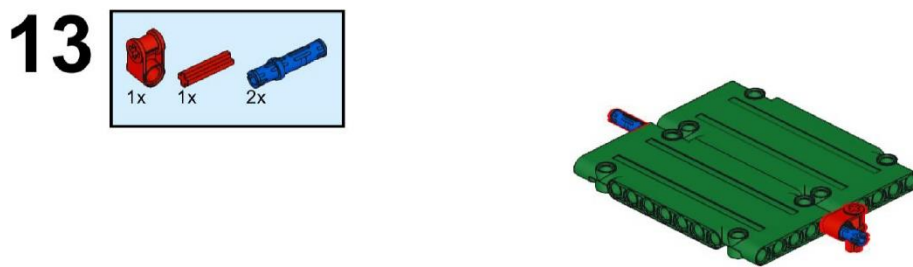
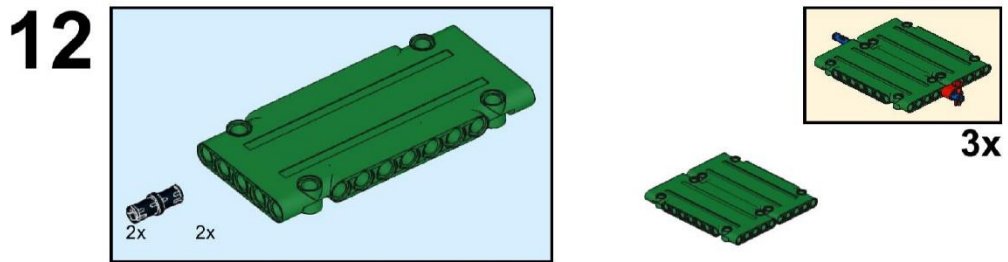
6

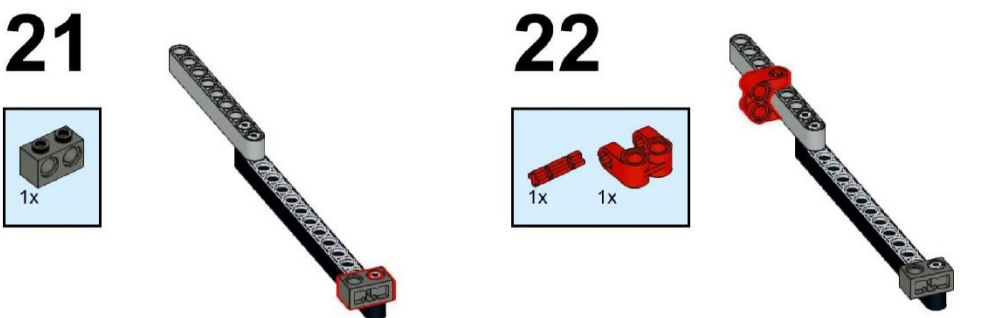
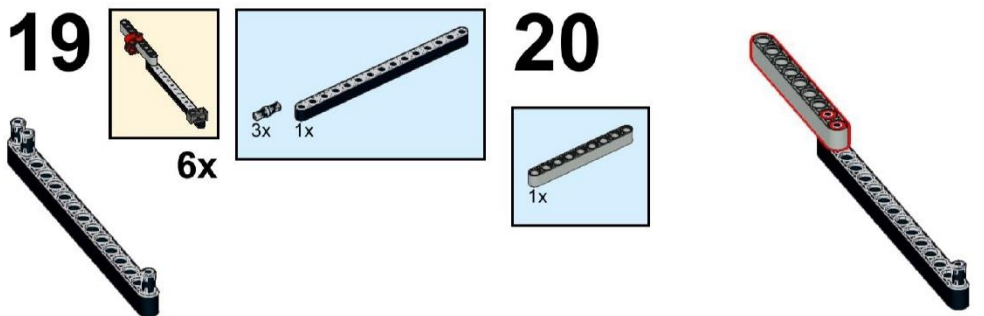
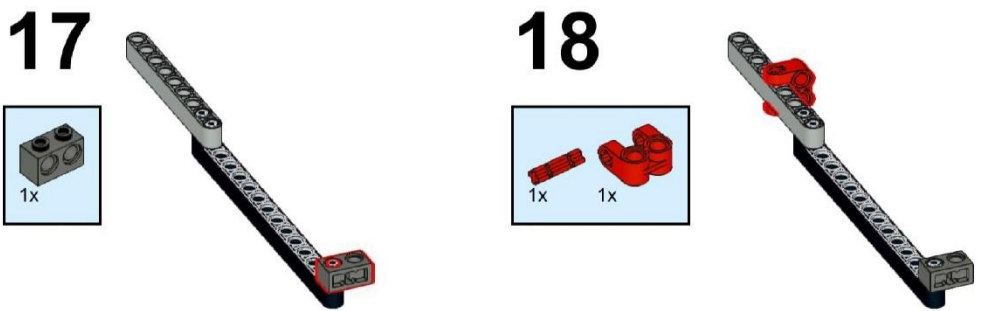
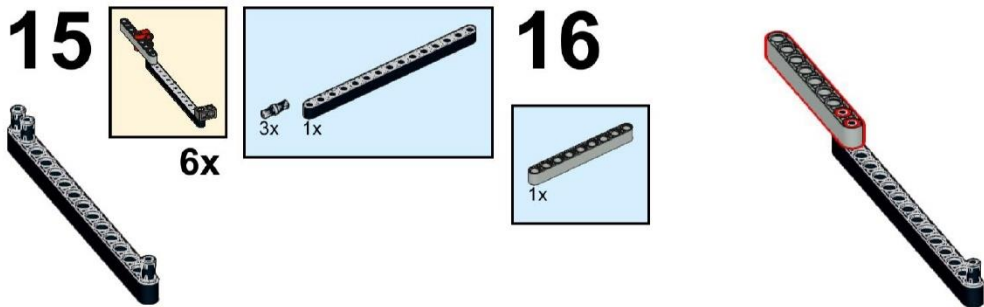


7

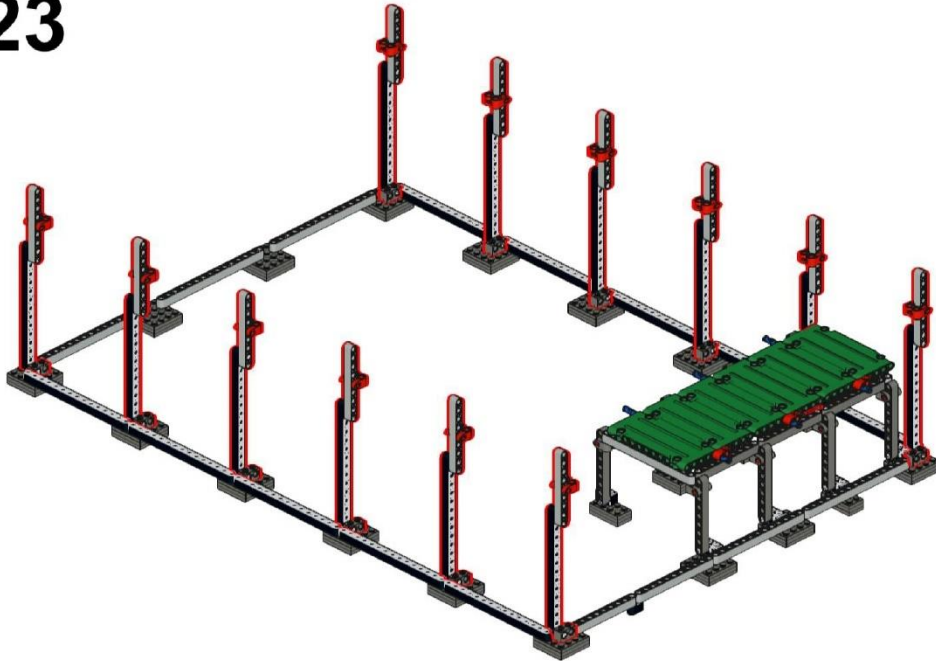




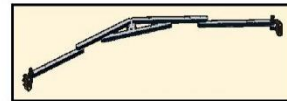
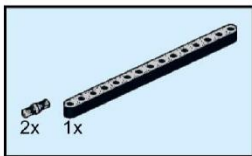




23

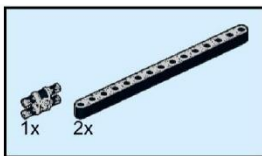


24



6x

25



26



27

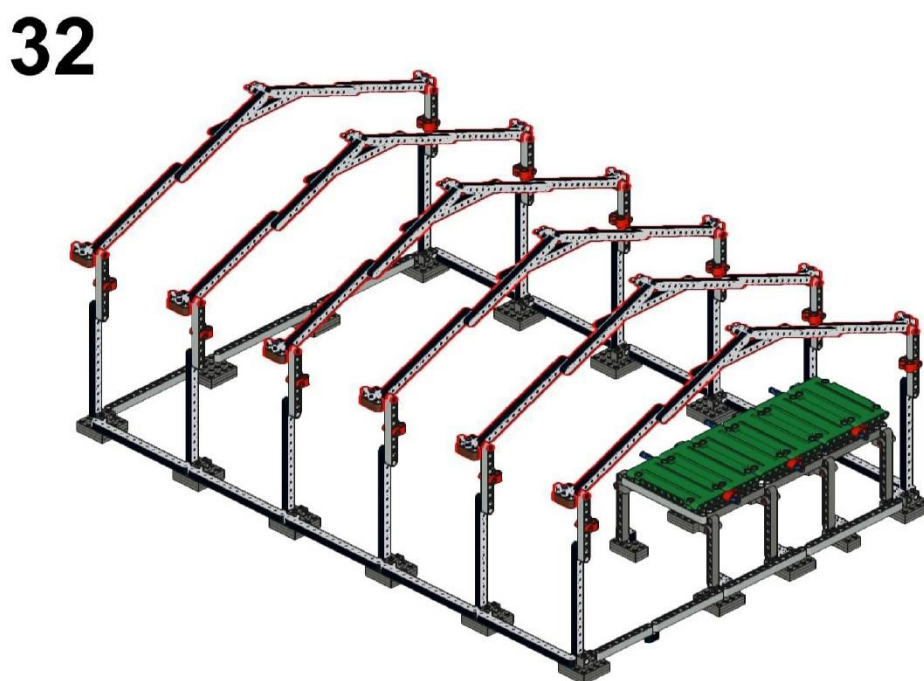


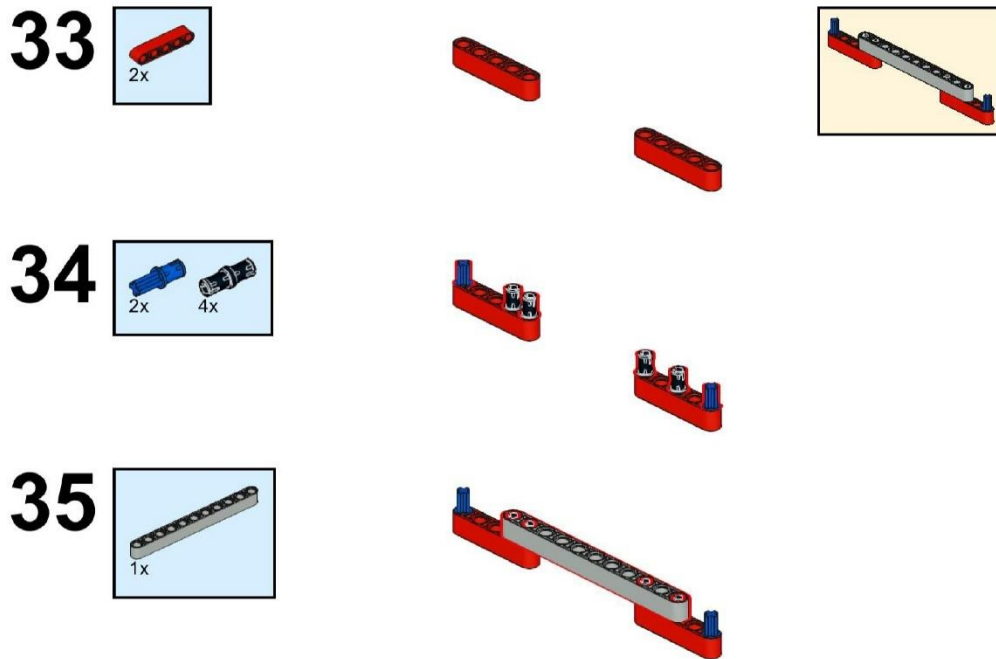
28



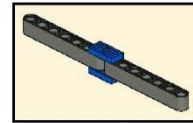
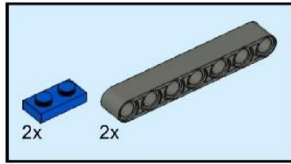
29





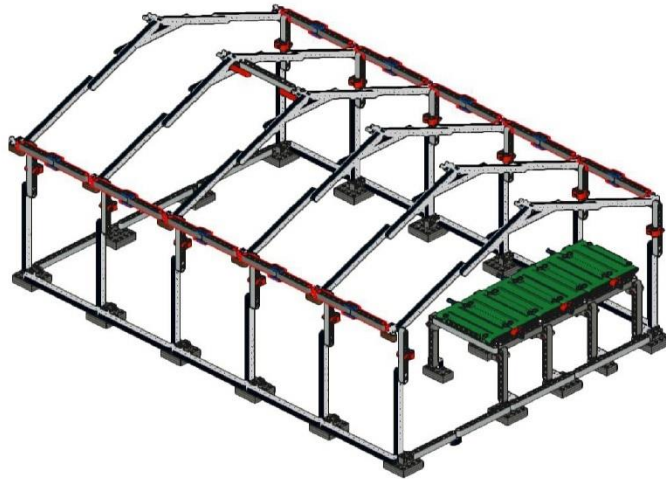


37

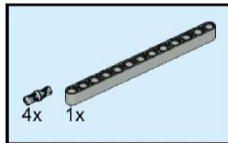


10x

38

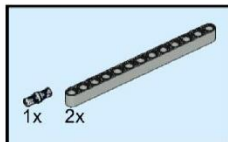


39

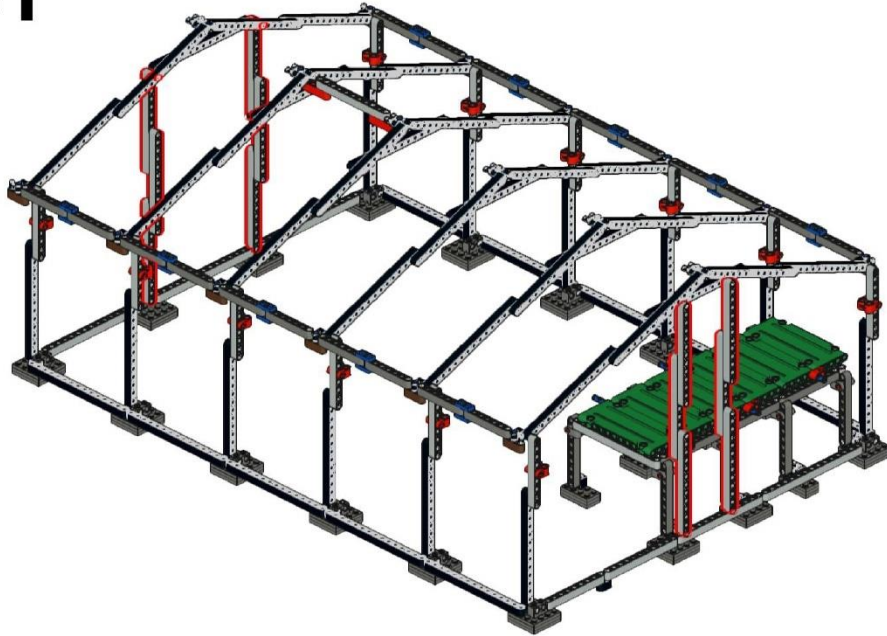


4x

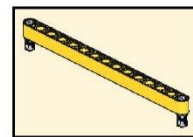
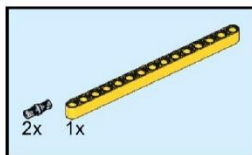
40



41

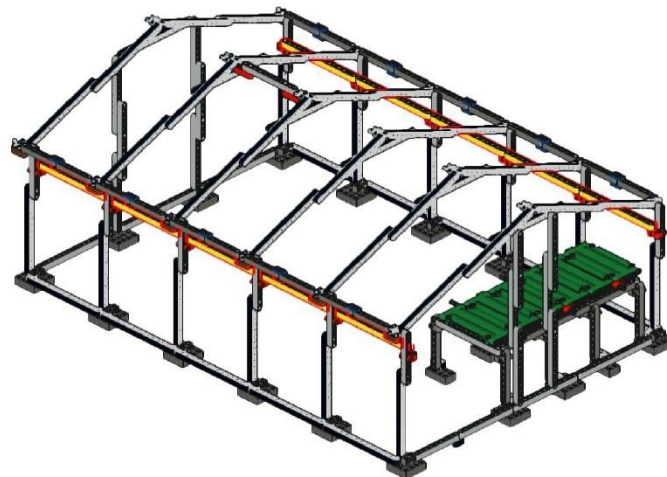


42

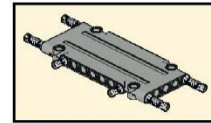
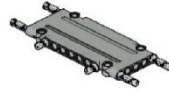
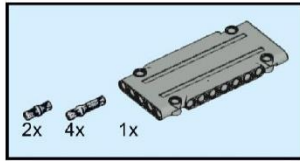


10x

43

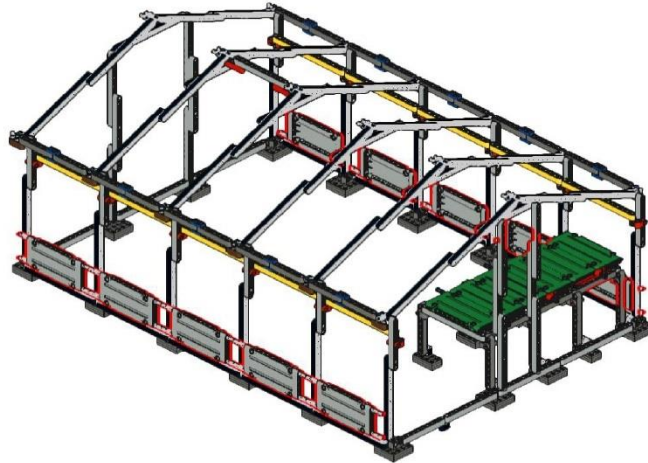


44

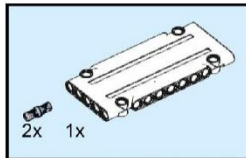


10x

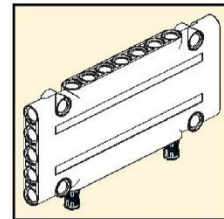
45



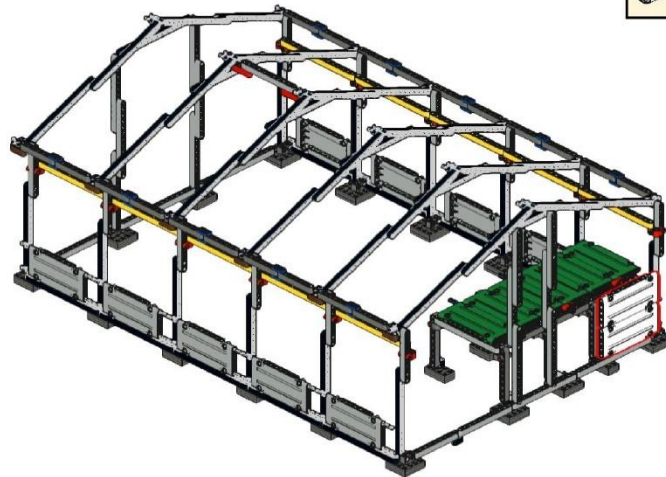
46



2x



47



ANEXO II: Listado de piezas y costes.

A continuación, se muestra un desglose de piezas indicando el tipo y la cantidad necesaria para cada uno de los elementos utilizados durante el trabajo. Las tablas indicadas también incluyen el coste unitario por pieza y el coste total del elemento.

ZAPATA AISLADA PRINCIPAL				
Descripción	Referencia	Coste unitario	Cantidad	Coste
Gris Claro Azulado. Plancha 4 x 4	4211403 / 4243797	0,22	3	0,66

Tabla 2. Desglose zapata principal.

ZAPATA AISLADA FORJADO				
Descripción	Referencia	Coste unitario	Cantidad	Coste
Amarillo. Ladrillo 2 x 4	300124	0,23	1	0,23

Tabla 3. Desglose zapata forjado.

RIOSTRA LONGITUDINAL				
Descripción	Referencia	Coste unitario	Cantidad	Coste
Negro. Viga Technic 1 x 15	4128603 / 4542573	0,42	1	0,42

Tabla 4. Desglose riostra longitudinal.

RIOSTRA TRANSVERSAL (SIN FORJADO)				
Descripción	Referencia	Coste unitario	Cantidad	Coste
Blanco. Viga Technic 1 x 15	4542578	0,42	3	1,26

Tabla 5. Desglose riostra transversal (sin forjado).

RIOSTRA TRANSVERSAL (FORJADO)				
Descripción	Referencia	Coste unitario	Cantidad	Coste
Blanco. Viga Technic 1 x 15	4542578	0,42	1	0,42
Gris. Viga Technic 1 x 13	4522934	0,79	1	0,79
Gris Claro Azulado. Viga Technic 1 x 9	4211866 / 6102449	0,33	1	0,33
Gris Claro Azulado. Viga Technic 1 x 11	4611705	0,28	1	0,28
Negro. Pin Technic con crestas de fricción longitudinales y ranuras centrales	278026 / 4121715 / 6279875	0,08	2	0,16
Blanco. Viga Technic 1 x 2	4177444	0,12	1	0,12
TOTAL			7	2,10

Tabla 6. Desglose riostra transversal (forjado).

CABIO				
Descripción	Referencia	Coste unitario	Cantidad	Coste
Gris Claro Azulado. Viga Technic 1 x 11	4611705	0,28	1	0,28
Amarillo. Viga Technic 1 x 5	4128590 / 4142133	0,15	2	0,30
Negro. Pin Technic con crestas de fricción longitudinales y ranuras centrales	278026 / 4121715 / 6279875	0,08	4	0,32
Azul. Eje técnico pin con fricción	4206482 / 4309323	0,10	2	0,20
TOTAL			9	1,10

Tabla 7. Desglose cabio.

PÓRTICO INTERMEDIO				
Descripción	Referencia	Coste unitario	Cantidad	Coste
Negro. Viga Technic 1 x 15	4128603 / 4542573	0,42	7	2,94
Gris Claro Azulado. Viga Technic 1 x 9	4211866 / 6102449	0,33	2	0,66
Negro. Pin Technic con crestas de fricción longitudinales y ranuras centrales	278026 / 4121715 / 6279875	0,08	16	1,28
Negro. Pin doble Technic con orificio para eje	4119589	0,16	1	0,16
Gris Claro. Ladrillo technic 1 x 2 con 2 agujeros	3200002	0,15	2	0,30
Rojo. Unión perpendicular doble split eje technic	4173975	0,36	2	0,72
Rojo. Eje técnico longitud 2 con muescas	4142865	0,10	2	0,20
Azul. Pin Technic 3L con fricción	4514553 / 6299413	0,12	2	0,24
Marrón Rojizo. Viga Technic 1 x 3	4211330 / 6121726	0,10	2	0,20
Negro. Viga 1 x 2 modificada con hueco para eje	4515185 / 6006140 / 6265091	0,16	2	0,32
Azul. Eje técnico pin con fricción	4206482 / 4309323	0,10	2	0,20
TOTAL			40	7,22

Tabla 8. Desglose pórtico intermedio.

PÓRTICO HASTIAL				
Descripción	Referencia	Coste unitario	Cantidad	Coste
Negro. Viga Technic 1 x 15	4128603 / 4542573	0,42	7	2,94
Gris Claro Azulado. Viga Technic 1 x 9	4211866 / 6102449	0,33	2	0,66
Negro. Pin Technic con crestas de fricción longitudinales y ranuras centrales	278026 / 4121715 / 6279875	0,08	16	1,28
Negro. Pin doble Technic con orificio para eje	4119589	0,16	1	0,16
Gris Claro. Ladrillo technic 1 x 2 con 2 agujeros	3200002	0,15	2	0,30
Rojo. Unión perpendicular doble split eje technic	4173975	0,36	2	0,72
Rojo. Eje técnico longitud 2 con muescas	4142865	0,10	2	0,20
Azul. Pin Technic 3L con fricción	4514553 / 6299413	0,12	2	0,24
Marrón Rojizo. Viga Technic 1 x 3	4211330 / 6121726	0,10	2	0,20
Negro. Viga 1 x 2 modificada con hueco para eje	4515185 / 6006140 / 6265091	0,16	2	0,32
Azul. Eje técnico pin con fricción	4206482 / 4309323	0,10	2	0,20
TOTAL			56	10,54

Tabla 9. Desglose pórtico hastial.

VIGA DE ATADO				
Descripción	Referencia	Coste unitario	Cantidad	Coste
Gris Claro Azulado. Viga Technic 1 x 7	4211665 / 4495930	0,18	2	0,36
3023 Azul. Plancha 1 x 2	302323	0,08	2	0,16
TOTAL			4	0,52

Tabla 10. Desglose viga de atado.

VIGA CARRIL				
Descripción	Referencia	Coste unitario	Cantidad	Coste
Amarillo. Viga Technic 1 x 15	4542579	0,42	1	0,42
Azul. Eje técnico pin con fricción	4206482 / 4309323	0,10	2	0,20
TOTAL			3	0,62

Tabla 11. Desglose viga carril.

MURETE				
Descripción	Referencia	Coste unitario	Cantidad	Coste
Verde Oliva. Panel Plancha Technic 1 x 5 x 11	6278082	2,73	1	2,73
Azul. Eje técnico pin con fricción	4206482 / 4309323	0,10	2	0,20
Azul. Pin Technic 3L con fricción	4514553 / 6299413	0,12	2	0,24
TOTAL			5	3,17

Tabla 12. Desglose murete.

CUBIERTA				
Descripción	Referencia	Coste unitario	Cantidad	Coste
Gris Claro Azulado. Plancha 2 x 12	4211360	0,28	2	0,56
Gris Oscuro Azulado. Plancha 2 x 4	4211065	0,11	2	0,22
Tierra. Plancha 2 x 16	4124486 / 4270425 / 6030980	0,35	2	0,70
Amarillo. Plancha modificada 1 x 2 con 2 clips horizontales abiertos en O	4556156 / 6337231	0,07	1	0,07
Amarillo. Plancha modificada 1 x 2 con asa	4501232	0,22	1	0,22
TOTAL			8	1,77

Tabla 13. Desglose cubierta.

CONECTORES CRUCES DE SAN ANDRÉS				
Descripción	Referencia	Coste unitario	Cantidad	Coste
Azul. Pin Technic 3L con fricción	4514553 / 6299413	0,12	16	1,92

Tabla 14. Desglose conectores cruces de San Andrés.

FORJADO				
Descripción	Referencia	Coste unitario	Cantidad	Coste
Gris Claro. Ladrillo technic 1 x 2 con 2 agujeros	3200002	0,15	8	1,2
Gris Claro Azulado. Viga Technic 1 x 9	4211866 / 6102449	0,33	14	4,62
Verde Oliva. Panel Plancha Technic 1 x 5 x 11	6278082	2,73	4	10,92
Gris. Viga Technic 1 x 13	4522934	0,79	2	1,58
Rojo. Unión perpendicular doble split eje technic	4173975	0,36	8	2,88
Rojo. Eje técnico longitud 2 con muescas	4142865	0,10	10	1,00
Negro. Pin Technic con crestas de fricción longitudinales y ranuras centrales	278026 / 4121715 / 6279875	0,08	24	1,92
Negro. Viga 1 x 2 modificada con hueco para eje	4515185 / 6006140 / 6265091	0,16	2	0,32
Azul. Pin Technic 3L con fricción	4514553 / 6299413	0,12	6	0,72
TOTAL			78	25,16

Tabla 15. Desglose forjado.

TOTAL DE PIEZAS				
Descripción	Referencia	Coste unitario	Cantidad	Coste
Negro. Viga Technic 1 x 15	4128603 / 4542573	0,42	64	26,88
Amarillo. Viga Technic 1 x 15	4542579	0,42	10	4,20
Blanco. Viga Technic 1 x 15	4542578	0,42	4	1,68
Gris. Viga Technic 1 x 13	4522934	0,79	3	2,37
Gris Claro Azulado. Viga Technic 1 x 11	4611705	0,28	2	0,56
Gris Claro Azulado. Viga Technic 1 x 9	4211866 / 6102449	0,33	27	8,91
Gris Claro Azulado. Viga Technic 1 x 7	4211665 / 4495930	0,18	20	3,60
Amarillo. Viga Technic 1 x 5	4128590 / 4142133	0,15	2	0,30
Marrón Rojizo. Viga Technic 1 x 3	4211330 / 6121726	0,10	12	1,20
Blanco. Viga Technic 1 x 2	4177444	0,12	1	0,12
Negro. Viga 1 x 2 modificada con hueco para eje	4515185 / 6006140 / 6265091	0,16	14	2,24
Rojo. Unión perpendicular doble split eje technic	4173975	0,36	20	7,20
Gris Claro. Ladrillo technic 1 x 2 con 2 agujeros	3200002	0,15	20	3,00
Negro. Pin Technic con crestas de fricción longitudinales y ranuras centrales	278026 / 4121715 / 6279875	0,08	146	11,68
Azul. Pin Technic 3L con fricción	4514553 / 6299413	0,12	42	5,04
Azul. Eje técnico pin con fricción	4206482 / 4309323	0,10	42	4,20

Rojo. Eje técnico longitud 2 con muescas	4142865	0,10	22	2,20
Negro. Pin doble Technic con orificio para eje	4119589	0,16	6	0,96
Verde Oliva. Panel Plancha Technic 1 x 5 x 11	6278082	2,73	8	21,84
Amarillo. Ladrillo 2 x 4	300124	0,23	5	1,15
Gris Claro Azulado. Plancha 4 x 4	4211403 / 4243797	0,22	48	10,56
3023 Azul. Plancha 1 x 2	302323	0,08	20	1,60
Gris Claro Azulado. Plancha 2 x 12	4211360	0,28	6	1,68
Gris Oscuro Azulado. Plancha 2 x 4	4211065	0,11	6	0,66
Tierra. Plancha 2 x 16	4124486 / 4270425 / 6030980	0,35	6	2,10
Amarillo. Plancha modificada 1 x 2 con 2 clips horizontales abiertos en 0	4556156 / 6337231	0,07	3	0,21
Amarillo. Plancha modificada 1 x 2 con asa	4501232	0,22	3	0,66

Tabla 16. Desglose total de piezas.

A continuación, se indica la cantidad de cada subconjunto utilizada para la construcción de la nave junto con el precio de cada subconjunto.

SUBCONJUNTO	CANTIDAD POR NAVE	COSTE UNITARIO	COSTE TOTAL
PÓRTICO INTERMEDIO	4	7,22	28,88
PÓRTICO HASTIAL	2	10,54	21,08
ZAPATA AISLADA PRINCIPAL	16	0,66	10,56
VIGA DE ATADO	10	0,52	5,2
VIGA CARRIL	10	0,62	6,2
RIOSTRA TRANSVERSAL (SIN FORJADO)	1	1,26	1,26
RIOSTRA TRANSVERSAL (FORJADO)	1	2,10	2,1
RIOSTRA LONGITUDINAL	10	0,42	4,2
MURETE	4	3,17	12,68
ZAPATA AISLADA FORJADO	5	0,23	1,15
FORJADO	1	25,16	25,16
CUBIERTA	3	1,77	5,31
CABIO	1	1,10	1,1
CONECTORES CRUCES DE SAN ANDRÉS	1	1,92	1,92

Tabla 17. Coste por subconjunto.

COSTE TOTAL DE LA NAVE = 126,80 €

Por último, se muestra un resumen en el cual se indica el número total de piezas, el precio final de la nave y el correspondiente coste por pieza.

TOTALES ESTIMADOS POR UNIDAD DE NAVE	
PIEZAS	562
COSTE	126,80
COSTE POR PIEZA	0,2256

Tabla 18. Resumen.

ANEXO III: Stud.io, conceptos básicos.

En este anexo se explican las funciones básicas del programa informático Stud.io desarrollado por la compañía BrickLink, utilizado durante la realización del presente trabajo. La figura 58 muestra la interfaz principal del programa:

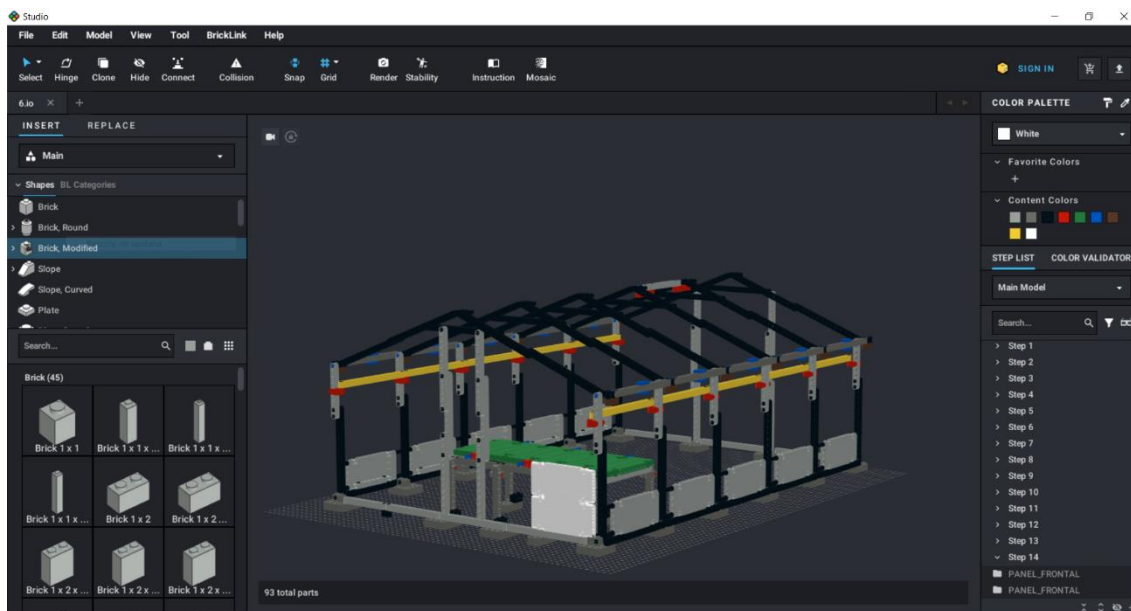


Figura 58. Interfaz del programa Stud.io.

Podemos observar que el espacio de trabajo se divide en cuatro partes principales:

- Barra de menú superior

En esta parte se encuentran una serie de opciones que permiten interactuar con el modelo tridimensional sobre el que se está trabajando. Las opciones más utilizadas durante el diseño del modelo han sido las de clonar y conectar, esta última permite que dos piezas encajen de forma automática. Además, las imágenes renderizadas, el vídeo animado y el manual de instrucciones han sido creados con las opciones correspondientes en este menú.

- Panel izquierdo

Esta zona de la interfaz permite navegar por la amplia biblioteca de piezas de las que dispone el programa. Estas se encuentran agrupadas por el tipo de pieza en carpetas

y subcarpetas para facilitar su búsqueda. Para añadir una pieza al modelo tan sólo es necesario arrastrarla hacia la zona central.

- Visor 3D

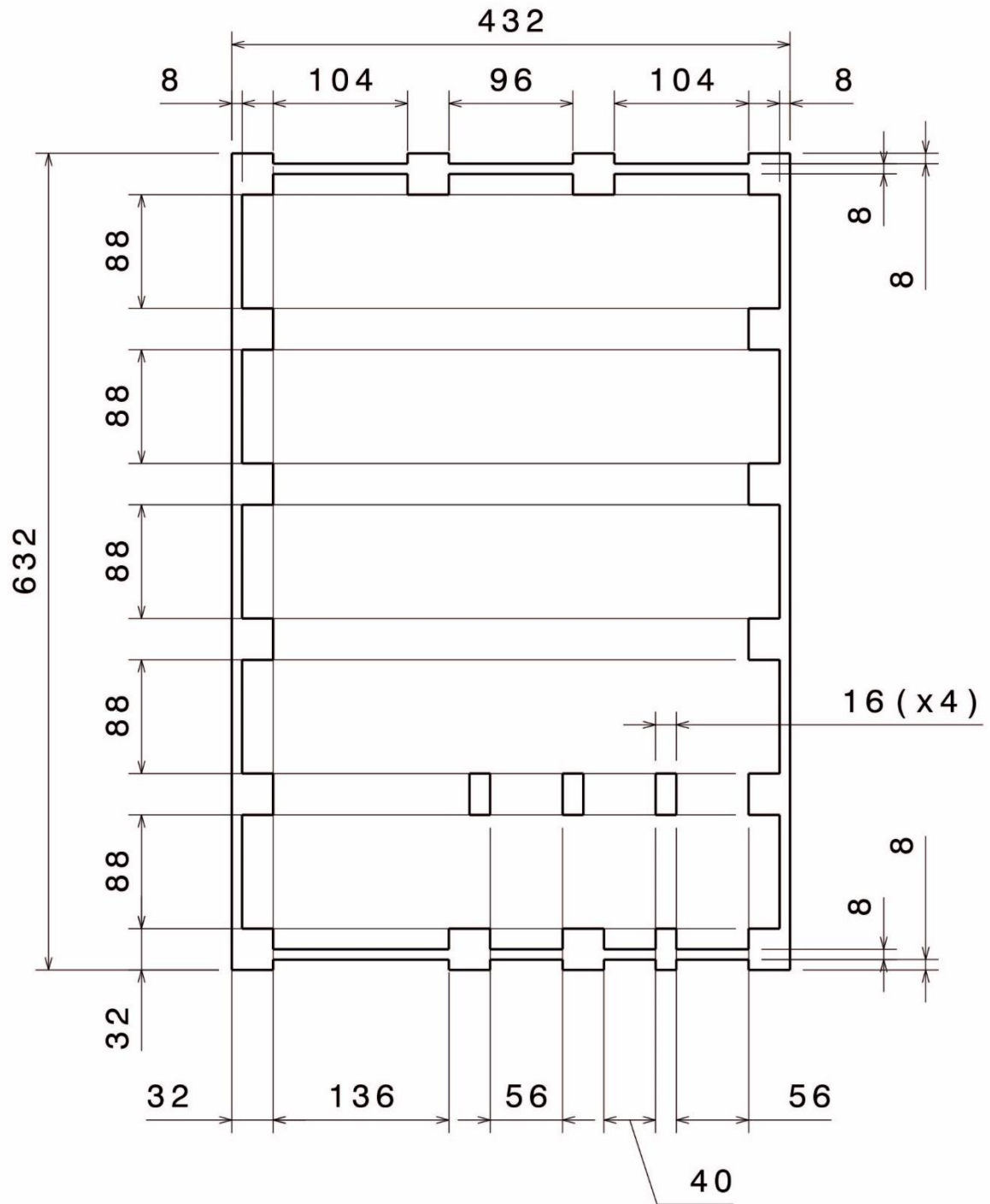
La parte con más protagonismo de toda la interfaz. Aquí es donde se muestra el modelo tridimensional tal como se está construyendo. El usuario puede manipular tanto la cámara como los diferentes elementos del modelo para ajustar la visión del mismo a sus necesidades o preferencias.

- Panel derecho

Por último, esta zona permite seleccionar y cambiar el color de cada pieza entre una gran variedad de opciones. Sin embargo, la parte con más interés de este panel se encuentra en la mitad inferior.

La lista que se muestra en la figura 58 se corresponde con el orden de montaje del modelo sobre el que se está trabajando. Dicho orden es creado por el usuario y es posible crear tantas etapas como se quiera. Por otra parte, es recomendable dividir el modelo general en submodelos más pequeños. Cada submodelo tendrá también su propio orden de montaje.

Es recomendable ir editando el orden de montaje a medida que se va trabajando, especialmente si el usuario desea generar un manual de instrucciones. Esto es debido a que si no es el usuario quien divide el proceso en etapas, el programa no lo hará de forma automática y todas las piezas generadas se irán acumulando en el mismo paso. Si no se ha tenido en cuenta esto desde un primer momento, la definición de las etapas de montaje será un proceso mucho más laborioso y requerirá de mucho tiempo debido a todas las piezas del modelo aparecerán en una larga lista y será necesario identificar y agrupar cada una de ellas poco a poco.



16 ZAPATAS PRINCIPALES (32x32 mm)
 4 ZAPATAS SECUNDARIAS (16x32 mm)

	Fecha	Nombre		Propuesta de un puesto de prácticas a escala sobre el desarrollo del proceso constructivo de una nave industrial.
Dibujado	31/05/23	Retortillo, J.		
Comprobado	31/05/23	Lorenzana, I.		
Escala	Plano cimentación. (ANEXO IV)			
1:5				