


# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

**TRABAJO FIN DE GRADO**

*Diseño y modelado virtual mediante piezas LEGO® de la figura de un alférez alumno*

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**ALUMNO:** David Rodríguez Franco

**DIRECTORA:** Araceli Regueiro Pereira

**CURSO ACADÉMICO:** 2025-2026

Universidade Vigo




Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar

**TRABAJO FIN DE GRADO**

# *Diseño y modelado virtual mediante piezas LEGO® de la figura de un alférez alumno*

**Grado en Ingeniería Mecánica**

Intensificación en Tecnología Naval

Infantería de Marina

Universidade Vigo

# RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado desarrolla el diseño y modelado virtual de la figura de un alférez alumno de Infantería de Marina mediante el uso combinado del sistema modular LEGO® y herramientas de diseño asistido por ordenador.
El trabajo se fundamenta en el análisis del sistema LEGO® como plataforma modular basada en estandarización geométrica, tolerancias controladas y compatibilidad dimensional, empleando dichas características como base para el desarrollo y representación a escala de un modelo estructural y cinemáticamente coherente.
El diseño modular se ha llevado a cabo mediante BrickLink Studio, validando la estructura, proporciones y ensamblaje del modelo con 302 piezas estándar del catálogo. Sobre esta base se han desarrollado 13 componentes personalizados mediante modelado en Autodesk Inventor, orientados a ampliar el nivel de detalle y funcionalidad del conjunto manteniendo la compatibilidad con el sistema LEGO®.
Estos componentes han sido fabricados mediante tecnologías de fabricación aditiva FDM y MSLA, definiendo un flujo completo desde el diseño hasta la validación estructural y económica. El resultado demuestra la viabilidad de integrar sistemas modulares existentes, diseño paramétrico y fabricación aditiva en un proyecto de ingeniería mecánica.

# PALABRAS CLAVE

Sistema modular LEGO®, fabricación aditiva, modelado CAD, compatibilidad dimensional, representación a escala

# CONTENIDO

Contenido ..... 1
Índice de Figuras ..... 5
Índice de Tablas ..... 7
1 Introducción y objetivos ..... 8
1.1 Introducción y motivación ..... 8
1.2 Objetivos ..... 9
1.3 Estructura de la memoria ..... 10
2 Estado del arte ..... 11
2.1 Sistemas modulares y plataforma LEGO ..... 11
2.1.1 Origen y avances de la modulación LEGO y su empleo para representación y maquetación ..... 11
2.1.2 Softwares para trabajar con LEGO ..... 13
2.1.2.1 Ecosistema LDraw (estándar abierto) ..... 13
2.1.2.2 Mecabricks ..... 13
2.1.2.3 BrickLink Studio ..... 13
2.1.2.4 Conclusión comparativa ..... 13
2.2 Tecnologías CAD / CAM ..... 14
2.2.1 Modelado paramétrico ..... 14
2.2.2 Selección software Autodesk Inventor ..... 15
2.3 Tecnologías de fabricación aditiva ..... 15
2.3.1 Estereolitografía (SLA) ..... 15
2.3.2 Sinterización selectiva por láser (SLS) ..... 16
2.3.3 Modelado por deposición fundida (FDM) ..... 16
2.3.3.1 Precisión dimensional y contracción térmica en FDM: comparativa PLA vs ABS ..... 17
2.3.4 Selección de la tecnología para el TFG ..... 18
2.3.5 Equipos de fabricación aditiva empleados ..... 19
2.3.5.1 Bambu Lab P1P ..... 19
2.3.5.2 Bambu Lab X1-Carbon ..... 20
2.3.5.3 ELEGOO Mars 3 Pro ..... 21
2.3.6 Materiales empleados para FDM ..... 22
2.3.6.1 Ácido Poliláctico (PLA) ..... 22
2.3.6.2 Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) ..... 22
2.3.6.3 Polietileno tereftalato modificado con glicol (PETG) ..... 23
2.3.6.4 Poliuretano termoplástico (TPU) ..... 23

2.3.7 Materiales empleados para SLA ..... 24
2.3.7.1 Resinas estándar ..... 24
2.3.7.2 Resinas de ingeniería (tough/durable) ..... 24
2.3.7.3 Resinas de base biológica ..... 25
2.3.8 Ensayos de dureza sobre piezas obtenidas con FDM y SLA ..... 26
2.3.8.1 Dureza Shore en piezas FDM ..... 26
2.3.8.2 Dureza Shore en piezas SLA ..... 27
3 Desarrollo del TFG ..... 28
3.1 Selección y justificación de la herramienta de modelado modular ..... 28
3.1.1 Justificaión estructural y cinemática del diseño ..... 29
3.1.2 Análisis de proporciones y escala de la figura ..... 32
3.1.3 Desarrollo de la figura en BrickLink Studio ..... 32
3.1.3.1 Proceso iterativo de prototipado ..... 32
3.1.3.2 Construcción del modelo definitivo ..... 32
3.1.3.3 Obtención de piezas de LEGO ..... 36
3.2 Desarrollo de componentes personalizados mediante modelado paramétrico ..... 37
3.2.1 Diseño del chaleco táctico portaplacas ..... 37
3.2.1.1 Diseño de la placa frontal ..... 38
3.2.1.2 Diseño de la placa trasera ..... 38
3.2.1.3 Diseño de las bandas laterales ..... 39
3.2.1.4 Diseño de los tirantes superiores ..... 39
3.2.2 Diseño del fusil de asalto ..... 40
3.2.3 Diseño de la cabeza y la teresiana ..... 40
3.2.4 Diseño articulación de la cadera ..... 41
3.2.5 Flujo CAD/CAM en fabricación aditiva ..... 43
3.3 Parámetros de procesamiento de la impresión 3D ..... 43
3.3.1 Bambu Studio ..... 43
3.3.2 Impresión en PLA con Bambu Lab P1P ..... 44
3.3.3 Impresión en ABS con Bambu Lab X1-Carbon ..... 45
3.3.4 Chitubox Basic ..... 46
3.3.5 Impresión en resina con ELEGOO Mars 3 Pro ..... 47
3.4 Ensayo de dureza Shore D ..... 48
3.4.1 Procedimiento del ensayo ..... 48
4 Resultados y Validación ..... 50
4.1 Resultados del diseño modular de la figura ..... 50
4.2 Resultados del diseño CAD de piezas personalizadas ..... 51

4.3 Resultados fabricación de componentes personalizados ....52
4.3.1 Fabricación en PLA mediante FDM en Bambu Lab P1P ....52
4.3.2 Fabricación en ABS mediante FDM en Bambu Lab X1-Carbon ....52
4.3.3 Fabricación en resina mediante MSLA en ELEGOO Mars 3 Pro ....53
4.3.4 Sustitución de la articulación de la cadera ....54
4.4 Resultados ensayo de dureza Shore D ....56
4.4.1 Resultados obtenidos ....56
4.4.2 Análisis de resultados ....56
4.5 Análisis estructural por elementos finitos (FEM) ....58
4.5.1 Metodología del estudio ....58
4.5.2 Análisis estructural con material ABS FDM ....60
4.5.2.1 Articulación de la cadera ....60
4.5.2.1.1 Pieza macho ....60
4.5.2.1.2 Pieza hembra ....61
4.5.2.2 Tirante superior ....62
4.5.2.3 Bandas laterales del chaleco ....63
4.5.2.3.1 Banda lateral con radio ....63
4.5.2.3.2 Banda lateral sin radio ....64
4.5.3 Análisis estructural con material PLA FDM ....64
4.5.3.1 Articulación de la cadera ....64
4.5.3.1.1 Pieza macho ....65
4.5.3.1.2 Pieza hembra ....65
4.5.3.2 Tirante superior ....66
4.5.3.3 Bandas laterales del chaleco ....67
4.5.3.3.1 Banda lateral con radio ....67
4.5.3.3.2 Bandas laterales del chaleco ....68
4.6 Análisis económico del proceso de adquisición y fabricación ....69
4.6.1 Coste de adquisición de piezas LEGO ....69
4.6.2 Coste de material de componentes personalizados en PLA ....70
4.6.3 Coste de material de componentes personalizados en ABS ....70
4.6.4 Coste de material de componentes con SLA ....71
4.6.5 Coste energético de fabricación de componentes personalizados ....72
4.6.6 Resumen económico global ....74
5 Conclusiones y líneas futuras ....76
5.1 Conclusiones ....76

5.1.1 Viabilidad del sistema LEGO® como plataforma de representación técnica a escala.....76
5.1.2 Complementariedad entre el catálogo LEGO® y la fabricación aditiva.....76
5.1.3 Diseño exitoso de la articulación de cadera personalizada.....77
5.1.4 Influencia determinante del proceso de fabricación sobre las propiedades mecánicas y superficiales.....77
5.1.5 Eficiencia económica del proceso.....78
5.2 Líneas futuras.....78
5.2.1 Ampliación del uso de la tecnología MSLA a todos los componentes del chaleco.....78
5.2.2 Extensión del flujo de trabajo a figuras de otros cuerpos militares.....78
5.2.3 Rediseño de la estructura interna mediante armadura CAD sobre base LEGO Technic .79
5.2.4 Extensión de la metodología a otros ámbitos de la ingeniería naval y arquitectónica .....79
6 Bibliografía.....80
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales.....84
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales.....85
Anexo III: Piezas de LEGO.....86
Anexo IV: Planos.....93
Anexo V: Instrucciones.....94

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Plano brick de LEGO ....12
Figura 2-2 Pieza generada con SLA ....16
Figura 2-3 Esquema de funcionamiento de FDM ....17
Figura 2-4 Bambu Lba P1P [19] ....19
Figura 2-5 Bambu Lab X1-Carbon [20] ....20
Figura 2-6 ELEGOO Mars 3 Pro [21] ....21
Figura 2-7 eSUN eResin-PLA [23] ....26
Figura 3-1 Interfaz BrikLink Studio [7] ....29
Figura 3-2 Articulación ball joint ....31
Figura 3-3 Pie de LEGO ....33
Figura 3-4 Pierna de LEGO ....33
Figura 3-5 Abdomen y cadera de LEGO ....34
Figura 3-6 Torso de LEGO ....34
Figura 3-7 Brazo de LEGO ....35
Figura 3-8 Figura final del alférez de LEGO ....35
Figura 3-9 Web de BrickLink ....36
Figura 3-10 Presupuesto final piezas de LEGO ....36
Figura 3-11 Chaleco táctico ....37
Figura 3-12 Placa delantera ....38
Figura 3-13 Placa trasera ....38
Figura 3-14 Banda lateral del chaleco con radio ....39
Figura 3-15 Tirante superior ....39
Figura 3-16 Fusil de asalto ....40
Figura 3-17 Cabeza de la figura ....40
Figura 3-18 Teresiana con alojamiento para la cabeza ....41
Figura 3-19 Teresiana ....41
Figura 3-20 Pieza hembra de la articulación de la cadera ....42
Figura 3-21 Pieza macho de la articulación de la cadera ....42
Figura 3-22 Preparación de piezas en Bambu Studio [35] ....43
Figura 3-23 Preparacion de pieza en Chitubox [36] ....46
Figura 3-24 Proceso impresión con SLA ....48
Figura 3-25 Durómetro PCE-DX-DS [26] ....49
Figura 4-1 Figura final con equipamiento del alférez de LEGO ....51

Figura 4-2 Pieza de ABS afectada por warping .....52
Figura 4-3 Teresiana de resina elaborada mediante SLA.....53
Figura 4-4 Placa frontal de resina elaborada mediante SLA.....54
Figura 4-5 Piezas de la cadera fabricadas en FDM.....55
Figura 4-6 Ensayo de dureza csobre pieza de PLA [26] .....58
Figura 4-7 Análisis FEM sobre pieza macho de la cadera en ABS FDM.....61
Figura 4-8 Análisis FEM sobre pieza hembra en ABS FDM.....61
Figura 4-9 Vista superior del análisis FEM sobre tirante superior en ABS FDM .....62
Figura 4-10 Vista inferior del análisis FEM sobre tirante superior en ABS FDM .....63
Figura 4-11 Zoom sobre orificio de encaje de banda lateral.....63
Figura 4-12 Análisis FEM sobre banda lateral con radio en ABS FDM .....64
Figura 4-13 Análisis FEM sobre banda lateral en ABS FDM .....64
Figura 4-14 Análisis FEM sobre pieza macho de la cadera en PLA.....65
Figura 4-15 Análisis FEM sobre pieza hembra en ABS .....66
Figura 4-16 Vista superior del análisis FEM sobre tirante superior en PLA .....67
Figura 4-17 Vista inferior del análisis FEM sobre tirante superior en PLA .....67
Figura 4-18 Análisis FEM sobre banda lateral con radio en PLA .....68
Figura 4-19 Análisis FEM sobre banda lateral en PLA .....68
Figura 4-20 Compra piezas de LEGO.....69

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Comparación softwares de LEGO ..... 14
Tabla 2-2 Comparación de tecnologías de fabricación ..... 18
Tabla 2-3 Comparación materiales empleables en FDM ..... 24
Tabla 3-1 Articulaciones de la figura ..... 30
Tabla 3-2 Prámetros Bambu Lab P1P ..... 44
Tabla 3-3 Prámetros Bambu Lab X1-Carbon ..... 45
Tabla 3-4 Parámetros Mars 3 Pro ..... 47
Tabla 4-1 Subconjuntos de la figura de LEGO ..... 50
Tabla 4-2 Elementos diseñados en CAD ..... 51
Tabla 4-3 Resultados ensayos de dureza ..... 56
Tabla 4-4 Propiedades de los materiales para análisis FEM ..... 59
Tabla 4-5 Costes piezas fabricadas con PLA ..... 70
Tabla 4-6 Costes piezas fabricadas con ABS ..... 71
Tabla 4-7 Costes piezas fabricadas con resina ..... 72
Tabla 4-8 Coste energético X1-Carbon ..... 73
Tabla 4-9 Coste energético P1P ..... 73
Tabla 4-10 Coste energético Mars 3 Pro ..... 74
Tabla 4-11 Resumen de gastos totales ..... 75

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Introducción y motivación

El presente Trabajo Fin de Grado se enmarca en el ámbito de la Ingeniería Mecánica aplicada al modelado digital, la representación modular y la fabricación aditiva.

El desarrollo de sistemas modulares como LEGO es un claro ejemplo de diseño basado en tolerancias geométricas, repetibilidad dimensional y compatibilidad universal entre componentes. Desde el punto de vista ingenieril, el sistema LEGO no es únicamente un juguete, sino un modelo de diseño paramétrico industrial basado en control dimensional preciso mediante encaje a través del sistema stud–tube system, el cual está basado en modularidad escalable y estandarización geométrica.

Diversos estudios han demostrado el potencial de los sistemas modulares basados en LEGO como herramientas educativas en el ámbito de la ingeniería, facilitando el aprendizaje práctico, el desarrollo de habilidades técnicas y la comprensión de conceptos complejos mediante metodologías activas basadas en la experimentación y el prototipado. En particular, su uso en entornos STEM (Science, Technology, Engineering, Marhematics) ha permitido fomentar competencias como la resolución de problemas, el pensamiento computacional y el diseño estructural, consolidándose como una herramienta eficaz en la formación de futuros ingenieros. La facilidad que con la que se puede realizar un prototipado rápido, además de permitir un análisis estructural simplificado son muestras de su clara función como herramienta didáctica en ingeniería, como se ha podido ver en alguna asignatura del grado como “Teoría de Estructuras y Construcciones Industriales”, en la cual se emplearon bloques derivados de los típicos bricks de LEGO para recrear puentes y estructuras colgantes.

Sin embargo, existe una escasa literatura centrada en el diseño paramétrico de figuras humanas complejas mediante el uso LEGO con criterios de fidelidad anatómica y representación fiel a las características y parámetros del cuerpo humano.

La motivación de este trabajo surge de la necesidad de integrar el modelado modular con diseño paramétrico con tecnologías CAD, a la vez que evaluar herramientas digitales específicas para diseño con LEGO, analizar la viabilidad de fabricación híbrida (piezas estándar + piezas impresas en 3D) y aplicar metodologías propias de ingeniería mecánica al diseño de una figura institucional como puede ser la representación de un alumno de la Escuela Naval perteneciente al cuerpo de Infantería de Marina.

Este proyecto pretende sintetizar competencias en los siguientes campos:

1. Modelado CAD.
2. Análisis dimensional.
3. Fabricación aditiva.
4. Evaluación técnica comparativa de herramientas.
5. Integración diseño virtual–fabricación física.

## 1.2 Objetivos

El presente proyecto integra competencias propias del Grado en Ingeniería Mecánica en los siguientes ámbitos: modelado CAD paramétrico aplicado al diseño de componentes compatibles con sistemas modulares; evaluación y selección justificada de herramientas de diseño digital para LEGO; fabricación aditiva mediante tecnología FDM, incluyendo la selección de materiales y parámetros de procesamiento; y la integración del diseño virtual con la materialización física de los componentes diseñados.

El objetivo principal del presente Trabajo de Fin de Grado es el diseño y modelado virtual completo de una figura de un alférez alumno de Infantería de Marina a escala, empleando el sistema modular LEGO® como plataforma base e integrando herramientas de diseño asistido por ordenador (CAD) y técnicas de fabricación aditiva para la creación de componentes personalizados que amplíen las posibilidades del catálogo estándar.

Con el fin de alcanzar el objetivo principal, se plantean los siguientes objetivos específicos, ordenados de forma secuencial según el desarrollo del trabajo:

1. Analizar el sistema LEGO® como plataforma modular desde una perspectiva geométrica y dimensional, identificando sus parámetros fundamentales de diseño como base para el desarrollo del modelo.
2. Evaluar y comparar las principales herramientas de software disponibles para el diseño digital con piezas LEGO, justificando la selección de la herramienta principal en función de criterios técnicos, documentales y de integración con el flujo de fabricación.
3. Realizar una justificación estructural y cinemática del diseño de la figura, analizando los grados de libertad de las articulaciones principales y la selección de las piezas que las permiten, asegurando que las proporciones del modelo son coherentes con la escala de referencia de un soldado real.
4. Desarrollar componentes personalizados mediante modelado paramétrico en software CAD, garantizando su compatibilidad geométrica con el sistema LEGO® mediante el control de tolerancias y parámetros de encaje.
5. Analizar las tecnologías de fabricación aditiva aplicables al proyecto, justificar la selección del proceso y del material empleado, y explorar la influencia de los parámetros de procesamiento en la calidad de las piezas fabricadas.
6. Validar los resultados obtenidos mediante la comparación dimensional entre las piezas diseñadas y las fabricadas, un análisis estructural simplificado por elementos finitos con indicación explícita de sus limitaciones, y un estudio económico completo del proceso de adquisición y fabricación.

## 1.3 Estructura de la memoria

Una vez establecido el ambiente en el que se desarrolla este trabajo a la vez que han sido definidos los objetivos que se pretenden alcanzar, se procede a estructurar la presente memoria de forma lógica y progresiva, permitiendo la comprensión del problema planteado, el marco teórico que lo sustenta y la metodología aplicada para su desarrollo. Este documento está dividido en cinco capítulos con su bibliografía correspondiente la cual recoge las referencias de las fuentes utilizadas para la investigación y desarrollo del trabajo. La memoria quedaría estructurada de la siguiente manera:

Capítulo 1: Introducción y objetivos: En este primer capítulo se contextualiza el trabajo dentro del ámbito de la Ingeniería Mecánica y el modelado digital modular. Se presenta la motivación técnica del proyecto, destacando la singularidad del sistema LEGO como plataforma constructiva estandarizada basada en principios geométricos y tolerancias controladas. Asimismo, se formulan de manera clara y secuenciada los objetivos generales y específicos del TFG.

Capítulo 2: Estado del arte: El segundo capítulo realiza una revisión crítica y organizada de los conocimientos existentes relacionados con el sistema LEGO como plataforma modular, las herramientas digitales para diseño con piezas LEGO, las tecnologías CAD, y la fabricación aditiva, así como un estudio de mercado de impresoras 3D y materiales que se utilizan para la impresión.

Capítulo 3: Desarrollo del TFG: Se describirá de forma estructurada el procedimiento seguido para alcanzar los objetivos planteados. Se detallarán las etapas del proyecto, desde el diseño de la figura con piezas LEGO utilizando el software Brick Studio Link, hasta el desarrollo de las piezas mediante Autodesk Inventor, incluyendo un análisis estructural previo a su posterior impresión mediante el empleo de fabricación aditiva.

Capítulo 4: Resultados y discusión: El presente capítulo recoge los resultados obtenidos durante el desarrollo del modelado virtual y la validación dimensional de la figura de alférez alumno, así como su análisis técnico en relación con los objetivos planteados,

Capítulo5: Conclusiones y líneas futuras: Se resumirán las conclusiones desarrolladas de los resultados obtenidos. Además, se plantearán posibles líneas futuras a realizar y desarrollar en posteriores proyectos o TFG con el objetivo de mejorar el resultado o focalizarse más en otros aspectos de los que se han trabajado.

Capítulo 6: Bibliografía: Se dispondrá de las fuentes académicas y empresariales en las que se ha basado y apoyado este trabajo, adjuntándose además anexos que complementan el TFG con la finalidad de facilitar la comprensión de la memoria.

# 2 ESTADO DEL ARTE

## 2.1 Sistemas modulares y plataforma LEGO

### *2.1.1 Origen y avances de la modulación LEGO y su empleo para representación y maquetación*

La empresa LEGO fue fundada en 1932 en Billund (Dinamarca) por el carpintero Ole Kirk Christiansen, quien se dedicaba principalmente a la fabricación de juguetes de madera. El nombre LEGO procede de la expresión danesa *leg godt*, que significa "jugar bien" [1].

Tras la Segunda Guerra Mundial, la empresa comenzó a experimentar con materiales plásticos, lo que marcaría un punto de inflexión en su desarrollo industrial. En 1949 se introdujeron los primeros ladrillos de plástico, como se ve en la Figura 2-1 Plano brick de LEGO, denominados *Automatic Binding Bricks* [2], que sentaron las bases del sistema constructivo que se desarrollaría en las décadas siguientes.

La evolución decisiva del sistema se produjo en 1961, cuando se patentó el diseño moderno del ladrillo LEGO, caracterizado por el sistema de *stud-tube system* que permiten el encaje entre piezas. Este sistema genera una fuerza de sujeción que garantiza la estabilidad estructural y rigidez del conjunto sin impedir el desmontaje de los elementos [1].

Uno de los aspectos más destacables del sistema LEGO es su compatibilidad intergeneracional [1]: las piezas fabricadas en los años sesenta pueden ensamblarse perfectamente con las actuales gracias a una estandarización dimensional extremadamente precisa, con tolerancias de fabricación en el orden de centésimas de milímetro. Las dimensiones fundamentales del sistema son las siguientes:

1. Paso entre *studs*: 8 mm
2. Diámetro del *stud*: 4,8 mm
3. Altura del *stud*: 1,8 mm
4. Altura de un *plate*: 3,2 mm
5. Altura de un *brick*: 9,6 mm
6. Ancho plate de 2 studs: 12 mm

A partir de la década de 1960, LEGO amplió progresivamente su catálogo incorporando nuevas piezas, mecanismos y elementos estructurales, lo que permitió que el sistema trascendiera su función inicial como juguete y se consolidara como una herramienta versátil para la representación de modelos arquitectónicos, estructuras mecánicas y prototipos conceptuales.

En el ámbito educativo y técnico, el sistema LEGO ha sido empleado en numerosos contextos académicos como herramienta de aprendizaje en ingeniería, robótica y diseño industrial [3, 4]. Su modularidad, facilidad de manipulación y coherencia dimensional lo convierten en un medio eficaz para representar sistemas complejos de manera tangible. En particular, su uso en entornos STEM ha permitido fomentar competencias como la resolución de problemas, el pensamiento computacional y el diseño estructural.

Desde el punto de vista ingenieril, el sistema LEGO puede describirse como una plataforma modular basada en interfaces estandarizadas, donde la compatibilidad geométrica entre piezas permite construir estructuras reconfigurables mediante la sustitución o ampliación de módulos. En el contexto del presente TFG, este sistema modular constituye la base para la representación física de la figura, permitiendo gestionar variantes de proporciones, postura y volumen sin necesidad de rediseñar el conjunto desde cero [1]. No obstante, el catálogo estándar presenta limitaciones para la representación de elementos específicos del uniforme y equipamiento militar, como el chaleco táctico, el fusil de asalto o la prenda de cabeza, lo que justifica la incorporación de herramientas CAD y fabricación aditiva como extensión del sistema modular.

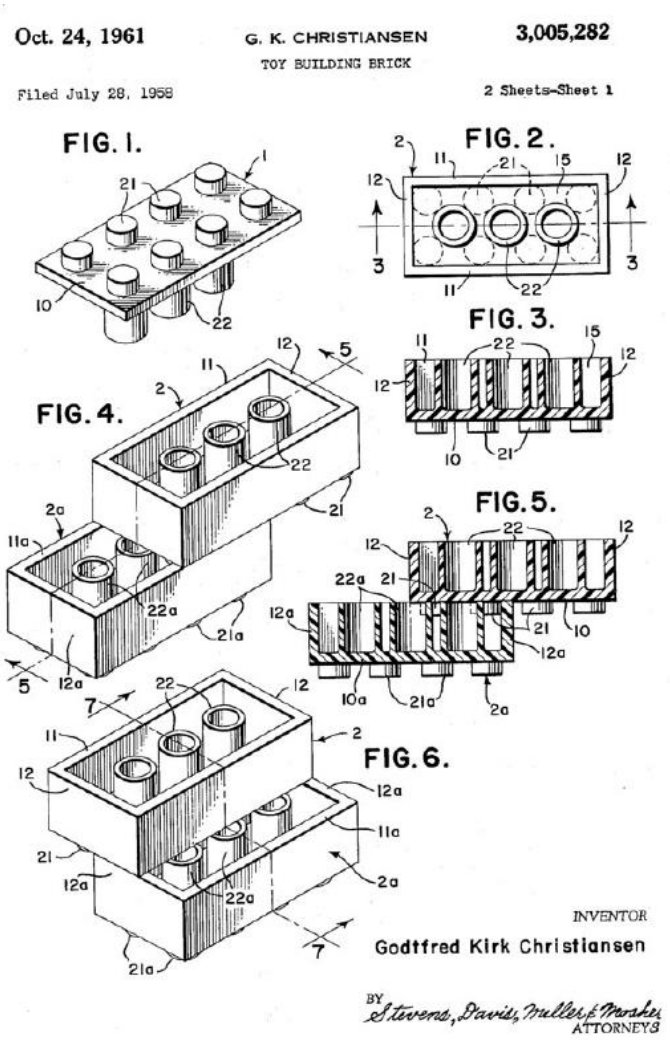



**Figura 2-1 Plano brick de LEGO**

### *2.1.2 Softwares para trabajar con LEGO*

El diseño digital de modelos LEGO requiere herramientas específicas que permitan trabajar con el catálogo de piezas existente, gestionar ensamblajes y preparar el modelo para su posterior construcción o documentación. En la actualidad existen diversas plataformas orientadas a este fin, que pueden clasificarse en tres categorías principales según su enfoque y funcionalidades.

#### *2.1.2.1 Ecosistema LDraw (estándar abierto)*

LDraw es un estándar abierto y gratuito desarrollado por la comunidad de usuarios de LEGO [5], que define un formato de archivo y una biblioteca de piezas digitales en constante actualización. Sobre este software operan herramientas como LeoCAD o MLCad, que permiten construir modelos virtuales con piezas del catálogo oficial y exportarlos a distintos formatos. Su principal fortaleza reside en la portabilidad del formato y en la amplitud de la biblioteca de piezas, mantenida de forma colaborativa. Sin embargo, presenta limitaciones relevantes en el contexto de un TFG orientado a la construcción real: la actualización de librerías no siempre es inmediata, la consistencia entre piezas puede variar, y la integración directa con plataformas de gestión de inventario y compra de piezas es limitada.

#### *2.1.2.2 Mecabricks*

Mecabricks [6] permite construir y visualizar modelos LEGO directamente desde el navegador, ofreciendo capacidades de renderizado de alta calidad. Su interfaz intuitiva facilita la creación rápida de modelos y su presentación visual, lo que las hace especialmente adecuadas para proyectos con un enfoque estético. No obstante, la gestión de listas de piezas, la generación de instrucciones de montaje detalladas y la integración con plataformas de adquisición de componentes son funcionalidades limitadas o inexistentes, lo que la hace poco adecuada para este tipo de proyectos.

#### *2.1.2.3 BrickLink Studio*

BrickLink Studio [7] ofrece un flujo de trabajo completo desde el modelado hasta la documentación y la gestión práctica de piezas. Integra en un mismo entorno el diseño del modelo con el catálogo oficial completo de piezas LEGO, la generación de instrucciones de montaje paso a paso editables, la comprobación automática de colisiones entre elementos y la conexión directa con la plataforma de compraventa BrickLink para la adquisición de los componentes necesarios. Estas características la convierten en la opción más adecuada para proyectos en los que el objetivo final es la construcción física del modelo diseñado.

#### *2.1.2.4 Conclusión comparativa*

En la Tabla 2-1 Comparación softwares de LEGO, se recoge un resumen comparativo de los tres enfoques descritos. Atendiendo a los criterios analizados, y dado que el presente trabajo tiene como objetivo el diseño virtual de una figura con vocación de construcción real, la herramienta más adecuada es BrickLink Studio [7], por su equilibrio entre catálogo completo, usabilidad, capacidad de documentación e integración en el flujo completo de diseño y adquisición de piezas

| Criterios | LDraw | Mecabricks | BrickLink Studio |
|---|---|---|---|
| Catálogo de piezas | Amplio | Limitado | Completo |
| Generación de instrucciones | Requiere herramientas adicionales | No disponible | Integrada |
| Gestión de inventario y compra | No integrada | No disponible | Integrada |
| Detección de colisiones | Limitada | No disponible | Integrada |
| Orientación principal | Modelado abierto | Visualización / render | Construcción real |
| Adecuación al TFG | Media | Baja | Alta |

**Tabla 2-1 Comparación softwares de LEGO**

## 2.2 Tecnologías CAD / CAM

El diseño asistido por ordenador CAD (Computer-Aided Design) y la fabricación por ordenador CAM (Computer-Aided Manufacturing) constituyen dos disciplinas íntimamente ligadas que, en conjunto, conforman el flujo de trabajo digital estándar en ingeniería mecánica moderna. Mientras que el CAD se ocupa de la definición geométrica y paramétrica del producto, el CAM traduce esa definición en instrucciones de fabricación ejecutables por máquinas o sistemas de producción automatizados [8].

La integración CAD/CAM ha experimentado un desarrollo significativo en las últimas décadas, impulsado en gran medida por la expansión de las tecnologías de fabricación aditiva. A diferencia de los procesos sustractivos tradicionales, en los que el CAM genera trayectorias de herramienta sobre un bloque de material, en fabricación aditiva el flujo CAD/CAM se materializa en la generación de archivos de intercambio (típicamente en formato STL o 3MF) que son procesados por software de laminado (*slicing*), el cual traduce la geometría tridimensional en capas y genera las instrucciones de movimiento para la impresora [9].

### *2.2.1 Modelado paramétrico*

El modelado paramétrico es la metodología de diseño CAD en la que la geometría de una pieza queda definida no solo por su forma, sino por un conjunto de parámetros y relaciones entre ellos. Cualquier modificación de un parámetro se propaga automáticamente a toda la geometría que depende de él, lo que permite gestionar variantes de diseño de forma eficiente y controlada [8, 10].

En el contexto del presente TFG, el modelado paramétrico es especialmente relevante por dos motivos. En primer lugar, las piezas personalizadas diseñadas deben ser compatibles con el sistema LEGO, lo que implica respetar con precisión los parámetros dimensionales del sistema (paso entre *studs*, diámetro y altura del *stud*, altura de *plate* y de *brick*). El uso de un modelo paramétrico permite vincular directamente las cotas críticas de encaje a estos valores. En segundo lugar, la posibilidad de generar variantes de una misma pieza modificando únicamente los parámetros de longitud o volumen permite explorar distintas proporciones de la figura sin necesidad de rediseñar cada componente desde cero [11]

### *2.2.2 Selección software Autodesk Inventor*

Entre las distintas plataformas CAD paramétricas disponibles en el mercado (Autodesk Inventor, SolidWorks, CATIA, Siemens NX), la herramienta seleccionada para el desarrollo de los componentes personalizados del presente TFG es Autodesk Inventor, por los siguientes motivos:

1. Modelado paramétrico robusto: Inventor permite definir la geometría de las piezas mediante relaciones y restricciones paramétricas, de forma que cualquier modificación de una cota se propaga automáticamente a toda la geometría dependiente, lo que resulta especialmente útil para mantener la compatibilidad dimensional con el sistema LEGO en todas las iteraciones de diseño [12].
2. Capacidad de modelado adaptativo: A diferencia de un enfoque puramente predictivo basado en parámetros fijos, Inventor ofrece herramientas de edición directa y modelado de forma libre que automatizan internamente el cálculo geométrico necesario para piezas con geometría compleja, como las superficies curvas del fusil de asalto o la semiesfera de la articulación de cadera, permitiendo centrarse en el diseño global sin perder tiempo en el cálculo manual de cada detalle geométrico [12].
3. Entorno de simulación integrado: Inventor incorpora un módulo de análisis de tensiones (*Stress Analysis*) que permite realizar simulaciones estructurales por el método de elementos finitos directamente sobre el modelo CAD, sin necesidad de exportar la geometría a un software externo. Esta integración fue determinante para el desarrollo del análisis estructural simplificado presentado en el apartado 4.3, al trabajar sobre el mismo modelo paramétrico utilizado para el diseño [12].
4. Disponibilidad institucional: Autodesk Inventor está disponible en el CUD-ENM como parte de las herramientas de diseño empleadas en la docencia del Grado en Ingeniería Mecánica, lo que garantiza el acceso a licencia educativa y el soporte técnico necesario durante el desarrollo del proyecto.
5. Tiempo de carga optimizado: Inventor distingue y carga de forma independiente los datos gráficos y los datos geométricos/materiales de cada componente, lo que reduce significativamente los tiempos de carga en ensamblajes complejos como el conjunto completo de piezas personalizadas del presente TFG.

## 2.3 Tecnologías de fabricación aditiva

La fabricación aditiva, también conocida como impresión 3D, engloba un conjunto de tecnologías de producción que construyen objetos tridimensionales mediante la deposición o solidificación sucesiva de material capa a capa, partiendo directamente de un modelo digital. A diferencia de los procesos sustractivos tradicionales, la fabricación aditiva añade material exclusivamente donde es necesario, lo que permite obtener geometrías complejas con un menor desperdicio de material [14].

Desde su aparición en la década de 1980, las tecnologías de fabricación aditiva han evolucionado considerablemente, diversificándose en múltiples procesos que difieren en el tipo de material empleado, el mecanismo de consolidación y las propiedades de las piezas resultantes. La norma ISO/ASTM 52900 establece una clasificación de estas tecnologías en siete categorías, de las cuales las más relevantes en el ámbito de los polímeros termoplásticos y fotopolímeros son la extrusión de material (FDM), la fotopolimerización en cuba (SLA) y la sinterización selectiva por láser (SLS) [13].

### *2.3.1 Estereolitografía (SLA)*

La estereolitografía (*Stereolithography Apparatus*) fue la primera tecnología de fabricación aditiva en comercializarse, patentada por Charles Hull en 1986. Su principio de funcionamiento se basa en la fotopolimerización selectiva de una resina líquida fotosensible mediante un láser ultravioleta. El láser

traza cada capa del modelo sobre la superficie de la resina, solidificándola en los puntos irradiados. Una vez completada una capa, la plataforma de construcción desciende una distancia equivalente al espesor de capa definido, y el proceso se repite hasta completar la pieza [13].

Las principales ventajas de la SLA son su elevada resolución dimensional y la calidad superficial de las piezas obtenidas, como se puede observar en la Figura 2-2 Pieza generada con SLA. Sus limitaciones principales son el coste de las resinas fotopolimerizables, la necesidad de postprocesado mediante curado adicional bajo luz ultravioleta, y la menor variedad de materiales disponibles en comparación con otras tecnologías [13]. En el CUD-ENM existe equipamiento de impresión SLA en el Laboratorio de Diseño de Investigación, lo que abre la posibilidad de explorar esta tecnología como línea futura para la fabricación de componentes de mayor resolución.

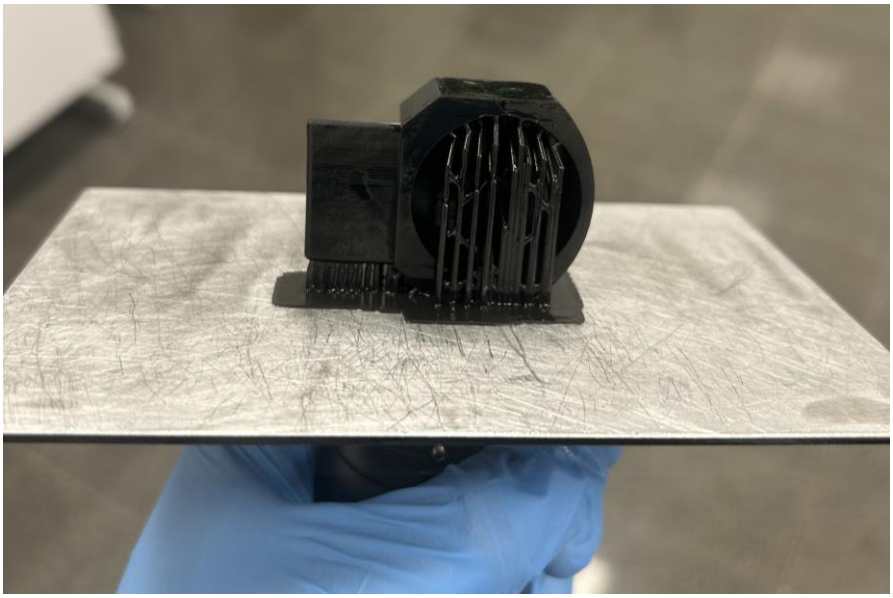


**Figura 2-2 Pieza generada con SLA**

### *2.3.2 Sinterización selectiva por láser (SLS)*

La sinterización selectiva por láser (*Selective Laser Sintering*) es una tecnología de fabricación aditiva basada en la fusión localizada de material en polvo mediante un láser de alta potencia. El proceso comienza con la deposición de una capa fina de polvo sobre la plataforma de construcción, posteriormente el láser escanea la sección transversal de la pieza, sinterizando las partículas en los puntos irradiados. Por último, el polvo no sinterizado actúa como soporte natural de la pieza, lo que elimina la necesidad de estructuras de soporte adicionales y permite fabricar geometrías muy complejas [13]. Como limitaciones destacan el elevado coste del equipamiento, la rugosidad superficial de las piezas obtenidas y la complejidad del postprocesado.

### *2.3.3 Modelado por deposición fundida (FDM)*

El modelado por deposición fundida (*Fused Deposition Modeling*), cuyo funcionamiento se puede visualizar en la Figura 2-3 Esquema de funcionamiento de FDM, también denominado fabricación por filamento fundido (FFF), es en la actualidad la tecnología de fabricación aditiva más extendida tanto en entornos industriales como educativos, principalmente por su bajo coste de equipamiento, la amplia disponibilidad de materiales y la facilidad de operación [14].

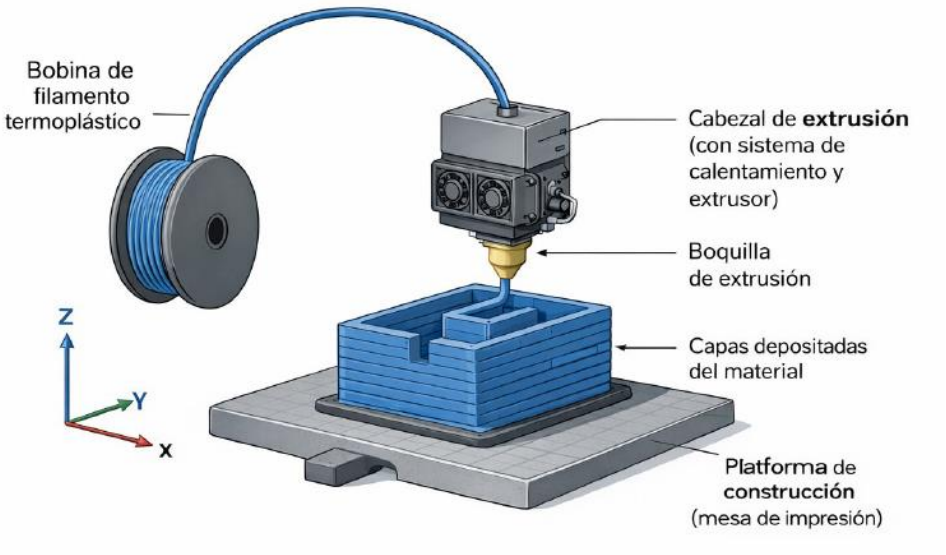



**Figura 2-3 Esquema de funcionamiento de FDM**

El principio de funcionamiento del FDM consiste en la fusión de un filamento termoplástico que es extruido a través de una boquilla calefactada y depositado sobre la plataforma de construcción siguiendo las trayectorias definidas por el software de laminado. El material se solidifica rápidamente al contacto con la capa inferior, formando una unión entre capas por fusión térmica. Los parámetros de procesamiento del FDM tienen una influencia directa y significativa sobre las propiedades mecánicas y la calidad dimensional de las piezas obtenidas [15]:

1. Espesor de capa: determina la resolución vertical de la pieza y el tiempo de impresión.
2. Densidad y patrón de relleno: condicionan la resistencia mecánica, el peso y el consumo de material.
3. Ángulo de raster: la orientación de las líneas de deposición influye de forma determinante en la resistencia a tracción y flexión de la pieza, dado el comportamiento anisótropo del material impreso.
4. Temperatura de extrusión: afecta a la adhesión entre capas y a las propiedades reológicas del material fundido.
5. Velocidad de impresión: influye en la calidad superficial y en la adhesión entre capas.
6. Temperatura de la cama: relevante para evitar deformaciones por contracción térmica (*warping*) durante la fabricación.

Es importante señalar que las piezas fabricadas por FDM presentan un comportamiento mecánico anisótropo, es decir, sus propiedades varían en función de la dirección de aplicación de la carga respecto a la orientación de las capas. Esta característica tiene implicaciones directas en el análisis estructural por elementos finitos, ya que los modelos basados en propiedades elásticas isotrópicas no representan con exactitud el comportamiento real de las piezas impresas, como se discutirá en el apartado de resultados [18].

### *2.3.3.1 Precisión dimensional y contracción térmica en FDM: comparativa PLA vs ABS*

La precisión dimensional de las piezas fabricadas por FDM está condicionada por la contracción térmica que experimenta el material durante el enfriamiento desde la temperatura de extrusión hasta la temperatura ambiente. Este fenómeno es inherente a todos los polímeros termoplásticos procesados por

FDM, pero su magnitud varía significativamente en función del material empleado y tiene implicaciones directas sobre la exactitud geométrica de las piezas obtenidas [18].

El PLA presenta una contracción térmica reducida, de aproximadamente un 0,3-0,5% en volumen, lo que lo hace especialmente adecuado para aplicaciones que requieren precisión dimensional elevada. Su baja temperatura de extrusión (190-220 °C) y su rápida solidificación al enfriarse generan gradientes térmicos moderados entre capas, minimizando las tensiones internas y el riesgo de deformación (*warping*). Estas características lo convierten en el material de referencia para prototipos con tolerancias ajustadas y piezas de encaje, como las diseñadas en el presente TFG [15, 18].

El ABS, por el contrario, presenta una contracción térmica significativamente mayor, de aproximadamente un 1,5-2% en volumen, como consecuencia de su mayor temperatura de extrusión (240-250 °C) y de su mayor coeficiente de expansión térmica. Esta contracción diferencial entre capas genera tensiones internas durante el enfriamiento que pueden manifestarse en forma de [19]:

1. Deformación (*warping*): curvatura de la base de la pieza por contracción de las capas inferiores al enfriarse más rápidamente que las superiores. Es especialmente pronunciada en piezas con gran superficie basal o esquinas pronunciadas.
2. Delaminación entre capas: separación parcial entre capas adyacentes causada por la contracción diferencial, que reduce la adhesión intercapa y puede comprometer la integridad estructural de la pieza.
3. Desviaciones dimensionales**:** las piezas fabricadas en ABS tienden a ser ligeramente más pequeñas que el modelo CAD original, especialmente en dimensiones críticas como los diámetros de encaje, lo que debe tenerse en cuenta ajustando las cotas del modelo antes de fabricar.

### *2.3.4 Selección de la tecnología para el TFG*

En la Tabla 2-2 Comparación de tecnologías de fabricación se recoge una comparativa de las tres tecnologías en función de los criterios más relevantes para el presente trabajo.

| **Criterios** | **SLA** | **SLS** | **FDM** |
|---|---|---|---|
| Coste de equipamiento | Medio | Alto | Bajo |
| Variedad de materiales | Baja (Resinas) | Media (Polvos) | Alta (Filamentos) |
| Resolución dimensional | Alta | Media | Media |
| Acabado superficial | Muy bueno | Bueno | Normal |
| Necesidad de soportes | Sí | No | No |
| Disponibilidad del CUD | Sí | No | Sí |
| Adecuación al TFG | Media | Baja | Alta |

**Tabla 2-2 Comparación de tecnologías de fabricación**

La selección de la tecnología FDM como proceso de fabricación principal del presente TFG se justifica por la confluencia de varios factores. En primer lugar, el equipamiento FDM está disponible en el CUD-ENM y es accesible para el alumno durante el desarrollo del trabajo. En segundo lugar, la amplia variedad de materiales en filamento, incluyendo PLA en distintos colores, permite diferenciar visualmente los elementos del uniforme y el equipamiento de la figura. En tercer lugar, el bajo coste por

pieza fabricada y la facilidad de reimpresión ante fallos o ajustes de diseño hacen del FDM la opción más eficiente para un proceso iterativo de diseño y validación [14].

El material seleccionado para la fabricación es el ácido poliláctico (PLA), un polímero termoplástico de origen biológico ampliamente utilizado en FDM por su facilidad de procesamiento, buena resolución dimensional, ausencia de emisiones tóxicas durante la impresión y coste reducido [16]. Su tensión de fluencia se sitúa típicamente entre 30 y 60 MPa, dato que resulta de especial relevancia para la interpretación del análisis estructural desarrollado en el apartado de resultados [18].

### *2.3.5 Equipos de fabricación aditiva empleados*

En el presente TFG se han empleado dos equipos de fabricación aditiva basados en tecnología FDM, seleccionados en función del material a procesar y de los requisitos técnicos de cada fase de fabricación.

#### *2.3.5.1 Bambu Lab P1P*

La Bambu Lab P1P, mostrada en la siguiente Figura 2-4 Bambu Lba P1P [19], es una impresora FDM de arquitectura CoreXY de bastidor abierto, introducida en el mercado en noviembre de 2022. Su sistema de movimiento CoreXY, combinado con compensación activa de vibraciones (*input shaping*) y control de presión de extrusión (*pressure advance*), le permite alcanzar velocidades de impresión de hasta 500 mm/s con una aceleración de 20.000 mm/s², manteniendo una elevada calidad dimensional incluso a altas velocidades [19].

La naturaleza de cámara abierta de la P1P la hace especialmente adecuada para la impresión de materiales de baja temperatura como el PLA, que no requieren un entorno térmicamente controlado durante la fabricación. Esta característica, unida a su reducido coste de adquisición de alrededor de 700 €, y a su facilidad de operación, la convierte en la opción más eficiente para la fabricación de los elementos del presente TFG.




**Figura 2-4 Bambu Lba P1P [19]**

### *2.3.5.2 Bambu Lab X1-Carbon*

La Bambu Lab X1-Carbon, la cual se muestra en la Figura 2-5 Bambu Lab X1-Carbon [20], es una impresora FDM de arquitectura CoreXY con cámara completamente cerrada, diseñada para la impresión de materiales técnicos y de ingeniería avanzados. Incorpora un hotend todo metálico capaz de alcanzar 300 °C, boquilla de acero endurecido, sensores LiDAR de 7 μm de resolución para nivelación automática dual de la cama, y un sistema de visión artificial con cámara integrada para detección de fallos durante la impresión [20].

La cámara cerrada de la X1-Carbones el elemento diferencial respecto a la P1P y el motivo de su selección para fabricación con ABS. Este presenta una contracción térmica significativa durante el enfriamiento, lo que puede provocar deformaciones (*warping*) y delaminación entre capas si el gradiente de temperatura no está controlado. La cámara cerrada de la X1-Carbon permite mantener una temperatura interior de hasta 60 °C durante la impresión, minimizando este gradiente y garantizando la estabilidad dimensional de las piezas fabricadas en ABS [20].

Adicionalmente, el sistema de filtrado de carbono activo integrado retiene las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) generadas durante la impresión de ABS, aspecto relevante desde el punto de vista de la seguridad en el entorno de trabajo del laboratorio.




**Figura 2-5 Bambu Lab X1-Carbon [20]**

### *2.3.5.3 ELEGOO Mars 3 Pro*

La ELEGOO Mars 3 Pro que se ve en la siguiente Figura 2-6 ELEGOO Mars 3 Pro [21], es una impresora de fotopolimerización en cuba basada en tecnología MSLA (*Masked Stereolithography Apparatus*), que emplea una pantalla LCD monocromática de 6,6 pulgadas y resolución 4K (4.098×2.560 píxeles) como máscara de exposición, combinada con una fuente de luz COB UV de 405 nm con lente Fresnel que garantiza una uniformidad de iluminación superior al 92%. A diferencia de la SLA láser clásica, la tecnología MSLA expone simultáneamente toda la sección de cada capa a través de la máscara LCD, reduciendo significativamente el tiempo de exposición por capa (2,5 s/capa) y aumentando la productividad [21].

La resolución XY de 35 µm de la ELEGOO Mars 3 Pro es significativamente superior a la resolución de las impresoras FDM empleadas en las fases anteriores (≈200 µm de espesor de capa en FDM), lo que permite obtener detalles superficiales muy superiores en las piezas de resina, siendo especialmente adecuada para elementos de pequeño tamaño y alto nivel de detalle como accesorios del uniforme o elementos faciales de la figura [21]

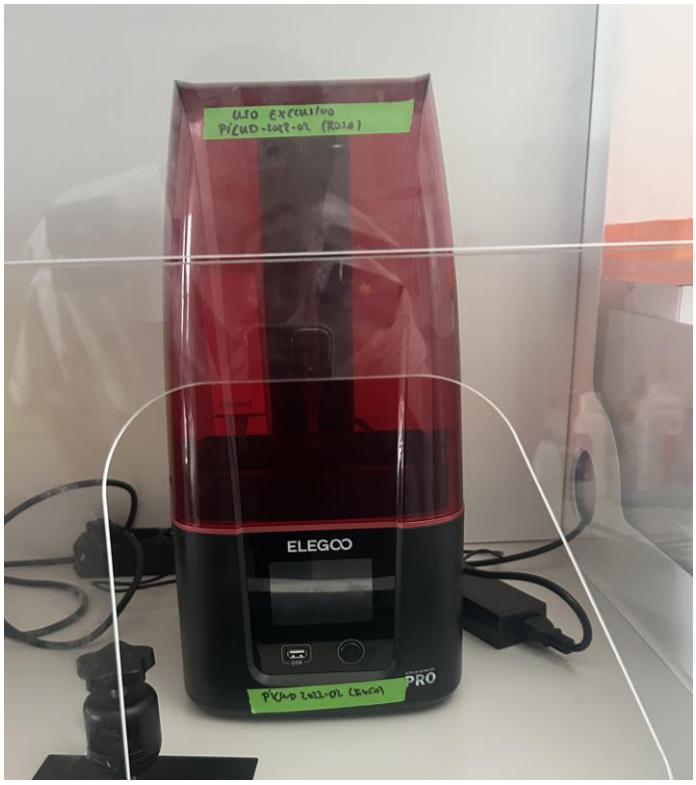



**Figura 2-6 ELEGOO Mars 3 Pro [21]**

### *2.3.6 Materiales empleados para FDM*

La selección del material es uno de los factores más determinantes en el proceso FDM, ya que condiciona directamente las propiedades mecánicas, la facilidad de procesamiento y la adecuación de la pieza a su aplicación final. Los materiales termoplásticos más utilizados en FDM pueden clasificarse en las siguientes categorías [22]

#### *2.3.6.1 Ácido Poliláctico (PLA)*

El ácido poliláctico (PLA, del inglés *Polylactic Acid*) es un polímero termoplástico de origen biológico sintetizado a partir del ácido láctico, obtenido mediante la fermentación de carbohidratos procedentes de fuentes renovables como el maíz, la caña de azúcar o la mandioca. A diferencia de los polímeros de origen petroquímico, el PLA es biodegradable en condiciones industriales de compostaje, lo que lo convierte en una de las opciones más sostenibles dentro del catálogo de materiales para fabricación aditiva [22].

Es el material de referencia en FDM por su facilidad de procesamiento, baja temperatura de extrusión (190-220 °C), escasa contracción térmica y buena resolución dimensional. Presenta una resistencia a tracción elevada (45-60 MPa) y una dureza Shore D de 73-82, siendo el material más adecuado para prototipos con tolerancias ajustadas y piezas de encaje como las diseñadas en el presente TFG. Su principal limitación es su fragilidad relativa frente a impactos y su baja temperatura de deflexión bajo carga (50-60 °C). [22]

No requiere cámara cerrada ni condiciones especiales de entorno, lo que lo hace compatible con prácticamente cualquier impresora FDM del mercado.

La baja contracción térmica del PLA es especialmente relevante para el presente proyecto, ya que las piezas personalizadas diseñadas incorporan elementos de encaje con el sistema LEGO con tolerancias de ±0,1 mm. La estabilidad dimensional del PLA durante el enfriamiento garantiza que estas tolerancias se mantengan dentro de los márgenes admisibles sin necesidad de compensación en el modelo CAD, a diferencia del ABS, que requiere correcciones dimensionales por contracción [18, 22].

#### *2.3.6.2 Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)*

Se trata de un terpolímero compuesto por tres monómeros: acrilonitrilo, que aporta rigidez y resistencia química; butadieno, que proporciona tenacidad e impacto; y estireno, que confiere rigidez superficial y facilidad de procesamiento. Esta combinación resulta en un material con un excelente equilibrio entre rigidez y tenacidad, superior al del PLA en lo que respecta a resistencia al impacto y comportamiento a fatiga [22].

En el contexto de la fabricación aditiva por FDM, el ABS presenta una temperatura de extrusión de 230-250 °C y requiere una cama caliente a 100-110 °C para garantizar la adhesión de la primera capa. Su mayor limitación es la contracción térmica significativa durante el enfriamiento (1,5-2%), que genera tensiones internas capaces de provocar deformaciones (*warping*) y delaminación entre capas si el gradiente térmico no está controlado. Por este motivo, la impresión de ABS requiere impresoras con cámara cerrada que mantengan la temperatura del entorno entre 45 y 60 °C durante todo el proceso [18, 22].

Desde el punto de vista de las propiedades mecánicas, el ABS presenta una resistencia a tracción de 30-50 MPa, un módulo de Young de 1.400-2.800 MPa y una dureza Shore D de 65-75, ligeramente inferior a la del PLA debido a su mayor tenacidad y capacidad de deformación plástica. Su temperatura de deflexión bajo carga (85-100 °C) es significativamente superior a la del PLA, lo que lo hace más adecuado para aplicaciones en entornos cálidos [22].

En el presente TFG, el ABS se seleccionó para la fabricación de la articulación de cadera por dos motivos principales: su coherencia con el material empleado por el fabricante LEGO en la producción de sus piezas originales mediante inyección, y su mayor tenacidad respecto al PLA, que lo hace más resistente a los esfuerzos de torsión y compresión repetidos que se producen durante la manipulación de la articulación.

### *2.3.6.3 Polietileno tereftalato modificado con glicol (PETG)*

Es un poliéster termoplástico derivado del PET (polietileno tereftalato) mediante la sustitución parcial del etilenglicol por ciclohexanodimetanol (CHDM) durante la polimerización. Esta modificación rompe la cristalinidad del PET, obteniendo un material amorfo con mayor flexibilidad, mejor resistencia al impacto y mayor facilidad de procesamiento que su precursor [22].

En FDM, el PETG se procesa a temperaturas de extrusión de 230-250 °C y temperatura de cama de 70-90 °C, sin necesidad de cámara cerrada. Presenta una contracción térmica baja, comparable a la del PLA, lo que facilita la obtención de piezas dimensionalmente precisas sin riesgo de *warping*. Su principal ventaja respecto al PLA es su mayor tenacidad y su excelente resistencia química a ácidos, álcalis y disolventes comunes, lo que lo hace especialmente adecuado para piezas funcionales expuestas a entornos húmedos o agresivos [22].

Sus propiedades mecánicas se sitúan entre las del PLA y el ABS: resistencia a tracción de 45-55 MPa, módulo de Young de 1.800-2.700 MPa y dureza Shore D de 70-75. La elongación en rotura del PETG (50-100%) es significativamente superior a la del PLA (3-6%), lo que le confiere una mayor capacidad de deformación antes de la fractura y reduce el riesgo de rotura frágil bajo cargas de impacto [22].

Aunque el PETG no se emplea como material principal en el presente TFG, su combinación de facilidad de procesamiento, tenacidad y resistencia química lo convierte en una alternativa relevante para futuros desarrollos de componentes de la figura que requieran mayor resistencia ambiental.

### *2.3.6.4 Poliuretano termoplástico (TPU)*

El TPU es un elastómero termoplástico formado por la alternancia de segmentos rígidos (diisocianato + extensor de cadena) y segmentos flexibles (poliol), cuya proporción relativa determina las propiedades mecánicas finales del material. Esta estructura segmentada le confiere un comportamiento intermedio entre los elastómeros vulcanizados y los termoplásticos convencionales, combinando la elasticidad del caucho con la procesabilidad de los termoplásticos [22].

En FDM, el TPU se procesa a temperaturas de extrusión de 220-235 °C y temperatura de cama de 30-60 °C. Su naturaleza elastomérica dificulta su procesamiento por FDM respecto a materiales rígidos como el PLA o el ABS, ya que el filamento tiende a pandear en el sistema de alimentación si no se dispone de un extrusor de accionamiento directo (*direct drive*). La velocidad de impresión debe reducirse significativamente respecto a otros materiales para garantizar una deposición uniforme [22].

Sus propiedades mecánicas son radicalmente distintas a las de los materiales rígidos: módulo de Young de 10-100 MPa (frente a los 1.400-3.500 MPa del PLA o el ABS), elongación en rotura de 300-600%, resistencia a tracción de 25-50 MPa y dureza Shore A de 60-98 (equivalente a 40-55 Shore D). Su alta resistencia al desgaste y al impacto, combinada con su capacidad de recuperación elástica, lo hace especialmente adecuado para juntas, sellos, protectores de impacto y elementos táctiles [22].

En el contexto del presente TFG, el TPU no se emplea como material de fabricación, dado que todos los componentes diseñados son elementos rígidos de representación y ensamblaje. No obstante, podría resultar de interés en futuras iteraciones del proyecto para el diseño de elementos de agarre o protecciones que requieran deformación elástica sin rotura.

Se muestra una comparativa de materiales en la Tabla 2-3 Comparación materiales empleables en FDM.

| Criterios | PLA | ABS | PETG | TPU |
|---|---|---|---|---|
| Temp de extrusión (ºC) | 190-220 | 230-250 | 230-250 | 220-235 |
| Temp. Cama (ºC) | 20-60 | 100-110 | 70-90 | 30-60 |
| Cámara cerrada | No necesaria | Recomendada | No necesaria | No necesaria |
| Dureza Shore D | 73-82 | 65-75 | 70-75 | 40-55 |
| Contracción plástica | Baja (0,3-0,5%) | Alta (1,5-2%) | Baja (0,3-0,5%) | Muy baja |
| Adecuación al TFG | Alta | Alta | Media | Baja |

**Tabla 2-3 Comparación materiales empleables en FDM**

### *2.3.7 Materiales empleados para SLA*

A diferencia del FDM, en el que el material es un filamento termoplástico, la tecnología SLA/MSLA emplea resinas fotopolimerizables líquidas que se solidifican por exposición a luz UV. La variedad de resinas disponibles permite obtener propiedades mecánicas muy distintas en función de la formulación, desde resinas rígidas de alta precisión hasta resinas flexibles de tipo elastomérico [13]

#### *2.3.7.1 Resinas estándar*

Ofrecen alta precisión dimensional y acabado superficial fino, siendo adecuadas para prototipos visuales y modelos de representación. Presentan buena rigidez, pero son relativamente frágiles. Son la opción más económica y la más empleada en impresoras de nivel de entrada.

Las resinas estándar son las formulaciones fotopolimerizables más básicas y económicas disponibles para tecnología SLA/MSLA. Están compuestas principalmente por monómeros y oligómeros de acrilato o metacrilato junto con fotoiniciadores que desencadenan la polimerización al recibir radiación UV de 405 nm. Una vez curadas, forman redes poliméricas altamente entrecruzadas que confieren al material una elevada rigidez superficial y una excelente resolución dimensional, con acabados superficiales muy superiores a los obtenibles por FDM [13].

Sus propiedades mecánicas típicas incluyen una resistencia a tracción de 40-65 MPa, un módulo de Young de 2.000-3.500 MPa y una dureza Shore D de 80-90, siendo los valores más elevados de todas las categorías de resina en términos de rigidez. Su principal limitación es la fragilidad: la elongación en rotura es muy baja (1-5%), lo que las hace susceptibles a la rotura frágil bajo cargas de impacto o esfuerzos localizados. Por este motivo, las resinas estándar son especialmente adecuadas para prototipos visuales, modelos de representación, figuras y elementos decorativos, pero no para piezas funcionales sometidas a cargas dinámicas [13].

El postcurado bajo luz UV es una etapa crítica para obtener las propiedades mecánicas óptimas de las resinas estándar. Un curado insuficiente produce piezas con menor dureza y mayor tendencia a la deformación diferida bajo carga (*creep*), mientras que un curado excesivo puede generar fragilidad adicional por sobreentrecruzamiento de la red polimérica. La norma ISO 10477 establece los procedimientos de ensayo para la caracterización de resinas fotopolimerizables curadas, aunque su aplicación más extendida es en el ámbito dental [13, 30].

#### *2.3.7.2 Resinas de ingeniería (tough/durable)*

Formuladas para aplicaciones funcionales que requieren resistencia mecánica y tenacidad. Las resinas tipo *tough* presentan propiedades similares al ABS (resistencia a tracción ≈ 55 MPa, módulo de elasticidad ≈ 2,7 GPa), siendo adecuadas para piezas con encajes, bisagras o elementos sometidos a impactos. Las resinas de ingeniería, también denominadas resinas *tough* o *durable* según el fabricante, están formuladas para superar las limitaciones de fragilidad de las resinas estándar, incorporando

modificadores de impacto y cadenas poliméricas de mayor flexibilidad en la red entrecruzada. El resultado es un material que combina la alta resolución superficial característica de la tecnología SLA/MSLA con propiedades mecánicas comparables a las de los termoplásticos de ingeniería procesados por FDM [13].

Las resinas tipo *tough* presentan propiedades mecánicas similares al ABS: resistencia a tracción de 45-55 MPa, módulo de Young de 2.400-2.700 MPa, elongación en rotura de 10-20% y dureza Shore D de 75-85. Esta combinación las hace especialmente adecuadas para piezas funcionales que puedan ser sometidas a pruebas de funcionamiento real y componentes que deben soportar cargas de impacto repetidas sin rotura frágil [13].

Las resinas *durables*, por su parte, están orientadas hacia comportamientos más similares al polipropileno o al polietileno de alta densidad, con mayor deformación plástica antes de la rotura (elongación en rotura de 50-100%) y menor módulo de Young (1.000-1.500 MPa). Son la opción preferida para piezas que requieren flexibilidad moderada manteniendo cierta rigidez estructural, como tapas, carcasas o elementos de cierre [13].

Al igual que las resinas estándar, las resinas de ingeniería requieren postcurado bajo luz UV para alcanzar sus propiedades mecánicas óptimas. El tiempo y la intensidad del postcurado tienen una influencia directa sobre el grado de entrecruzamiento final y, por tanto, sobre el equilibrio entre rigidez y tenacidad de la pieza obtenida [29].

#### *2.3.7.3 Resinas de base biológica*

Las resinas fotopolimerizables de base biológica representan una categoría emergente dentro del mercado de materiales para SLA/MSLA, desarrollada como respuesta a las crecientes demandas de sostenibilidad en los procesos de fabricación. A diferencia de las resinas convencionales, sintetizadas a partir de monómeros de origen petroquímico, las resinas de base biológica emplean precursores derivados de fuentes renovables como el maíz, la caña de azúcar o la soja para la síntesis de los poliales y oligómeros que forman la red polimérica [23].

La resina empleada en el presente TFG, la eSUN eResin-PLA, pertenece a esta categoría. Está sintetizada a partir de poliol de PLA de producción propia de eSUN, derivado de fuentes renovables, lo que le confiere un origen sostenible sin sacrificar las prestaciones mecánicas ni la calidad de impresión. Sus propiedades mecánicas incluyen una resistencia a tracción de 37-48 MPa, una resistencia a flexión de 36-49 MPa, y una dureza Shore D de 78-80, situándola en un rango de rigidez intermedio entre las resinas estándar y las de ingeniería [23].

Desde el punto de vista del procesamiento, la eResin-PLA, la cual se muestra en la Figura 2-7 eSUN eResin-PLA [23], presenta baja emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV) durante la impresión, lo que la hace especialmente adecuada para entornos de laboratorio con ventilación limitada. Su temperatura de operación recomendada es de 20-28 °C y debe almacenarse en recipiente opaco y sellado para evitar la fotopolimerización accidental por exposición a la luz ambiental [23].

Las resinas de base biológica presentan como limitación principal su mayor coste respecto a las resinas estándar convencionales, y su disponibilidad en colores y formulaciones es más reducida. No obstante, el avance en la síntesis de biopolioles y fotoiniciadores de origen renovable está ampliando progresivamente la gama de propiedades alcanzables con estos materiales, lo que hace prever un crecimiento significativo de esta categoría en los próximos años [23].

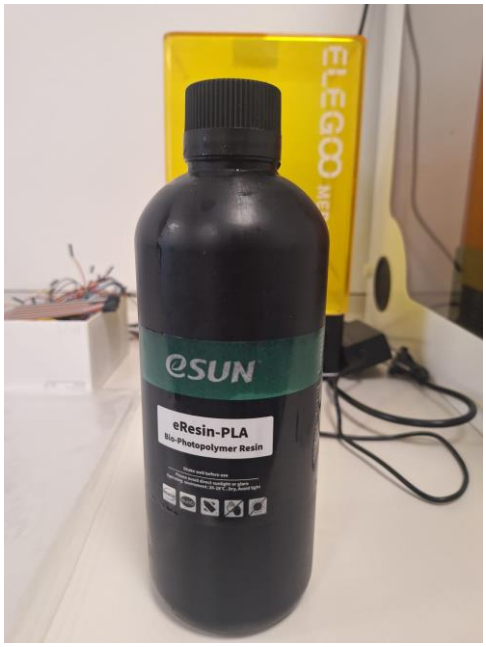



**Figura 2-7 eSUN eResin-PLA [23]**

## *2.3.8 Ensayos de dureza sobre piezas obtenidas con FDM y SLA*

La caracterización mecánica de piezas fabricadas mediante FDM y SLA no se limita a los ensayos de tracción y al análisis por elementos finitos. La dureza superficial constituye un parámetro complementario de gran relevancia, especialmente en componentes sometidos a contacto repetido, desgaste por rozamiento o esfuerzos de compresión localizada, como es el caso de la articulación esférica de cadera diseñada en el presente TFG.

La dureza de materiales plásticos se determina habitualmente mediante el método Shore, normalizado en la norma ISO 868:2003 [26], que cuantifica la resistencia del material a la penetración de un indentador bajo una carga y geometría normalizadas. En función de la rigidez del material, se emplean distintas escalas: la escala Shore D se aplica a polímeros rígidos como el PLA, el ABS y las resinas fotopolimerizables curadas, mientras que la escala Shore A se reserva para elastómeros y materiales más blandos. La diferencia fundamental entre ambas escalas reside en la geometría del indentador: el de tipo D presenta una punta cónica de 30° que concentra la carga en una zona más pequeña, haciéndola más sensible a diferencias de dureza en materiales rígidos [24].

### *2.3.8.1 Dureza Shore en piezas FDM*

Numerosos estudios han demostrado que la dureza Shore D de piezas fabricadas por FDM no es un valor constante del material, sino que depende significativamente de los parámetros de procesamiento empleados durante la fabricación. En particular, se han identificado dos factores de influencia principales [25, 26]:

1. Orientación de las capas (*raster angle*): la dirección de deposición del filamento respecto al plano de medición afecta directamente a la dureza superficial registrada. Las piezas impresas en orientación horizontal presentan valores de dureza Shore D superiores a las impresas en

orientación vertical, debido a que en la orientación horizontal la indentación actúa perpendicularmente a las capas, donde la adhesión entre ellas es mayor.

2. Densidad de relleno (*infill density*): la dureza Shore D aumenta de forma progresiva con la densidad de relleno. Para piezas PLA impresas por FDM, se han registrado valores que oscilan entre 75 Shore D para densidades de relleno bajas y 82,7 Shore D para densidades de relleno del 90%, lo que confirma la influencia directa de la porosidad interna en la resistencia superficial a la indentación [27].

Respecto a los valores típicos de dureza Shore D para los materiales empleados en el presente TFG, la literatura científica establece los siguientes rangos de referencia:

1. PLA impreso por FDM: valores de dureza Shore D comprendidos entre 80 y 85 Shore D para muestras con relleno elevado e impresión en orientación horizontal, reduciéndose hasta valores en torno a 73-76 Shore D para densidades de relleno moderadas [25, 27, 28].
2. ABS impreso por FDM: valores ligeramente inferiores a los del PLA, situados típicamente entre 70 y 75 Shore D, debido a su menor módulo de elasticidad y mayor tenacidad, que confiere al material una mayor capacidad de deformación plástica ante la indentación [29].

#### *2.3.8.2 Dureza Shore en piezas SLA*

Las resinas fotopolimerizables curadas por SLA presentan características de dureza Shore distintas a las de los polímeros termoplásticos impresos por FDM. Alcanzan típicamente valores de dureza Shore D superiores, situándose en rangos de 85-90 Shore D para resinas de uso general completamente curadas, debido a la mayor densidad de entrecruzamiento de la red polimérica generada durante la fotopolimerización [29].

A diferencia del FDM, la dureza Shore en piezas SLA depende principalmente del grado de curado del material, es decir, de la dosis de energía UV recibida durante la impresión y del postcurado posterior. Un curado insuficiente produce piezas con dureza reducida y propiedades mecánicas inferiores a las del material completamente curado. Por este motivo, el proceso de postcurado bajo luz UV es una etapa crítica en la caracterización de piezas SLA, y debe realizarse en condiciones controladas y documentadas para garantizar la reproducibilidad de los resultados [29].

# 3 DESARROLLO DEL TFG

## 3.1 Selección y justificación de la herramienta de modelado modular

El primer paso en el desarrollo del proyecto fue la selección de la herramienta de software más adecuada para el modelado virtual de la figura mediante piezas LEGO. Como se analizó en el apartado 2.1.2, existen diversas plataformas orientadas al diseño digital con piezas LEGO, cada una con características y orientaciones distintas. La elección de la herramienta condiciona directamente el flujo de trabajo completo del proyecto, desde el diseño hasta la adquisición de piezas y la documentación del modelo.

Atendiendo a los criterios establecidos en la comparativa del estado del arte, la herramienta seleccionada para el desarrollo del presente TFG es BrickLink Studio [6], cuya interfaz se puede visualizar en la Figura 3-1 Interfaz BrikLink Studio [7]. Estos son los motivos por los que ha sido seleccionada:

1. Catálogo oficial completo: BrickLink Studio integra el catálogo oficial de piezas LEGO en su totalidad, lo que garantiza que todas las piezas empleadas en el diseño virtual existen físicamente y pueden ser adquiridas. Esto es especialmente relevante en un proyecto orientado a la construcción real de la figura.
2. Detección de colisiones: la herramienta incorpora un sistema automático de detección de colisiones entre piezas, que permite identificar interferencias geométricas durante el diseño y corregirlas antes de proceder a la adquisición de componentes, evitando errores.
3. Generación de instrucciones de montaje: BrickLink Studio permite generar instrucciones de montaje editables paso a paso, con control sobre el número de pasos, las vistas de cada paso y las piezas necesarias en cada fase. Esta funcionalidad facilita la documentación del proceso de ensamblaje y constituye un entregable adicional del proyecto [Anexo V].
4. Integración con la plataforma de adquisición: la conexión directa con la plataforma BrickLink permite trasladar la lista de piezas del modelo directamente a la búsqueda de vendedores, optimizando el proceso de adquisición y facilitando la comparación de precios entre distintos proveedores.

Desde el punto de vista metodológico, el uso de BrickLink Studio permitió estructurar el desarrollo del modelo en dos fases claramente diferenciadas y secuenciales:

1. Fase de modelado modular**:** diseño completo de la figura empleando exclusivamente piezas del catálogo estándar de LEGO, validando las proporciones anatómicas, el sistema de articulaciones y la estabilidad estructural del conjunto antes de incorporar ningún componente personalizado.

2. Fase de integración de componentes personalizados: una vez validado el modelo base, se identificaron los elementos del uniforme y equipamiento que no podían resolverse con piezas del catálogo estándar, procediendo a su diseño mediante CAD paramétrico e impresión FDM, y verificando su compatibilidad geométrica con el modelo modular ya validado. Además del diseño de piezas basadas en el catálogo de LEGO para sustitución de articulaciones que no ofrecieron buen resultado

Esta separación en dos fases reduce significativamente el riesgo de iteraciones fallidas, ya que permite detectar y corregir los problemas de proporciones, articulaciones y estabilidad en la fase modular, donde las modificaciones son inmediatas y no tienen coste de fabricación. Solo una vez validado el sistema base se acomete el diseño y fabricación de los componentes personalizados, que requieren mayor inversión de tiempo y recursos [6].

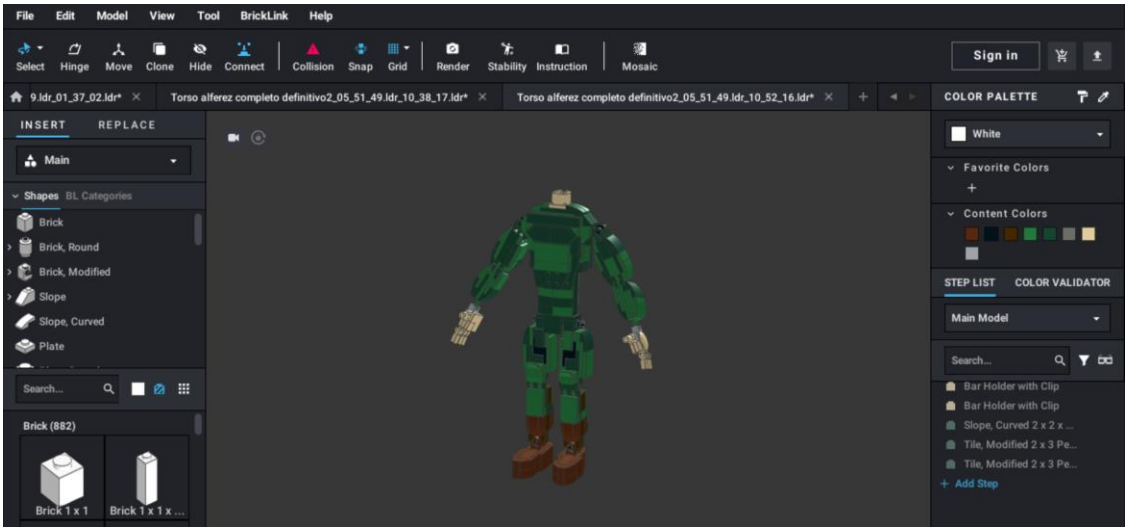



**Figura 3-1 Interfaz BrikLink Studio [7]**

### *3.1.1 Justificaión estructural y cinemática del diseño*

Previo al modelo definitivo, se desarrollaron una serie de prototipos con el objetivo de familiarizarse con el software BrickLink Studio, herramienta no empleada durante el Grado, y de explorar las posibilidades constructivas del catálogo LEGO®.

Los primeros prototipos presentaban una geometría excesivamente cúbica y rectilínea, resultado de la aproximación más intuitiva al sistema modular: el apilamiento directo de bricks estándar. Esta solución inicial, aunque válida como punto de partida, no permitía reproducir la silueta humana con la fidelidad visual requerida.

El diseño de una figura articulada mediante piezas LEGO requiere, antes de la selección de componentes, definir qué movimientos se desea que la figura sea capaz de realizar y qué grados de libertad (GDL) son necesarios en cada articulación para permitirlos. Este análisis cinemático previo es el que determina qué tipos de piezas son adecuadas en cada unión y justifica su selección desde un punto de vista funcional.

En el cuerpo humano, las articulaciones principales pueden clasificarse según su tipología cinemática. Las articulaciones esféricas o de rótula (*ball-and-socket*), como la cadera, el hombro y la rodilla, permiten rotación en los tres ejes del espacio y presentan tres grados de libertad de rotación. Las articulaciones de bisagra, como el codo, permiten flexión y extensión en un único plano, presentando un único grado de libertad de rotación. Las articulaciones de tipo condíleo, como la muñeca, permiten movimiento en dos planos, con dos grados de libertad [32].

Se han definido las articulaciones de la figura en la siguiente Tabla 3-1 Articulaciones de la figura:

| Articulación | Tipo cinemático | GDL | Solución elegida | Justificación |
|---|---|---|---|---|
| Cadera | Esférica | 3 | Pieza personalizada (CAD+FDM) | Piezas elegidas inicialmente para la articulación no cumplen de la manera prevista con su función |
| Rodilla | Esférica | 2 | Ball Joint LEGO Technic | Permite a la pierna realizar el movimiento normal de la rodilla |
| Hombro | Esférica | 3 | Ball Joint LEGO Technic | Permite elevación y rotación del brazo, acorde a la movilidad del hombro humano |
| Codo | Bisagra | 1 | Bisagra (hinge) | Limita el movimiento en el momento que la bisagra está completamente abierta, manteniendo el brazo completamente recto y rígido |
| Muñeca | Condílea / Esférica | 2 | Ball Joint LEGO Technic | Permite movimiento natural en los dos planos, aportando rigidez |
| Tobillo | Esférica | 1 | Ball Joint LEGO Technic | La articulación funcional rígida para garantizar estabilidad y rigidez a la figura en posición erguida |

**Tabla 3-1 Articulaciones de la figura**

De la tabla anterior se extrae que la solución adoptada para cada articulación responde a criterios tanto cinemáticos como estructurales. Las articulaciones esféricas (*ball joint*) del catálogo LEGO Technic ofrecen tres grados de libertad de rotación y son las piezas que mejor reproducen el comportamiento de las articulaciones del cuerpo humano dentro del catálogo estándar, por lo que se emplean en rodilla, hombro y muñeca.

Sin embargo, el análisis dimensional de la articulación de cadera reveló que ninguna pieza tipo Figura 3-2 Articulación ball joint del catálogo estándar presentaba las dimensiones necesarias para implementar correctamente esta articulación en la posición que ocupa en la figura. Se eligió otra que consistía en la unión de dos bricks del apartado Technic de LEGO mediante el empleo de un pin pasante que unía ambos bricks. Posteriormente se analizó estructuralmente, y dicha articulación limitaba la movilidad de la pierna, así como la estabilidad de la figura en esa zona crítica. Estas limitaciones motivaron el diseño de una pieza personalizada mediante modelado CAD paramétrico y su posterior fabricación por FDM, siguiendo el mismo principio de funcionamiento que los *ball joints* del catálogo LEGO Technic: una esfera macho que encaja en una cavidad esférica hembra, con dimensiones adaptadas a los requisitos geométricos de la figura. El diseño detallado de esta pieza se desarrolla en el apartado 3.2.

El tobillo, por su parte, está conformado por una unión más rígida, priorizando la rigidez y estabilidad en esa zona a la vez que dándole un grado de movilidad más limitado

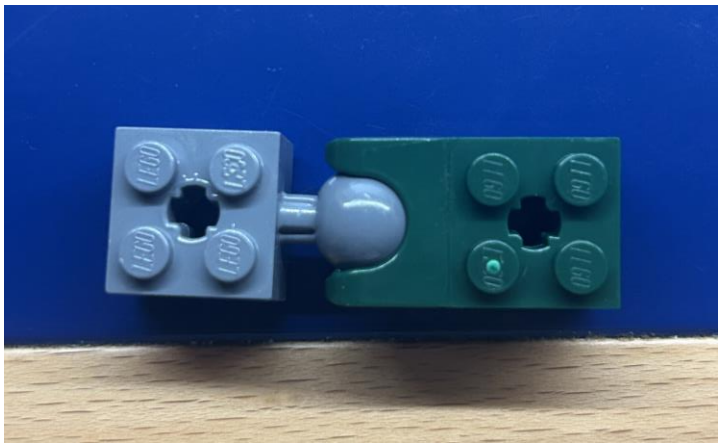


**Figura 3-2 Articulación ball joint**

### *3.1.2 Análisis de proporciones y escala de la figura*

Un requisito fundamental en el diseño de una figura humana es que las proporciones entre sus segmentos corporales sean coherentes con las de un ser humano real. En el presente TFG se ha tomado como referencia las proporciones antropométricas estándar de un varón adulto de complexión media, correspondiente al perfil de un alférez alumno de Infantería de Marina [34].

La escala global de la figura es de aproximadamente 1:8,7, es decir, cada centímetro de la figura equivale a 8,7 cm reales. No obstante, las desviaciones obtenidas son aceptables para una figura a esta escala. La cabeza presenta una ligera sobredimensión respecto a las proporciones reales, efecto habitual en figuras a escala reducida. El tronco y las extremidades presentan una ligera infradimensión que queda compensada visualmente por el volumen añadido de los elementos del equipamiento táctico diseñados mediante CAD.

En conjunto, el análisis proporcional confirma que la figura diseñada constituye una representación fiel y técnicamente justificada de un alférez alumno de Infantería de Marina a escala aproximada 1:9, dentro de las posibilidades que ofrece el sistema modular LEGO.

### *3.1.3 Desarrollo de la figura en BrickLink Studio*

Una vez seleccionada la herramienta de modelado modular y definidos los requisitos cinemáticos y proporcionales de la figura en los apartados 3.2 y 3.3, se procedió al desarrollo del modelo virtual en BrickLink Studio. El proceso de diseño siguió una metodología iterativa basada en la generación y evaluación de prototipos completos sucesivos, en los que se fueron corrigiendo progresivamente los aspectos que no satisfacían los requisitos establecidos.

#### *3.1.3.1 Proceso iterativo de prototipado*

El desarrollo del modelo definitivo requirió la generación de dos prototipos completos previos, en cada uno de los cuales se identificaron limitaciones que motivaron modificaciones sustanciales en el siguiente. Los principales aspectos corregidos a lo largo del proceso iterativo fueron los siguientes:

1. Apariencia excesivamente cúbica: Los primeros prototipos presentaban una geometría demasiado angular y rectilínea, resultado del apilamiento directo de *bricks* estándar sin aprovechar la variedad de piezas de perfil curvo, placas inclinadas y elementos de transición disponibles en el catálogo LEGO. Esta limitación se fue corrigiendo progresivamente mediante la incorporación de piezas de geometría más orgánica, especialmente en las zonas de hombros, torso y extremidades, logrando una silueta progresivamente más cercana a la forma humana.
2. Proporciones anatómicas incorrectas**:** En los primeros prototipos las proporciones entre segmentos corporales no respetaban las relaciones antropométricas de referencia establecidas en el apartado 3.3. En particular, las piernas resultaban excesivamente cortas y anchas respecto al torso y los brazos no alcanzaban la longitud proporcional correcta. Estos desajustes se corrigieron ajustando el número de módulos de cada segmento hasta obtener las proporciones verificadas recogidas en la Tabla 3-2.
3. Articulaciones que no funcionaban correctamente: En los primeros prototipos, las articulaciones de los hombros presentaban interferencias geométricas entre las piezas adyacentes que impedían el rango de movimiento deseado, o bien la selección de piezas no era la adecuada para el tipo de articulación requerido. Estos problemas se fueron resolviendo a través de la herramienta de detección de colisiones de BrickLink Studio, que permitió identificar las interferencias antes de proceder a la adquisición de piezas, y mediante la revisión del análisis cinemático descrito en el apartado 3.2.

#### *3.1.3.2 Construcción del modelo definitivo*

El modelo definitivo se construyó siguiendo un orden de ensamblaje de abajo hacia arriba, comenzando por los pies y avanzando progresivamente hasta la cabeza. Este orden responde a criterios

tanto constructivos como de verificación: al construir desde la base, es posible verificar la estabilidad del conjunto en cada fase y detectar incompatibilidades geométricas entre subconjuntos antes de que afecten a la totalidad del modelo.

Las etapas de construcción fueron las siguientes:

1. Pies: Se diseñaron con una base de apoyo suficientemente amplia para garantizar la estabilidad de la figura en posición erguida. La geometría del pie reproduce la silueta de la bota, la cual se muestra en la Figura 3-3 Pie de LEGO:



**Figura 3-3 Pie de LEGO**

2. Piernas: Se construyeron en dos subfases, primero desde el pie hasta la rodilla y posteriormente desde la rodilla hasta la cadera. En cada rodilla se incorporó el *ball joint* del catálogo LEGO Technic que proporciona los tres grados de libertad de rotación descritos en el apartado 3.2. Esta se puede ver en la Figura 3-4 Pierna de LEGO.

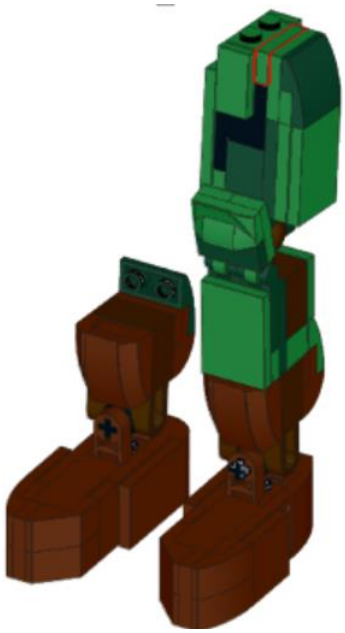


**Figura 3-4 Pierna de LEGO**

3. Cadera y abdomen: Este subconjunto constituye el elemento estructural central de la figura, al que se unen las piernas por su parte inferior y el torso por su parte superior. Su diseño requirió especial atención para garantizar la correcta integración de las articulaciones de cadera, y se puede apreciar en la Figura 3-5 Abdomen y cadera de LEGO.



**Figura 3-5 Abdomen y cadera de LEGO**

4. Torso: Es el subconjunto de mayor número de piezas (92 en total) y mayor complejidad geométrica, al incorporar articulaciones para los hombros y colocación de studs para el acoplamiento del chaleco diseñado con herramientas CAD. Este se puede ver en la Figura 3-6 Torso de LEGO.

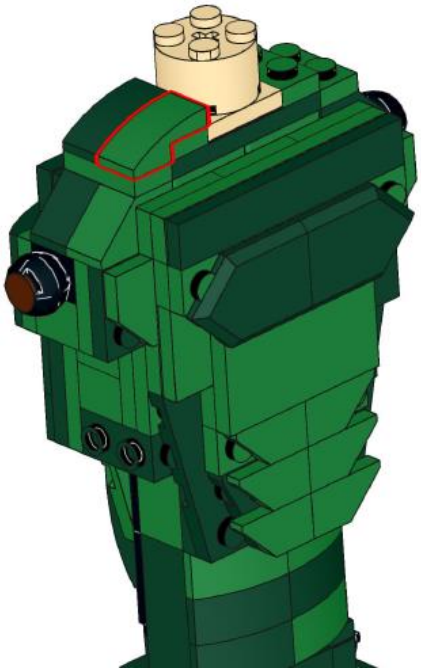


**Figura 3-6 Torso de LEGO**

5. Brazos: Construidos simétricamente, incorporan los *ball joints* de hombro, codo con bisagra y *ball joint* de muñeca. El diseño de la mano se realizó con suficiente detalle para poder identificar la palma de la mano y los dedos. Estos detalles se aprecian en la Figura 3-7 Brazo de LEGO.

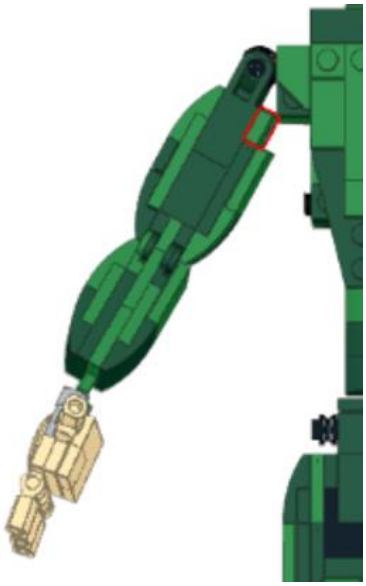


**Figura 3-7 Brazo de LEGO**

6. Cabeza: Conectada al torso mediante el sistema de encaje estándar, ha sido diseñada en CAD descrita en el apartado 3.2.3, con la teresiana como elemento independiente.

El resultado final, visible en la Figura 3-8 Figura final del alférez de LEGO, es un modelo virtual compuesto por 302 piezas del catálogo estándar de LEGO, que integra correctamente los 10 puntos de



**Figura 3-8 Figura final del alférez de LEGO**

articulación definidos en el análisis cinemático y respeta las proporciones antropométricas, constituyendo la base sobre la que se integran los componentes personalizados desarrollados con herramientas CAD.

### *3.1.3.3 Obtención de piezas de LEGO*

Tras haber desarrollado la figura de LEGO y haber llegado al diseño final, el siguiente paso es obtener las piezas de LEGO necesarias para su construcción. Para ello se debe seguir un procedimiento estricto mediante el uso de la aplicación BrickLink para la obtención de dichas piezas, mostrada en la Figura 3-9 Web de BrickLink.

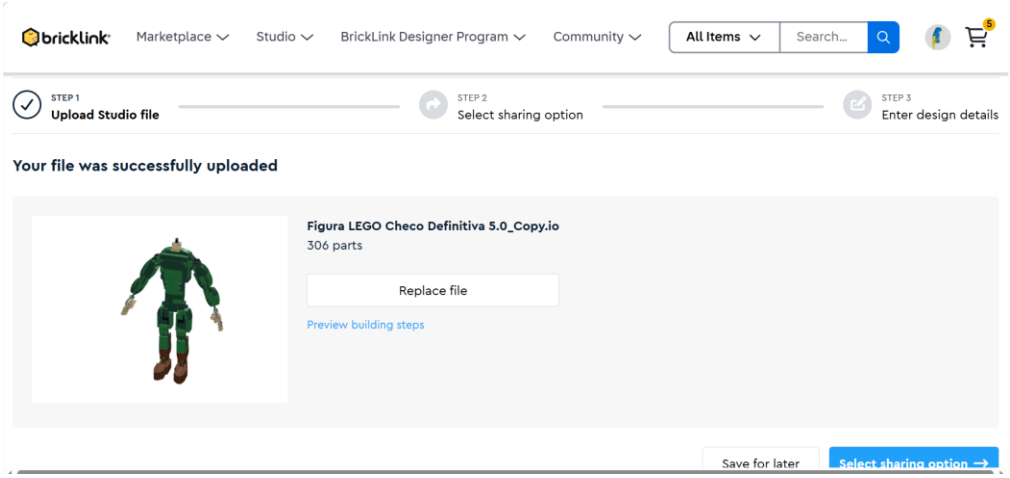



**Figura 3-9 Web de BrickLink**

Tras haber obtenido el diseño definitivo de la figura, ha de guardarse en formato ".io", dicho formato es el exigido para poder subir el diseño posteriormente a la aplicación BrickLink. Para tener acceso a dicha plataforma se debe crear una cuenta, y habiendo hecho esto se accede de manera normal a la aplicación y se pincha en el apartado "Upload design" en el cual se subió el archivo del diseño en la extensión requerida para generar el listado de piezas necesarias.

Después de haber elegido se pulsó sobre el apartado "Easy buy" en el cual apareció una distribución de las piezas disponibles en diferentes tiendas del mundo con el precio final del conjunto. En un primer momento las piezas venían desde diferentes puntos del mundo, por lo que hubo que ir seleccionando pieza por pieza, ver desde que tiendas dentro de Europa y cerca de España están disponibles e ir modificando la cesta de la compra para intentar agrupar al mayor número de piezas en la misma tienda para aminorar los gastos de envío y precio de estas. El precio y distribución de piezas finales se puede ver en la Figura 3-10 Presupuesto final piezas de LEGO.

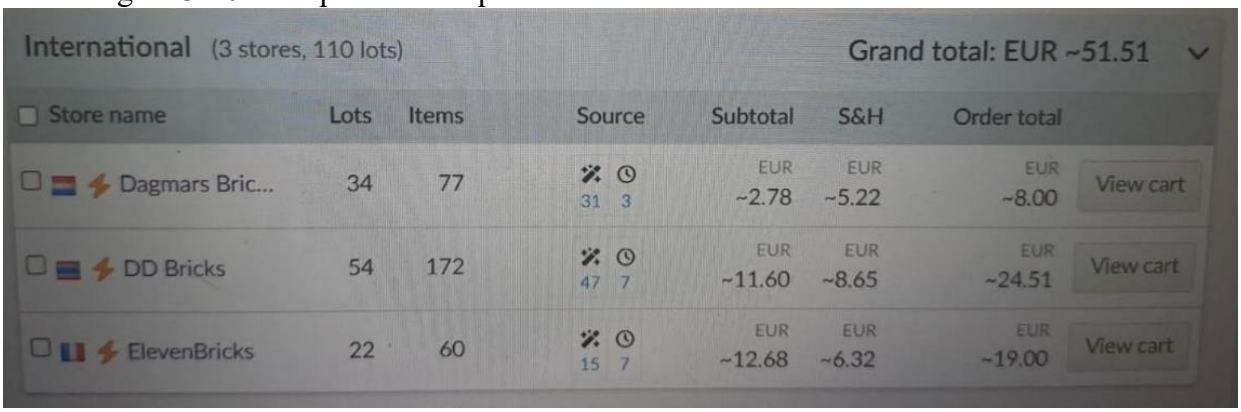



**Figura 3-10 Presupuesto final piezas de LEGO**

## 3.2 Desarrollo de componentes personalizados mediante modelado paramétrico

El catálogo estándar de piezas LEGO presenta limitaciones para la representación de elementos específicos del uniforme y el equipamiento de un alférez alumno de Infantería de Marina. Por este motivo se desarrollaron componentes personalizados mediante modelado CAD paramétrico, siguiendo el flujo CAD/CAM descrito en el apartado 2.2.2.

El criterio de diseño común a todos los componentes es la compatibilidad geométrica con el sistema LEGO: todas las piezas diseñadas incorporan elementos de encaje (pivotes, orificios o cavidades) cuyas dimensiones respetan los parámetros dimensionales del sistema, con un diámetro de pivote de 4,8 mm y una tolerancia de fabricación de ±0,1 mm.

### *3.2.1 Diseño del chaleco táctico portaplacas*

El chaleco táctico es el elemento de mayor complejidad geométrica de los diseñados en el TFG, compuesto por varios subcomponentes: la placa delantera, la placa trasera, las bandas laterales y los tirantes superiores. Se puede visualizar el ensamblaje del chaleco en la Figura 3-11 Chaleco táctico.

La decisión de diseño fundamental del chaleco es su sistema de unión con la figura mediante pivotes basados en el mismo diseño del "stud-tube system" desarrollado por la empresa LEGO. Estos pivotes cilíndricos tienen un diámetro de 4,8 mm y longitud de 1,8 mm. Se tomó la decisión de dividir el chaleco en diferentes piezas para poder realizar su montaje de forma más sencilla sobre la figura de LEGO, ya que, si se hubiese diseñado como una única pieza, el montaje del cuerpo de LEGO hubiese sido mucho más complicado, por lo que de esta manera la estructura de LEGO no necesita ser desensamblada.

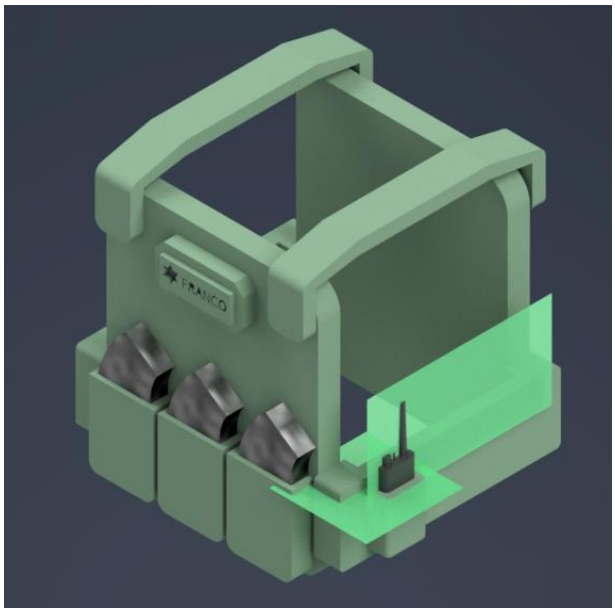


**Figura 3-11 Chaleco táctico**

### *3.2.1.1 Diseño de la placa frontal*

Los portacargadores se diseñaron como extrusiones sobre la placa delantera, con geometría rectangular. El dispositivo portamóvil y la galleta identificativa se resolvieron mediante extrusiones más sencillas, aplicando chaflanes en las esquinas para suavizar el perfil y mejorar la calidad de impresión. En sus laterales se reprodujeron los pivotes donde encajan los elementos laterales del chaleco, además de los dos que se encuentran en las esquinas superiores para encajar con los tirantes. La pieza final se muestra en la Figura 3-12 Placa delantera.




**Figura 3-12 Placa delantera**

### *3.2.1.2 Diseño de la placa trasera*

La placa trasera tiene exactamente las mismas dimensiones que la placa frontal, pero se diferencia en las personalizaciones, ya que esta cuenta con un botiquín sobre el que se diseñó una cruz la cual se obtuvo mediante extrusión de su perfil en cruz. Se ve la placa trasera en la Figura 3-13 Placa trasera.

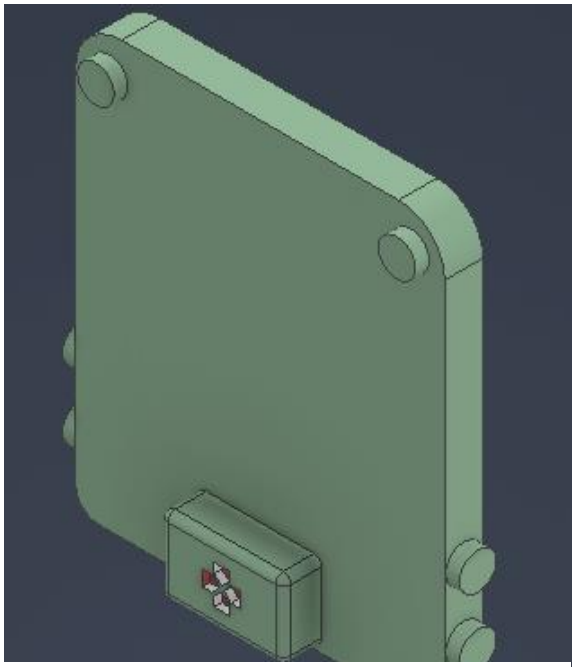


**Figura 3-13 Placa trasera**

### *3.2.1.3 Diseño de las bandas laterales*

La banda lateral, Figura 3-14 Banda lateral del chaleco con radio, cuenta con dos orificios en sus dos extremos para poder encajar con los pivotes laterales de las placas. Además, la banda del lado izquierda incorpora un bolsillo portaradio y su radio, cuya antena fue desarrollada mediante una operación de revolución sobre el eje de la pieza.

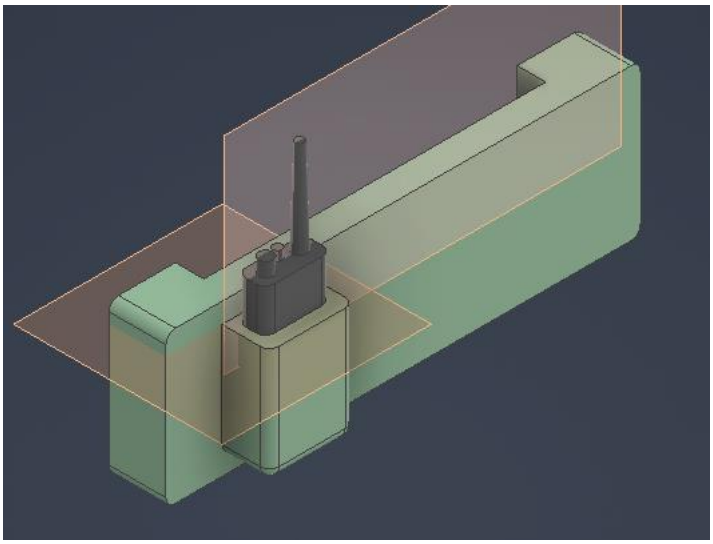


**Figura 3-14 Banda lateral del chaleco con radio**

### *3.2.1.4 Diseño de los tirantes superiores*

En la Figura 3-15 Tirante superior, se observa que estos cuentan con un orificio en los apéndices de sus extremos, los cuales alojan los studs superiores de las placas, y en el tramo más largo de la pieza cuenta con dos orificios que encajarían directamente con los studs de la propia figura de LEGO para mantener el chaleco en su sitio.

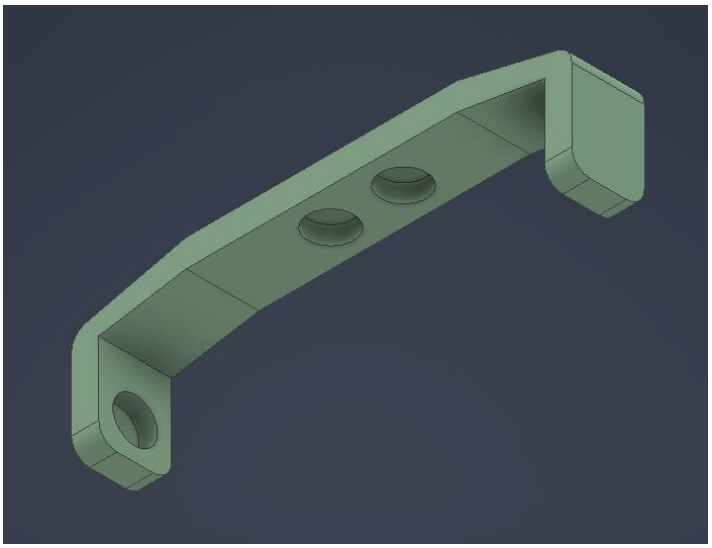


**Figura 3-15 Tirante superior**

### *3.2.2 Diseño del fusil de asalto*

El fusil de asalto, visible en laFigura 3-16 Fusil de asalto, se modelado como un conjunto de extrusiones y operaciones booleanas que reproducen la silueta característica del fusil HK 416, arma empleada por la Infantería de Marina española. Las decisiones de diseño estuvieron condicionadas por la escala de la figura y los requisitos de fabricación aditiva por FDM, que imponen restricciones sobre los voladizos y las paredes de espesor reducido.

Se optó por una geometría simplificada pero reconocible, que reproduce los elementos más característicos del arma (cuerpo principal, cargador, culata y cañón). El fusil se diseñó para ser sostenido por la mano derecha de la figura, con un punto de agarre compatible con la geometría de la mano.



**Figura 3-16 Fusil de asalto**

### *3.2.3 Diseño de la cabeza y la teresiana*

La cabeza, la cual se muestra en la Figura 3-17 Cabeza de la figura, se diseñó siguiendo la estética característica de las figuras LEGO, con geometría cilíndrica y dimensiones compatibles con el sistema de encaje del cuello de la figura. La base incorpora un orificio de encaje normalizado de 4,8 mm de diámetro que permite fijarla al cuello mediante el sistema *stud-tube* estándar.



**Figura 3-17 Cabeza de la figura**

La teresiana se diseñó como un componente independiente que encaja sobre la cabeza mediante un orificio central, reproduciendo la forma característica del gorro con visera adaptada a la escala de la figura. La separación en dos componentes permite intercambiar el tocado sin necesidad de rediseñar la cabeza. Se puede ver desde dos ángulos diferentes en la Figura 3-18 Teresiana con alojamiento para la cabeza y la Figura 3-19 Teresiana.

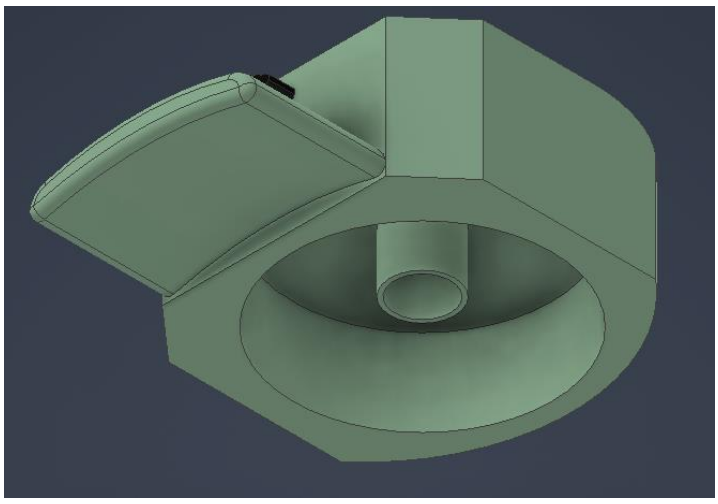


**Figura 3-18 Teresiana con alojamiento para la cabeza**

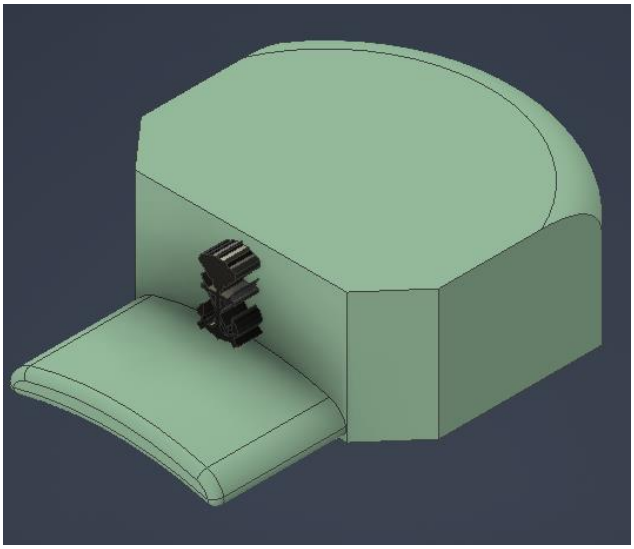


**Figura 3-19 Teresiana**

### *3.2.4 Diseño articulación de la cadera*

Como se justificó en el apartado 3.1.1, el análisis cinemático determinó que la articulación de cadera requiere tres grados de libertad de rotación y ninguna pieza del catálogo LEGO estándar presenta las dimensiones adecuadas. Por este motivo se diseñó una articulación esférica propia siguiendo el principio de funcionamiento de los *ball joints* del sistema LEGO Technic.

El mecanismo consta de dos componentes: una pieza macho, Figura 3-21 Pieza macho de la articulación de la cadera, con esfera de radio adaptado a la escala de la figura, y una pieza hembra, Figura 3-20 Pieza hembra de la articulación de la cadera, con cavidad esférica de radio ligeramente superior. La holgura de la articulación se fijó en 0,2 mm, que garantiza libertad de movimiento sin holgura excesiva. Tras la fabricación de las piezas se determinó que el radio de la esfera debía ser mayor que el de la cavidad para que no hubiese juego y así la pieza macho pudiese quedarse fija en su posición, eliminando el riesgo de que, por el peso de la estructura de LEGO, la articulación acabase cediendo, por lo que el diámetro de la esfera se fijó en 9,2 mm y el de la cavidad en 8,8 mm. Ambas piezas incorporan elementos de encaje con el sistema LEGO en sus extremos, mediante pivotes y orificios de 4,8 mm de diámetro.

Al emplear esta articulación se reduce el número de piezas de LEGO ya que estas dos piezas diseñadas en Autodesk Inventor sustituirían a un total de 6 piezas en cada articulación.

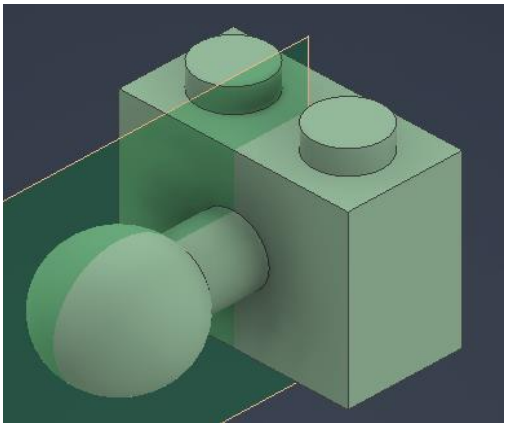


**Figura 3-21 Pieza macho de la articulación de la cadera**

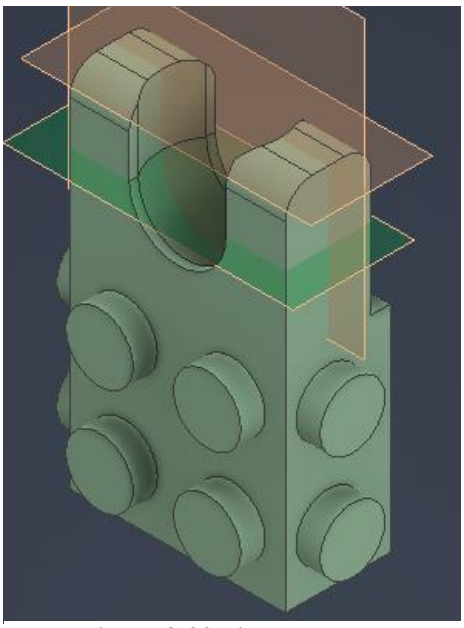


**Figura 3-20 Pieza hembra de la articulación de la cadera**

### *3.2.5 Flujo CAD/CAM en fabricación aditiva*

En un entorno de fabricación aditiva, el flujo de trabajo CAD/CAM puede describirse en las siguientes etapas secuenciales:

1. Diseño CAD: definición paramétrica de la geometría de la pieza, incluyendo el control de tolerancias y la verificación de compatibilidad con el sistema de encaje LEGO.
2. Exportación: conversión del modelo a formato STL o 3MF, que *tesela* la superficie en una malla triangular para su procesamiento posterior.
3. Laminado (*slicing*): el software de laminado secciona el modelo en capas horizontales y genera el archivo de instrucciones (G-code) que controla los movimientos de la impresora, la temperatura de extrusión, la velocidad de impresión y el patrón de relleno.
4. Fabricación: ejecución del proceso de impresión capa a capa según los parámetros definidos en la fase anterior.
5. Validación: comparación dimensional entre la pieza diseñada y la fabricada, para verificar que las tolerancias de encaje con el sistema LEGO se mantienen dentro de los márgenes admisibles [10].

## 3.3 Parámetros de procesamiento de la impresión 3D

### *3.3.1 Bambu Studio*

El software de laminado empleado para la preparación de los archivos de impresión en las fases FDM es Bambu Studio, desarrollado por Bambu Lab y basado en el código abierto de PrusaSlicer. Bambu Studio es el software oficial para las impresoras de la gama Bambu Lab, incluyendo la P1P y la X1-Carbon empleadas en el presente TFG. Bambu Studio genera archivos en formato G-code con parámetros como las trayectorias de movimiento del extrusor, las temperaturas de extrusión y cama, la velocidad de impresión y el patrón de relleno (Figura 3-22 Preparación de piezas en Bambu Studio [35]). Entre sus funcionalidades más relevantes para el presente TFG destacan la generación automática de soportes de tipo árbol, el cálculo automático del peso de material consumido y el coste estimado y la previsualización del proceso de impresión capa a capa. El flujo de trabajo de Bambu Studio sigue las etapas del proceso CAD/CAM descritas en el apartado 2.2.2, desde la importación del archivo STL hasta la generación del archivo de impresión listo para enviar a la impresora.

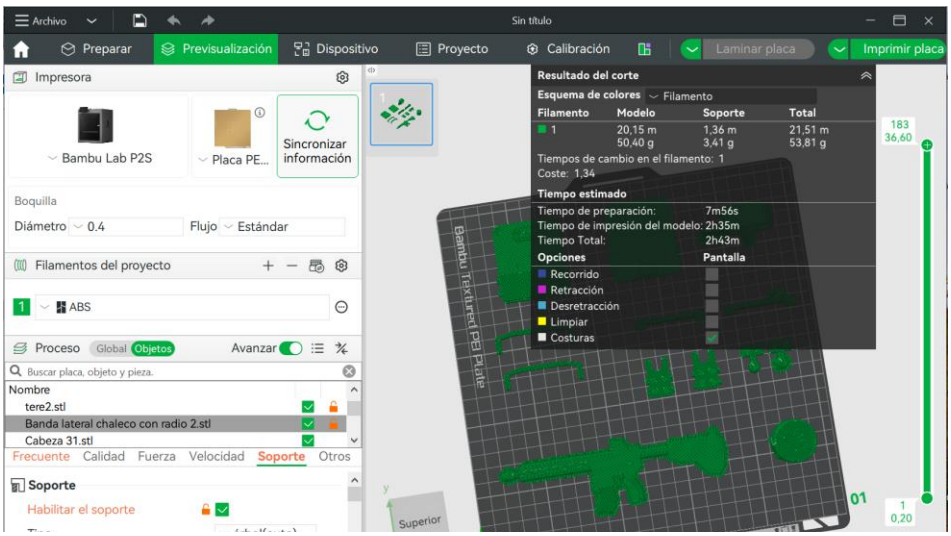



**Figura 3-22 Preparación de piezas en Bambu Studio [35]**

### *3.3.2 Impresión en PLA con Bambu Lab P1P*

Los componentes personalizados fueron procesados mediante Bambu Studio, configurado para la impresora Bambu Lab P1P con boquilla de 0,4 mm, usando el perfil 0.20mm Standard Bambu Lab P1P con PLA Basic [19]. En la **Tabla 3-2 Prámetros Bambu Lab P1P** se muestran los diferentes parámetros con los que cuenta la Bambu Lab P1P.

| Parámetros | Valor | Justificación |
|---|---|---|
| Espesor de capa | 0,2 mm | Equilibrio entre resolución dimensional y tiempo de fabricación |
| Temperatura de extrusión | 220 ºC | Valor estándar para PLA Basic en la P1P |
| Temperatura de cama | 35 ºC | Recomendado para PLA Basic con placa PEI texturizada |
| Velocidad de capa inicial | 50 mm/s | Velocidad reducida para maximizar adhesión a la cama |
| Velocidad de pared exterior | 200 mm/s | Velocidad nominal de la P1P para paredes exteriores con PLA |
| Densidad de relleno | 15% | Suficiente para piezas decorativas y de ensamblaje |
| Patrón de relleno | Rejilla | Buena resistencia en los dos ejes principales del plano horizontal |
| Diámetro de boquilla | 0,4 mm | Boquilla estándar adecuada para el nivel de detalle requerido |
| Soportes | Tipo árbol | Minimiza material de soporte y facilita su retirada |
| Tipo de cama | Placa PEI texturizada | Garantiza adhesión adecuada del PLA |
| Secuencia de impresión | Por capa | Permite imprimir varios componentes simultáneamente |

**Tabla 3-2 Prámetros Bambu Lab P1P**

### *3.3.3 Impresión en ABS con Bambu Lab X1-Carbon*

A diferencia de la impresión con PLA, la impresión en ABS requirió ajustes específicos derivados del comportamiento térmico del material: la cama se mantuvo a 100-110 °C para garantizar la adhesión de la primera capa, y la cámara cerrada de la impresora permitió mantener una temperatura ambiente interna de 45-50 °C durante todo el proceso, reduciendo el gradiente térmico entre capas y minimizando el riesgo de *warping* [20]. Tabla 3-3 Prámetros Bambu Lab X1-Carbon.

| Parámetros | Valor | Justificación |
|---|---|---|
| Espesor de capa | 0,2 mm | Mismo valor que con la P1P para facilitar la comparación |
| Temperatura de extrusión | 240-250 ºC | Rango recomendado para ABS en la X1-C |
| Temperatura de cama | 100-110 ºC | Necesaria para evitar "warping" del ABS |
| Temperatura de cámara | 60 ºC | Reduce gradiente térmico durante la impresión |
| Ventilación de capa | 0% | ABS requiere ausencia de corriente de aire |
| Densidad de relleno | 30% | Mayor resistencia de las piezas |
| Patrón de relleno | Rejilla | Mismo patrón que en la P1P para comparación |
| Diámetro de boquilla | 0,4 mm | Boquilla estándar de acero endurecido |
| Placa de impresión | Bambu Engineering Plate / High Temp Plate | Recomendada por Bambu Lab para ABS |

**Tabla 3-3 Prámetros Bambu Lab X1-Carbon**

### *3.3.4 Chitubox Basic*

El software de laminado empleado para la preparación de los archivos de impresión en la fase MSLA es Chitubox Basic, desarrollado por la empresa CBD-Tech y lanzado en 2017. Chitubox es en la actualidad uno de los softwares de laminado más utilizados para impresoras de resina basadas en tecnología SLA, y MSLA, siendo el software recomendado por fabricantes como ELEGOO [35]. A diferencia de los laminadores FDM como Bambu Studio, que generan archivos G-code con trayectorias de movimiento del extrusor, Chitubox genera archivos en formato CTB que contienen las máscaras de exposición UV de cada capa, los tiempos de exposición, las velocidades de elevación de la plataforma y los parámetros de postcurado (Figura 3-23 Preparacion de pieza en Chitubox [36]). Entre sus funcionalidades más relevantes para el presente TFG destacan la generación automática de soportes con configuración de densidad y tipo (ligero, medio o pesado), la previsualización del proceso de impresión capa a capa, y el cálculo automático del volumen de resina consumido y el coste estimado del material, datos empleados en el estudio económico del apartado 4.6 [37].

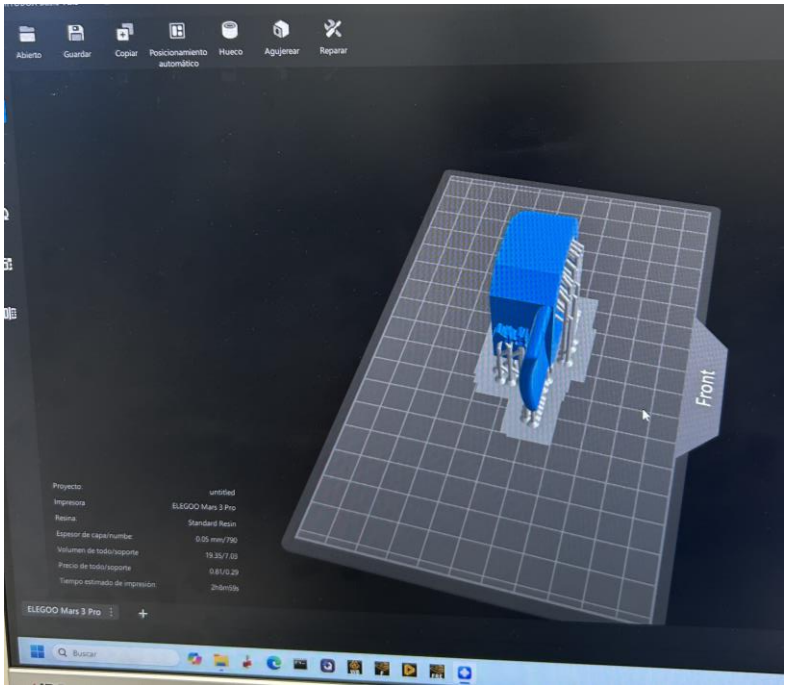



**Figura 3-23 Preparacion de pieza en Chitubox [36]**

### *3.3.5 Impresión en resina con ELEGOO Mars 3 Pro*

Este proceso de fabricación se realizó mediante tecnología MSLA con la ELEGOO Mars 3 Pro empleando resina eSUN eResin-PLA. A diferencia del FDM, el proceso MSLA no requiere temperatura de cama ni de cámara, siendo los parámetros críticos el tiempo de exposición por capa y el postcurado UV. El proceso de fabricación requirió el uso de equipos de protección individual y ventilación adecuada del espacio de trabajo, y una posterior limpieza exhaustiva de la impresora para evitar que quede cualquier resto de resina en ella [21, 23]. Tabla 3-4 Parámetros Mars 3 Pro. En la Figura 3-24 Proceso impresión con SLA se puede ver a la Mars 3 Pro con la resina ya preparada para iniciar la fabricación de la pieza.

| **Parámetro** | **Especificación** |
|---|---|
| Tecnología | Medio |
| Volumen | 143x89,6x175 mm |
| Resolución XY | 35 µm |
| Espesor de capa | 0,01-0,2 mm |
| Velocidad de impresión | 30-50 mm/h |
| Fuente de luz | UV integrada, 405 nm |
| Pantalla LCD | 6,6 pulgadas, monocormática 4K |
| Protección de pantalla | Cristal templado |
| Materiales compatibles | Resinas fotopolimerizables |

**Tabla 3-4 Parámetros Mars 3 Pro**

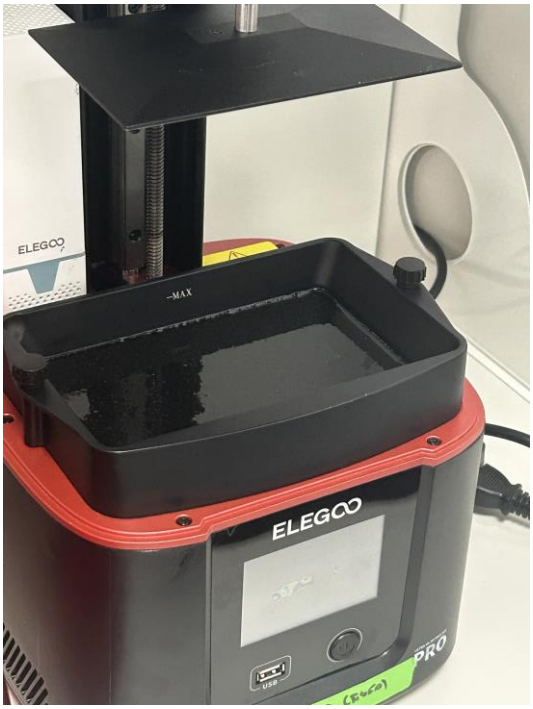



**Figura 3-24 Proceso impresión con SLA**

## 3.4 Ensayo de dureza Shore D

Con el objetivo de caracterizar experimentalmente las propiedades superficiales de los componentes fabricados en el presente TFG, se realizaron ensayos de dureza Shore D mediante el durómetro PCE-DX-DS sobre muestras representativas de cada uno de los tres materiales empleados: PLA procesado por FDM, ABS procesado por FDM y resina eSUN eResin-PLA procesada por MSLA. El ensayo se llevó a cabo siguiendo el procedimiento establecido en la norma ISO 868:2003 [25], empleando el durómetro digital PCE-DX-DS disponible en el laboratorio del CUD, y visible en la Figura 3-25 Durómetro PCE-DX-DS [26].

### *3.4.1 Procedimiento del ensayo*

El procedimiento seguido para la realización del ensayo fue el siguiente:

1. Las superficies de medición fueron seleccionadas en zonas planas y limpias de cada pieza, evitando marcas de soporte de impresión, líneas de capa visibles o irregularidades superficiales que pudieran afectar a la medición.
2. El durómetro se aplicó perpendicularmente a la superficie, con presión lenta y continua, sin golpe.
3. El valor de dureza fue registrado a los 15 segundos de la aplicación de la carga, conforme a lo establecido en la norma ISO 868:2003.
4. Se realizaron 5 mediciones por material en zonas diferentes de la pieza, calculando la media aritmética y la desviación típica de los valores obtenidos.
5. Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente.




**Figura 3-25 Durómetro PCE-DX-DS [26]**

# 4 RESULTADOS Y VALIDACIÓN

## 4.1 Resultados del diseño modular de la figura

El proceso de diseño modular desarrollado ha permitido obtener una figura completa de un alférez alumno de Infantería de Marina mediante el sistema LEGO®, estructurada en los siguientes subconjuntos funcionales: pies, piernas, conjunto cadera-abdomen, torso, brazos y cabeza.

El modelo final está compuesto por un total de 302 piezas del catálogo estándar de LEGO, distribuidas según se recoge en la Tabla 4-1 Subconjuntos de la figura de LEGO:

| Subconjunto | Número de piezas |
|---|---|
| Pies | 44 |
| Piernas hasta rodilla | 30 |
| Piernas hasta cadera | 36 |
| Cadera-abdomen | 36 |
| Torso | 92 |
| Brazos | 72 |
| Total | 302 |

**Tabla 4-1 Subconjuntos de la figura de LEGO**

El proceso de diseño iterativo contempló la generación de tres prototipos previos al modelo definitivo, refinando progresivamente las proporciones anatómicas, el sistema de articulaciones y la estabilidad estructural. El modelo definitivo presenta las siguientes características:

1. Proporciones anatómicas verificadas: Escala de la figura de 1:9
2. 12 articulaciones móviles: 2 tobillos, 2 rodillas, 2 articulaciones en la cadera, 2 hombros, 2 codos y 2 muñecas, que permiten a la figura adoptar distintas posturas.
3. Estabilidad en posición erguida: Base de apoyo suficientemente amplia sin necesidad de elementos de soporte adicionales.
4. Compatibilidad con componentes personalizados**:** El torso fue diseñado para recibir el chaleco táctico mediante el sistema de pivotes descrito en el apartado 3.2.1.

## 4.2 Resultados del diseño CAD de piezas personalizadas

En total se han diseñado 13 componentes personalizados:

| Conjunto | Componentes | Número de piezas |
|---|---|---|
| Chaleco portaplacas | Placas delantera y trasera, 2 tirantes superiores y 2 bandas laterales | 6 |
| Armamento | Fusil de asalto | 1 |
| Cabeza y teresiana | Cabeza y teresiana | 2 |
| Articulación cadera | 2 piezas de encaje mediante sistema ball joint | 4 |
| TOTAL | | 13 |

**Tabla 4-2 Elementos diseñados en CAD**

Las piezas fabricadas presentan un encaje correcto con las piezas estándar, con una tolerancia dimensional real dentro del margen de ±0,2 mm. El peso de los componentes fabricados es de 66,01 g, con un coste de material de 0,99 € y un tiempo total de fabricación de 3 horas 18 minutos y 17 segundos. El resultado final está visible en la Figura 4-1 Figura final con equipamiento del alférez de LEGO.



**Figura 4-1 Figura final con equipamiento del alférez de LEGO**

## 4.3 Resultados fabricación de componentes personalizados

Una vez completado el proceso de diseño CAD de los componentes personalizados, se procedió a su fabricación mediante las tres tecnologías de fabricación aditiva seleccionadas en el apartado 2.3: FDM con PLA, FDM con ABS y MSLA con resina eSUN eResin-PLA. En este apartado se recogen los resultados obtenidos en cada proceso de fabricación, prestando especial atención a la calidad dimensional de las piezas obtenidas y a las incidencias producidas durante el proceso.

### *4.3.1 Fabricación en PLA mediante FDM en Bambu Lab P1P*

La fabricación de los componentes personalizados en PLA mediante la Bambu Lab P1P transcurrió sin incidencias significativas, obteniéndose piezas de buena calidad dimensional y superficial.

Desde el punto de vista dimensional, las piezas fabricadas en PLA presentaron una excelente compatibilidad geométrica con el sistema LEGO, con tolerancias reales en los orificios de encaje que se situaron dentro del margen de ±0,01 a ±0,02 mm respecto a las dimensiones nominales del diseño CAD. Esta precisión dimensional es coherente con la baja contracción térmica del PLA (0,3-0,5%) y con la estabilidad del proceso FDM en la Bambu Lab P1P, confirmando que los parámetros de diseño adoptados (diámetro de pivote de 4,8 mm con tolerancia de ±0,1 mm) son adecuados para garantizar un encaje funcional con las piezas estándar del catálogo LEGO.

El acabado superficial de las piezas en PLA es el esperado para tecnología FDM con líneas de capa visibles en las superficies inclinadas, pero sin afectar a la funcionalidad de los elementos de encaje. Los soportes de tipo árbol se retiraron sin dificultad, dejando marcas superficiales mínimas en las zonas de apoyo.

### *4.3.2 Fabricación en ABS mediante FDM en Bambu Lab X1-Carbon*

La fabricación de los componentes en ABS mediante la Bambu Lab X1-Carbon presentó mayores dificultades que el anterior proceso, derivadas principalmente del comportamiento térmico del ABS durante el proceso de deposición fundida.

El principal problema encontrado fue el warping o deformación por contracción térmica, mostrado en laFigura 4-2 Pieza de ABS afectada por warping, que se manifestó en varias de las piezas fabricadas, especialmente en aquellas con mayor superficie basal como las placas del chaleco y más acentuado en las bandas laterales del chaleco. A pesar de las medidas preventivas adoptadas (cama a 100-110 °C, cámara cerrada a temperatura pasiva de 45-50 °C y placa de impresión Bambu Engineering Plate), algunas piezas presentaron un ligero levantamiento de las esquinas respecto a la cama de impresión, lo que generó deformaciones en la base de las piezas, y en la geometría de los orificios de encaje [18, 22].

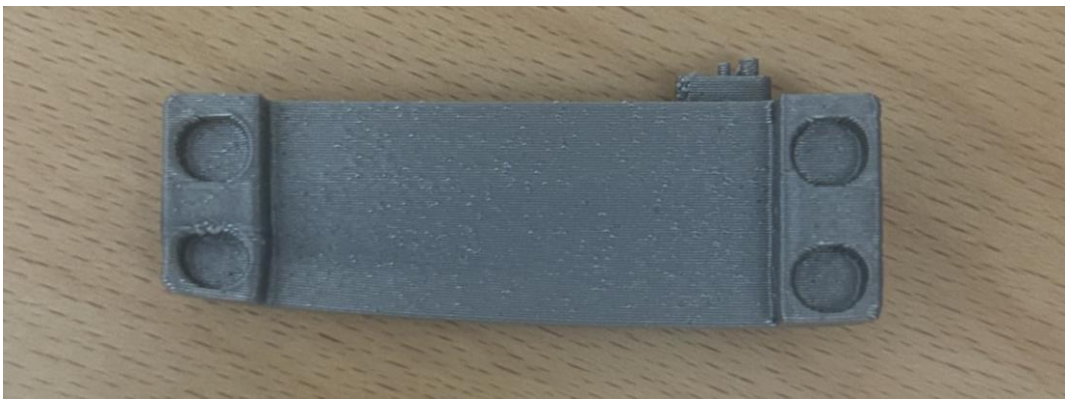


**Figura 4-2 Pieza de ABS afectada por warping**

Desde el punto de vista dimensional, las piezas fabricadas en ABS presentaron tolerancias en los orificios de encaje de ±0,01 a ±0,02 mm respecto a las dimensiones nominales, similares a las obtenidas en PLA. Sin embargo, la mayor contracción térmica del ABS (1,5-2%) generó en algunas piezas una ligera reducción de las dimensiones globales respecto al modelo CAD, que fue más pronunciada en la dirección perpendicular a las capas de deposición, coherente con el comportamiento anisótropo del material impreso por FDM.

A pesar de estas dificultades, las piezas finalmente obtenidas en ABS presentan una funcionalidad correcta y un encaje adecuado con las piezas estándar del catálogo LEGO, validando la viabilidad del proceso de fabricación en ABS para los componentes personalizados del presente TFG.

### *4.3.3 Fabricación en resina mediante MSLA en ELEGOO Mars 3 Pro*

La fabricación mediante tecnología MSLA con resina eSUN eResin-PLA se realizó sobre la placa delantera del chaleco y la teresiana, con el objetivo de explorar las posibilidades de esta tecnología para la obtención de piezas con mayor resolución superficial y nivel de detalle que las obtenibles por FDM.

Los resultados obtenidos confirman la superioridad de la tecnología MSLA respecto al FDM en términos de resolución dimensional y calidad superficial. Las piezas fabricadas en resina presentan líneas de capa prácticamente imperceptibles a simple vista, una superficie más homogénea y brillante que permite apreciar con mayor detalle los elementos decorativos del chaleco como la galleta identificativa y los portacargadores o el escudo de Infantería de Marina en el caso de la prenda de cabeza.

Desde el punto de vista dimensional, las piezas en resina presentaron la mayor precisión de los tres procesos de fabricación, con tolerancias inferiores a las obtenidas por FDM, lo que es coherente con la resolución XY de 35 µm de la ELEGOO Mars 3 Pro frente a la resolución típica de 200-400 µm del FDM [21, 23]. Estos detalles se aprecian en la Figura 4-3 Teresiana de resina elaborada mediante SLA y Figura 4-4 Placa frontal de resina elaborada mediante SLA

Como limitación de la tecnología MSLA en el contexto del presente TFG, cabe señalar que la necesidad de soportes en piezas con voladizos pronunciados genera marcas superficiales en las zonas de apoyo que requieren postprocesado adicional para su eliminación. Adicionalmente, el manejo de la resina líquida requiere el uso de equipos de protección individual y una ventilación adecuada del espacio de trabajo, lo que incrementa el tiempo de proceso respecto al FDM.



**Figura 4-3 Teresiana de resina elaborada mediante SLA**




**Figura 4-4 Placa frontal de resina elaborada mediante SLA**

### *4.3.4 Sustitución de la articulación de la cadera*

Uno de los objetivos principales del presente TFG era superar las limitaciones del catálogo estándar de LEGO en lo que respecta a la articulación de cadera, que en las versiones anteriores de la figura se resolvía mediante piezas estándar del catálogo que no ofrecían el rango de movimiento ni la integración dimensional adecuados para esta posición de la figura.

La solución adoptada en versiones previas del diseño empleaba piezas estándar del catálogo LEGO para conectar el torso con las piernas, lo que imponía restricciones significativas tanto en el número de grados de libertad de la articulación como en las proporciones anatómicas de la figura en la zona de la cadera. Las piezas estándar disponibles en el catálogo no permitían implementar una articulación esférica con tres grados de libertad de rotación en las dimensiones requeridas por la figura, lo que las piezas seleccionadas finalmente limitaban la capacidad de la figura para adoptar posturas naturales además de afectar a la estabilidad y rigidez de la figura.

La articulación de cadera diseñada en el presente TFG y mostrada en la Figura 4-5 Piezas de la cadera fabricadas en FDM, compuesta por la pieza macho, un brick 2×1 con vástago y bola de 9,2 mm de diámetro y la pieza hembra, réplica modificada de la pieza LEGO Technic 80431 con cavidad esférica de 8,8 mm de diámetro, ha resuelto con éxito estas limitaciones. Los resultados obtenidos tras la fabricación e integración en la figura confirman los siguientes aspectos:

1. Rango de movimiento ampliado: la articulación esférica diseñada permite la rotación de la pierna en los tres ejes del espacio (tres grados de libertad), frente a la solución anterior con piezas estándar que limitaba el movimiento a uno o dos planos. Esto permite a la figura adoptar posturas más naturales y variadas.

2. Compatibilidad dimensional con el sistema LEGO: ambas piezas incorporan elementos de encaje estándar, pivotes y orificios de 4,8 mm de diámetro en sus caras laterales y frontal, lo que garantiza su integración en la estructura modular de la figura sin modificar ninguna de las piezas del catálogo estándar. La tolerancia de encaje verificada experimentalmente se sitúa dentro del margen de ±0,01 a ±0,02 mm, confirmando la compatibilidad geométrica con el sistema LEGO.
3. Integridad estructural verificada: el análisis FEM realizado en el apartado 4.4 confirma que ambas piezas presentan coeficientes de seguridad muy superiores a la unidad para las cargas reales de uso de la figura (CS = 130 para la pieza macho en ABS FDM y CS = 1.248 para la pieza hembra en ABS FDM), garantizando su integridad estructural en condiciones normales de uso.
4. Coherencia material con el sistema LEGO: la fabricación de ambas piezas en ABS, el mismo material empleado por el fabricante LEGO en la producción de sus piezas originales mediante inyección, garantiza una compatibilidad de propiedades mecánicas y superficiales entre las piezas diseñadas y las piezas estándar del catálogo con las que interactúan [22].

En conjunto, el diseño e implementación de la articulación de cadera personalizada constituye una de las aportaciones técnicas más relevantes del presente TFG, demostrando que la combinación de modelado CAD paramétrico y fabricación aditiva permite superar las limitaciones del catálogo estándar de LEGO y ampliar las capacidades de la plataforma modular para aplicaciones de representación técnica a escala.

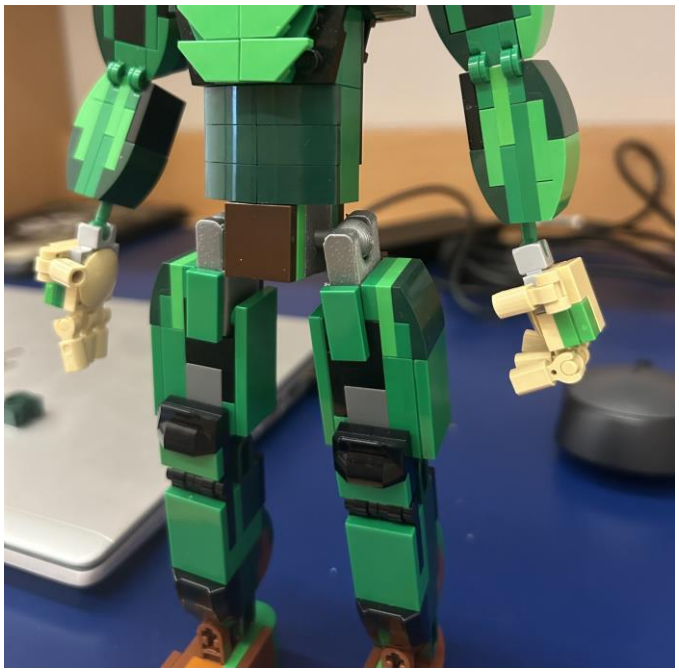


**Figura 4-5 Piezas de la cadera fabricadas en FDM**

## 4.4 Resultados ensayo de dureza Shore D

### *4.4.1 Resultados obtenidos*

En la tabla 4-3 se recogen los valores individuales de dureza Shore D obtenidos por cada material, junto con la media aritmética y desviación típica de cada conjunto de mediciones.

### *4.4.2 Análisis de resultados*

| Material | Medición 1 | Medición 2 | Medición 3 | Medición 4 | Medición 5 | Media | Desv. Típica |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PLA | 76 | 75 | 73 | 73 | 75 | 74,4 | 1,3 |
| ABS | 55 | 49 | 52 | 54 | 56 | 53,2 | 2,6 |
| eResin-PLA | 78 | 79 | 80 | 80 | 79 | 79,2 | 0,8 |
| ABS LEGO | 72 | 70 | 73 | 75 | 72 | 72,4 | 1,8 |

**Tabla 4-3 Resultados ensayos de dureza**

Los resultados obtenidos, mostrados en la Tabla 4-3 Resultados ensayos de dureza, son coherentes con los valores reportados en la literatura científica para cada material y proceso, y permiten establecer una comparativa cualitativa entre los tres materiales empleados en el TFG [25].

1. PLA (74,4 Shore D): El valor medio obtenido se sitúa en el rango inferior de los valores bibliográficos para PLA impreso por FDM (73-82 Shore D), lo cual es coherente con la densidad de relleno del 15% empleada en la fabricación, que es una densidad moderada. La desviación típica de 1,3 Shore D indica una buena homogeneidad superficial entre las distintas zonas medidas, lo que confirma la estabilidad del proceso FDM con PLA en la Bambu Lab P1P.
2. ABS (53,2 Shore D): el valor medio obtenido es inferior al rango bibliográfico habitual para ABS impreso por FDM (65-75 Shore D). Esta diferencia puede atribuirse a varios factores, como la contracción térmica del ABS durante el enfriamiento, la cual genera microporosidades internas que reducen la dureza superficial medida. La densidad de relleno o el comportamiento mecánico anisótropo del ABS impreso por FDM, más pronunciado que en el PLA, puede dar lugar a variaciones significativas en la dureza medida en función de la orientación de las capas respecto al indentador. La mayor desviación típica (2,6 Shore D) respecto al PLA y la resina confirma esta mayor variabilidad superficial del ABS procesado por FDM.

3. eResin-PLA MSLA (79,2 Shore D): El valor medio obtenido coincide con el rango especificado en la ficha técnica del fabricante (78-80 Shore D), lo que confirma que el proceso de impresión y postcurado se realizó en condiciones adecuadas. La desviación típica de 0,8 Shore D es la más baja de los tres materiales, lo que refleja la mayor homogeneidad superficial de las piezas fabricadas por MSLA respecto a las FDM. Esta homogeneidad es característica de la tecnología MSLA, en la que toda la sección de cada capa se expone simultáneamente, generando una superficie más uniforme que la obtenida por deposición capa a capa en FDM.
4. ABS original LEGO por inyección (72,4 Shore D): Con el objetivo de contextualizar los resultados obtenidos con los materiales fabricados en el TFG, se realizó adicionalmente el ensayo de dureza Shore D sobre una pieza original del catálogo LEGO, fabricada en ABS mediante inyección. El valor medio obtenido (72,4 Shore D) es significativamente superior al del ABS impreso por FDM (53,2 Shore D), lo que cuantifica el impacto del proceso de fabricación sobre las propiedades superficiales del mismo material. La diferencia de 19,2 Shore D entre ambos procesos se explica por la mayor densidad y homogeneidad de las piezas obtenidas por inyección, que no presentan las microporosidades ni la anisotropía características de las piezas FDM. La desviación típica de 1,8 Shore D es moderada, coherente con la alta consistencia dimensional de las piezas LEGO originales. Este resultado confirma que, aunque el ABS es el material de referencia del sistema LEGO, el proceso de fabricación por inyección confiere propiedades superficiales muy superiores a las obtenibles por FDM, lo que debe tenerse en cuenta al valorar la idoneidad de la articulación de cadera fabricada en ABS por FDM como sustituto de una pieza LEGO original.
5. Comparativa global: La resina eSUN eResin-PLA procesada por MSLA presenta la mayor dureza Shore D (79,2), seguida del ABS original LEGO por inyección (72,4), el PLA procesado por FDM (74,4) y finalmente el ABS procesado por FDM (53,2). Esta jerarquía pone de manifiesto que el proceso de fabricación tiene una influencia determinante sobre la dureza superficial, incluso para el mismo material: el ABS inyectado supera al PLA por FDM en dureza, mientras que el ABS por FDM queda muy por debajo de ambos. Se demuestra así que la tecnología MSLA genera superficies más densas y homogéneas que el FDM, y que el proceso de inyección produce piezas con propiedades superficiales superiores a las obtenibles por cualquiera de las tecnologías de fabricación aditiva empleadas en el presente TFG.




**Figura 4-6 Ensayo de dureza csobre pieza de PLA [26]**

Es importante señalar que los valores de dureza Shore D obtenidos son propiedades superficiales que no representan necesariamente el comportamiento mecánico global de las piezas, que depende también de la densidad de relleno, la orientación de las capas y la geometría de la pieza. Los valores deben interpretarse en combinación con los resultados del análisis FEM presentados en el apartado 4.4, que caracterizan el comportamiento estructural de las piezas bajo las cargas de uso real. En la Figura 4-6 Ensayo de dureza csobre pieza de PLA [26]

## 4.5 Análisis estructural por elementos finitos (FEM)

### *4.5.1 Metodología del estudio*

El análisis estructural por elementos finitos (FEM) se ha llevado a cabo mediante el módulo de análisis de tensiones integrado en Autodesk Inventor, empleando el método de elementos finitos con elementos tetraédricos de segundo orden para la discretización de la geometría de cada pieza. El análisis se ha realizado bajo la hipótesis de comportamiento elástico lineal, lo que implica que los resultados son válidos mientras las tensiones obtenidas se mantengan por debajo de la tensión de fluencia del material.

El análisis se ha realizado para dos materiales: ABS FDM y PLA FDM, con el objetivo de comparar el comportamiento estructural de las piezas en función del material de fabricación y justificar la selección del material más adecuado para cada componente.

Dado que ninguno de los dos materiales en su versión FDM está disponible en la biblioteca de materiales de Autodesk Inventor, ambos han sido definidos manualmente como materiales personalizados. Las propiedades adoptadas para cada material son las siguientes Tabla 4-4 Propiedades de los materiales para análisis FEM:

| Propiedad | ABS macizo | ABS FDM | PLA macizo | PLA FDM |
|---|---|---|---|---|
| Módulo de Young | 2,240 GPa | 1,680 GPa | 3,5 GPa | 3,15 GPa |
| Tensión de fluencia | 45 MPa | 33,75 MPa | 50 MPa | 45 MPa |
| Coeficiente de Poisson | 0,38 | 0,38 | 0,36 | 0,36 |
| Densidad | 1,060 g/ cm³ | 1,060 g/ cm³ | 1,240 g/ cm³ | 1,240 g/ cm³ |

**Tabla 4-4 Propiedades de los materiales para análisis FEM**

Las propiedades del ABS FDM se han obtenido reduciendo al 75% las propiedades del ABS macizo disponible en la biblioteca de Inventor, como aproximación conservadora al comportamiento real del ABS procesado por deposición fundida. Esta reducción tiene en cuenta las porosidades internas y la anisotropía características de las piezas FDM, que reducen las propiedades mecánicas reales entre un 15-30% respecto al material macizo [18]. La idoneidad de este factor de reducción queda avalada por los resultados experimentales del ensayo de dureza Shore D: el ABS FDM presenta una dureza de 53,2 Shore D frente a los 72,4 Shore D del ABS inyectado de las piezas LEGO® originales, lo que representa una reducción del 26% coherente con el factor aplicado.

Las propiedades del PLA FDM se han obtenido reduciendo al 90% las propiedades nominales del PLA macizo reportadas en la bibliografía [15, 22]. Este factor se justifica igualmente por los resultados del ensayo de dureza Shore D: el PLA FDM presenta una dureza de 74,4 Shore D frente al rango de 80-85 Shore D reportado en la bibliografía para PLA macizo, lo que representa una reducción aproximada del 10%, coherente con el factor aplicado

El módulo cortante (G) de cada material se ha calculado a partir del Módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson (ν) mediante la expresión fundamental de la elasticidad isótropa:

$$G = E / 2(1 + \nu)$$

Esta relación es estrictamente válida para materiales isótropos linealmente elásticos. En el caso de piezas fabricadas por FDM, cuyo comportamiento real es anisótropo, su aplicación constituye una simplificación adicional coherente con la hipótesis isotrópica ya adoptada en el modelo. La anisotropía real del material queda recogida de forma aproximada mediante los factores de reducción aplicados a las propiedades nominales, ×0,75 para ABS FDM y ×0,90 para PLA FDM, respaldados por los resultados experimentales del ensayo de dureza Shore D presentados en el apartado 4.4.

El criterio de fallo empleado es la tensión de Von Mises, que permite evaluar el estado tensional multiaxial de la pieza mediante un único valor escalar comparable con la tensión de fluencia del material. El coeficiente de seguridad (CS) se define como:

**CS = Tensión de fluencia / Tensión de Von Mises máxima**

Un coeficiente de seguridad superior a 1 indica que la pieza no falla bajo las cargas aplicadas. En análisis estático lineal, el módulo de Young y el módulo cortante afectan exclusivamente a las deformaciones de la pieza, no a la distribución de tensiones Von Mises. Por tanto, los resultados de tensión y coeficiente de seguridad dependen únicamente de la geometría, las cargas aplicadas, las condiciones de contorno y la tensión de fluencia del material.

El modelo FEM presenta las siguientes limitaciones que deben tenerse en cuenta en la interpretación de los resultados:

1. El modelo asume comportamiento isotrópico, cuando tanto el ABS como el PLA procesados por FDM son en realidad anisótropos
2. Los factores de reducción aplicados (×0,75 para ABS FDM y ×0,90 para PLA FDM) son aproximaciones basadas en resultados de dureza Shore D, no valores exactos medidos mediante ensayos de tracción normalizados
3. Las cargas aplicadas son estáticas, sin considerar efectos dinámicos ni de fatiga
4. No se modela el contacto entre piezas, sino que se analizan individualmente [18, 29, 30]

### *4.5.2 Análisis estructural con material ABS FDM*

#### *4.5.2.1 Articulación de la cadera*

La articulación de cadera es el componente más crítico desde el punto de vista estructural, ya que está sometida al peso del torso completo de la figura (torso, brazos, cabeza, chaleco y fusil), transmitido a través del mecanismo de bola y cavidad. El peso total del conjunto superior de la figura, medido experimentalmente mediante báscula, es de 28,91 g. Dado que la figura dispone de dos articulaciones de cadera simétricas, este peso se reparte de forma equitativa entre ambas, resultando una carga de 14,455 g → 0,142 N sobre cada articulación. El análisis se ha realizado por separado para la pieza macho (bola) y la pieza hembra (cavidad), dado que las condiciones de contorno son distintas en cada una.

##### *4.5.2.1.1 Pieza macho*

Las condiciones de contorno aplicadas son las siguientes:

1. Restricciones: orificios de la base trasera del brick + studs frontales empotramiento fijo, representando los puntos de encaje con el torso de la figura
2. Fuerza en la parte superior del brick: 0,142 N hacia abajo, representando el peso del torso sobre cada articulación
3. Fuerza en la bola: 0,142 N hacia arriba, representando la reacción de la pierna

La malla empleada consta de 330.268 nodos y 223.638 elementos, con refinamiento local en la zona del vástago y el borde de la bola Figura 4-7 Análisis FEM sobre pieza macho de la cadera en ABS FDM.

La tensión de Von Mises máxima obtenida es de 0,2595 MPa, localizada en el borde perimetral de la bola, en la zona de contacto con la apertura de la cavidad de la pieza hembra. Este resultado es coherente con la física del problema: es en esa zona donde se produce la mayor concentración de tensiones por el efecto de palanca del vástago al transmitir la carga de la pierna al brick. El coeficiente de seguridad obtenido es:

CS = 33,75 / 0,2595 = 130

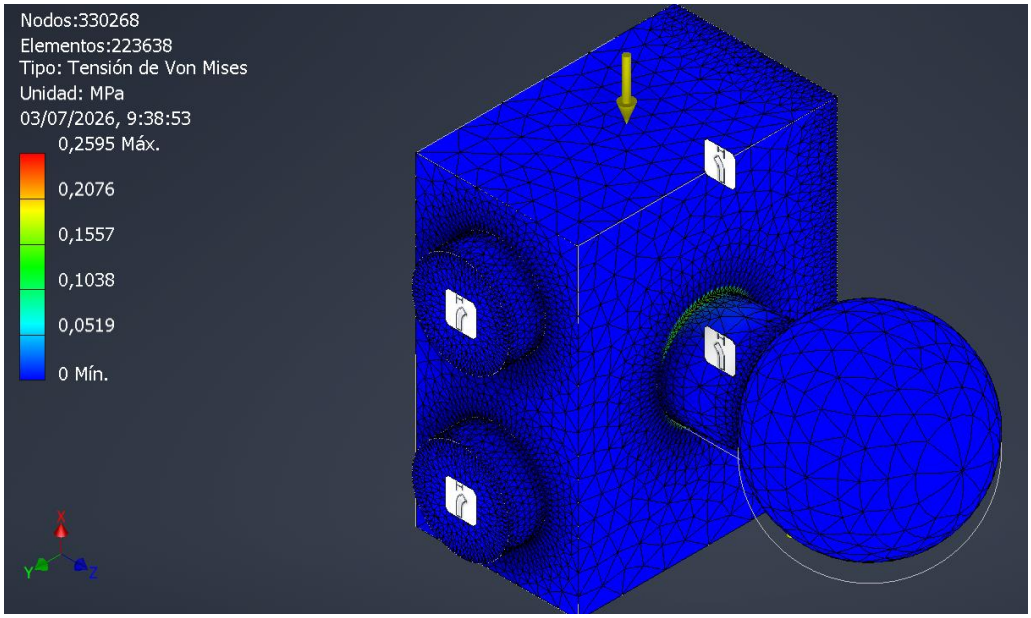



**Figura 4-7 Análisis FEM sobre pieza macho de la cadera en ABS FDM**

### *4.5.2.1.2 Pieza hembra*

Las condiciones de contorno aplicadas son las siguientes:

1. Restricciones: Studs frontales: Empotramiento fijo
2. Fuerza en la cavidad: 0,142 N hacia abajo, representando el peso del torso transmitido a través de la bola

La malla empleada consta de 183761 nodos y 123633 elementos. Figura 4-8 Análisis FEM sobre pieza hembra en ABS FDM

La tensión de Von Mises máxima obtenida es de 0,02704 MPa, localizada en la zona de los orificios de encaje con la pierna. El coeficiente de seguridad obtenido es:

CS = 33,75 / 0,02704 = 1248

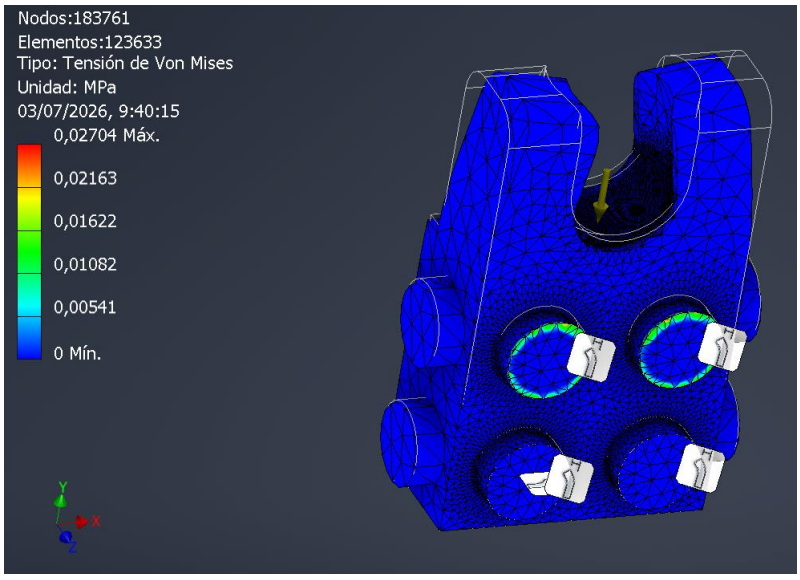



**Figura 4-8 Análisis FEM sobre pieza hembra en ABS FDM**

La diferencia entre los coeficientes de seguridad de la pieza macho (130) y la pieza hembra (1.248) refleja la diferente geometría y distribución de cargas de cada pieza. La pieza macho, con su vástago de sección reducida, presenta una mayor concentración de tensiones que la pieza hembra, que distribuye la carga a través de una cavidad esférica de mayor superficie de contacto.

### *4.5.2.2 Tirante superior*

El tirante superior conecta la placa delantera con la placa trasera del chaleco por la parte superior, soportando el peso de ambas placas y de las bandas laterales. Las condiciones de contorno aplicadas son las siguientes:Figura 4-9 Vista superior del análisis FEM sobre tirante superior en ABS FDM Figura 4-10 Vista inferior del análisis FEM sobre tirante superior en ABS FDM

1. Restricción: zona central de apoyo sobre el hombro de la figura: empotramiento fijo
2. Fuerza en orificio delantero: 0,060 N hacia abajo (mitad del peso de la placa delantera + mitad del peso de la banda lateral con radio, en ABS)
3. Fuerza en orificio trasero: 0,050 N hacia abajo (mitad del peso de la placa trasera + mitad del peso de la banda lateral con radio, en ABS)

La malla empleada consta de 8.063 nodos y 4.311 elementos.

La tensión de Von Mises máxima obtenida es de 0,144 MPa, localizada en la zona central superior del tirante, en la transición entre el brazo horizontal y el apoyo central, que es el punto de mayor momento flector de la pieza. El coeficiente de seguridad obtenido es:

CS = 33,75 / 0,144 = 234

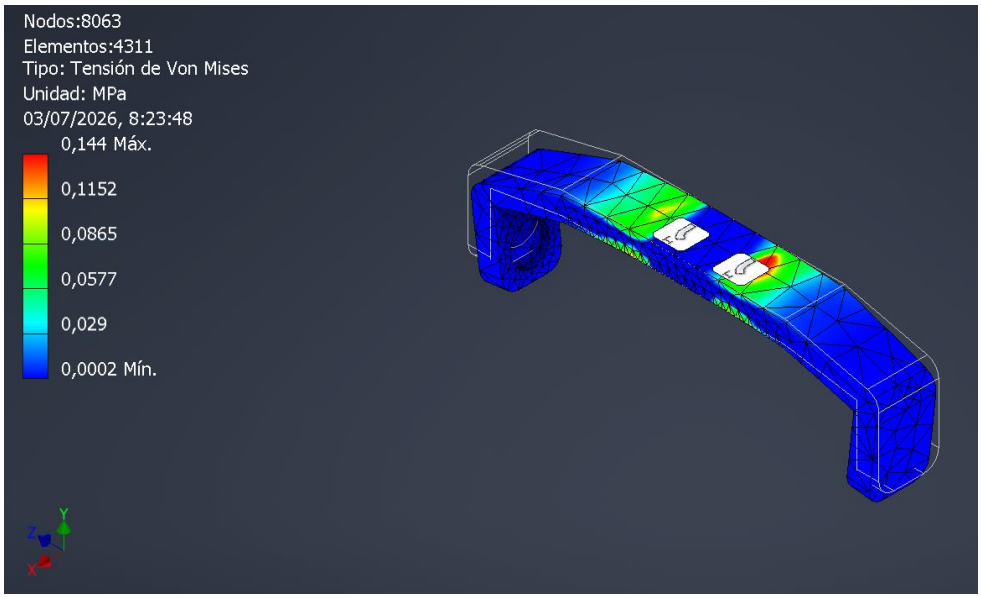



**Figura 4-9 Vista superior del análisis FEM sobre tirante superior en ABS FDM**

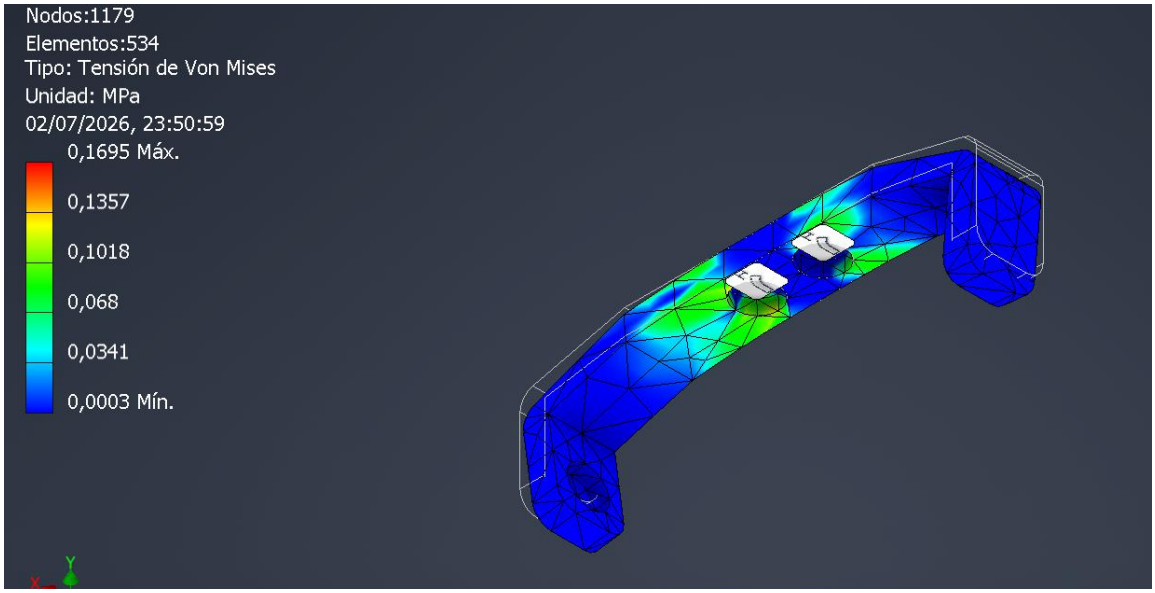



**Figura 4-10 Vista inferior del análisis FEM sobre tirante superior en ABS FDM**

### *4.5.2.3 Bandas laterales del chaleco*

Las bandas laterales del chaleco son los componentes de menor carga del conjunto analizado, ya que únicamente están sometidas a su propio peso mediante la acción de la gravedad. Las condiciones de contorno aplicadas son las siguientes:

1. Restricciones: 4 orificios de encaje (2 en cada extremo) → empotramiento fijo
2. Carga: Peso de la pieza 3,28 g y 2,31 respectivamente

#### *4.5.2.3.1 Banda lateral con radio*

La malla empleada consta de 177.883 nodos y 111.505 elementos. La tensión de Von Mises máxima obtenida es de 0,005385 MPa, localizada en la zona de los orificios de encaje. El coeficiente de seguridad obtenido es: Figura 4-12 Análisis FEM sobre banda lateral con radio en ABS FDM, Figura 4-13 Análisis FEM sobre banda lateral en ABS FDM

CS = 33,75 / 0,005385 = 6268

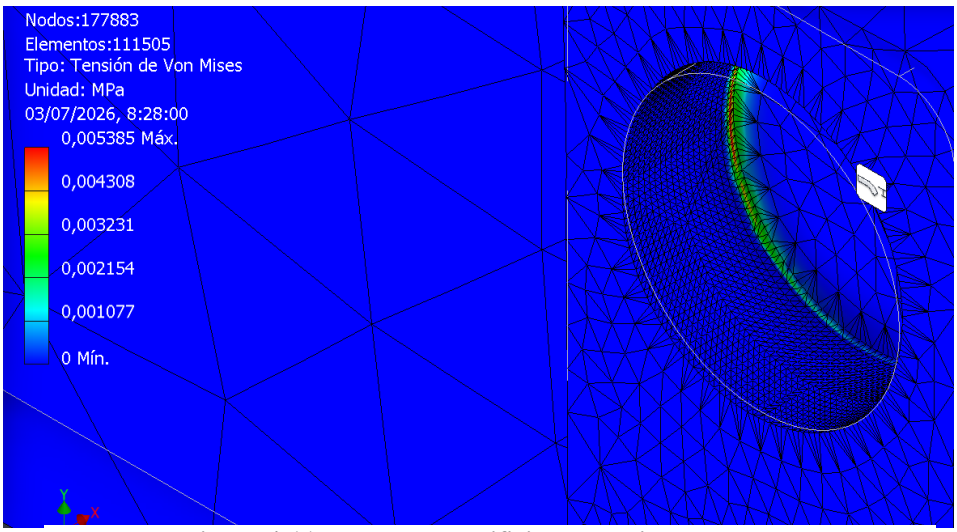



**Figura 4-11 Zoom sobre orificio de encaje de banda lateral**

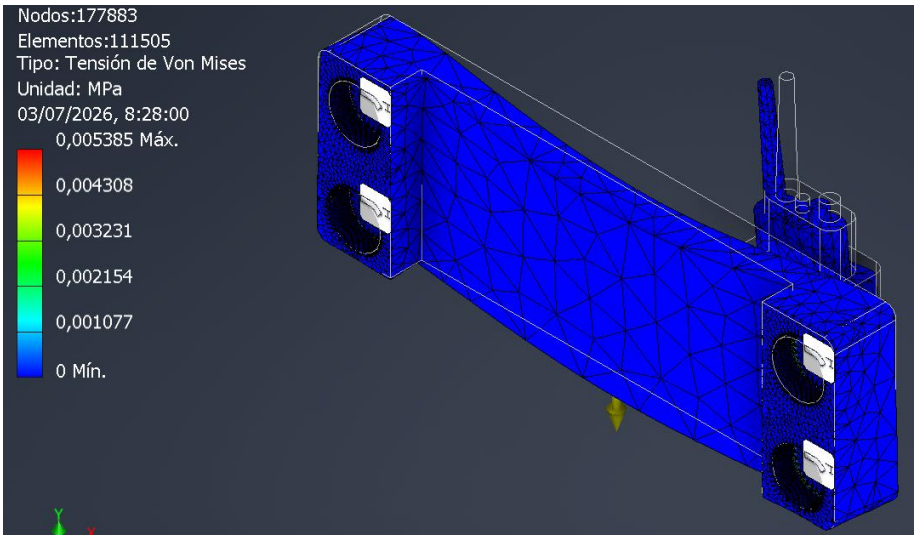



**Figura 4-12 Análisis FEM sobre banda lateral con radio en ABS FDM**

### *4.5.2.3.2 Banda lateral sin radio*

La malla empleada consta de 30816 nodos y 19131 elementos. La tensión de Von Mises máxima obtenida es de 0,004557 MPa, localizada igualmente en la zona de los orificios de encaje. El coeficiente de seguridad obtenido es:Figura 4-13 Análisis FEM sobre banda lateral en ABS FDM

CS = 33,75 / 0,004557 = 7.406

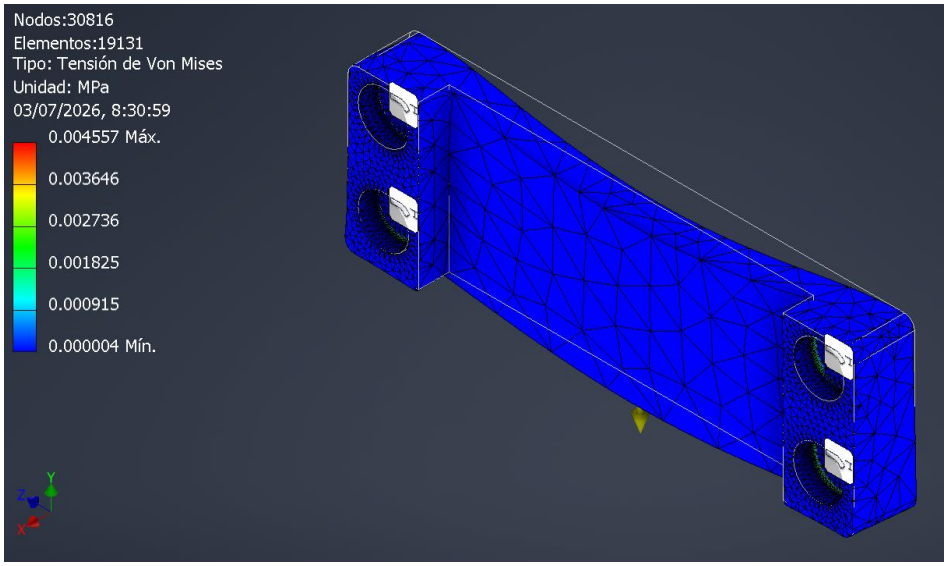



**Figura 4-13 Análisis FEM sobre banda lateral en ABS FDM**

## *4.5.3 Análisis estructural con material PLA FDM*

### *4.5.3.1 Articulación de la cadera*

El análisis de la articulación de cadera con material PLA FDM presenta una diferencia importante respecto al análisis en ABS FDM en cuanto a la carga aplicada. Dado que las piezas del conjunto superior de la figura (torso, chaleco, cabeza, teresiana y fusil) están fabricadas en PLA, su peso total es mayor que en ABS debido a la mayor densidad del PLA (1.240 kg/m³ frente a 1.060 kg/m³ del ABS). El peso

total del conjunto superior medido experimentalmente con las piezas en PLA asciende a 69,2 g, lo que equivale a una carga de 34,6 g → 0,339 N sobre cada articulación de cadera.

#### *4.5.3.1.1 Pieza macho*

1. Restricciones: orificios de la base trasera del brick + studs frontales mpotramientofijo
2. Fuerza en la parte superior del brick: 0,339 N hacia abajo
3. Fuerza en la bola: 0,339 N hacia arriba
   La malla empleada consta de 330268 nodos y 223638 elementos.
   La tensión de Von Mises máxima obtenida es de 0,6266 MPa, localizada en el borde perimetral de la bola, coincidiendo con la misma localización que en el análisis con ABS FDM. El coeficiente de seguridad obtenido es: Figura 4-14 Análisis FEM sobre pieza macho de la cadera en PLA
   CS = 50 / 0,6266 = 80

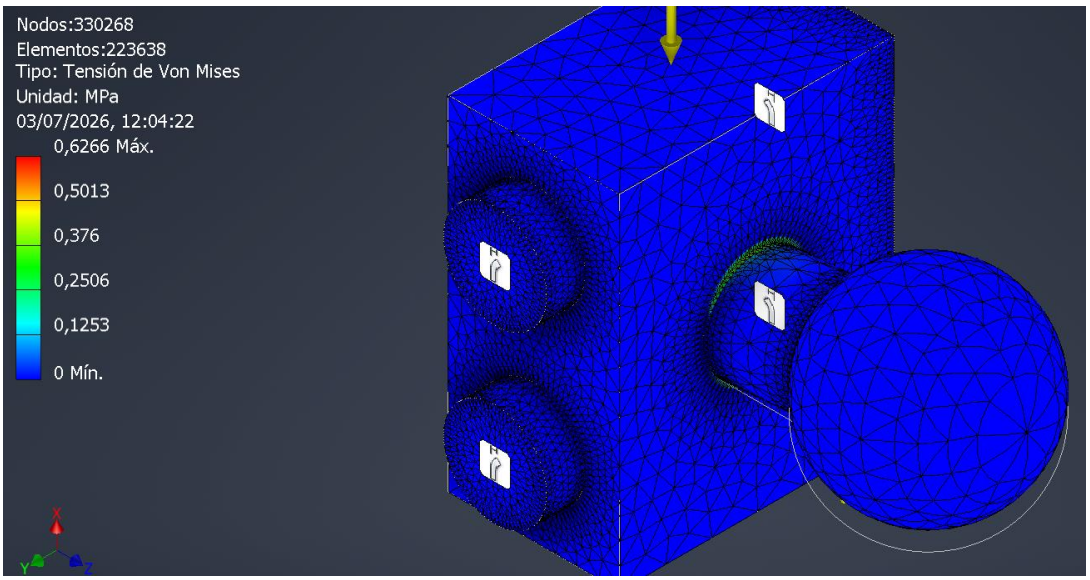



**Figura 4-14 Análisis FEM sobre pieza macho de la cadera en PLA**

#### *4.5.3.1.2 Pieza hembra*

1. Restricciones: base inferior del brick: empotramiento fijo
2. Fuerza en la cavidad: 0,339 N hacia abajo

   La malla empleada consta de 183761 nodos y 123633 elementos.

   La tensión de Von Mises máxima obtenida es de 0,06481 MPa, localizada en la zona de los orificios de encaje con la pierna. El coeficiente de seguridad obtenido es:Figura 4-15 Análisis FEM sobre pieza hembra en ABS

   CS = 50 / 0,06841 = 771

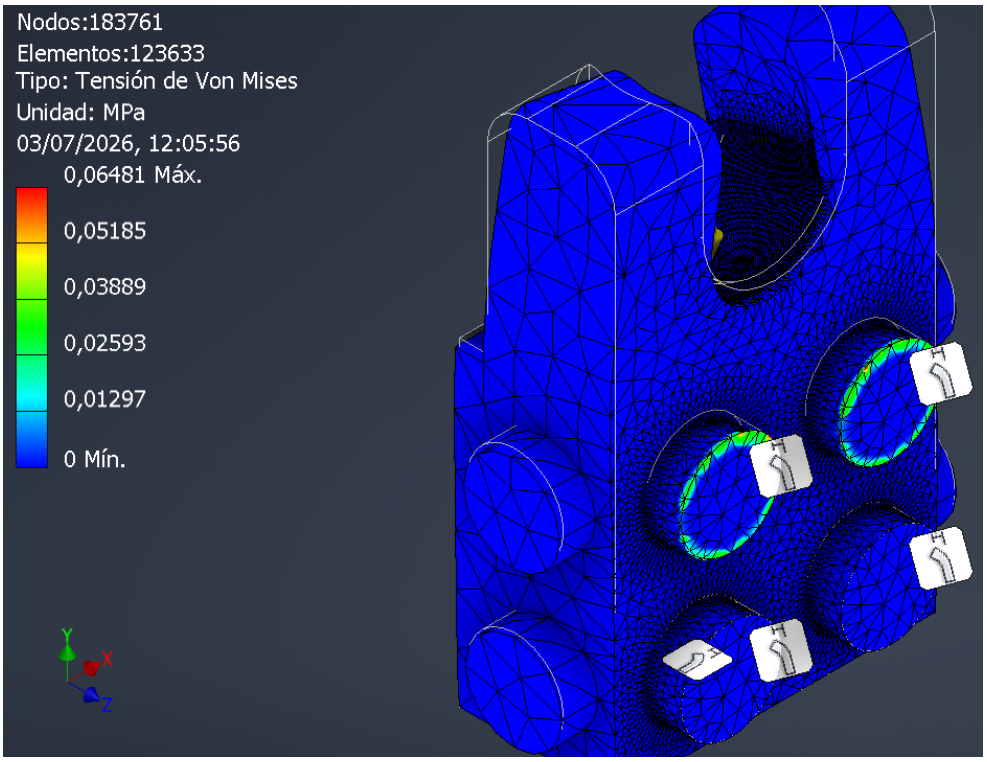



**Figura 4-15 Análisis FEM sobre pieza hembra en ABS**

### *4.5.3.2 Tirante superior*

Las condiciones de contorno aplicadas son las siguientes:

1. Restricción: zona central de apoyo sobre el hombro de la figura → empotramiento fijo
2. Fuerza en orificio delantero: 0,068 N hacia abajo (mitad del peso de la placa delantera + mitad del peso de la banda lateral con radio, en PLA)
3. Fuerza en orificio trasero: 0,057 N hacia abajo (mitad del peso de la placa trasera + mitad del peso de la banda lateral con radio, en PLA)

La malla empleada consta de 8.063 nodos y 4.311 elementos.

La tensión de Von Mises máxima obtenida es de 0,1934 MPa, localizada en la zona del orificio delantero, en la transición entre el orificio y el brazo horizontal del tirante. El coeficiente de seguridad obtenido es: Figura 4-16 Vista superior del análisis FEM sobre tirante superior en PLA Figura 4-17 Vista inferior del análisis FEM sobre tirante superior en PLA

CS = 50 / 0,1934 = 259

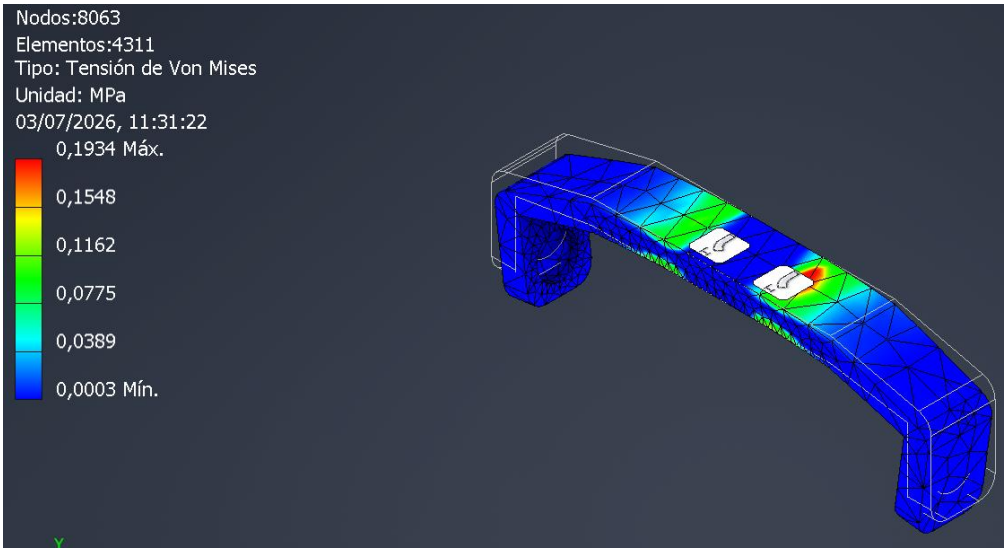



**Figura 4-16 Vista superior del análisis FEM sobre tirante superior en PLA**

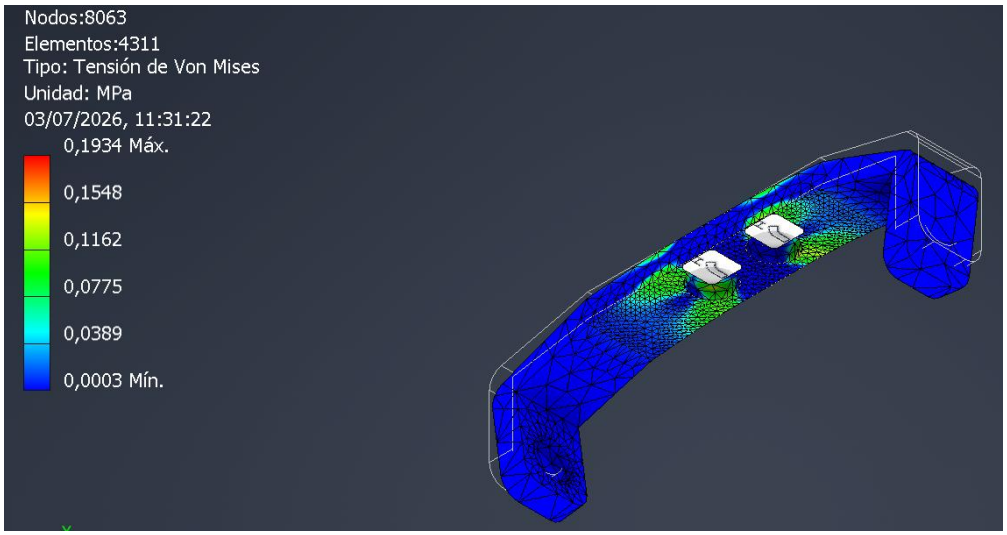



**Figura 4-17 Vista inferior del análisis FEM sobre tirante superior en PLA**

### *4.5.3.3 Bandas laterales del chaleco*

Las condiciones de contorno aplicadas son las mismas que en el análisis con ABS FDM: 4 orificios de encaje como empotramiento fijo y peso propio como única carga: 3,04 g y 2,64 g respectivamente

#### *4.5.3.3.1 Banda lateral con radio*

La malla empleada consta de 177883 nodos y 111505 elementos. La tensión de Von Mises máxima obtenida es de 0,006358 MPa. El coeficiente de seguridad obtenido es: Figura 4-18 Análisis FEM sobre banda lateral con radio en PLA

CS = 50 / 0,006358 = 7865

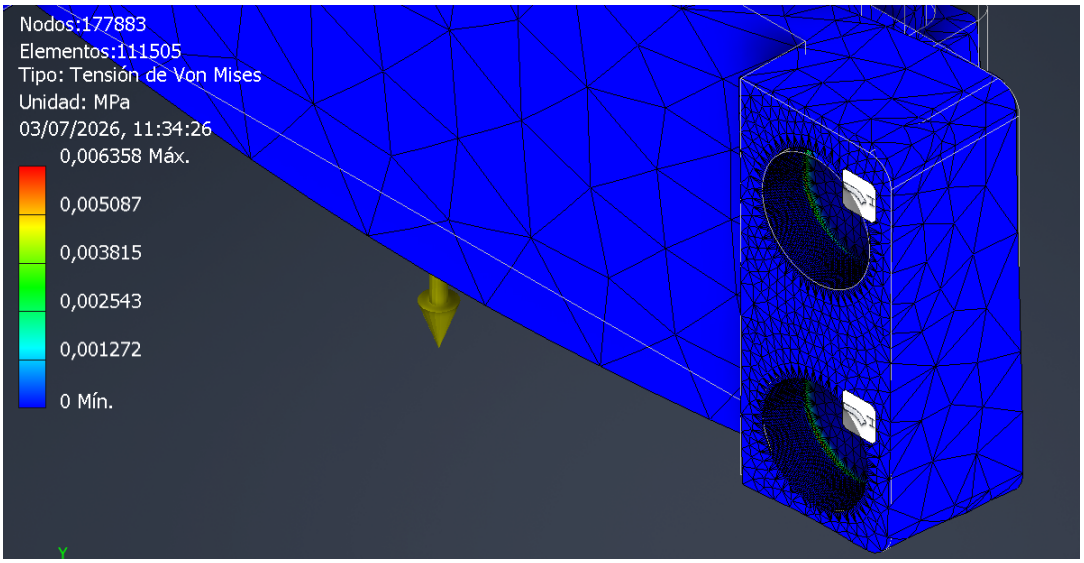



**Figura 4-18 Análisis FEM sobre banda lateral con radio en PLA**

### *4.5.3.3.2 Bandas laterales del chaleco*

La malla empleada consta de 30816 nodos y 19131 elementos. La tensión de Von Mises máxima obtenida es de 0,005368 MPa. El coeficiente de seguridad obtenido es: FiguFigura 4-19 Análisis FEM sobre banda lateral en PLA

CS = 50 / 0,005368 = 9315

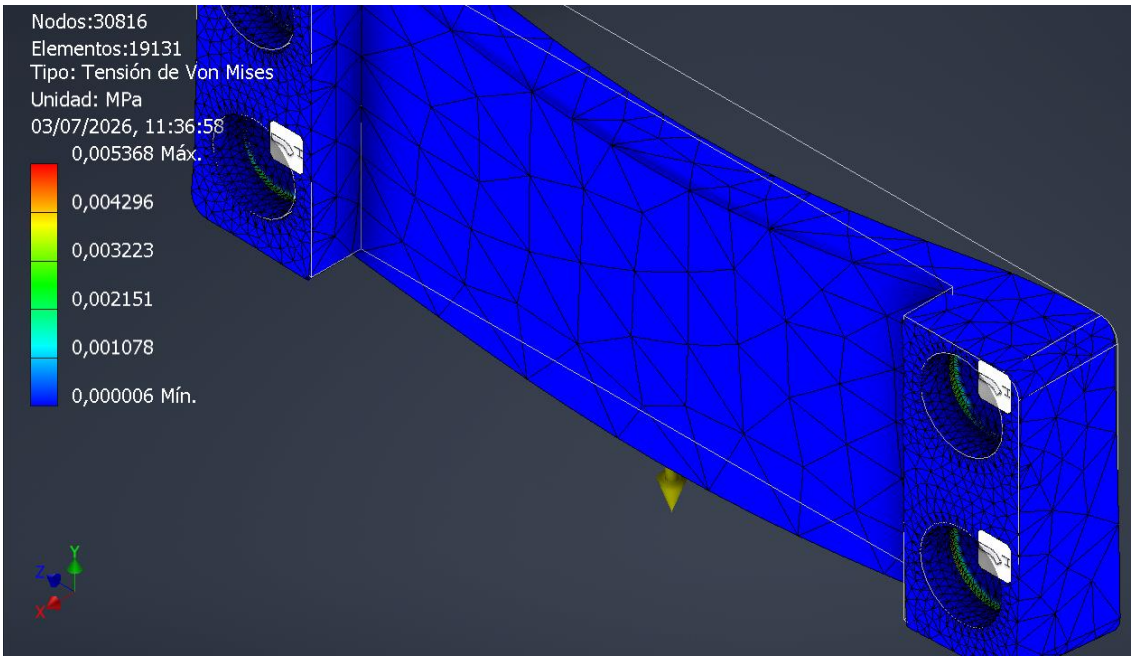



**Figura 4-19 Análisis FEM sobre banda lateral en PLA**

## 4.6 Análisis económico del proceso de adquisición y fabricación

### *4.6.1 Coste de adquisición de piezas LEGO*

El proceso de adquisición de piezas LEGO® se ha realizado mediante la plataforma BrickLink, permitiendo optimizar tanto el coste total como la logística de compra.

En una primera estimación, el coste total de las piezas necesarias ascendía a 270 €, distribuidas en un total de siete tiendas, lo que implicaba un incremento significativo en los costes de envío, al igual que en el tiempo de duración del envío de las piezas, lo que suponía que hasta que no estuviesen las piezas, no se podía comprobar realmente la integración de las piezas diseñadas en Autodesk Inventor con el sistema modular de LEGO.

Tras un proceso de optimización basado en la selección de proveedores y la agrupación de pedidos, se logró reducir el número de tiendas a únicamente dos tiendas, obteniendo un coste final de 50 €. Esta optimización ha permitido minimizar los costes logísticos y simplificar el proceso de adquisición.

La reducción obtenida evidencia la importancia de la planificación en la fase de compra, especialmente en proyectos que requieren un elevado número de componentes.

Coste inicial: 270 €. Coste final optimizado a 2 tiendas: 50 € (ahorro del 81%). En la Figura 4-20 Compra piezas de LEGO, se ve el pedido de piezas para el montaje del alférez.



**Figura 4-20 Compra piezas de LEGO**

### *4.6.2 Coste de material de componentes personalizados en PLA*

El coste promedio de una bobina de 1 Kg de PLA es de 20 €, por lo que el coste sería de 0,02 €/g. Sabiendo que el peso de las piezas es de 73,27 g, obtenemos que el coste del lote completo de piezas de PLA será de y 1,453 €. Tabla 4-5 Costes piezas fabricadas con PLA

El tiempo total estimado de impresión, obtenido a partir del software de laminado Bambu Studio, es de 4 horas, 16 minutos y 20 segundos, lo que permite evaluar la viabilidad temporal del proceso de fabricación. No obstante, esta estimación es conservadora, ya que se ha calculado considerando la impresión de cada pieza de forma individual. En la práctica, la impresora requiere un tiempo de preparación de aproximadamente 7 minutos por proceso de impresión, independientemente del número de piezas fabricadas simultáneamente, además poniendo un mayor número de piezas a imprimir a la vez se reduciría significativamente el tiempo de impresión, estableciéndose una tirada de todas las piezas en 2 horas y 40 minutos según el software Bambu Studio.

| Pieza | Peso (g) | Tiempo (h:min:s) | Coste material (€) |
|---|---|---|---|
| Placa delantera | 10,91 | 0:25:45 | 0,22 |
| Placa trasera | 8,49 | 0:21:47 | 0,17 |
| Banda lateral chaleco | 2,64 | 0:19:09 | 0,053 |
| Banda lateral con radio | 3,04 | 0:20:34 | 0,061 |
| Tirante superior (x2) | 6,60 | 0:27:56 | 0,132 |
| Cabeza | 9,33 | 0:35:40 | 0,18 |
| Teresiana | 8,92 | 0:37:26 | 0,17 |
| Macho articulación (x2) | 3,3 | 0.20.47 | 0,066 |
| Hembra articulación (x2) | 4,24 | 0:19:05 | 0,085 |
| Fusil | 15,8 | 0:48:11 | 0,316 |
| TOTAL | 73,27 | 4:16:20 | 1,453 |

**Tabla 4-5 Costes piezas fabricadas con PLA**

### *4.6.3 Coste de material de componentes personalizados en ABS*

El coste promedio de una bobina de 1 Kg de ABS es de 20 €, por lo que el coste sería de 0,02 €/g. Sabiendo que el peso de las piezas es de 60,79 g, obtenemos que el coste del lote completo de piezas de ABS será de 1,216 €. Tabla 4-6 Costes piezas fabricadas con ABS.

El tiempo total estimado de impresión, obtenido a partir del software de laminado Bambu Studio, es de 5 horas, 32 minutos y 35 segundos, lo que permite evaluar la viabilidad temporal del proceso de fabricación. No obstante, esta estimación es conservadora, ya que se ha calculado considerando la impresión de cada pieza de forma individual. En la práctica, la impresora requiere un tiempo de preparación de aproximadamente 8 minutos por proceso de impresión, independientemente del número de piezas fabricadas simultáneamente, además poniendo un mayor número de piezas a imprimir a la vez se reduciría significativamente el tiempo de impresión, estableciéndose una tirada de todas las piezas en 3 horas y 5 minutos según el software Bambu Studio.

| Pieza | Peso (g) | Tiempo (h:min:s) | Coste material (€) |
|---|---|---|---|
| Placa delantera | 8,93 | 0:28:36 | 0,179 |
| Placa trasera | 6,99 | 0:25:14 | 0,140 |
| Banda lateral chaleco | 2,31 | 0:25:18 | 0,046 |
| Banda lateral con radio | 3,28 | 0:22:57 | 0,066 |
| Tirante superior (x2) | 4,77 | 0:36:06 | 0,095 |
| Cabeza | 7,67 | 0:45:58 | 0,153 |
| Teresiana | 7,42 | 0:49:47 | 0,148 |
| Macho articulación (x2) | 2,89 | 0:26:42 | 0,058 |
| Hembra articulación(x2) | 3,59 | 0.22:19 | 0,072 |
| Fusil | 12,94 | 0:49:38 | 0,259 |
| TOTAL | 60,79 | 5:32:35 | 1,216 |

**Tabla 4-6 Costes piezas fabricadas con ABS**

### *4.6.4 Coste de material de componentes con SLA*

El coste de material asciende a 4 €, calculado a partir del volumen de resina consumido en cada pieza y el precio de la resina eSUN eResin-PLA de 32 €/litro (0,032 €/cm³) [34]. A diferencia de los procesos anteriores, en las que el coste de material se calcula a partir del peso del filamento consumido, en la tecnología MSLA el parámetro de referencia es el volumen de resina, dado que este material se presenta en formato líquido y su consumo depende directamente del volumen de las piezas y sus estructuras de soporte. El mayor coste unitario de la resina respecto a los filamentos termoplásticos queda justificado por la superior resolución dimensional y calidad superficial obtenida con la tecnología MSLA, pero como punto negativo es notablemente más lento que los procesos de FDM con ABS y PLA, superando ligeramente las 14 horas. Tabla 4-7 Costes piezas fabricadas con resina.

| Pieza | Volumen (cm³) | Tiempo (h:min:s) | Coste material (€) |
|---|---|---|---|
| Placa delantera | 19,58 | 0:36:45 | 0,626 |
| Placa trasera | 14,36 | 0:30:48 | 0,460 |
| Banda lateral chaleco | 2,99 | 0:49:07 | 0,096 |
| Banda lateral con radio | 3,6 | 1:20:57 | 0,115 |
| Tirante superior (x2) | 3,16 | 0:25:21 | 0,101 |
| Cabeza | 21,15 | 1:36:13 | 0,677 |
| Teresiana | 26,38 | 2:08:09 | 0,844 |
| Macho articulación (x2) | 4,28 | 0:59:42 | 0,137 |
| Hembra articulación (x2) | 6,02 | 0:29:42 | 0,193 |
| Fusil | 23,51 | 5:11:52 | 0,752 |
| TOTAL | 125,03 | 14:08:36 | 4,001 |

**Tabla 4-7 Costes piezas fabricadas con resina**

### *4.6.5 Coste energético de fabricación de componentes personalizados*

El coste energético del proceso de fabricación se ha calculado a partir del consumo medio de cada impresora durante la impresión, el tiempo total de fabricación, y el precio medio de la electricidad en España en 2026, fijado en 0,131 €/kWh según la tarifa regulada PVPC [19, 20].

La Bambu Lab P1P presenta un consumo medio de 100 W durante la impresión con PLA, (Tabla 4-9 Coste energético P1P), mientras que la Bambu Lab X1-Carbon (Tabla 4-8 Coste energético X1-Carbon) consume aproximadamente 175 W durante la impresión con ABS, valor superior debido al calentamiento adicional de la cama a 100-110 °C y al mantenimiento de la temperatura de cámara cerrada durante todo el proceso de fabricación. La ELEGOO Mars 3 Pro presenta el consumo más reducido de los tres equipos (Tabla 4-10 Coste energético Mars 3 Pro), con aproximadamente 55 W durante la impresión, dado que la tecnología MSLA no requiere cama caliente ni extrusor, limitándose el consumo energético principalmente a la fuente de luz COB UV y los motores del eje Z [33].

| Concepto | Valor |
|---|---|
| Precio electricidad en España 2026 | 0,131 €/kWh |
| Consumo medio durante impresión X1-Carbon | 175 W |
| Tiempo impresión X1-Carbon | 5,543 h |
| Energía consumida X1-Carbon | 0,175 kW x 5,543 h= 0,970 kWh |
| Coste energético total X1-Carbon | 0,970 kWh x 0,131 €/kWh = 0,127 € |

**Tabla 4-8 Coste energético X1-Carbon**

| Concepto | Valor |
|---|---|
| Precio electricidad en España 2026 | 0,131 €/kWh |
| Consumo medio durante impresión P1P | 100 W |
| Tiempo impresión P1P | 4,272 h |
| Energía consumida P1P | 0,1 kW x 4,272 h= 0,427 kWh |
| Coste energético total P1P | 0,427 kWh x 0,131 €/kWh = 0,056 € |

**Tabla 4-9 Coste energético P1P**

| Concepto | Valor |
|---|---|
| Precio electricidad en España 2026 | 0,131 €/kWh |
| Consumo medio durante impresión Mars 3 Pro | 55 W |
| Tiempo impresión Mars 3 Pro | 2,885 h |
| Energía consumida Mars 3 Pro | 0,055 kW x 2,885 h= 0,159kWh |
| Coste energético total Mars 3 Pro | 0,159 kWh x 0,131 €/kWh = 0,021 € |

**Tabla 4-10 Coste energético Mars 3 Pro**

### *4.6.6 Resumen económico global*

En la Tabla 4-11 se recoge el resumen económico global del proyecto desglosado según la tecnología de fabricación aditiva empleada para la producción de los componentes personalizados.

En el caso de emplear la Bambu Lab P1P con PLA, el coste total del proyecto asciende a 51,509 €, de los cuales el 97,07% corresponde a la adquisición de las piezas LEGO estándar (50 €). El coste del material de fabricación representa el 2,82% del total, mientras que el gasto energético del proceso de impresión supone tan solo el 0,11%, siendo prácticamente despreciable.

Si se emplea la Bambu Lab X1-Carbon con ABS, el coste total es de 51,343 €, ligeramente inferior al caso anterior debido al menor peso de las piezas en ABS respecto al PLA, derivado de su menor densidad. Las piezas LEGO estándar representan el 97,38% del coste total, el material ABS el 2,36% y el gasto energético el 0,26%, algo superior al del PLA por el mayor consumo de la X1-Carbon durante la impresión con cámara cerrada.

En el caso de la ELEGOO Mars 3 Pro con resina eSUN eResin-PLA, el coste total asciende a 54,022 €, el más elevado de los tres procesos analizados. Las piezas LEGO estándar representan el 92,55% del coste total, el material de resina supone el 7,40%, el cual es significativamente superior al de los filamentos termoplásticos, coherente con el mayor precio unitario de la resina, 32 €/litro frente a 19,99 €/kg del PLA y el ABS. Para finalizar, el gasto energético de la ELEGOO Mars 3 Pro equivale al 0,05% restante, lo que confirma el carácter prácticamente despreciable del coste energético en todas las tecnologías analizadas.

Como conclusión del estudio económico, (Tabla 4-11 Resumen de gastos totales) el empleo de tecnología FDM con PLA o ABS resulta la opción más ventajosa en términos de coste total, con diferencias inferiores a 0,17 € entre ambos procesos. La tecnología MSLA, aunque produce piezas de mayor resolución superficial y calidad de acabado, supone un sobrecoste de aproximadamente 2,5 € respecto al FDM, derivado principalmente del mayor precio unitario de la resina fotopolimerizable. En cualquier caso, el coste dominante en los tres escenarios es la adquisición de piezas LEGO estándar, que

representa entre el 92,55% y el 97,38% del coste total según el proceso empleado, lo que pone de manifiesto que la selección de la tecnología de fabricación aditiva tiene un impacto económico relativamente menor sobre el coste global del proyecto.

| Concepto | Coste (€) |
|---|---|
| LEGO + P1P (73,27 g) + coste energeético | 51,509 |
| LEGO + X1-Carbon (60,79 g) + coste energético | 51,343 |
| LEGO + Mars 3 Pro ($cm^3$) + coste energético | 54,022 |

**Tabla 4-11 Resumen de gastos totales**

# 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

## 5.1 Conclusiones

El presente Trabajo de Fin de Grado ha permitido alcanzar todos los objetivos planteados inicialmente, demostrando la viabilidad técnica y económica de combinar el sistema modular LEGO® con herramientas de diseño CAD paramétrico y tecnologías de fabricación aditiva para la representación a escala de una figura institucional compleja. A continuación se exponen las conclusiones más relevantes extraídas del trabajo, organizadas en función de los bloques principales del proyecto

### *5.1.1 Viabilidad del sistema LEGO® como plataforma de representación técnica a escala*

El sistema modular LEGO® ha demostrado ser una plataforma válida para la representación técnica a escala de figuras humanas institucionales, gracias a su estandarización dimensional extremadamente precisa y a la compatibilidad intergeneracional de sus piezas. La figura diseñada, compuesta por 302 piezas del catálogo estándar, reproduce fielmente las proporciones anatómicas de un alférez alumno de Infantería de Marina a escala aproximada 1:9, con desviaciones máximas del 14% respecto a las proporciones antropométricas de referencia.

El proceso iterativo de diseño, basado en la generación y evaluación de tres prototipos completos previos, ha permitido optimizar progresivamente las proporciones, el sistema de articulaciones y la estabilidad estructural del conjunto, validando la metodología de diseño modular secuencial propuesta en el presente TFG.

### *5.1.2 Complementariedad entre el catálogo LEGO® y la fabricación aditiva*

La integración del diseño CAD paramétrico en Autodesk Inventor con la fabricación aditiva por FDM y MSLA ha permitido superar con éxito las limitaciones del catálogo estándar LEGO®, incorporando 13 componentes personalizados que reproducen elementos representativos del uniforme y equipamiento de un alférez alumno de Infantería de Marina. Estos componentes tenían mucha complejidad para ser reproducidos únicamente mediante piezas del catálogo estándar y habrían sido imposibles de obtener por medios puramente modulares.

La compatibilidad geométrica entre los componentes diseñados y las piezas estándar LEGO® ha sido verificada experimentalmente, con tolerancias reales en los orificios de encaje que se sitúan dentro del margen de ±0,01 a ±0,02 mm. Este resultado confirma que el modelado paramétrico, correctamente aplicado con control de las cotas críticas de encaje, permite diseñar piezas plenamente compatibles con el sistema LEGO® sin necesidad de ajustes posteriores a la fabricación, al menos para el PLA. Para el ABS fue necesario realizar iteraciones adicionales debido a la mayor contracción térmica del material.

La separación metodológica en dos fases, primero el modelado modular con piezas estándar y posteriormente el diseño de componentes personalizados ha demostrado ser una estrategia eficaz, al validar el sistema base antes de invertir tiempo en el diseño y fabricación de las extensiones personalizadas.

### *5.1.3 Diseño exitoso de la articulación de cadera personalizada*

El diseño e implementación de la articulación de cadera personalizada constituye la aportación técnica más relevante del presente TFG. La articulación esférica diseñada, compuesta por una pieza macho con bola de 9,2 mm de diámetro y una pieza hembra con una cavidad de diámetro 8,8 mm, resuelve la limitación cinemática del catálogo estándar, que no disponía de ninguna pieza con las dimensiones adecuadas para implementar una articulación esférica en la posición requerida por la figura.

La nueva articulación proporciona tres grados de libertad de rotación (flexión/extensión, abducción/aducción y rotación interna/externa), frente a la movilidad limitada que ofrecía la solución anterior con piezas estándar. Esto permite a la figura adoptar posturas más naturales y variadas, mejorando significativamente su valor como figura de representación institucional.

El análisis FEM realizado confirma la integridad estructural de ambas piezas bajo las cargas reales de uso. Los coeficientes de seguridad obtenidos son ampliamente suficientes: CS = 130 para la pieza macho en ABS FDM (tensión máxima de 0,2595 MPa frente a una tensión de fluencia de 33,75 MPa) y CS = 1.248 para la pieza hembra en ABS FDM. Estos valores garantizan que la articulación no falla bajo las cargas estáticas de uso normal de la figura, incluso considerando la reducción de propiedades inherente al proceso FDM.

La fabricación de ambas piezas en ABS, aun siendo el mismo material empleado por el fabricante LEGO® en sus piezas originales, no se garantiza al 100% una coherencia de propiedades mecánicas y superficiales con el sistema al que se integra la articulación, ya que la densidad de las piezas obtenidas mediante fabricación aditiva no es la misma. Esto se refleja al analizar los ensayos de dureza Shore D, que evidencian que el ABS impreso por FDM (53,2 Shore D) presenta propiedades superficiales significativamente inferiores a las del ABS inyectado de las piezas LEGO® originales (72,4 Shore D), lo que abre una línea de mejora futura mediante la fabricación por inyección.

### *5.1.4 Influencia determinante del proceso de fabricación sobre las propiedades mecánicas y superficiales*

Los resultados del ensayo de dureza Shore D han puesto de manifiesto una de las conclusiones más relevantes del trabajo, el proceso de fabricación tiene una influencia mayor sobre las propiedades superficiales que el propio material. La diferencia de 19,2 Shore D entre el ABS inyectado de las piezas LEGO® originales (72,4 Shore D) y el ABS impreso por FDM (53,2 Shore D) cuantifica el impacto de las microporosidades internas, la anisotropía de las capas y la menor densidad de relleno características del proceso FDM.

Esta conclusión tiene implicaciones directas sobre el análisis FEM. Se aplicó una reducción del 75% sobre las propiedades del ABS FDM, que al realizar los ensayos evidencian una reducción real de propiedades del orden del 26% entre el ABS macizo inyectado y el ABS procesado por FDM.

Por el contrario, la tecnología MSLA ha demostrado producir piezas con propiedades superficiales superiores a las del FDM, tanto en dureza, con valor medio de 79,2 Shore D para la resina eSUN eResin-PLA frente a 74,4 Shore D del PLA FDM, como en homogeneidad superficial, obteniendo una desviación típica de 0,8 Shore D frente a 1,3 Shore D del PLA FDM y 2,6 Shore D del ABS FDM. Este resultado es coherente con el principio de funcionamiento de la tecnología MSLA, que expone simultáneamente toda la sección de cada capa y genera superficies más densas y uniformes que la deposición capa a capa del FDM.

### *5.1.5 Eficiencia económica del proceso*

El análisis económico completo del proyecto, que incluye el coste de adquisición de piezas LEGO®, el material de fabricación en las tres tecnologías, el coste energético de las tres impresoras y la amortización de los equipos, aporta un coste total de aproximadamente 58,90 €. Este resultado confirma la elevada eficiencia económica de la combinación del sistema modular LEGO® con la fabricación aditiva para proyectos de representación a escala.

El coste dominante del proyecto es la adquisición de piezas LEGO® estándar, que representa el 84,9% del coste total (50 €), seguido de la amortización de los equipos de fabricación (3,81 €, 6,5%) y el coste de material de fabricación en las tres fases (4,88 €, 8,3%). El coste energético total de las tres impresoras asciende a tan solo 0,20 €, lo que confirma la práctica despreciabilidad del coste energético de la fabricación aditiva a esta escala.

Cabe destacar que la optimización de la adquisición de piezas LEGO® a través de la plataforma BrickLink permitió reducir el coste inicial estimado de 270 € a 50 € (ahorro del 81%), demostrando la importancia de una gestión eficiente de la cadena de suministro incluso en proyectos de pequeña escala.

## 5.2 Líneas futuras

El desarrollo del presente TFG abre diversas líneas de trabajo futuro que permitirían ampliar, mejorar y validar los resultados obtenidos. Se presentan a continuación ordenadas según su relevancia e impacto esperado sobre la calidad del proyecto.

### *5.2.1 Ampliación del uso de la tecnología MSLA a todos los componentes del chaleco*

Los resultados obtenidos en la fabricación mediante MSLA, confirman la superioridad de esta tecnología respecto al FDM en términos de resolución superficial y homogeneidad de acabado. La resolución XY de 35 µm de la ELEGOO Mars 3 Pro permite obtener un nivel de detalle muy superior al alcanzable con FDM, como queda demostrado en la teresiana y la galleta identificativa de la placa delantera del chaleco.

Como línea futura, se propone la fabricación mediante MSLA de todos los componentes del chaleco táctico y del armamento, aprovechando la mayor resolución dimensional para reproducir con mayor fidelidad los detalles del equipamiento real. Esta mejora requeriría la optimización de los parámetros de soporte para piezas de mayor tamaño y la evaluación de la resistencia mecánica de la resina frente al ABS FDM para piezas funcionales de encaje.

### *5.2.2 Extensión del flujo de trabajo a figuras de otros cuerpos militares*

El flujo de trabajo desarrollado en el presente TFG, el modelado modular en BrickLink Studio, diseño de componentes personalizados en Autodesk Inventor y fabricación en tres tecnologías de fabricación aditiva, es directamente extensible a la representación de figuras de otros cuerpos de la Armada, modificando únicamente los componentes del uniforme y el equipamiento específico de cada cuerpo.

Esta línea de trabajo abre la posibilidad de desarrollar una colección completa de figuras de los diferentes empleos de los alumnos de la Escuela Naval Militar, con un coste de desarrollo incremental muy reducido gracias a la reutilización del modelo base de la figura y del flujo de trabajo establecido. La colección podría constituir un elemento representativo del con valor institucional y divulgativo, así como un material didáctico para la enseñanza de técnicas de diseño CAD y fabricación aditiva en el Grado en Ingeniería Mecánica.

### *5.2.3 Rediseño de la estructura interna mediante armadura CAD sobre base LEGO Technic*

Una de las limitaciones inherentes al diseño modular es la geometría predominantemente cúbica y rectilínea que impone el sistema de studs y bricks, que dificulta la reproducción de la curvatura y la organicidad de la anatomía humana a escala reducida.

Como línea futura se propone el rediseño de la estructura interna adoptando un enfoque de doble capa, basado en una estructura esquelética interna basada en piezas LEGO Technic de mayor versatilidad geométrica, que proporcione el armazón cinemático y estructural de la figura, complementada por una armadura exterior de piezas personalizadas diseñadas en CAD y fabricadas por FDM o MSLA, que se encajen directamente sobre la estructura base y reproduzcan la forma exterior de la figura con mayor fidelidad.

Este enfoque desacopla la función estructural y cinemática de la función estética, permite aprovechar al máximo la resolución de la tecnología MSLA para reproducir superficies curvas, y facilita la adaptación de la figura a distintos uniformes simplemente sustituyendo las piezas exteriores.

### *5.2.4 Extensión de la metodología a otros ámbitos de la ingeniería naval y arquitectónica*

La metodología desarrollada en el presente TFG, la combinación de sistemas modulares con diseño CAD paramétrico y fabricación aditiva, no se limita a la representación de figuras humanas, sino que es extensible a la creación de prototipos funcionales y maquetas de mayor complejidad en el ámbito de la ingeniería.

Como línea futura se propone la aplicación de este enfoque a dos casos de especial relevancia para el CUD-ENM, como son la representación a escala de las lanchas de instrucción empleadas en la formación de los alumnos de Cuerpo General de la Armada, donde la combinación de piezas LEGO Technic con componentes CAD permitiría representar fielmente este tipo de prototipo, y la maquetación de las edificaciones de la Escuela Naval Militar, donde el sistema modular LEGO podría emplearse como base estructural complementada con fachadas y elementos arquitectónicos personalizados fabricados por MSLA.

Ambas aplicaciones reforzarían el potencial del enfoque adoptado en este trabajo, demostrando que la integración de sistemas modulares y fabricación aditiva constituye una metodología de prototipado versátil, económica y aplicable a una amplia variedad de proyectos de ingeniería en el entorno académico y militar.

# 6 BIBLIOGRAFÍA


[1] LEGO Group, "The stud and tube principle," lego.com. https://www.lego.com/en-us/history/articles/d-the-stud-and-tube-principle

[2] LEGO Group, "Automatic binding bricks," lego.com. https://www.lego.com/en-us/history/articles/c-automatic-binding-bricks.

[3] P. Grogan y O. de Weck, "LEGO product design and manufacturing simulations for engineering design and systems engineering education," en *ASEE Annual Conference*, Tampa, FL, 2019. 9. https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/137206

[4] L. C. Gerber et al., "Liquid-handling Lego robots and experiments for STEM education and research," *PLOS Biology*, vol. 15, no. 3, art. e2001413, mar. 2017. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2001413

[5] LDraw.org, "LDraw system of tools," ldraw.org. https://www.ldraw.org.

[6] Mecabricks, "Mecabricks online LEGO CAD tool," mecabricks.com. https://www.mecabricks.com.

[7] BrickLink, "Studio," *BrickLink*, bricklink.com. https://www.bricklink.com/v3/studio/main.page.

[8] S. Junk y L. Burkart, "Comparison of CAD systems for generative design for use with additive manufacturing," *Procedia CIRP*, vol. 100, pp. 577–582, 2021. https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.126

[9] A. García-Dominguez, J. Claver y M. A. Sebastián, "Integration of additive manufacturing, parametric design, and optimization of parts obtained by FDM. A methodological approach," *Polymers*, vol. 12, no. 9, art. 1993, sep. 2020. https://doi.org/10.3390/polym12091993

[10] T. B. Nerenst et al., "Parametric CAD modeling: New principles for robust sketch constraints," *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 20, no. 1, pp. 56–81, 2023. https://doi.org/10.14733/cadaps.2023.56-8

[11] F. Machado, N. Malpica y S. Borromeo, "Parametric CAD modeling for open source scientific hardware," *PLOS ONE*, vol. 14, no. 12, art. e0225795, dic. 2019. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225795

[12] I. A. Magomedov et al., "Comparative analysis of CAD software packages for engineering design," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1155, art. 012083, jun. 2021. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1155/1/012083

[13] A. Kafle, E. Luis, R. Silwal, H. M. Pan, P. L. Shrestha y A. K. Bastola, "3D/4D printing of polymers: Fused deposition modelling (FDM), selective laser sintering (SLS), and stereolithography (SLA)," *Polymers*, vol. 13, no. 18, art. 3101, sep. 2021.. https://doi.org/10.3390/polym13183101

[14] L. Zhou et al., "Additive manufacturing: A comprehensive review," *Sensors*, vol. 24, no. 9, art. 2668, abr. 2024.https://doi.org/10.3390/s24092668

[15] W. Liu et al., "A survey of the influence of process parameters on mechanical properties of FDM parts," *Micromachines*, vol. 13, no. 4, art. 553, abr. 2022. https://doi.org/10.3390/mi13040553

[16] M. Bembenek et al., "Research on the influence of processing parameters on the specific tensile strength of FDM additive manufactured PET-G and PLA materials," *Polymers*, vol. 14, no. 12, art. 2446, jun. 2022. https://doi.org/10.3390/polym14122446

[17] A. Özen et al., "Characterization and multiscale modeling of the mechanical properties for FDM-printed copper-reinforced PLA composites," *Polymers*, vol. 14, no. 17, art. 3512, ago. 2022.

[18] D. Popescu, A. Zapciu, C. Amza, F. Baciu y R. Marinescu, "FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review," *Polymer Testing*, vol. 69, pp. 157–166, 2018. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.020

[19] Bambu Lab, *Bambu Lab P1P Quick Start Guide*, Bambu Lab Co., Ltd., 2023. https://www.manualslib.com/manual/4047805/Bambu-Lab-P1p.html.

[20] Bambu Lab, "X1-Carbon Technical Specifications," *Bambu Lab*, bambulab.com. https://bambulab.com/en-us/x1

[21] ELEGOO, "Mars 3 Pro specifications," *ELEGOO Official*, elegoo.com. https://us.elegoo.com/products/elegoo-mars-3-pro-4k-mono-lcd-3d-printer..

[22] M. Algarni y S. Ghazali, "Comparative study of the sensitivity of PLA, ABS, PEEK, and PETG's mechanical properties to FDM printing process parameters," *Crystals*, vol. 11, no. 8, art. 995, ago. 2021. https://doi.org/10.3390/cryst11080995

[23] eSUN, "eResin-PLA Bio-Photopolymer Resin technical data sheet," esun3d.com. https://www.esun3d.com/uploads/eSUN_eResin-PLA_TDS_V4.0.pdf.

[24] International Organization for Standardization, *ISO 868:2003 — Plastics and ebonite — Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness)*, Ginebra, Suiza: ISO, 2003. https://www.iso.org/standard/34804.html

[25] S. Z. Hervan, A. Altınkaynak y Z. Parlar, "Hardness, friction and wear characteristics of 3D-printed PLA polymer," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 235, no. 12, pp. 2766–2775, 2021. https://doi.org/10.1177/1350650120966407

[26] PCE Instruments, "Durometer PCE-DX-DS Shore D," *PCE Instruments*, pce-instruments.com. https://www.pce-instruments.com/us/measuring-instruments/test-meters/durometer-shore-durometer-pce-instruments-durometer-pce-dx-ds-shore-d-det_2131515.htm.

[27] A. Chadha, U. Ul Haq, M. Raina, R. R. Singh, N. B. Penumarti y M. S. Bishnoi, "An investigation on the hardness of polylactic acid parts fabricated via fused deposition modeling," *Polymers*, vol. 14, no. 14, art. 2907, jul. 2022. [En línea]. https://doi.org/10.3390/polym14142907

[28] J. Mayén et al., "Descriptive and inferential study of hardness, fatigue life, and crack propagation on PLA 3D-printed parts," *Composites Part C: Open Access*, vol. 9, art. 100293, jul. 2022. https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100293

[29] M. Gabrysiak et al., "Analysis of the mechanical properties of 3D-printed plastic samples subjected to selected degradation effects," *Materials*, vol. 16, no. 8, art. 3268, abr. 2023. https://doi.org/10.3390/ma16083268

[30] G. Chouhan, R. Nagwal, H. Borade, A. K. Namdeo, S. S. Chauhan y P. Bidare, "Effect of Shore A hardness and process parameters on the impact behaviour of SLA printed polymers," *Discover Mechanical Engineering*, vol. 5, art. 97, 2026. https://doi.org/10.1007/s44245-026-00259-y

[31] D. Catana, M. A. Pop y D. I. Brus, "Comparison between the test and simulation results for PLA structures 3D printed, bending stressed," *Molecules*, vol. 26, no. 11, art. 3325, jun. 2021. https://doi.org/10.3390/molecules26113325

[32] F. H. Martini, M. J. Timmons y R. B. Tallitsch, *Human Anatomy*, 7ª ed. San Francisco, CA, EE. UU.: Pearson Benjamin Cummings, 2012.

[33] LEGO Group, "LEGO Technic ball joint system," lego.com. https://www.lego.com/en-us/themes/technic.

[34] Ministerio de Defensa de España, *Manual de uniformidad de las Fuerzas Armadas Españolas*. Madrid, España: Ministerio de Defensa, 2020.

[35] eSUN, "eResin-PLA Bio-Photopolymer Resin," *eSUN Official*, esun3d.com. https://www.esun3d.com/eresin-pla-product/

[36] Bambu Lab, "Bambu Studio," *Bambu Lab*, bambulab.com. https://bambulab.com/en-us/download/studio.

[37] CBD-Tech, "Chitubox Basic slicer software," chitubox.com. [En línea]. https://www.chitubox.com/en/index

[38] M. Majeed, R. Silva, D. N. Faye y P. Pedrosa, "Influence of strain-offset-based yield definitions on the accuracy of finite element analysis of 3D-printed PLA with different raster orientations," *Polymers*, vol. 18, art. 158, 2026. https://doi.org/10.3390/polym18020158

[39] S. Ganeshkumar et al., "Investigation of tensile properties of different infill pattern structures of 3D-printed PLA polymers: Analysis and validation using finite element analysis in ANSYS," *Materials*, vol. 15, art. 5142, 2022. https://doi.org/10.3390/ma15155142

# ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

El presente Trabajo de Fin de Grado, centrado en el diseño y modelado virtual de la figura de un alférez alumno de Infantería de Marina mediante el sistema modular LEGO® y herramientas CAD, presenta implicaciones relevantes en los ámbitos social, económico y ambiental.

La representación de personal militar a través del sistema LEGO®, ampliamente reconocido en todos los grupos de edad, constituye una vía de acercamiento de las Fuerzas Armadas a la sociedad civil, contribuyendo a proyectar una imagen más cercana y comprensible de la institución. Desde el punto de vista educativo, la metodología desarrollada, la cual integra diseño CAD paramétrico, sistemas modulares y fabricación aditiva, puede trasladarse al ámbito docente del Centro Universitario de la Defensa como material didáctico para la enseñanza de herramientas de ingeniería mecánica.

El trabajo demuestra la eficiencia económica de la combinación de herramientas digitales y fabricación aditiva: el coste total del proyecto oscila entre 51,34 € y 54,02 € según la tecnología empleada, con un coste de fabricación de los componentes personalizados inferior a 9 € en todos los casos. La optimización de la adquisición de piezas LEGO® mediante BrickLink permitió reducir el coste inicial de 270 € a 50 €, ilustrando el potencial de las plataformas digitales para la gestión eficiente de la cadena de suministro en proyectos de pequeña escala.

La fabricación aditiva presenta ventajas ambientales frente a los procesos sustractivos tradicionales al generar menor cantidad de residuos de material. El uso de PLA, polímero de origen biológico y biodegradable en condiciones industriales, y de resina eSUN eResin-PLA de base renovable, reduce el impacto ambiental del proceso. No obstante, deben considerarse el consumo energético de las impresoras, la generación de residuos de soporte y piezas defectuosas, y las emisiones de COV durante la impresión en ABS, que requieren ventilación adecuada del espacio de trabajo.

El análisis conjunto de las tres dimensiones pone de manifiesto que el enfoque adoptado en este TFG trasciende el ámbito puramente técnico. La accesibilidad económica del proceso, con un coste total inferior a 55 €, demuestra que es posible desarrollar proyectos de representación institucional complejos con recursos limitados, propios de un entorno académico. El potencial divulgativo de la figura resultante, combinado con el uso de materiales de origen renovable y la minimización de residuos característica de la fabricación aditiva, configura una metodología coherente con los principios de sostenibilidad y eficiencia que deben guiar la práctica de la ingeniería moderna. En definitiva, la integración de sistemas modulares, herramientas CAD y fabricación aditiva constituye un ejemplo de cómo la tecnología puede emplearse de forma responsable para generar valor técnico, social y ambiental de forma simultánea.

# ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El presente trabajo se ha desarrollado exclusivamente con fines formativos y técnicos, empleando las herramientas disponibles para la generación de modelos digitales y su materialización física en un contexto académico. No obstante, es importante reconocer que estas mismas tecnologías podrían emplearse para la reproducción de elementos con aplicación en ámbitos sensibles, lo que refuerza la necesidad de establecer criterios de utilización responsable. La facilidad de acceso a herramientas CAD de alta precisión y a impresoras 3D de bajo coste exige que su uso esté siempre guiado por una reflexión ética previa sobre las implicaciones de los objetos diseñados y fabricados.

El proyecto se centra en la representación de un alférez alumno de Infantería de Marina, lo que introduce una dimensión ética relacionada con la imagen y el significado social de las Fuerzas Armadas. A lo largo del desarrollo se ha procurado que la representación sea rigurosa, respetuosa y coherente con los valores institucionales, evitando cualquier trivialización del equipamiento o de la función militar. El enfoque técnico e ingenieril del trabajo, alejado de cualquier interpretación lúdica o estereotipada, sitúa el proyecto en el ámbito de la ingeniería de representación institucional, contribuyendo a proyectar una imagen digna y fiel de la Armada Española.

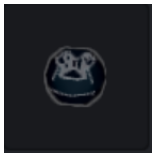
La integración del sistema modular LEGO® en un proyecto de ingeniería plantea reflexiones sobre el papel de las herramientas accesibles en la formación técnica. Estos sistemas fomentan la creatividad, la resolución de problemas y el aprendizaje autónomo, competencias fundamentales en la formación de futuros oficiales ingenieros. Sin embargo, su uso en contextos académicos requiere un enfoque pedagógico adecuado que evite la simplificación excesiva de conceptos técnicos complejos y que garantice la transferencia real de conocimiento hacia situaciones de mayor exigencia técnica.

El avance tecnológico en el ámbito del diseño y la fabricación digital debe ir acompañado de una reflexión ética continua que oriente su aplicación hacia fines formativos, técnicos y socialmente responsables. Este proyecto evidencia que la integración de criterios éticos en el desarrollo tecnológico no es un requisito externo, sino una parte intrínseca de la práctica de la ingeniería moderna, especialmente en contextos con dimensión institucional y militar como el del CUD.

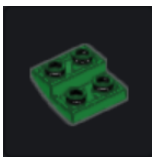
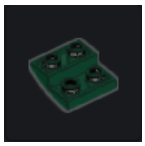
# ANEXO III: PIEZAS DE LEGO

En el presente anexo se adjuntan tablas que contienen la cantidad y tipo de pieza que se han empleado para el montaje de cada uno de los subconjuntos que conforman la figura completa del alférez de LEGO:

**Piezas que componen los pies:**

| Pieza | Número | Pieza | Número | Pieza | Número |
|---|---|---|---|---|---|
|  | 2 |  | 4 |  | 2 |
|  | 2 |  | 2 |  | 4 |
|  | 2 |  | 4 |  | 2 |
|  | 2 |  | 2 |  | 2 |
|  | 2 |  | 2 |  | 4 |
|  | 2 |  | 2 |  | 2 |

**Piezas que forman la parte de la pierna que va desde los pies hasta la rodilla:**

| Pieza | Número | Pieza | Número | Pieza | Número |
|---|---|---|---|---|---|
|  | 1 |  | 4 |  | 2 |
|  | 2 |  | 2 |  | 2 |
|  | 2 |  | 2 |  | 2 |
|  | 2 |  | 2 |  | 4 |
|  | 2 |  | 1 | | |

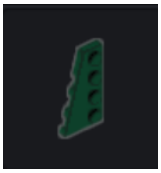
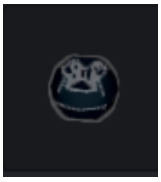
**Piezas que conforman la zona de la pierna que va de la rodilla hasta la cadera:**

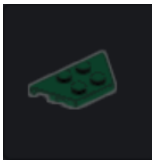
| Pieza | Número | Pieza | Número | Pieza | Número |
|---|---|---|---|---|---|
|  | 2 |  | 2 |  | 2 |
|  | 2 |  | 2 |  | 2 |
|  | 2 |  | 2 |  | 2 |
|  | 6 |  | 4 |  | 2 |

**Piezas que conforman cadera y abdomen:**

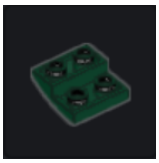
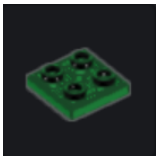
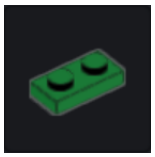
| Pieza | Número | Pieza | Número | Pieza | Número |
|---|---|---|---|---|---|
|  | 2 |  | 2 |  | 1 |
|  | 2 |  | 2 |  | 1 |
|  | 2 |  | 2 |  | 1 |
|  | 3 |  | 1 |  | 1 |
|  | 1 |  | 1 |  | 1 |
|  | 1 |  | 2 |  | 3 |
|  | 3 |  | 2 |  | 1 |
|  | 1 | | | | |

**Piezas que componen el torso:**

| Pieza | Número | Pieza | Número | Pieza | Número |
|---|---|---|---|---|---|
|  | 1 |  | 4 |  | 2 |
|  | 1 |  | 1 |  | 1 |
|  | 1 |  | 3 |  | 1 |
|  | 5 |  | 4 |  | 4 |
|  | 1 |  | 2 |  | 1 |
|  | 1 |  | 3 |  | 2 |
|  | 1 |  | 2 |  | 2 |
|  | 6 |  | 1 |  | 1 |
|  | 2 |  | 2 |  | 2 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
|  | 1 |  | 1 |  | 1 |
|  | 1 |  | 2 |  | 1 |
|  | 4 |  | 4 |  | 4 |
|  | 1 |  | 1 |  | 1 |
|  | 1 |  | 2 |  | 2 |
|  | 1 |  | 2 |  | 2 |
|  | 2 |  | 1 | | |

**Piezas que conforman los brazos:**

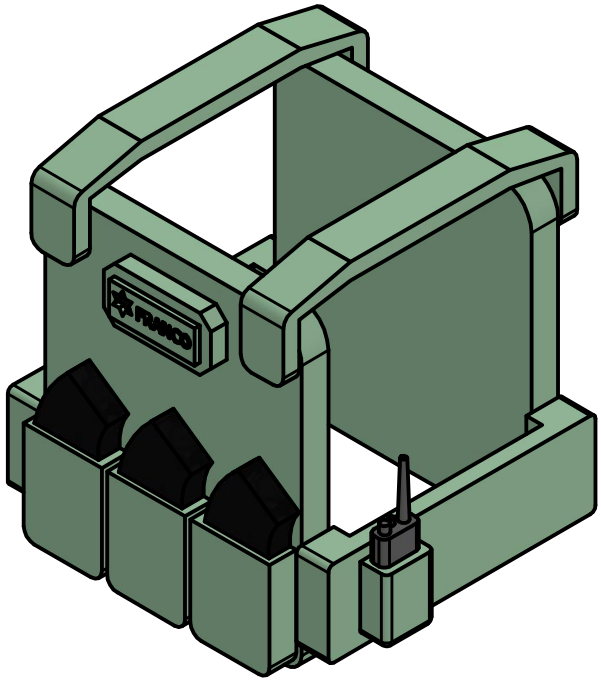
| Pieza | Número | Pieza | Número | Pieza | Número |
|---|---|---|---|---|---|
|  | 8 |  | 2 |  | 2 |
|  | 2 |  | 2 |  | 2 |
|  | 2 |  | 2 |  | 4 |
|  | 2 |  | 2 |  | 2 |
|  | 2 |  | 6 |  | 4 |
|  | 2 |  | 4 |  | 2 |
|  | 4 |  | 2 |  | 2 |
|  | 2 |  | 4 |  | 2 |
|  | 2 |  | 2 | | |

# ANEXO IV: PLANOS

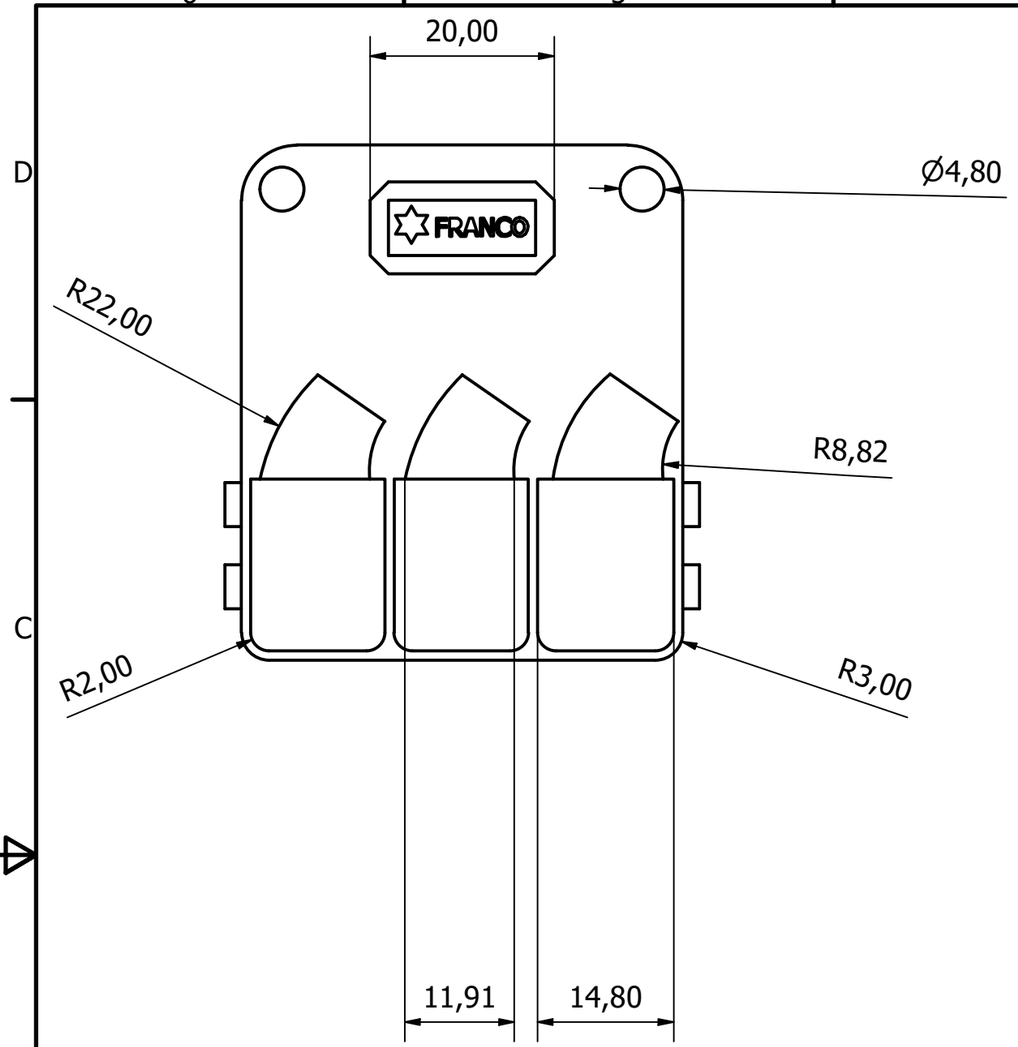
En el presente anexo se adjuntan los planos necesarios para la fabricación del equipamiento de la figura del alférez alumno, siendo estas las piezas correspondientes al chaleco portaplacas, el fusil de asalto y por último la cabeza y la teresiana. Las medidas están expresadas en milímetros (mm):

| Registro | Pieza |
|---|---|
| 1 | Placa frontal |
| 2 | Placa trasera |
| 3 | Banda lateral |
| 4 | Tirante superior |
| 5 | Cabeza |
| 6 | Teresiana |
| 7 | Fusil de asalto |
| 8 | Pieza macho |
| 9 | Pieza hembra |

| LISTA DE PIEZAS | | |
|---|---|---|
| ELEMENTO | CTDAD | Nº DE PIEZA |
| 1 | 1 | Placa delantera |
| 2 | 1 | Banda lateral |
| 3 | 1 | Banda lateral con radio |
| 4 | 1 | Placa Trasera |
| 5 | 2 | Tirante superior |

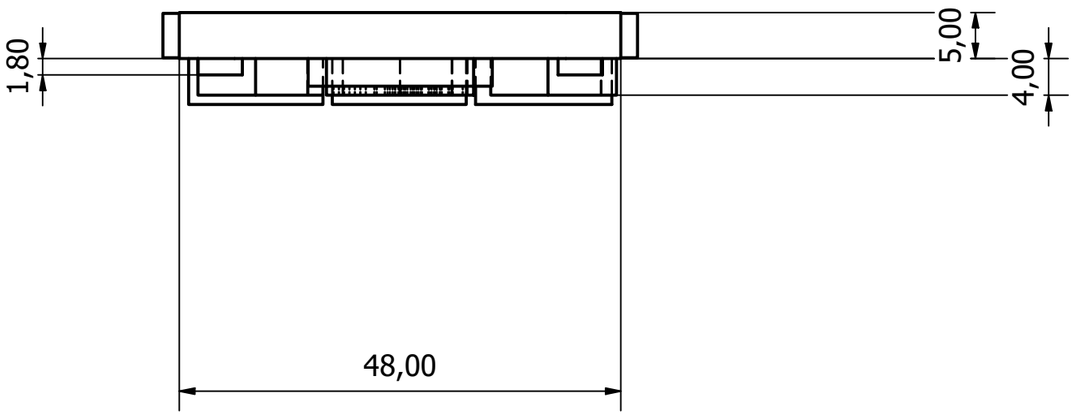


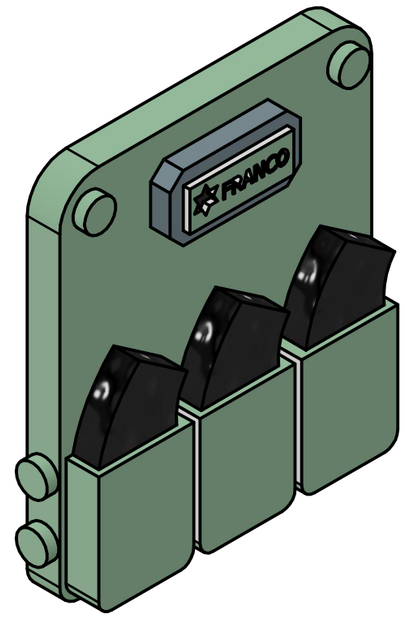

| | | | |
|---|---|---|---|
| Diseño y modelado virtual mediante piezas LEGO® de la figura de un alférez alumno | | | Fecha 05/07/2026 |
| Diseñado por: David Rodríguez Franco | Ensamblaje Chaleco | | |
| | CONJUNTO | Material ABS/PLA | Escala 1:1 |



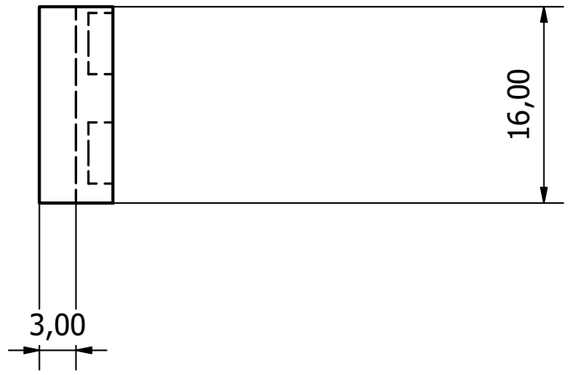


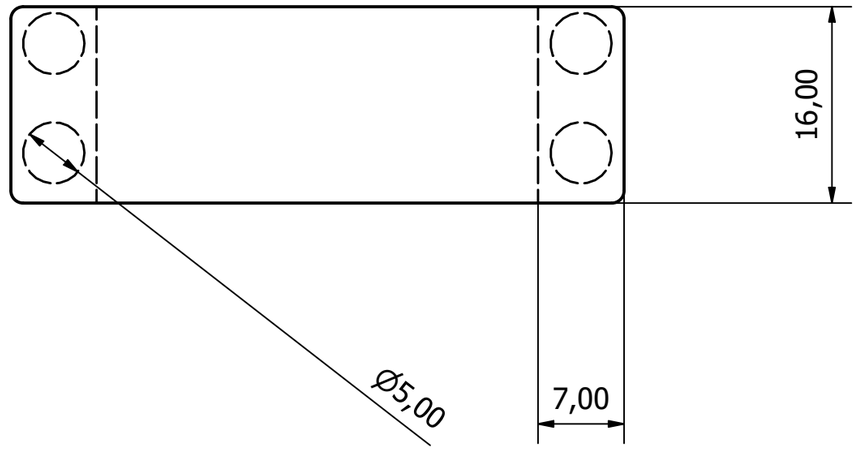


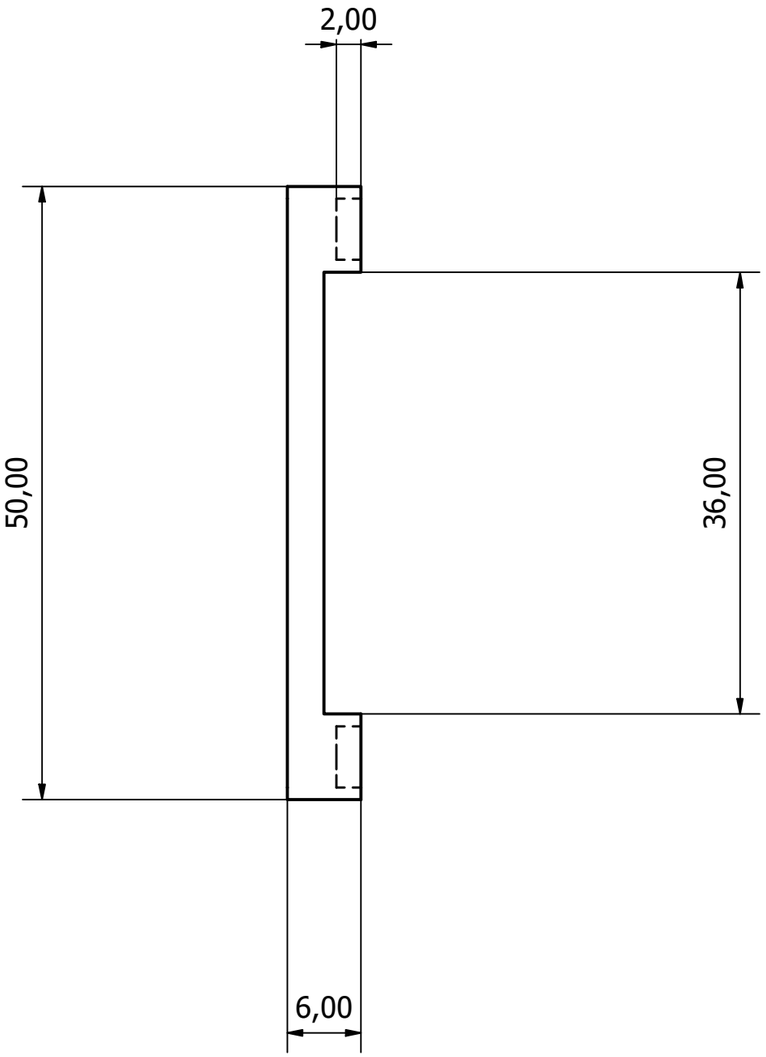


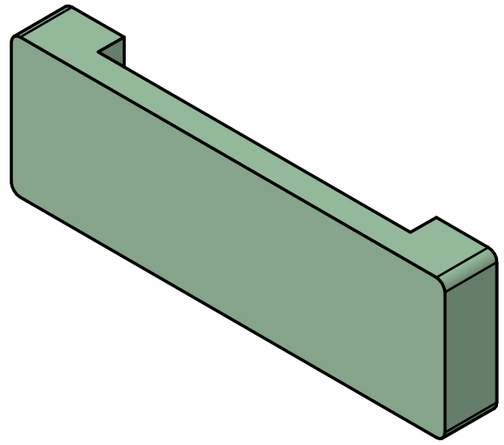



| | | |
|---|---|---|
| Diseño y modelado virtual mediante piezas LEGO® de la figura de un alférez alumno | | Fecha 06/07/2026 |
| Diseñado por: David Rodríguez Franco | Placa delantera | |
| | PIEZA 1 | Material ABS/PLA / Escala 3:2 |

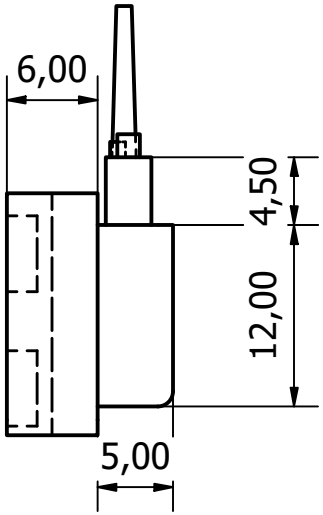


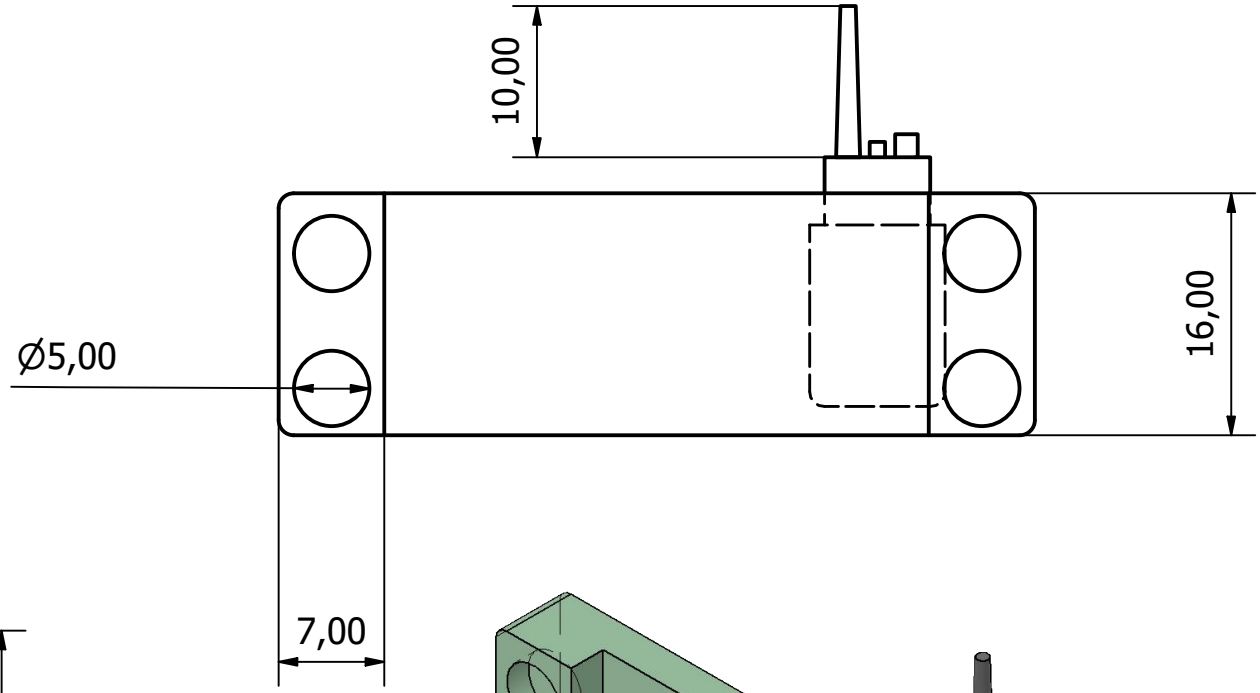



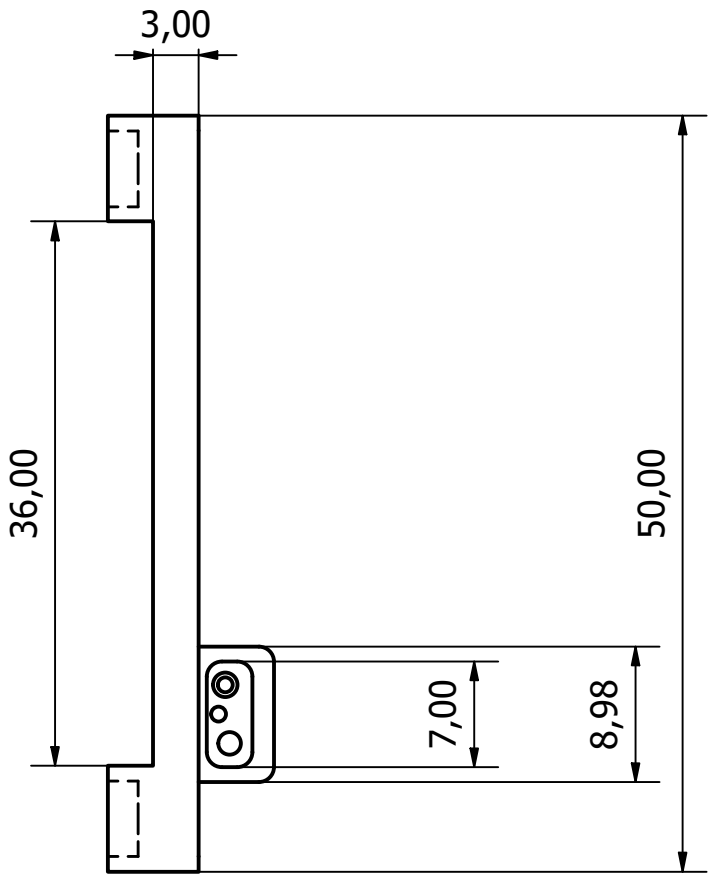



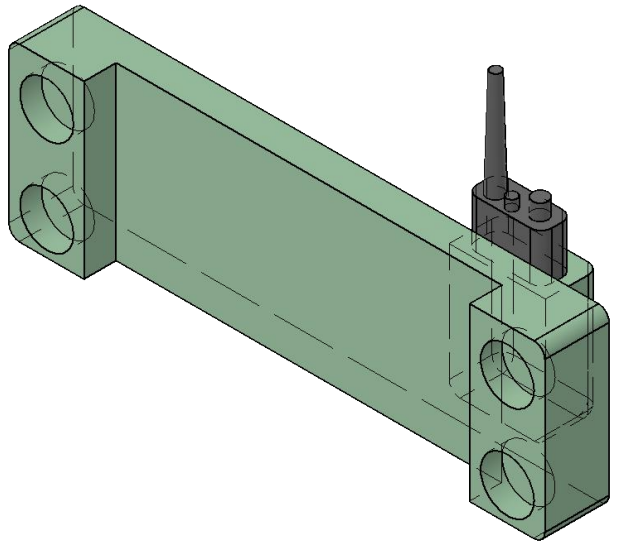



| | | |
|---|---|---|
| Diseño y modelado virtual mediante piezas LEGO® de la figura de un alférez alumno | | Fecha 05/07/2026 |
| Diseñado por: David Rodríguez Franco | Banda Lateral | |
| | PIEZA 2 | Material: ABS/PLA — Escala: 2:1 |

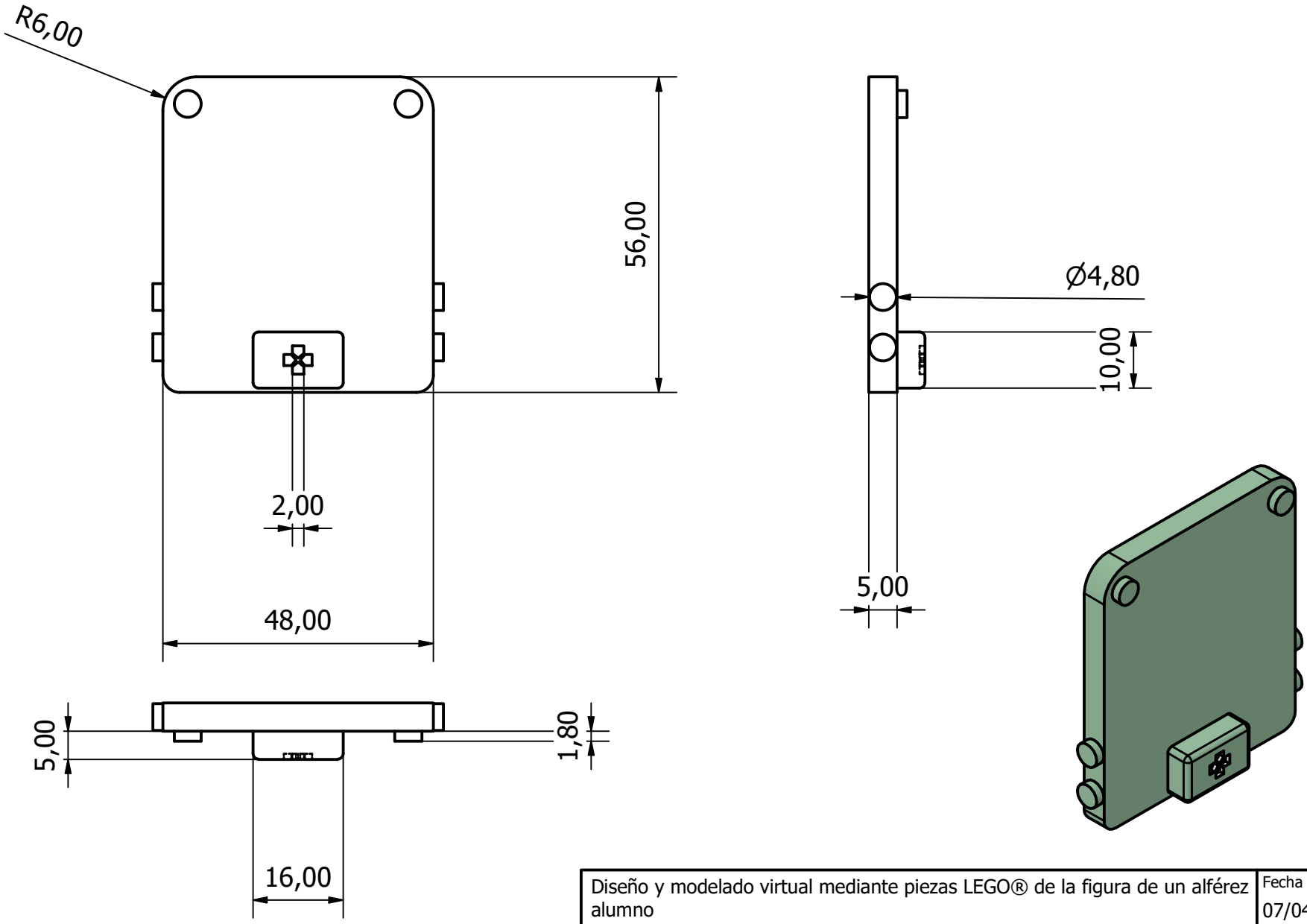


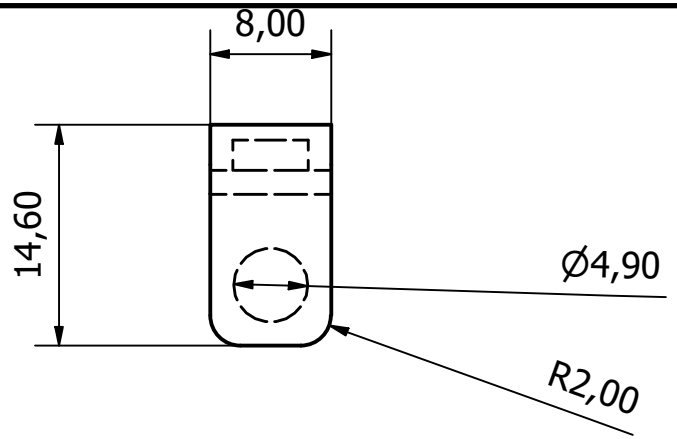



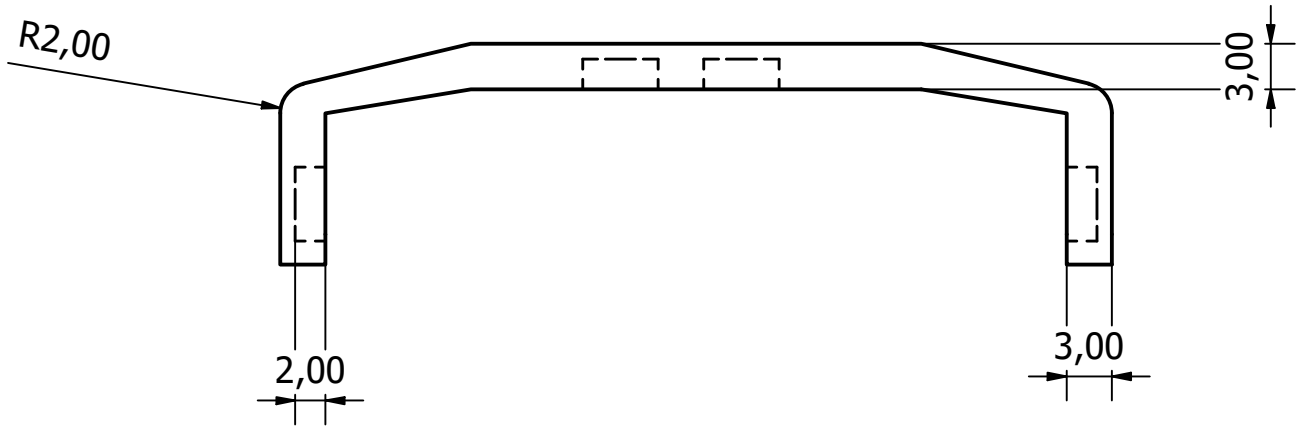



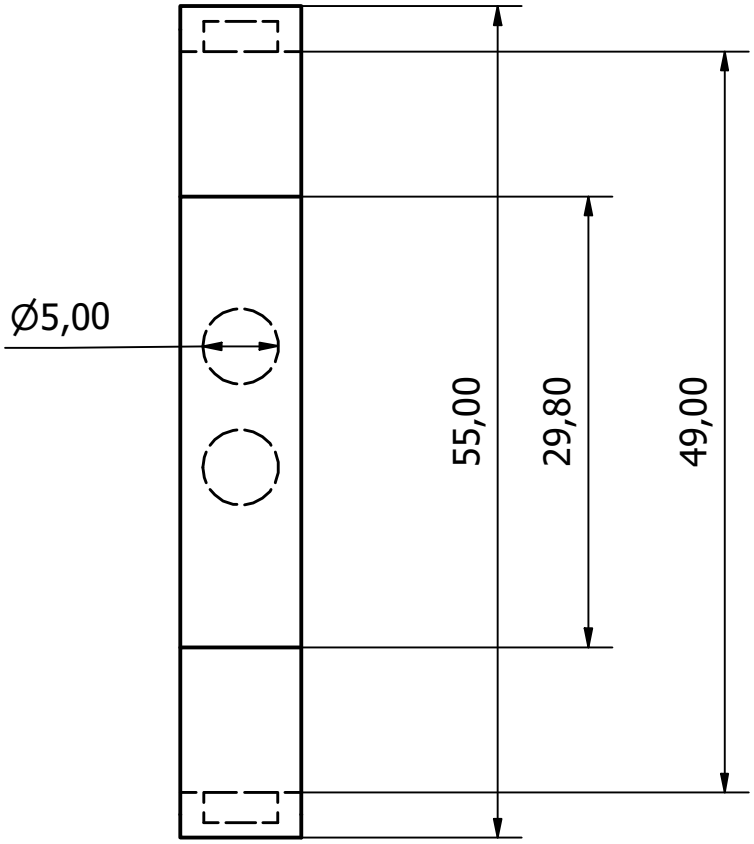
| | | | |
|---|---|---|---|
| Diseño y modelado virtual mediante piezas LEGO® de la figura de un alférez alumno | | Fecha 07/04/2026 | |
| Diseñado por: David Rodríguez Franco | Banda lateral con radio | | |
| | PIEZA 3 | Material: ABS/PLA | Escala: 1:1 |

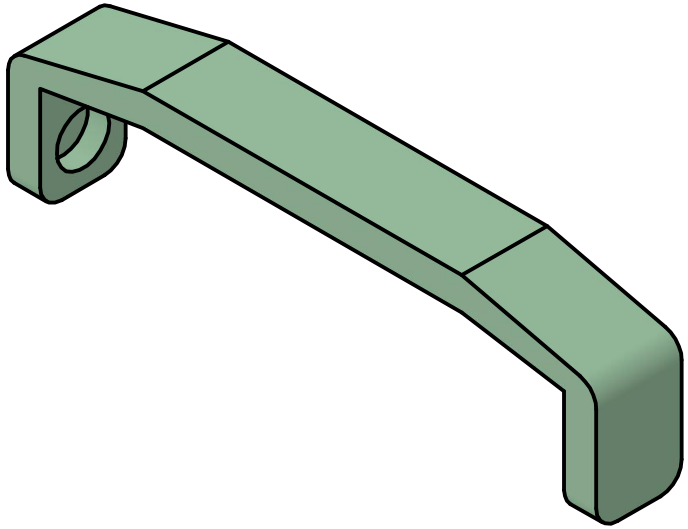



| | | |
|---|---|---|
| Diseño y modelado virtual mediante piezas LEGO® de la figura de un alférez alumno | | Fecha 07/04/2026 |
| Diseñado por: David Rodríguez Franco | Placa trasera | |
| | PIEZA 5 | Material: ABS/PLA — Escala: 1:1 |

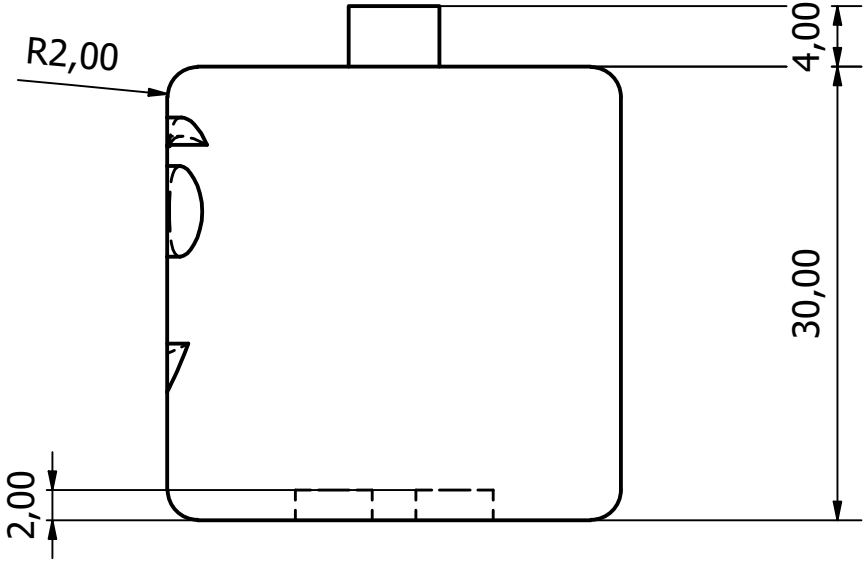


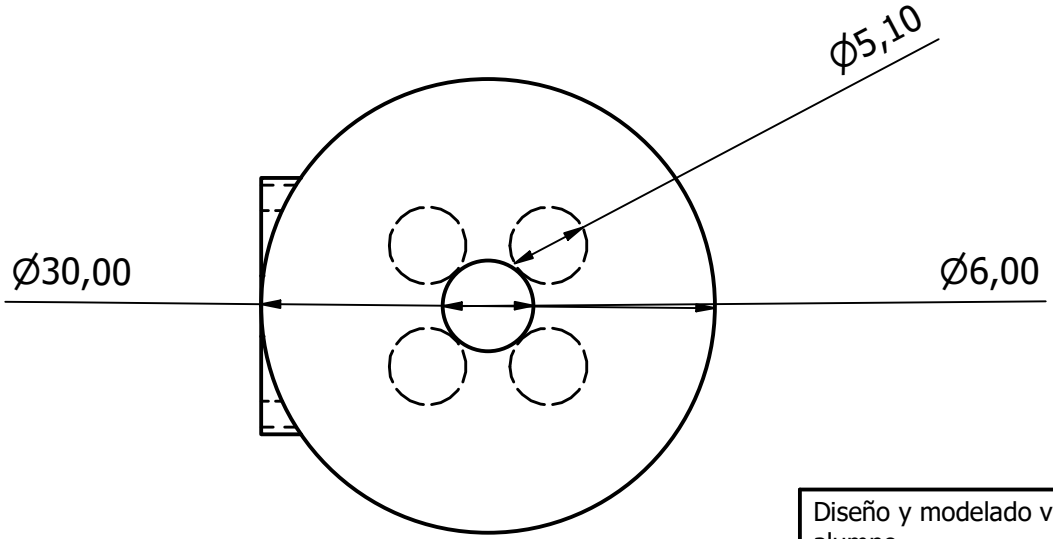



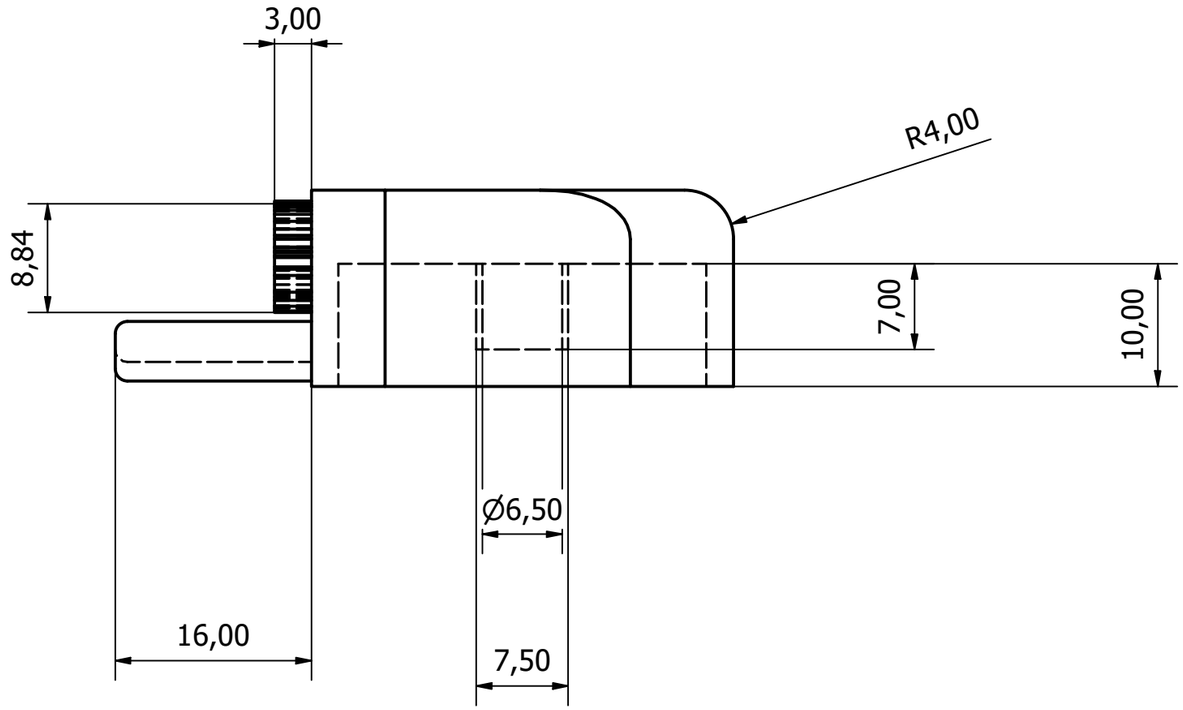
| | | |
|---|---|---|
| Diseño y modelado virtual mediante piezas LEGO® de la figura de un alférez alumno | | Fecha 07/04/2026 |
| Diseñado por: David Rodríguez Franco | Tirante superior | |
| | PIEZA 5 | Material: ABS/PLA — Escala: 2:1 |

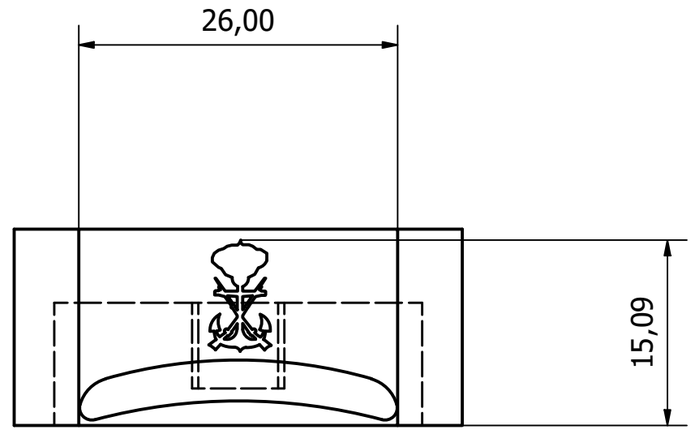


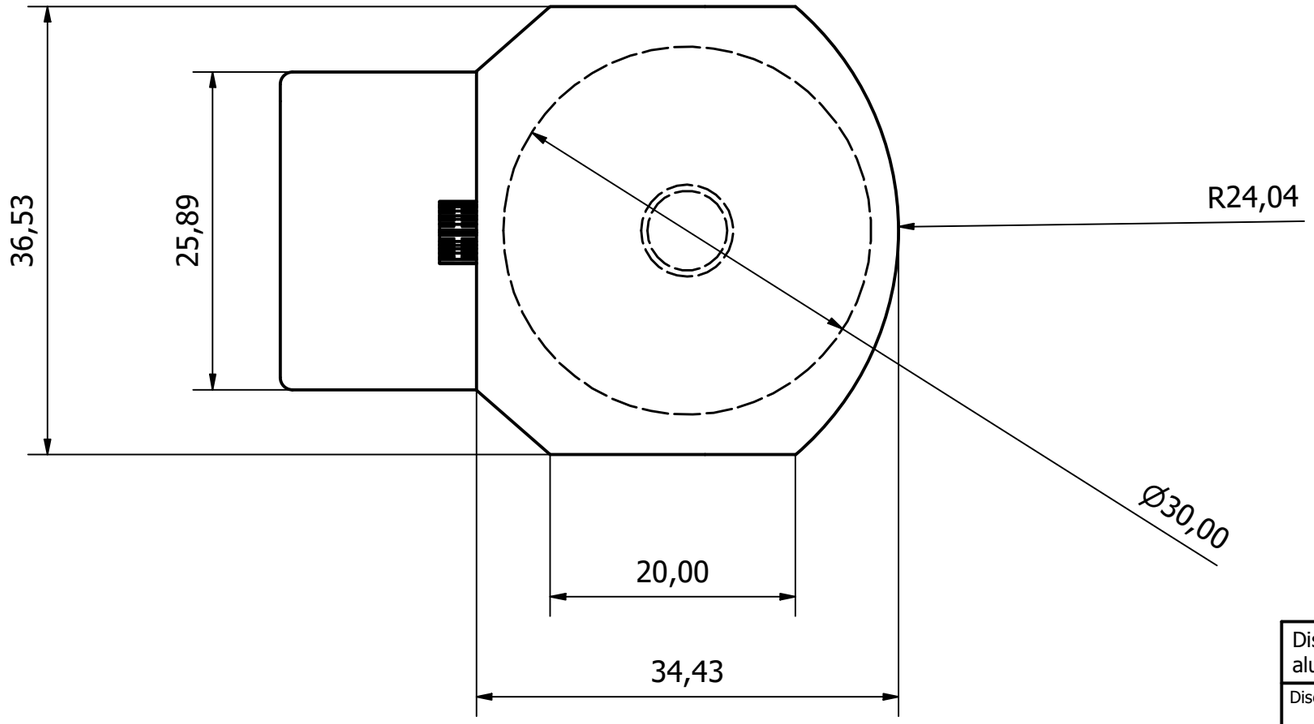


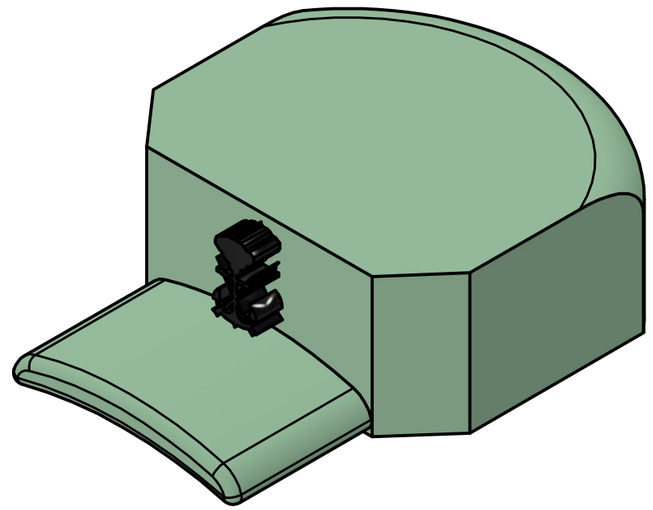




| | | |
|---|---|---|
| Diseño y modelado virtual mediante piezas LEGO® de la figura de un alférez alumno | | Fecha 07/04/2026 |
| Diseñado por: David Rodríguez Franco | Cabeza de LEGO | |
| | PIEZA 6 | Material: ABS/PLA |
| | | Escala: 2:1 |

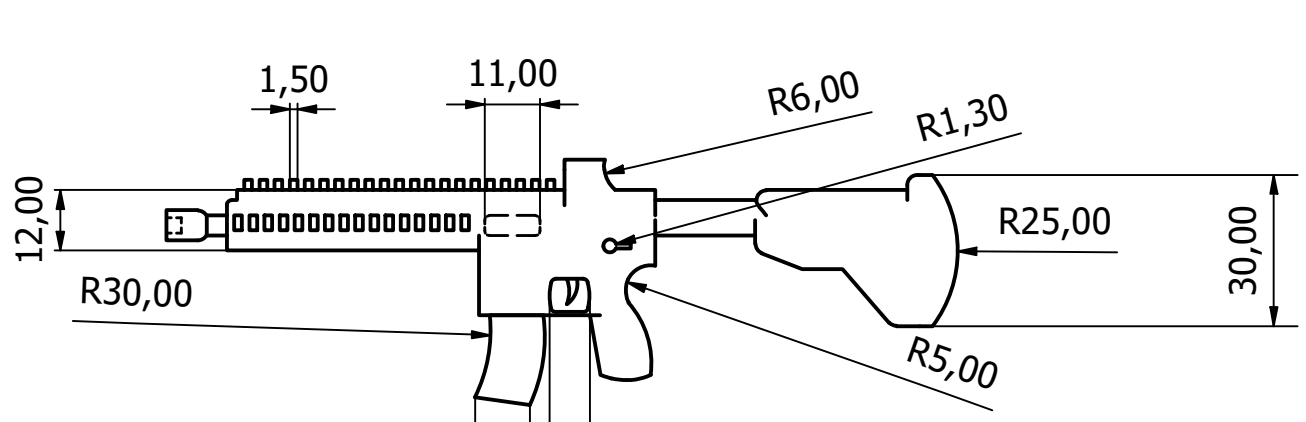


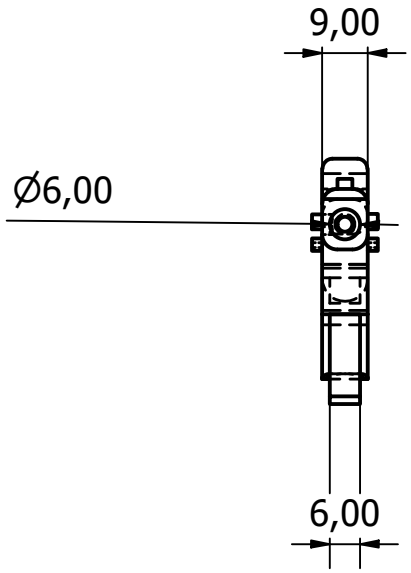



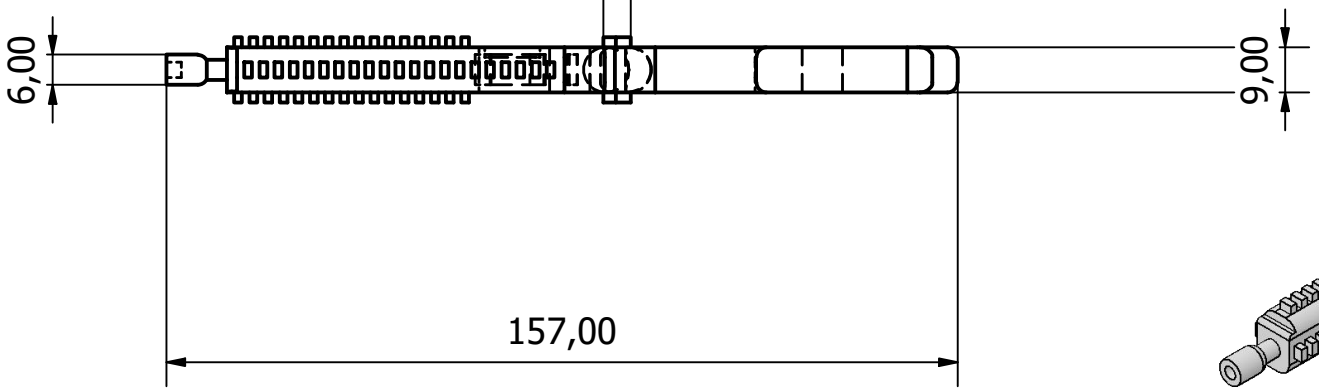



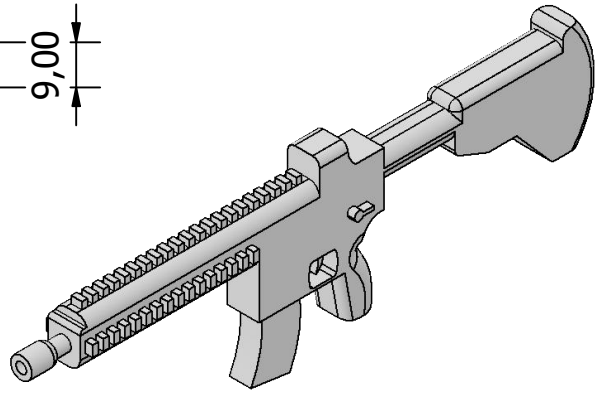



| | | |
|---|---|---|
| Diseño y modelado virtual mediante piezas LEGO® de la figura de un alférez alumno | | Fecha 05/07/2026 |
| Diseñado por: David Rodríguez Franco | Teresiana | |
| | PIEZA 7 | Material: ABS/PLA — Escala: 2:1 |

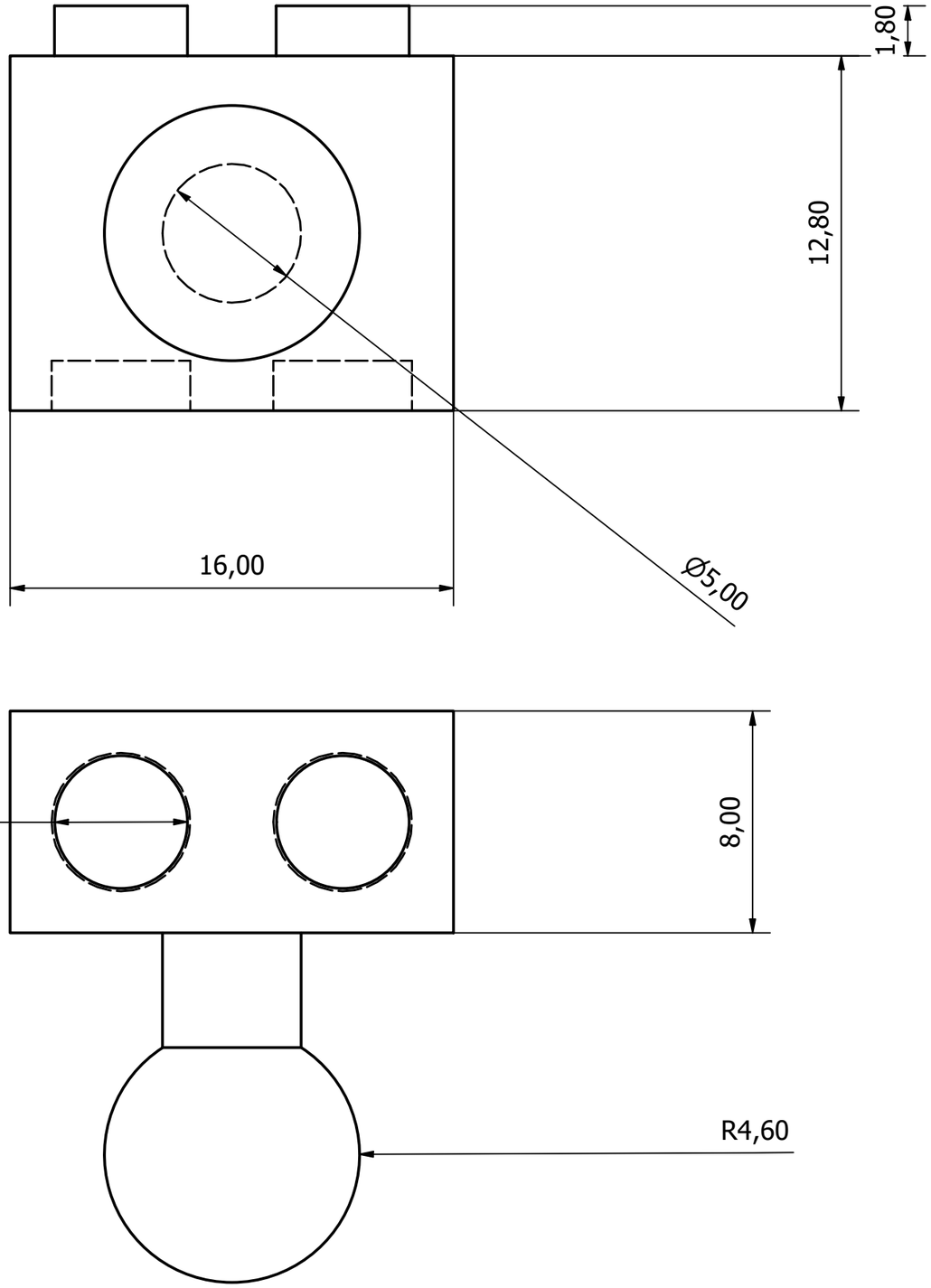


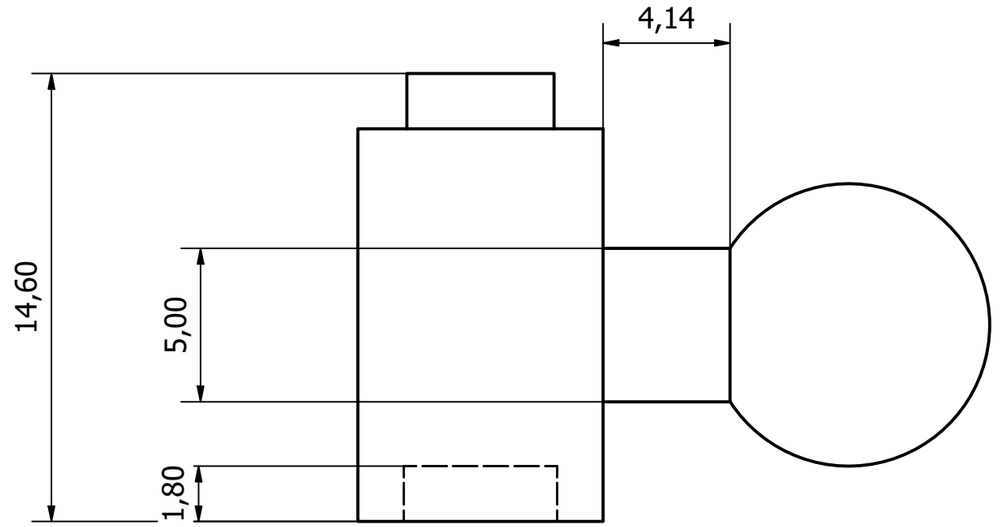



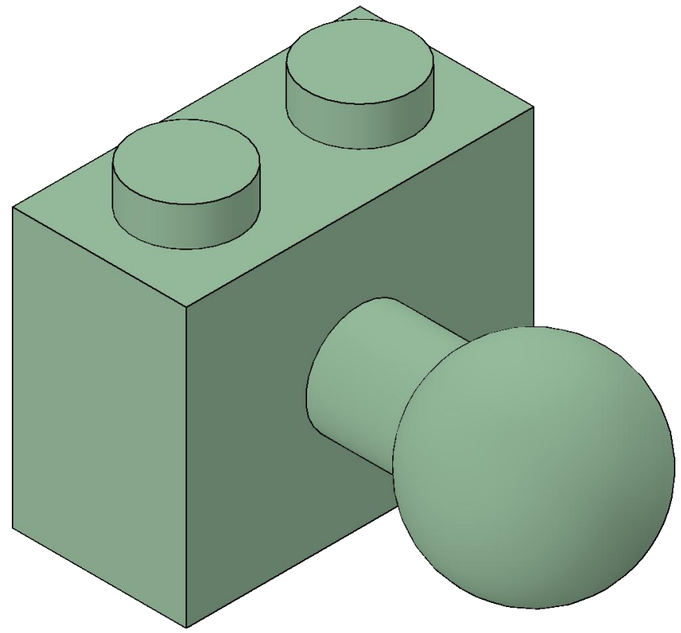



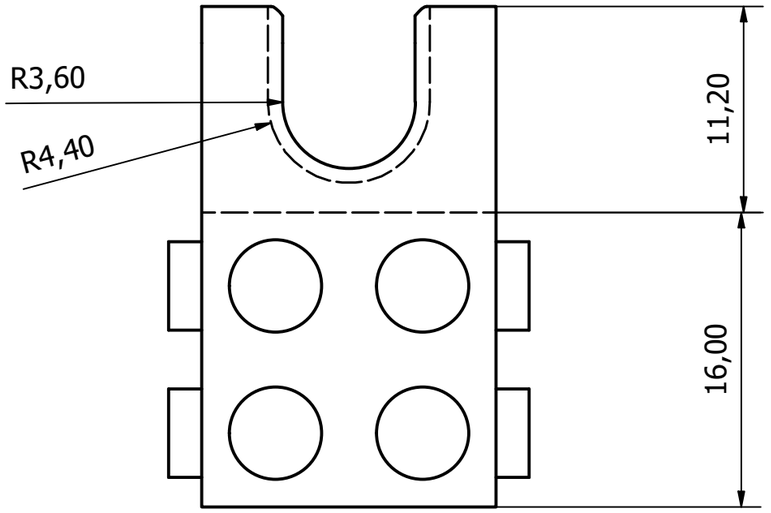
| | | | |
|---|---|---|---|
| Diseño y modelado virtual mediante piezas LEGO® de la figura de un alférez alumno | | | Fecha 07/04/2026 |
| Diseñado por: David Rodríguez Franco | Fusil de asalto | | |
| | PIEZA 8 | Material: ABS/PLA | Escala: 2:3 |

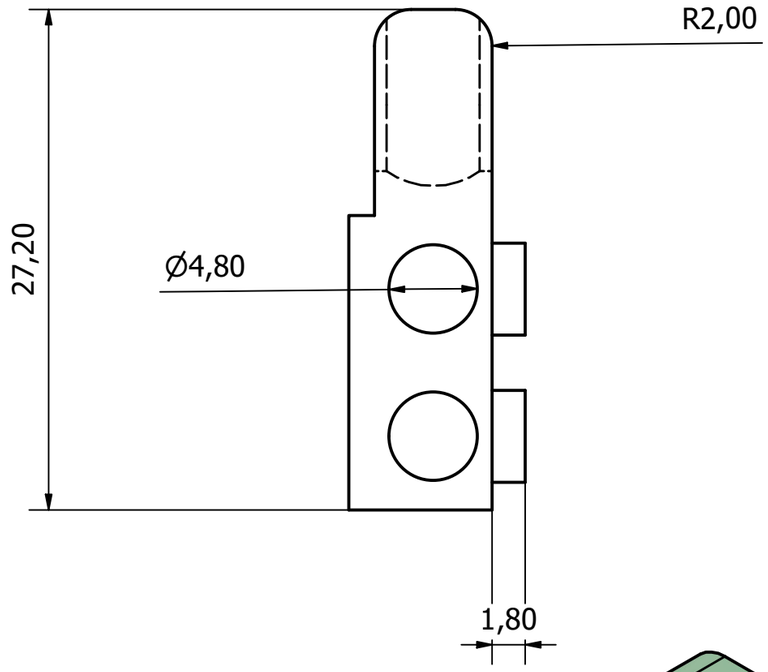


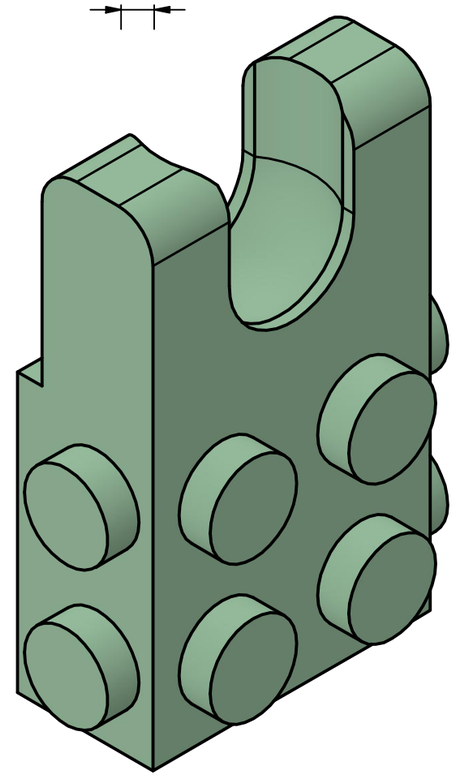



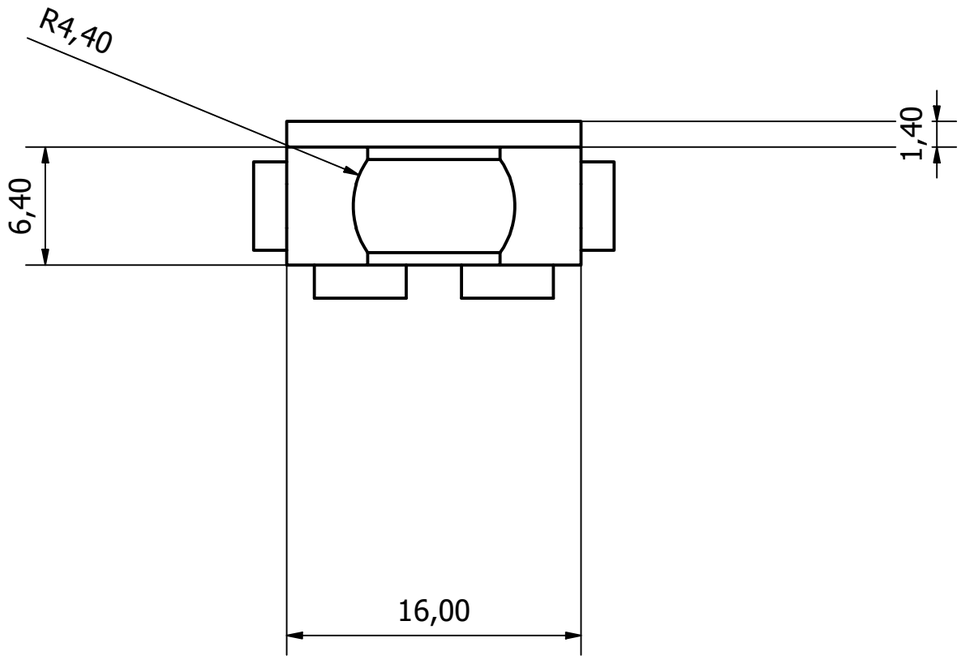



| | | |
|---|---|---|
| Diseño y modelado virtual mediante piezas LEGO® de la figura de un alférez alumno | | Fecha 05/07/2026 |
| Diseñado por: David Rodríguez Franco | Pieza macho de la articulación | |
| | PIEZA 9 | Material ABS/PLA — Escala 5:1 |



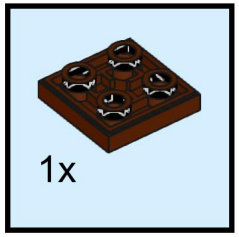



| | | |
|---|---|---|
| Diseño y modelado virtual mediante piezas LEGO® de la figura de un alférez alumno | | Fecha 05/07/2026 |
| Diseñado por: David Rodríguez Franco | Pieza hembra de la articulación | |
| | PIEZA 10 | Material ABS/PLA / Escala 4:1 |

# ANEXO V: INSTRUCCIONES

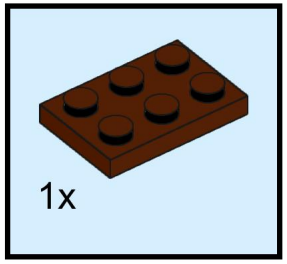
**En el presente anexo que adjunta el documento con las instrucciones para el montaje de la figura del alférez alumno de LEGO**

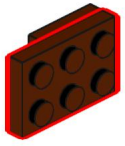
1



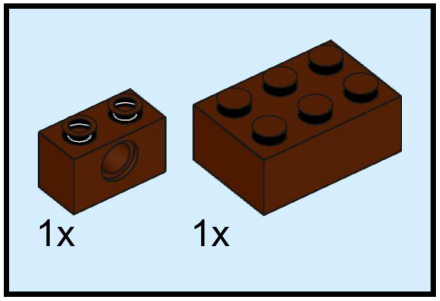


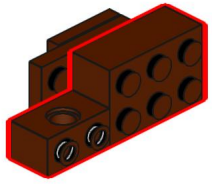

2



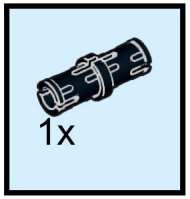



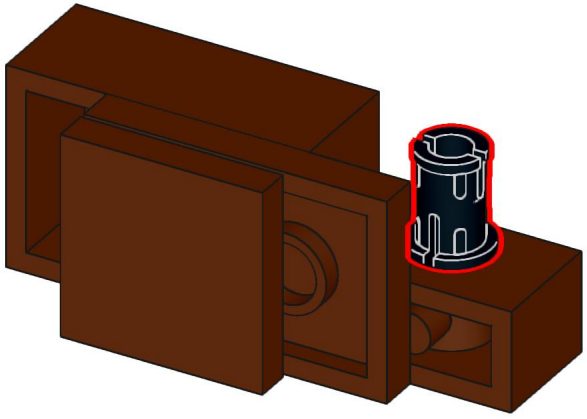
3



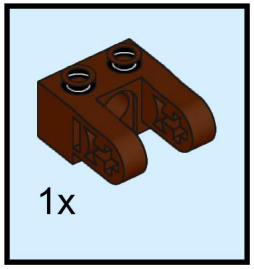



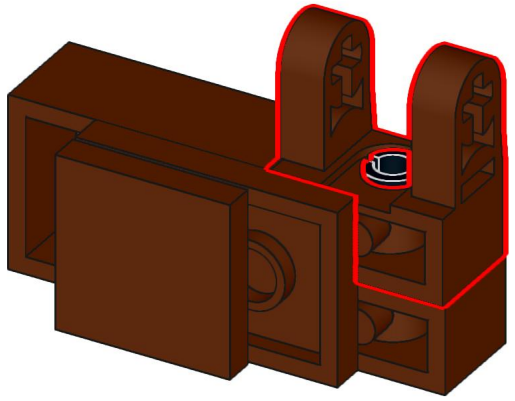
**4**



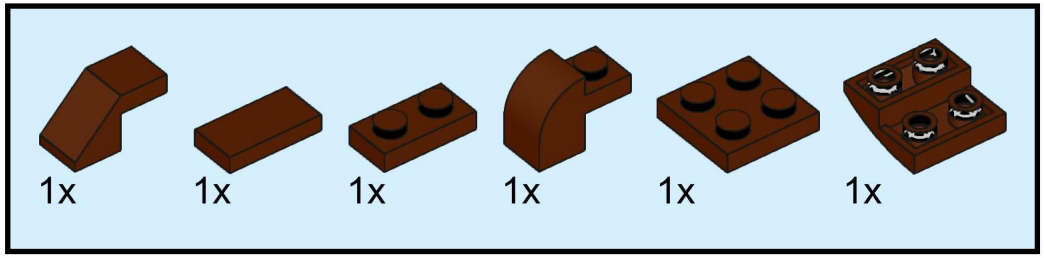



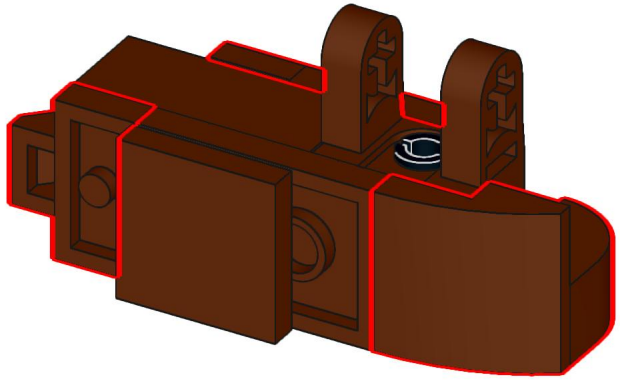
**5**



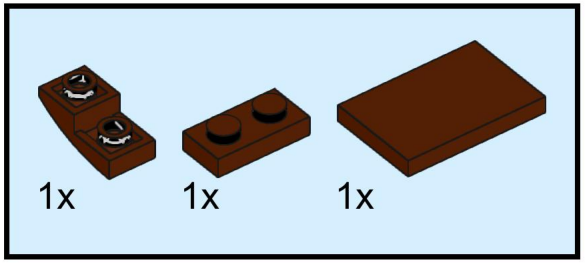



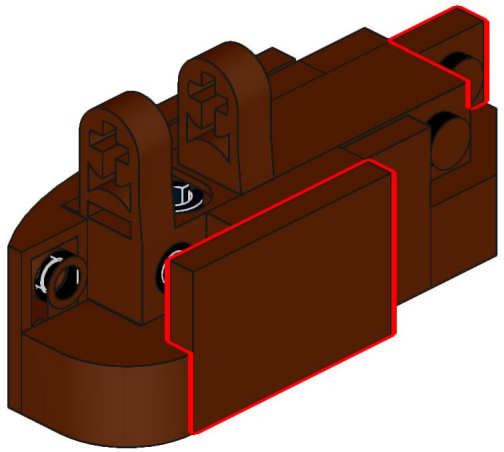
# 6



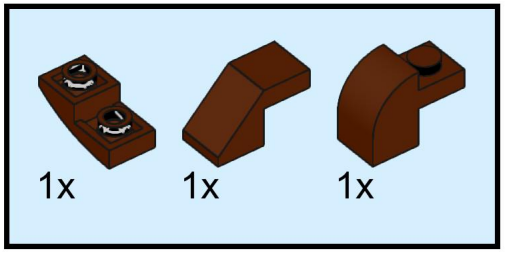



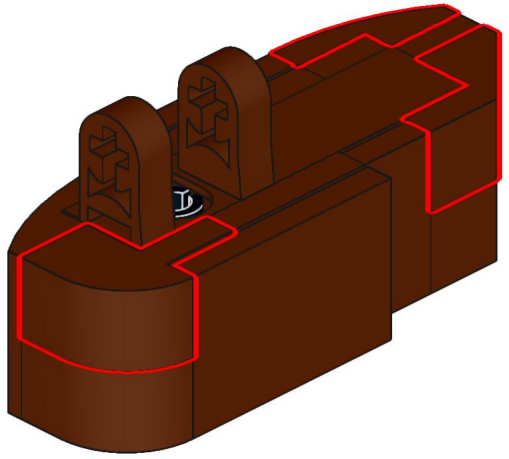
# 7



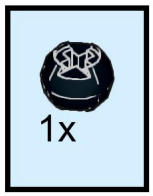



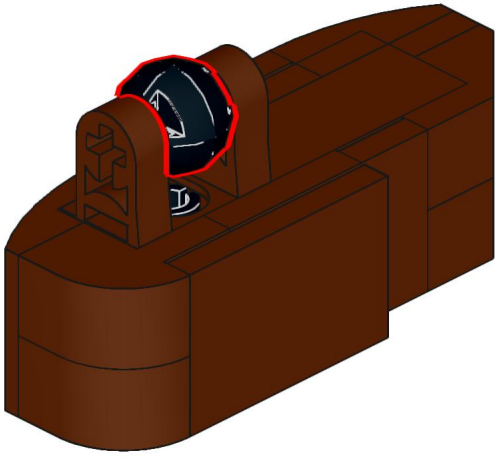
# 8



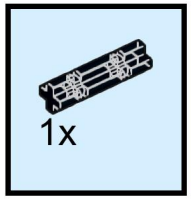



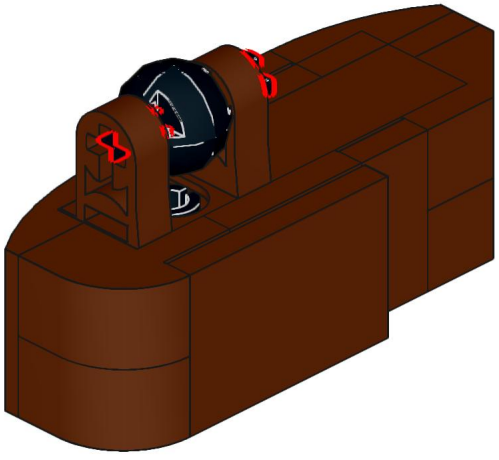
**9**



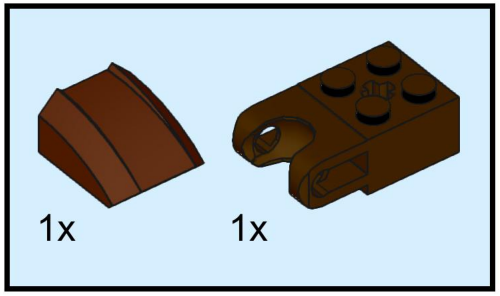



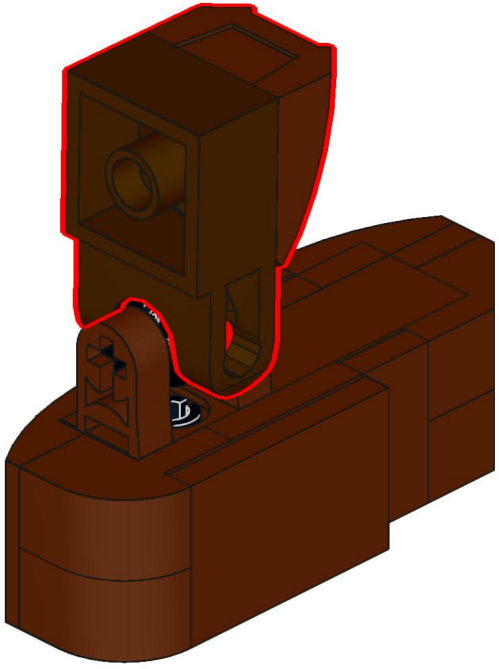
**10**



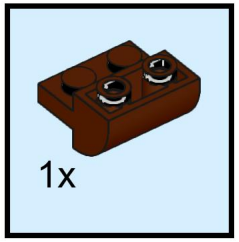



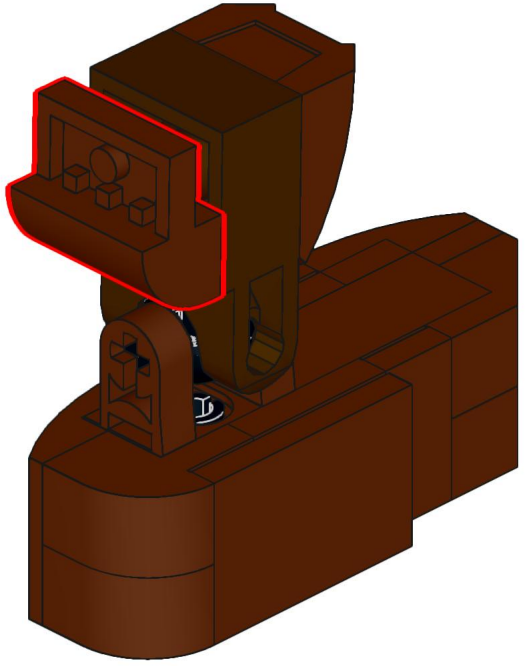
# 11



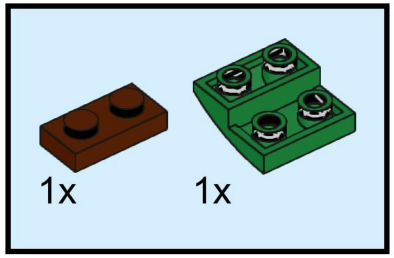



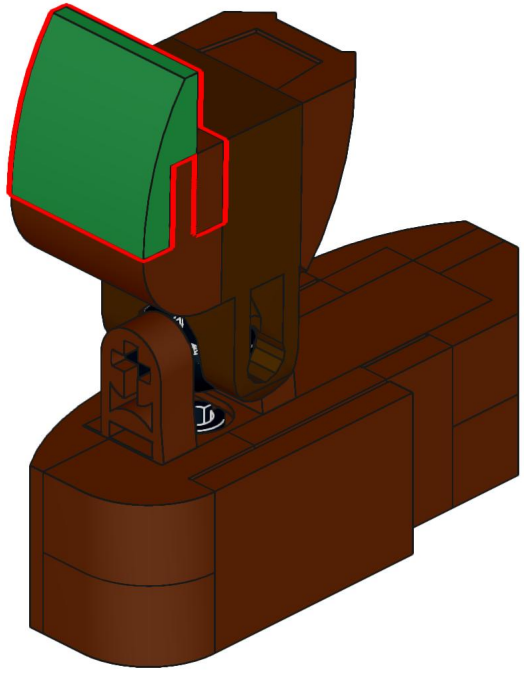
# 12



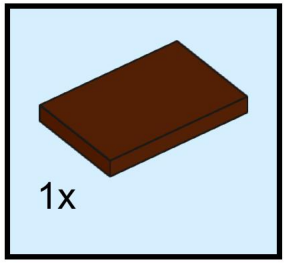



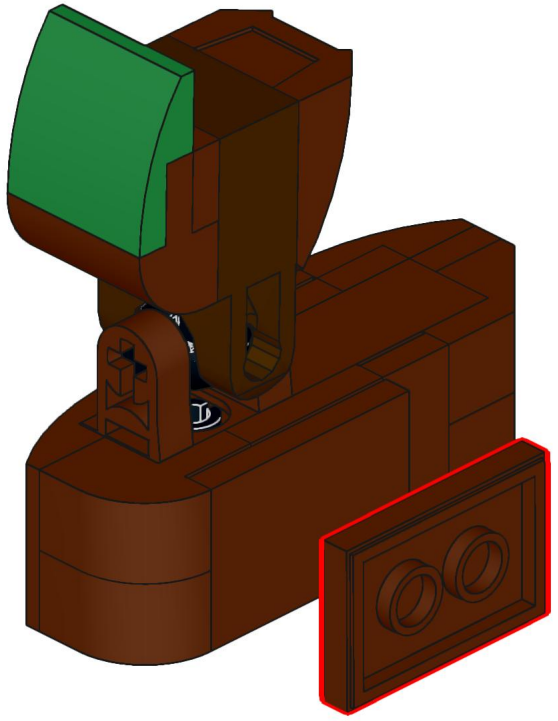
# 13



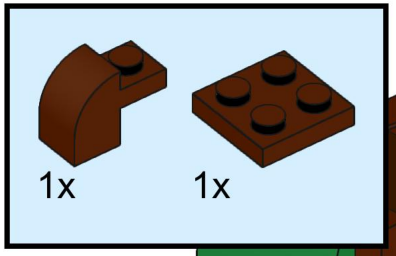



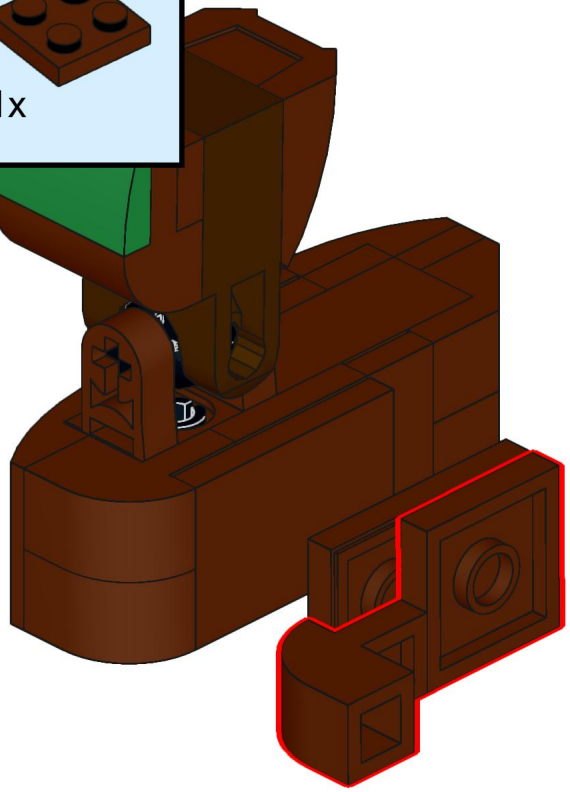
# 14



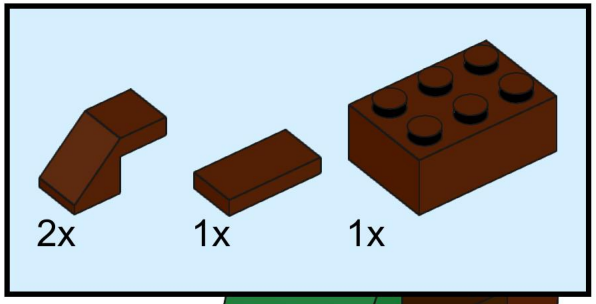



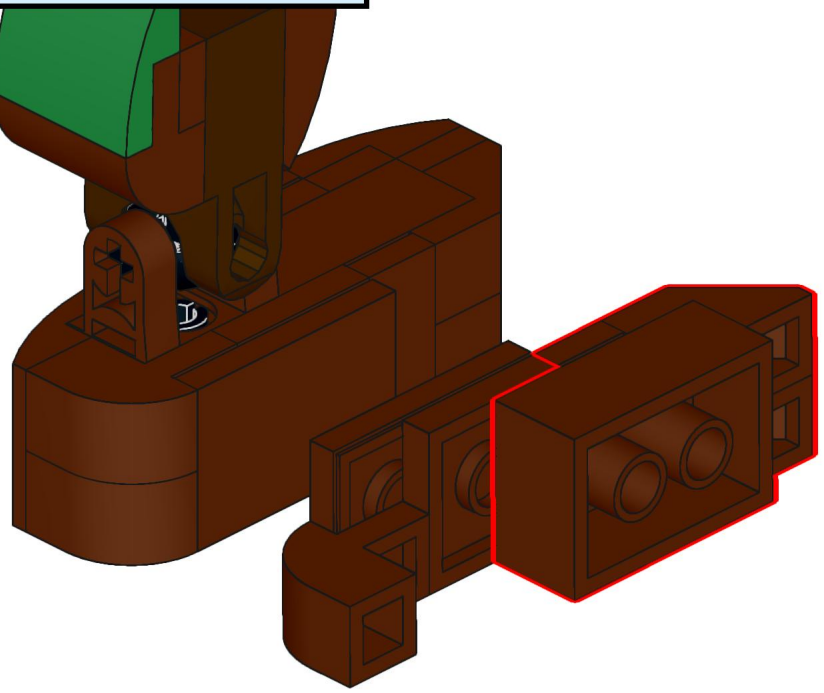
# 15



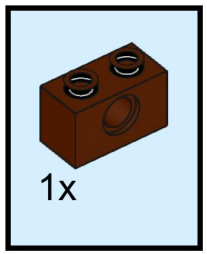



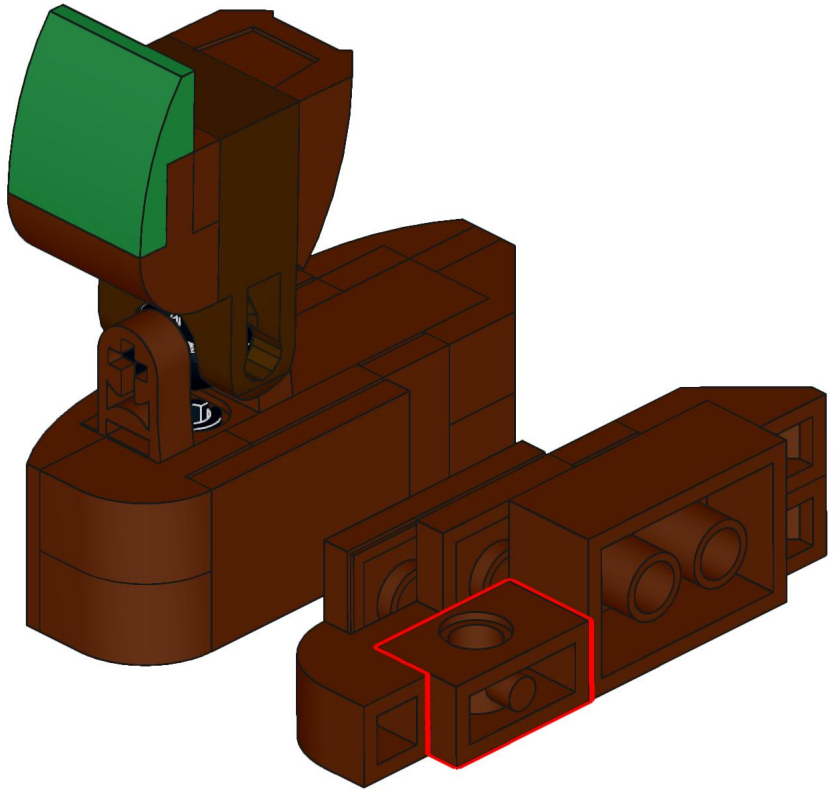
# 16



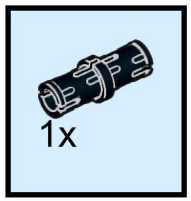



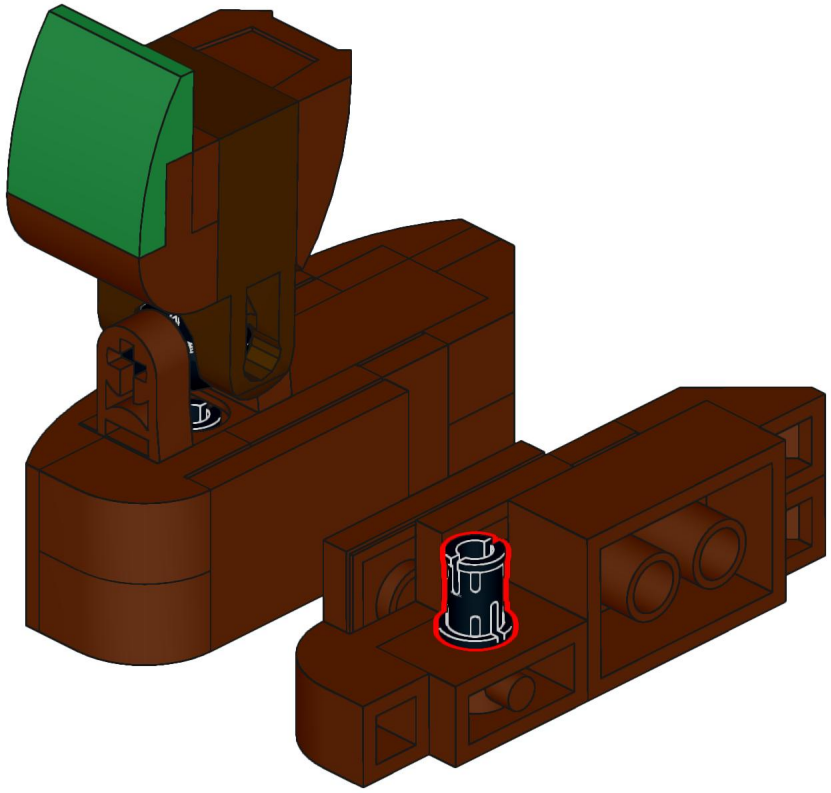
# 17



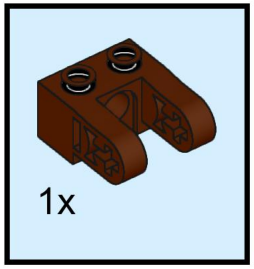



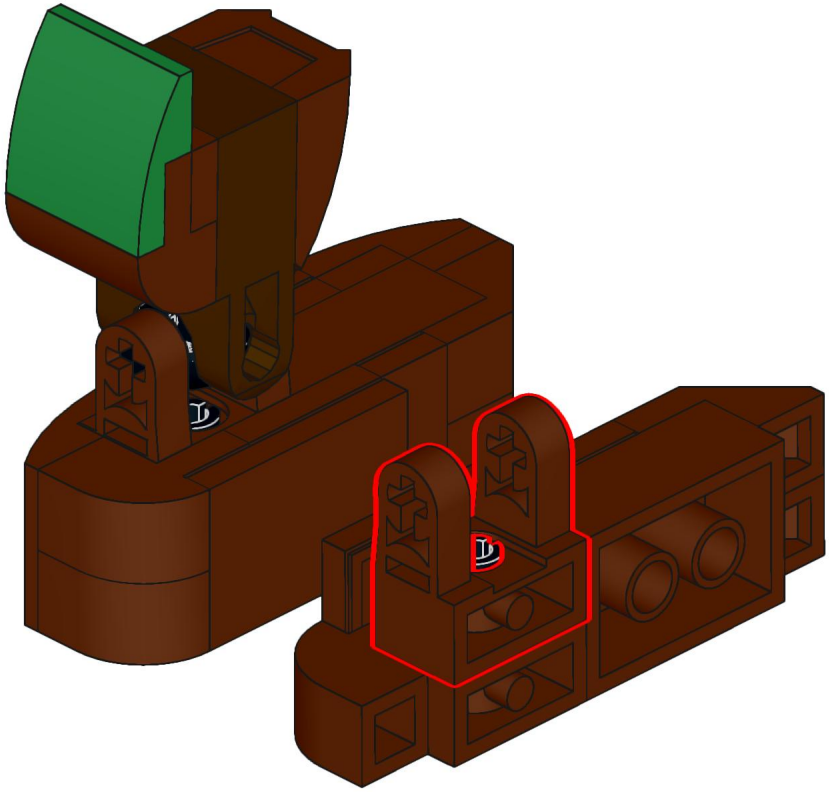
# 18



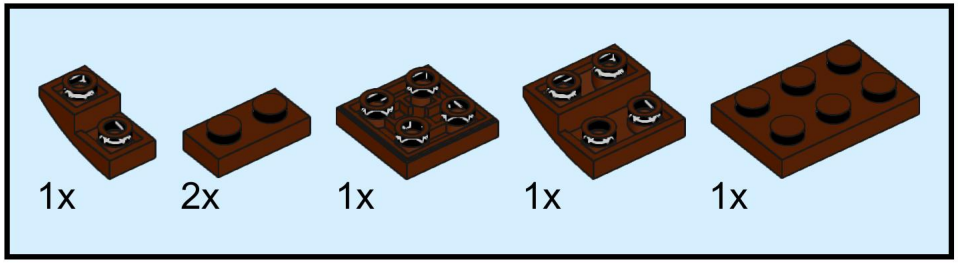



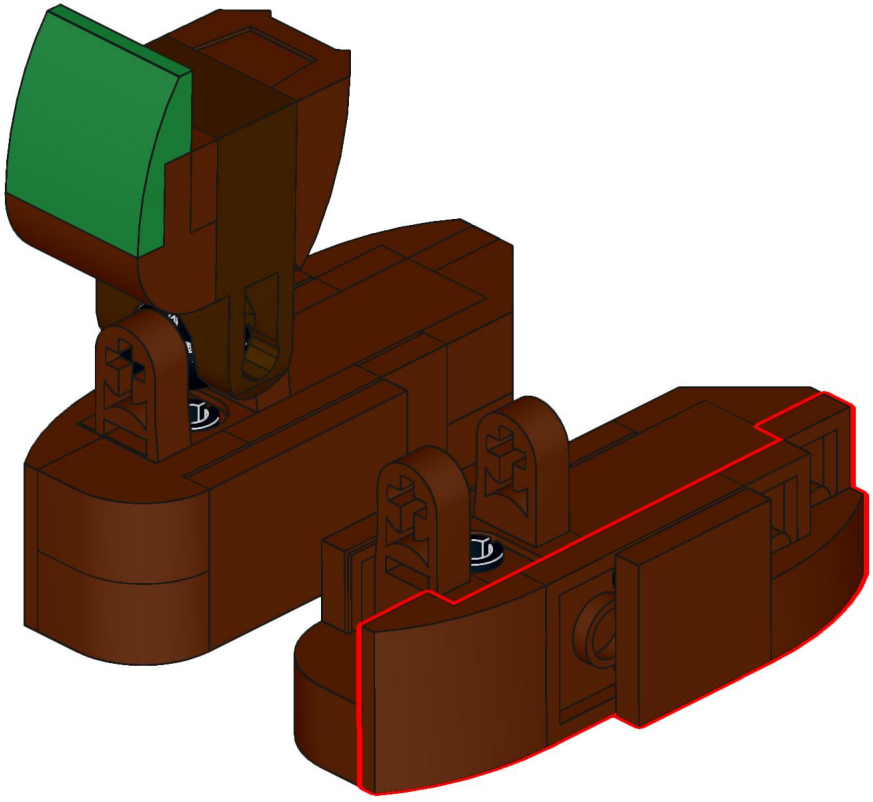
# 19



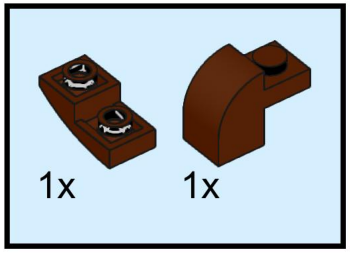



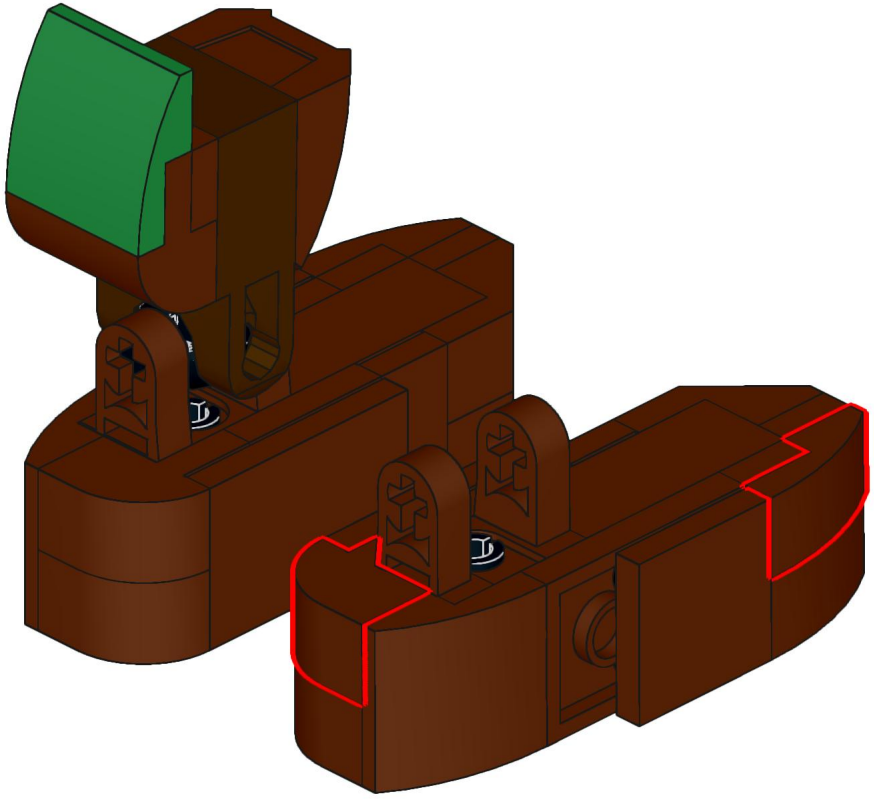
# 20



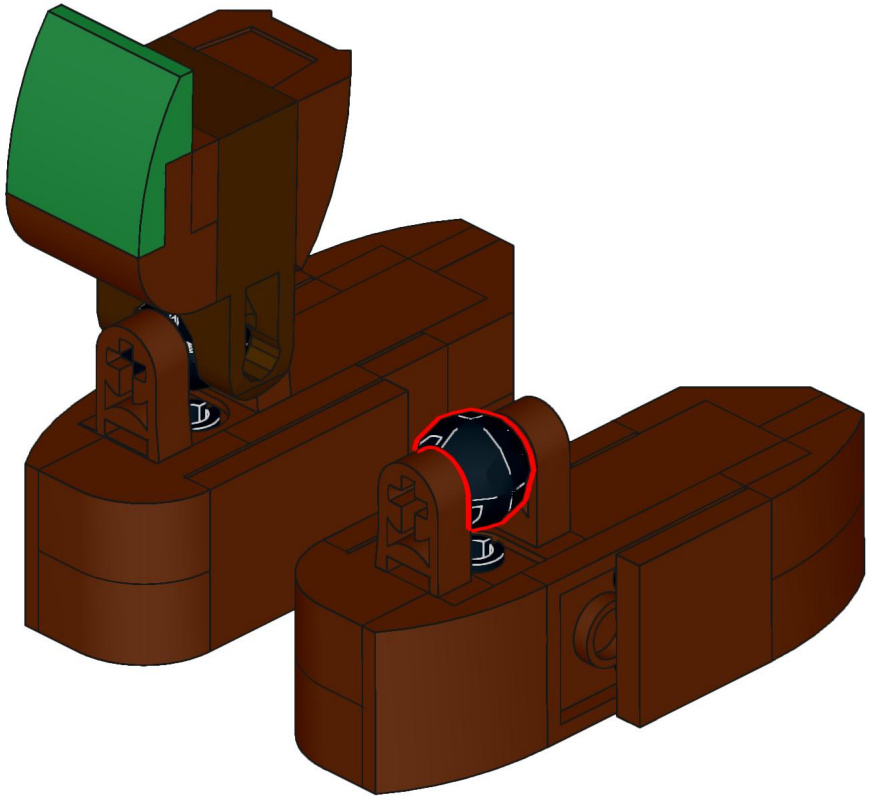
# 21



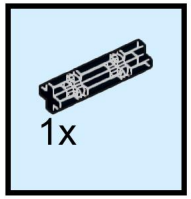



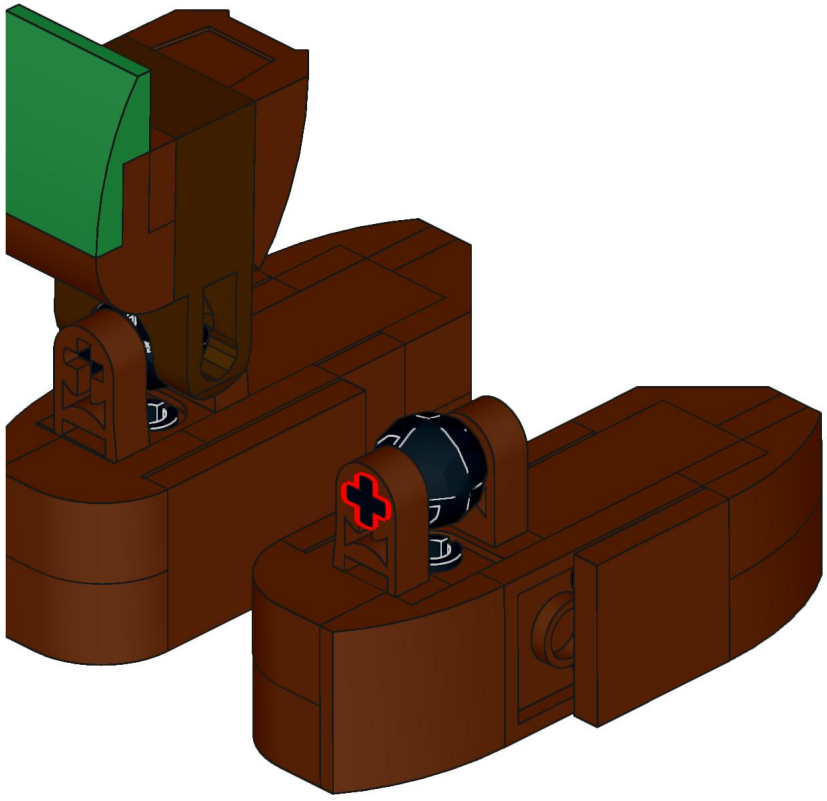
# 22



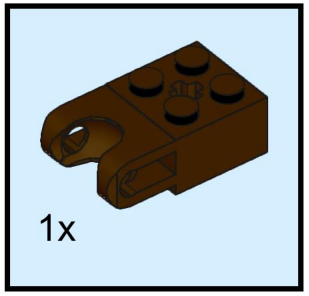



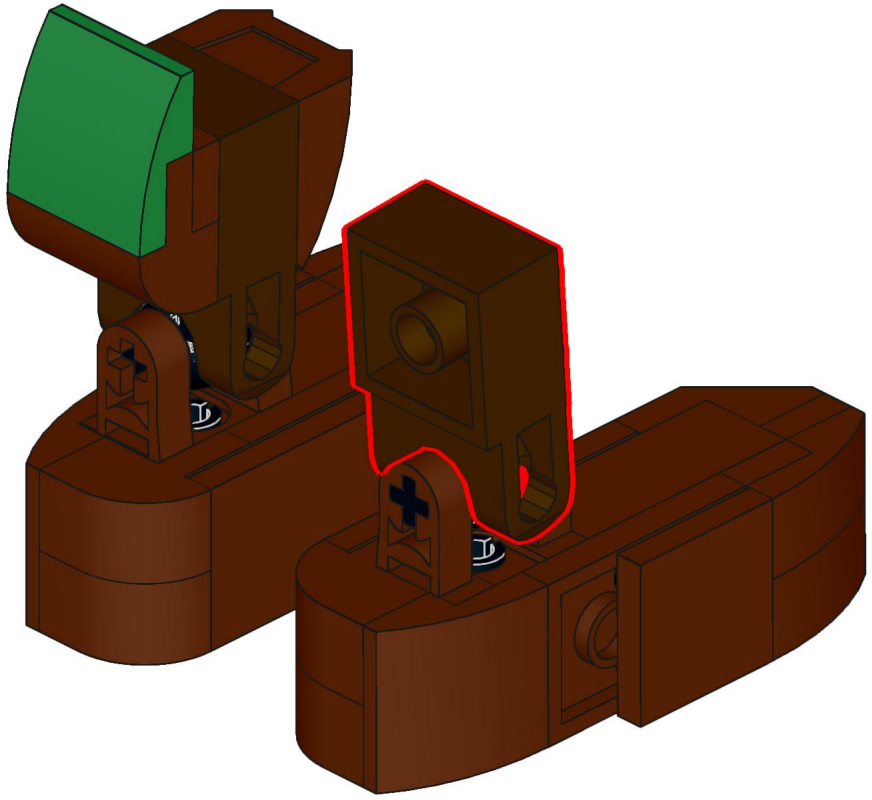
# 23



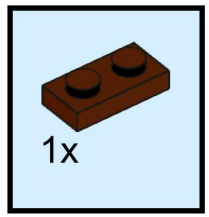



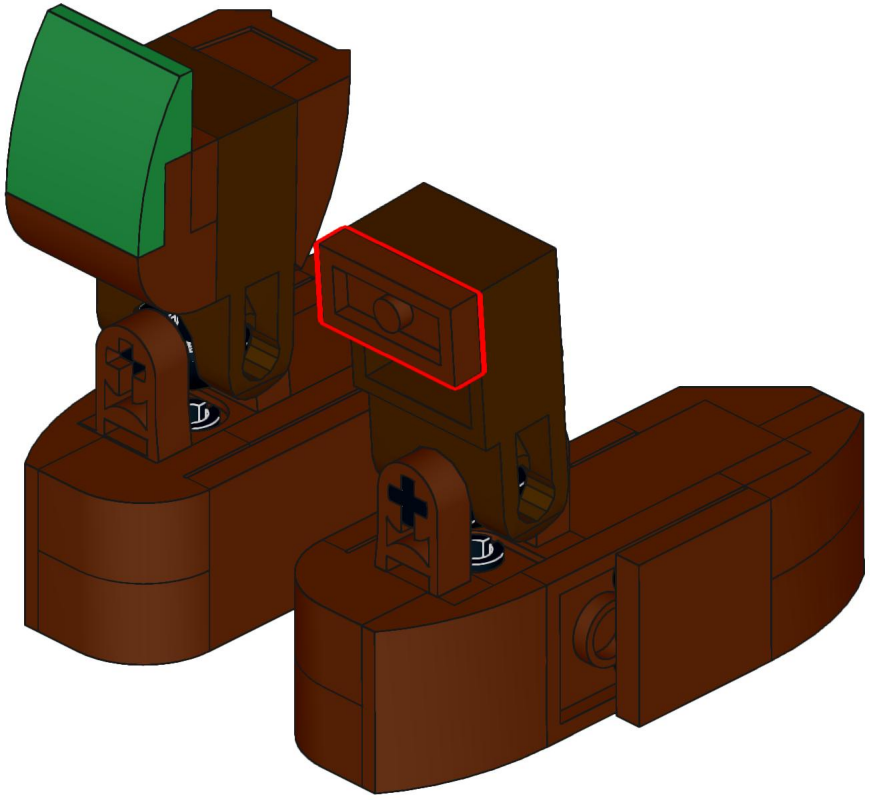
# 24



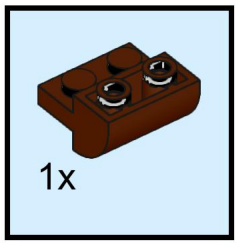



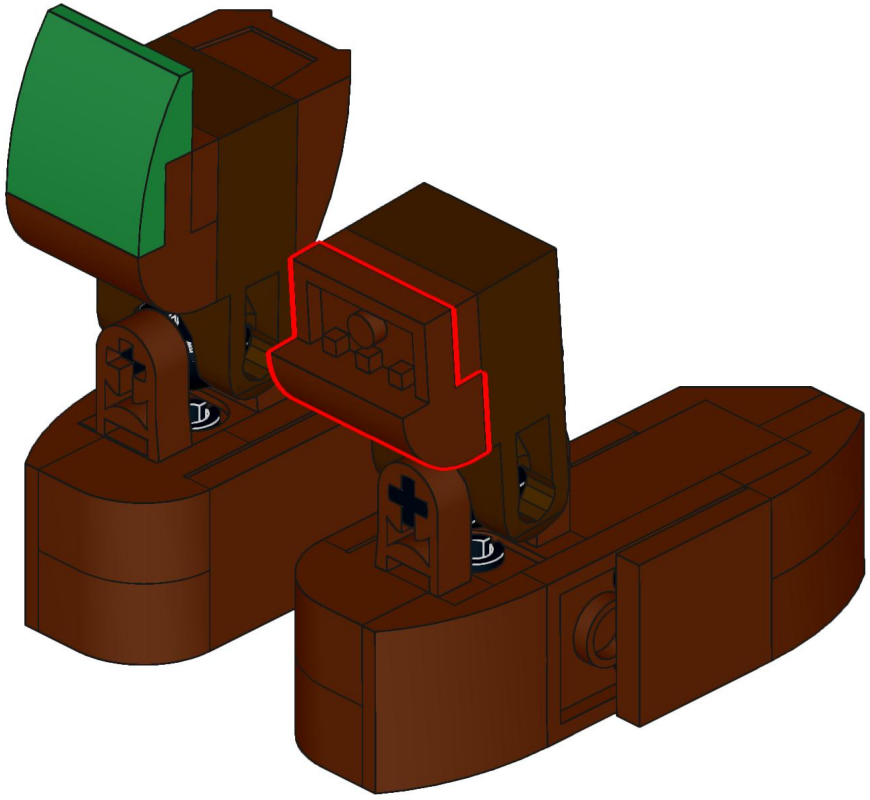
# 25



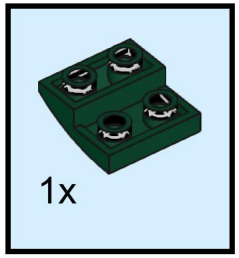



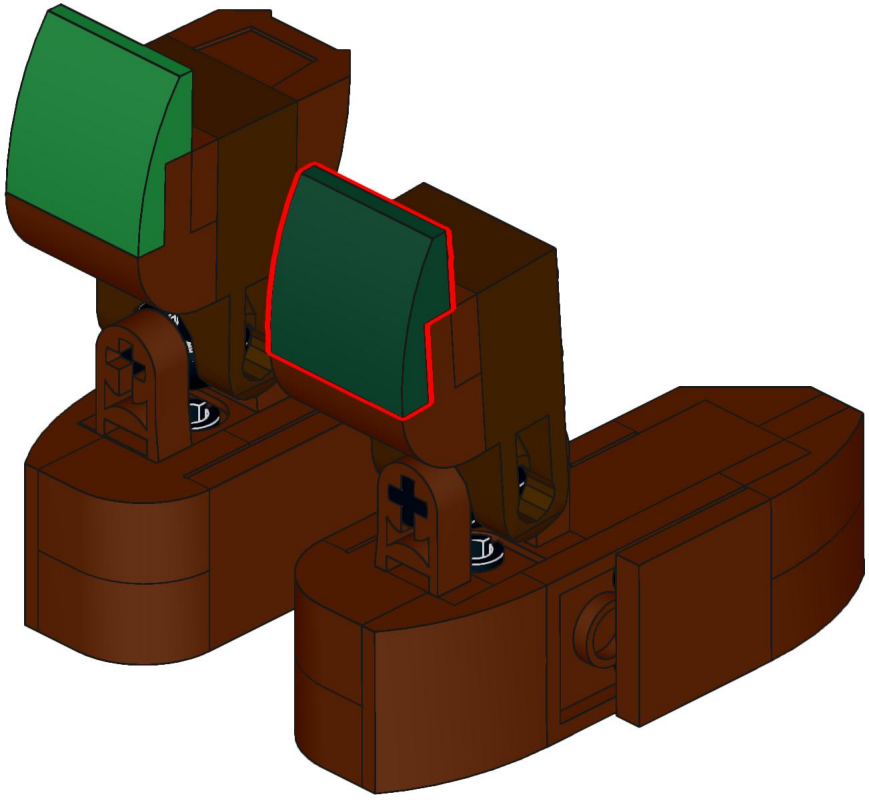
# 26



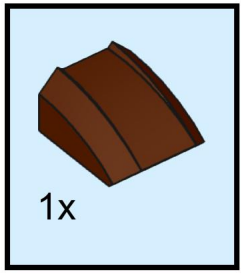



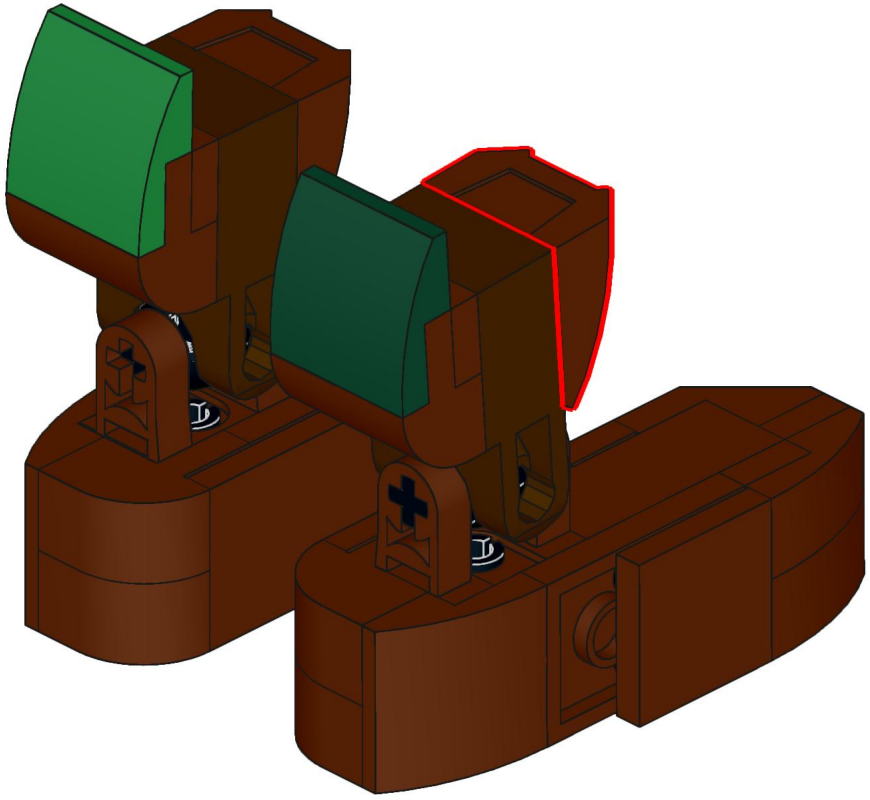
# 27



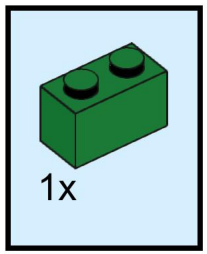



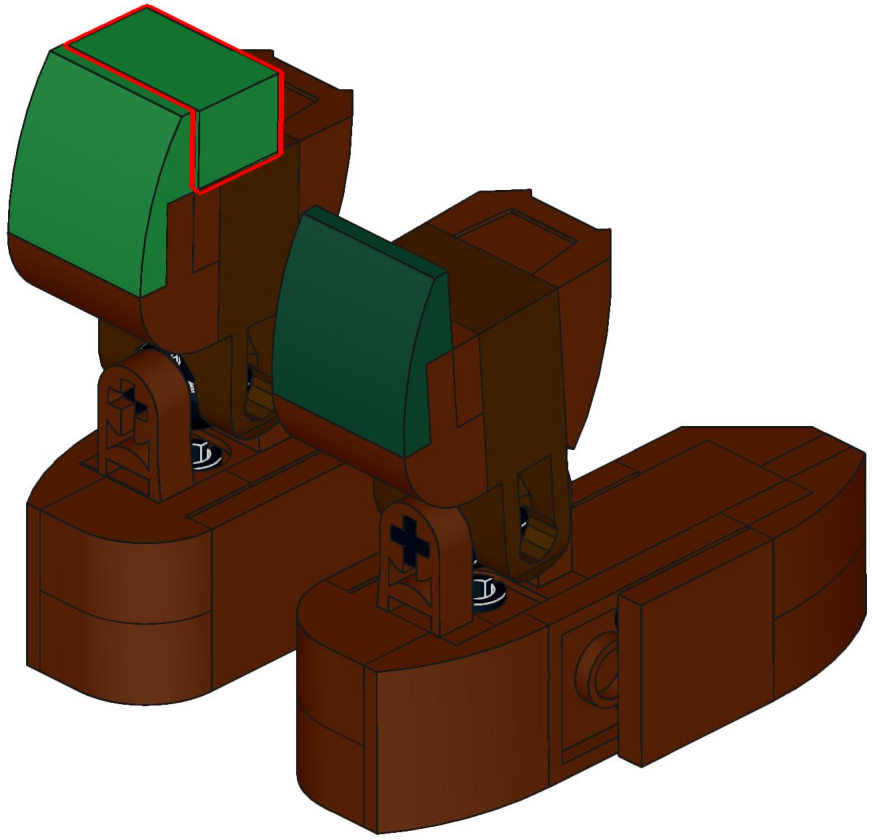
# 28



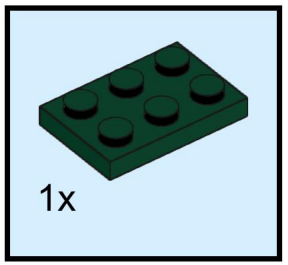



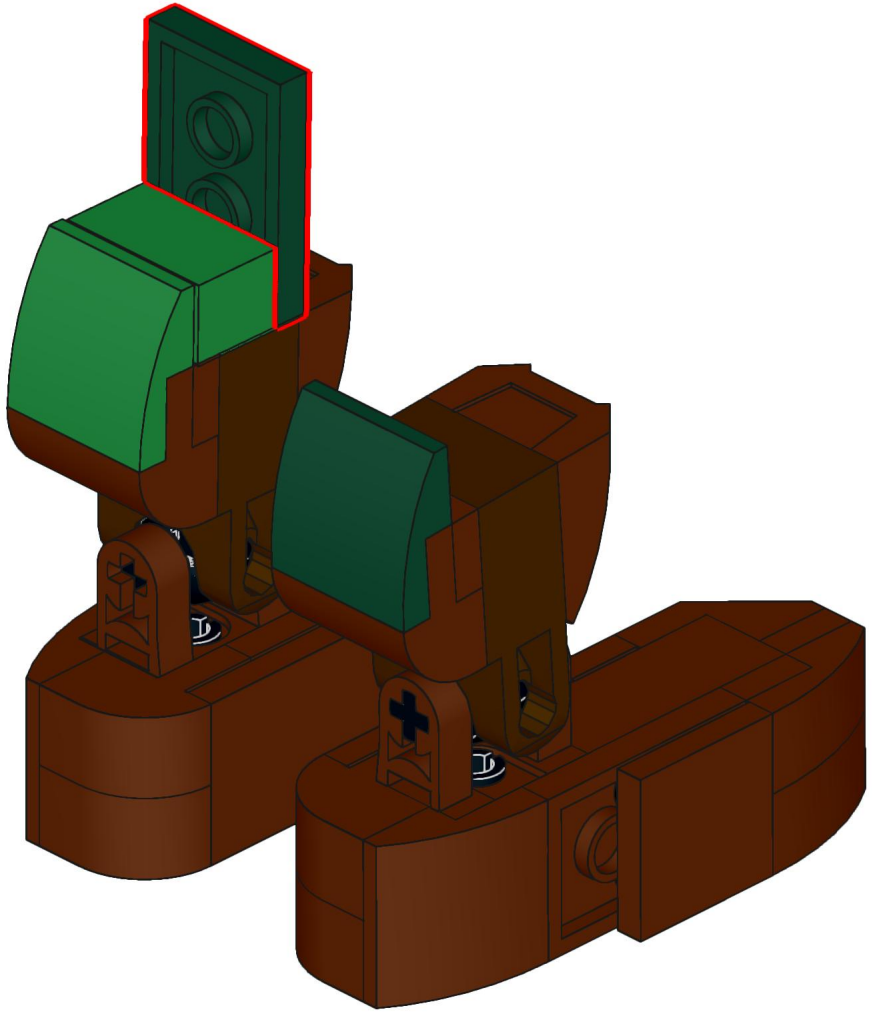
# 29



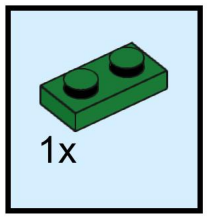



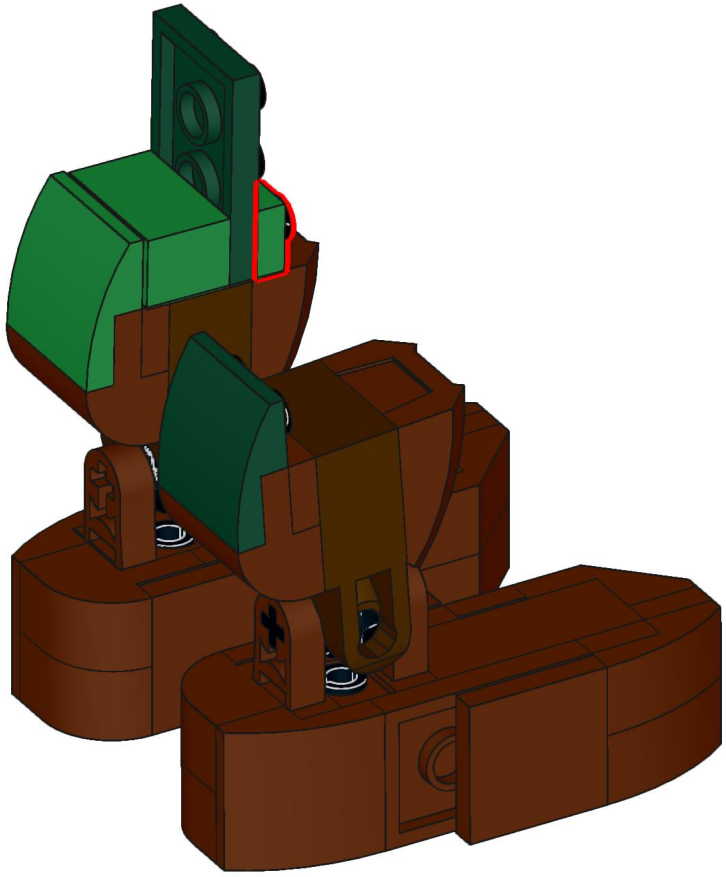
# 30



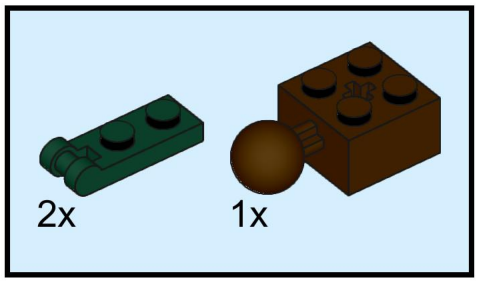



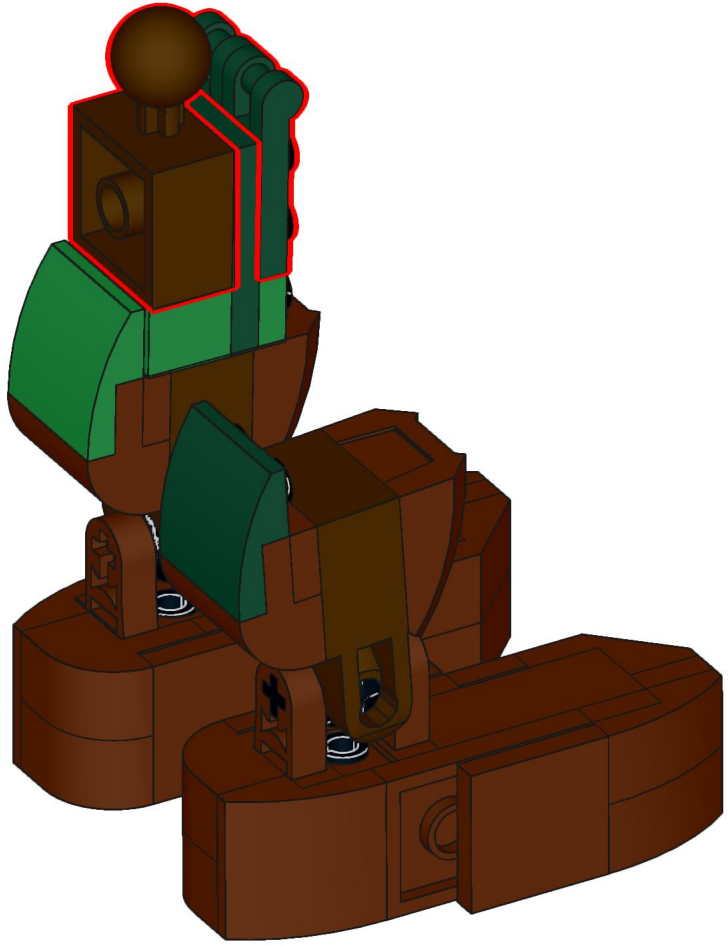
# 31



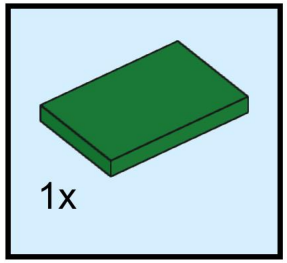



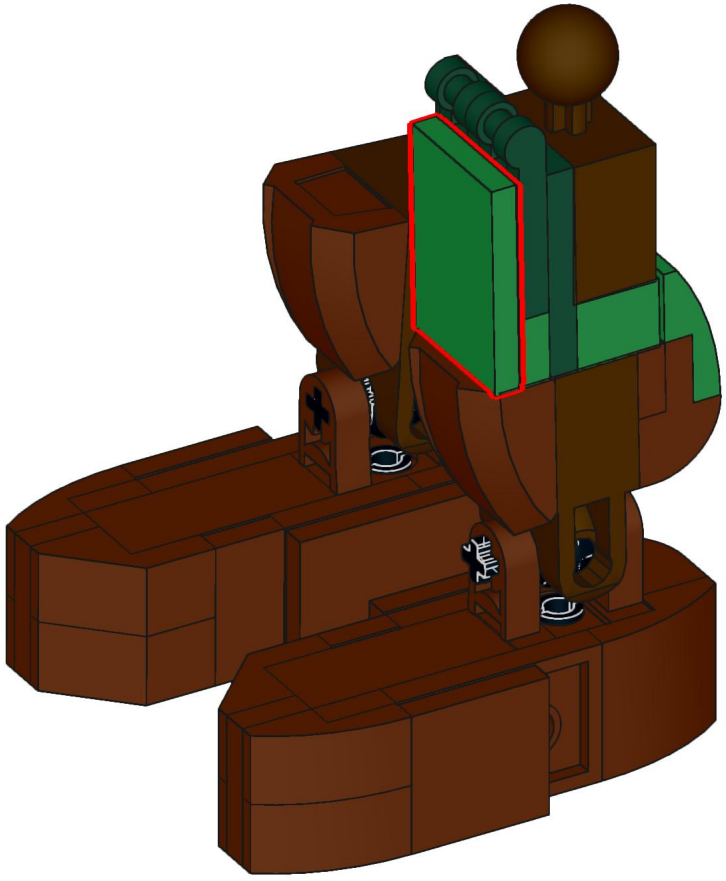
# 32



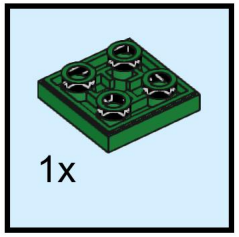



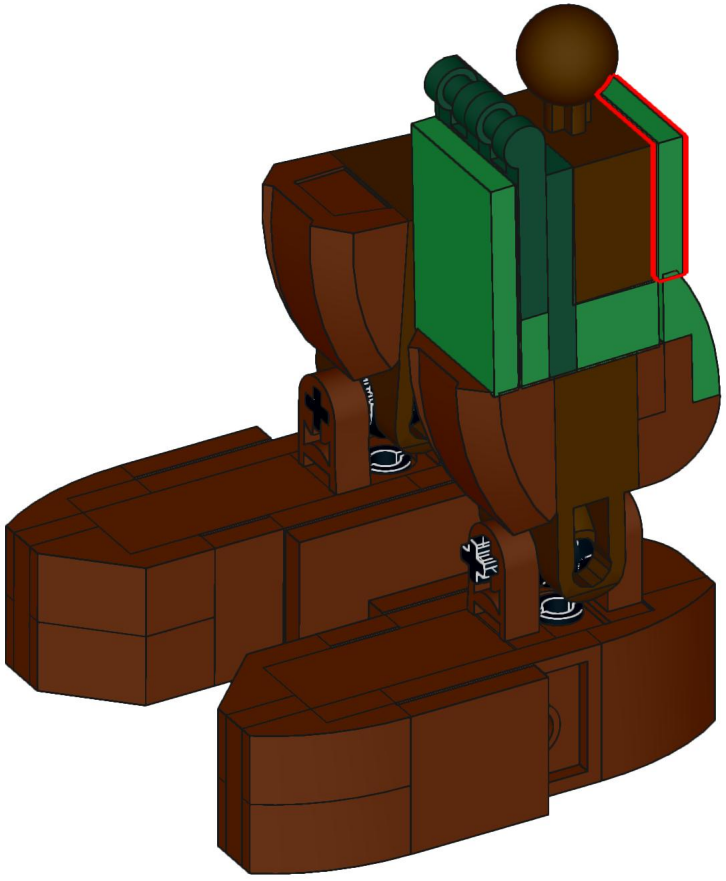
# 33



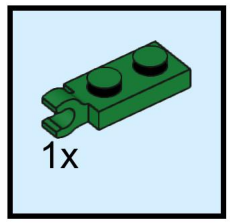



# 34



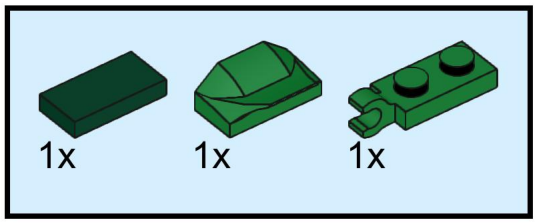



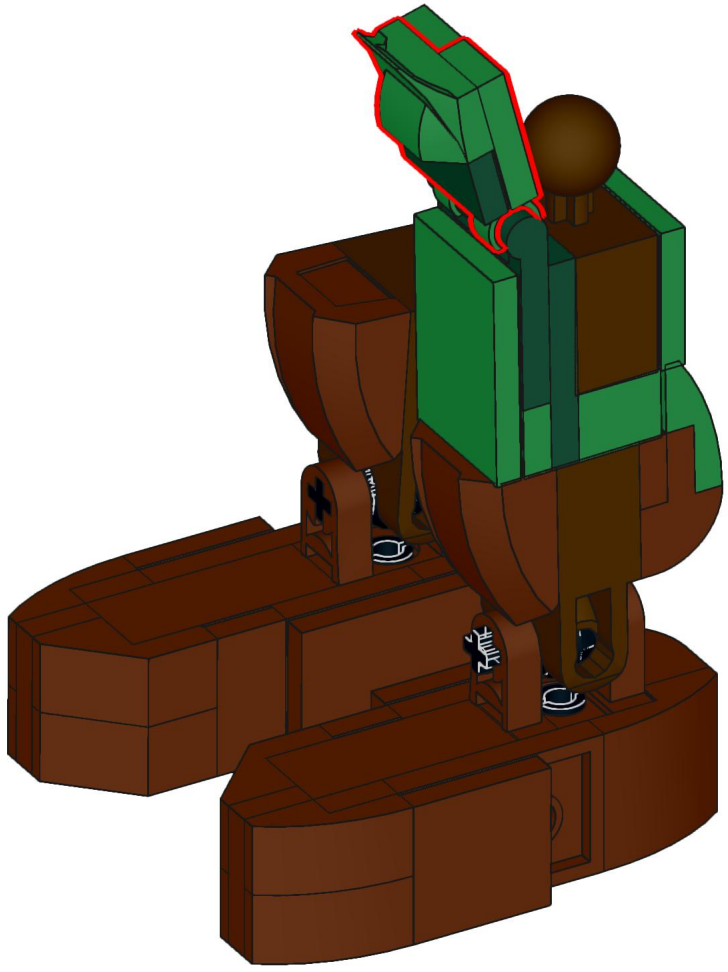
# 35



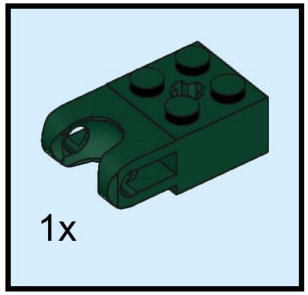


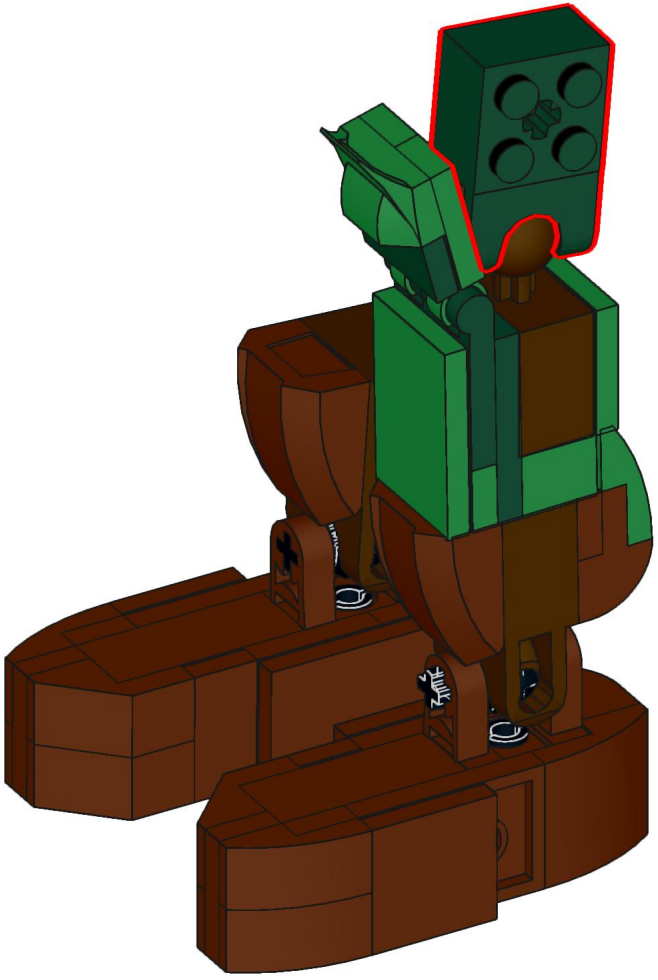

# 36



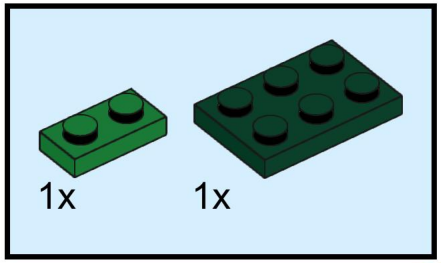



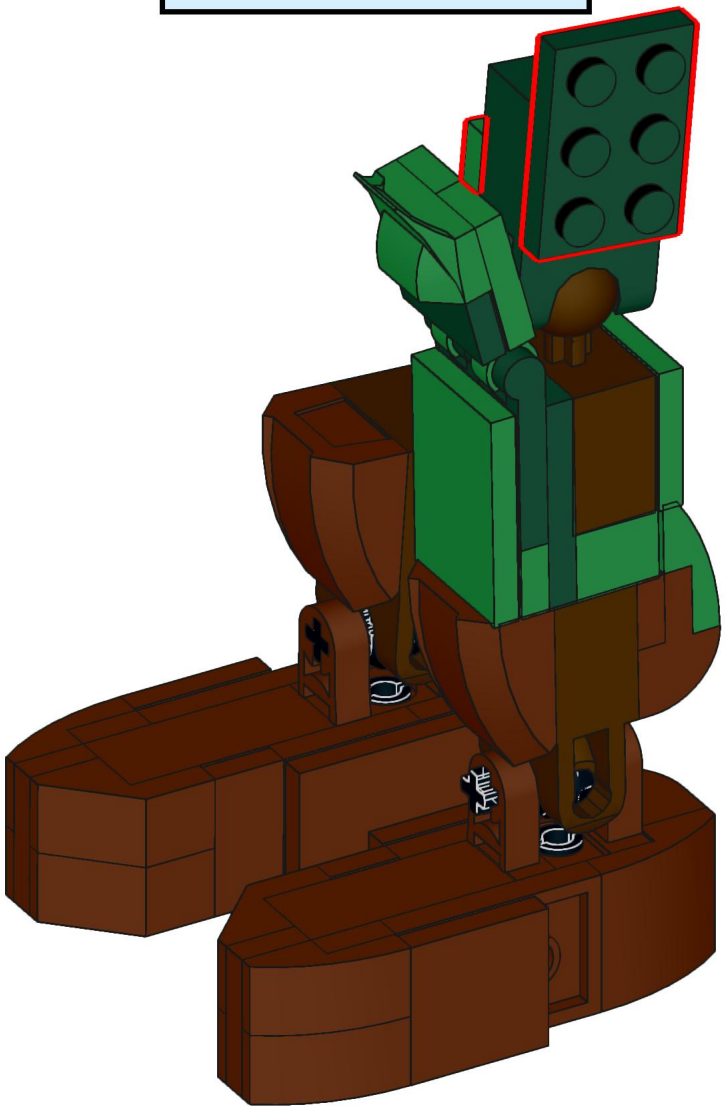
# 37



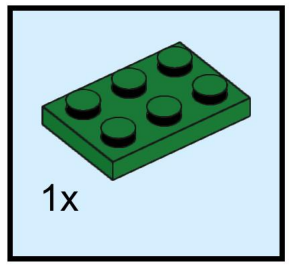



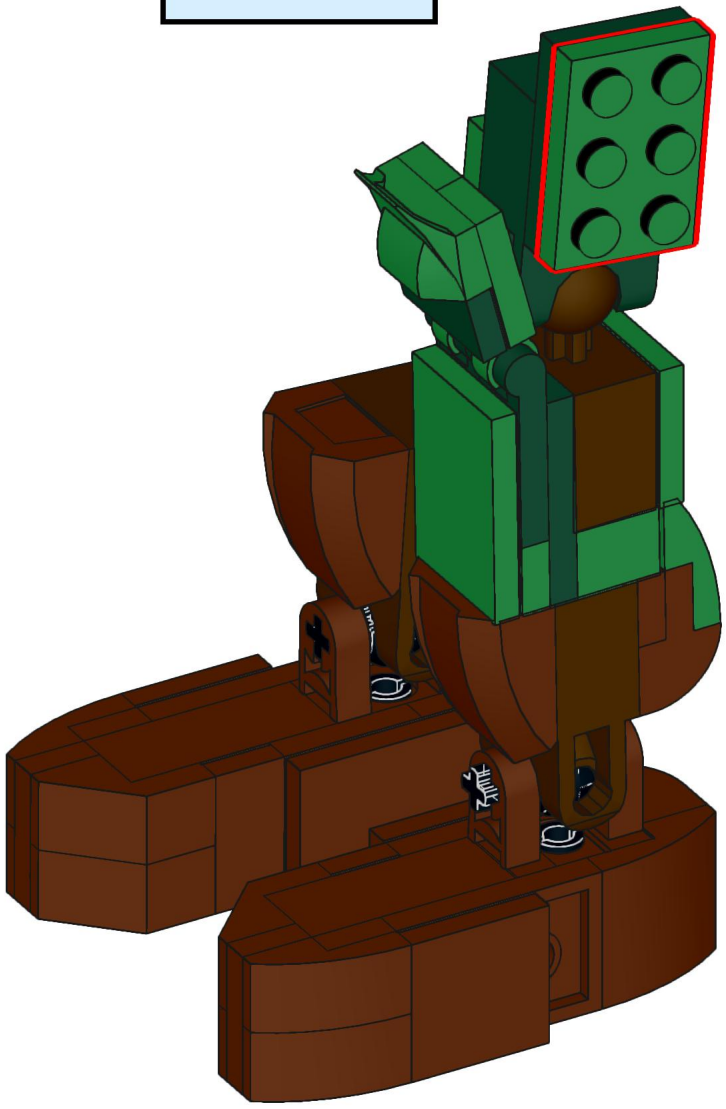
# 38



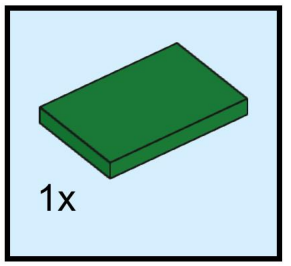



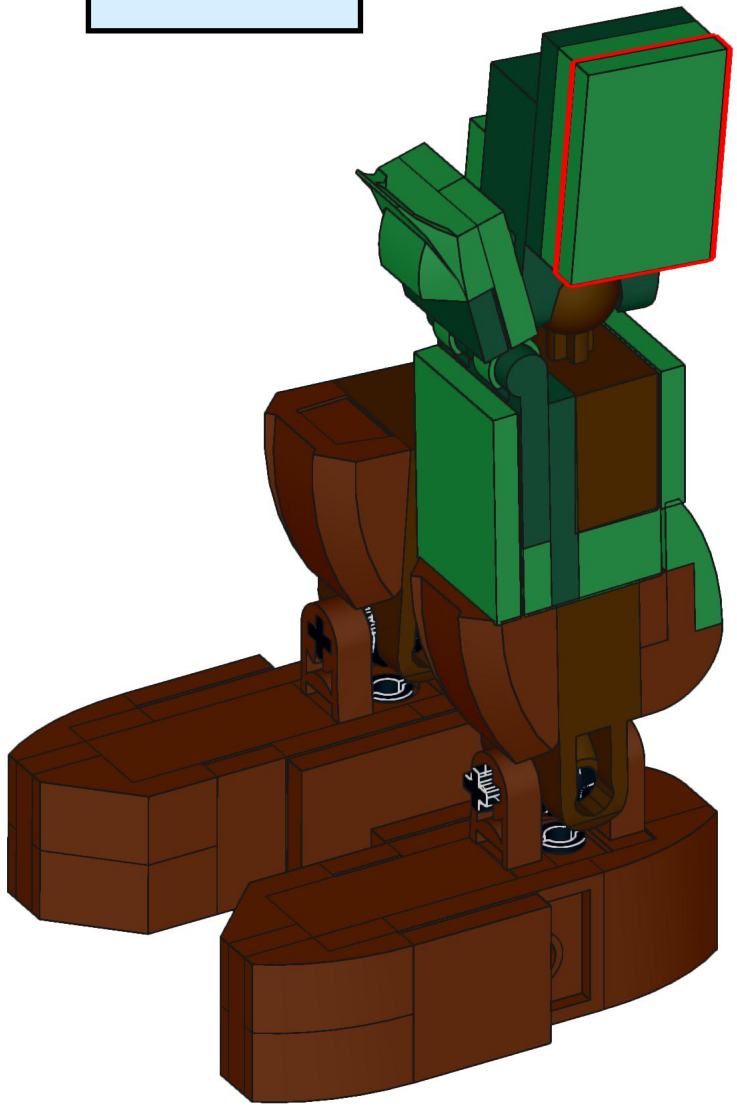
# 39



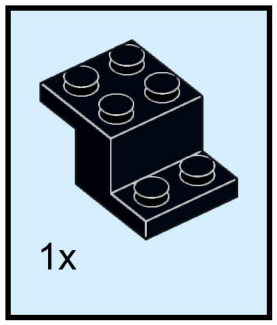



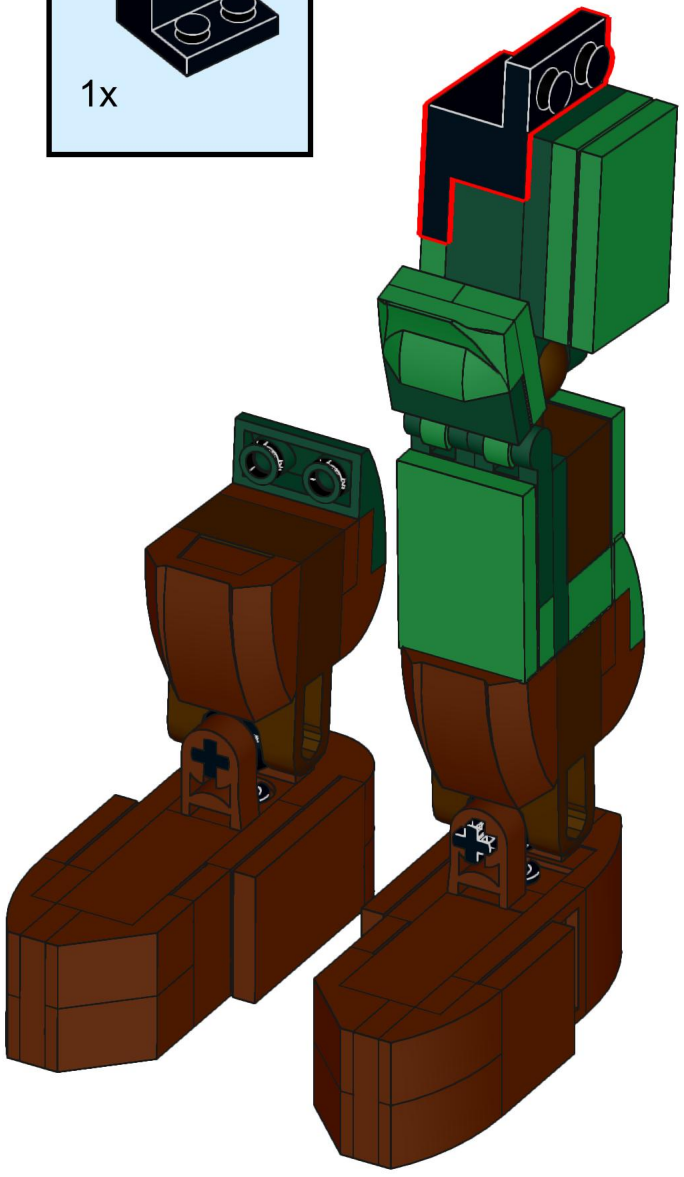
# 40



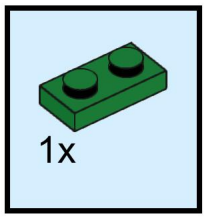



# 41

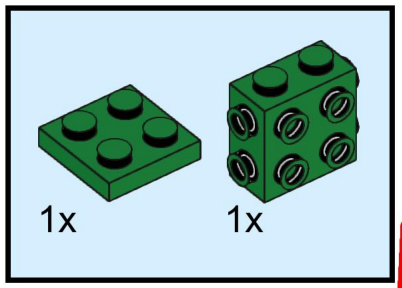


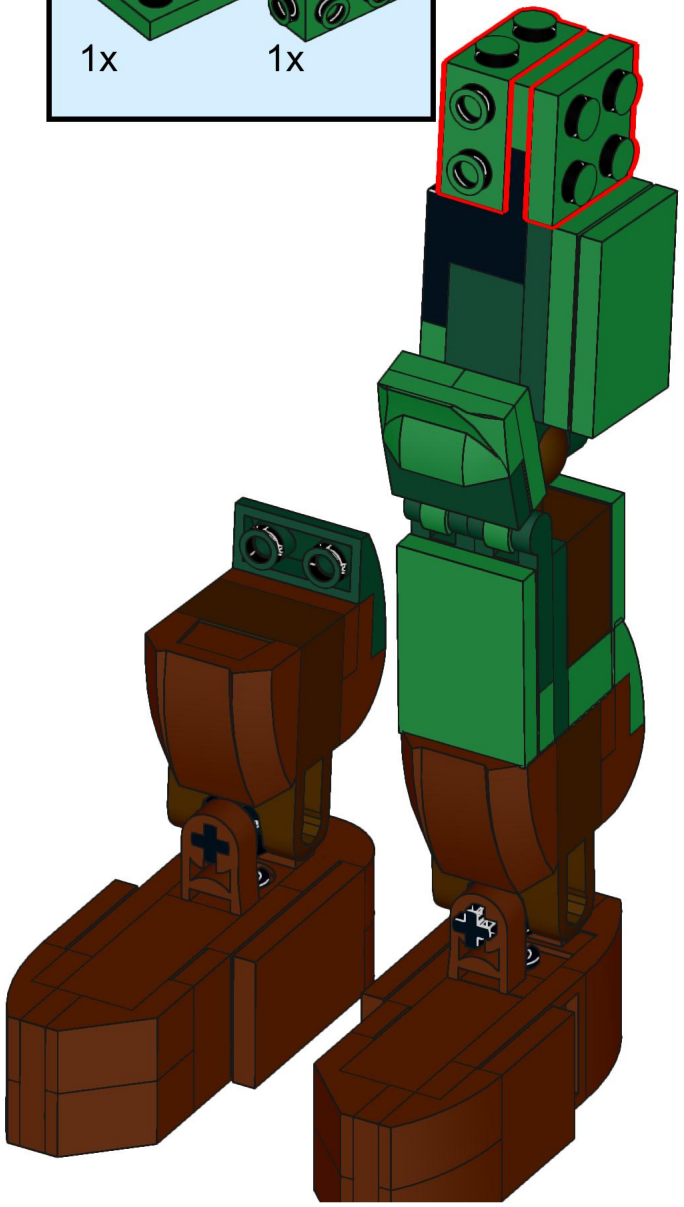



# 42

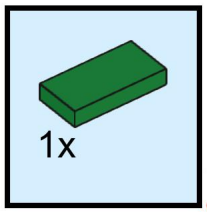


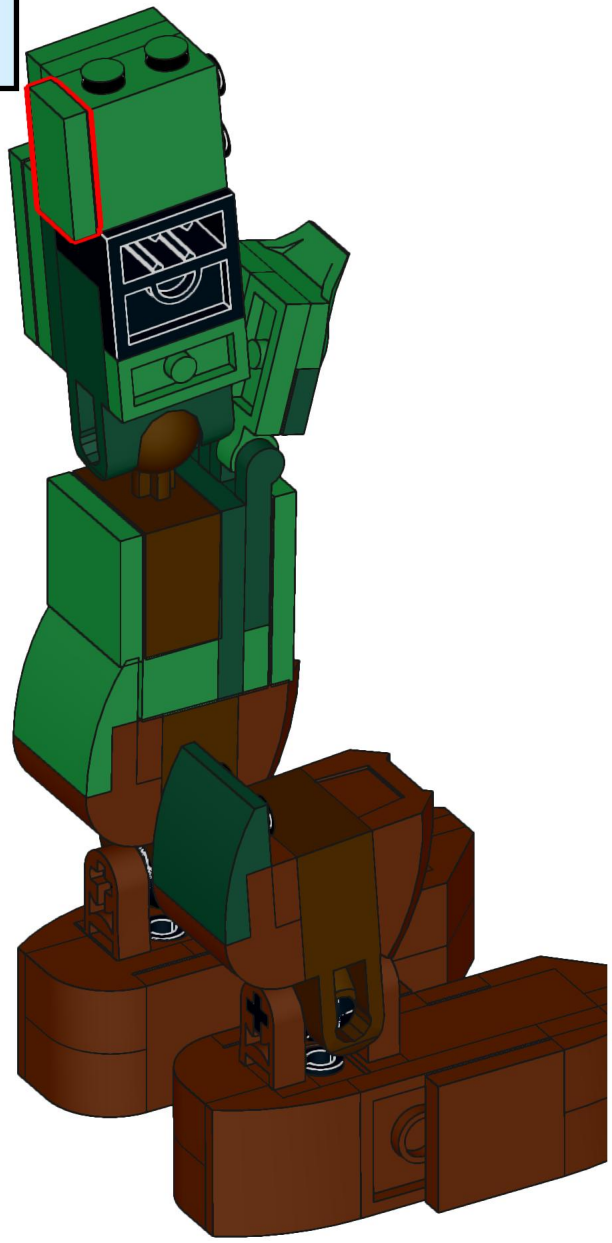
# 43



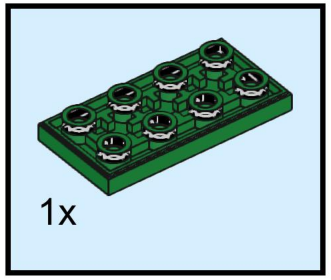



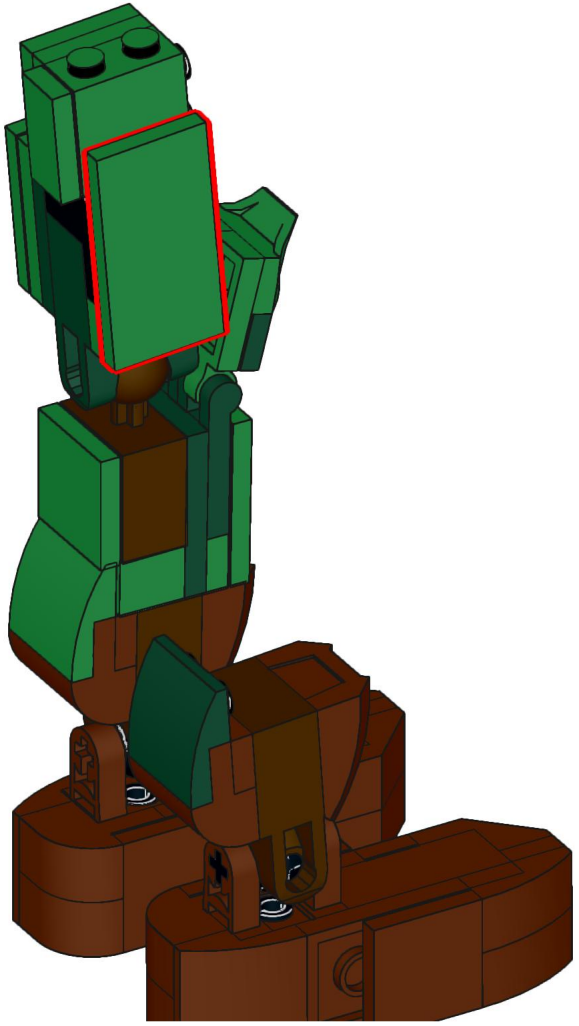
# 44



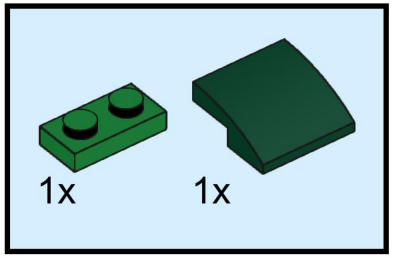



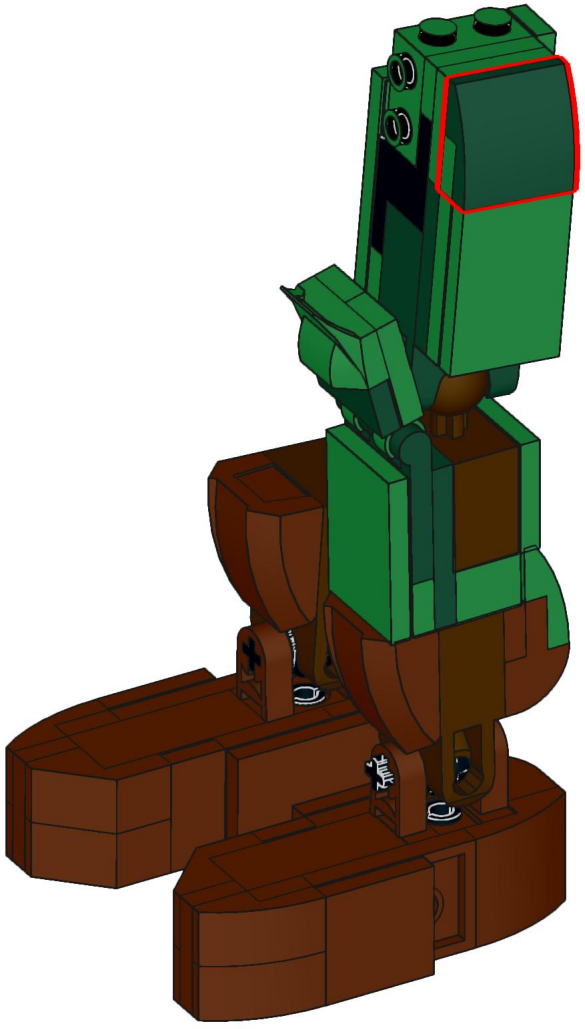
# 45



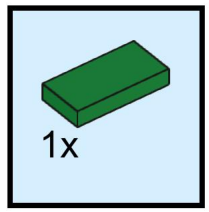



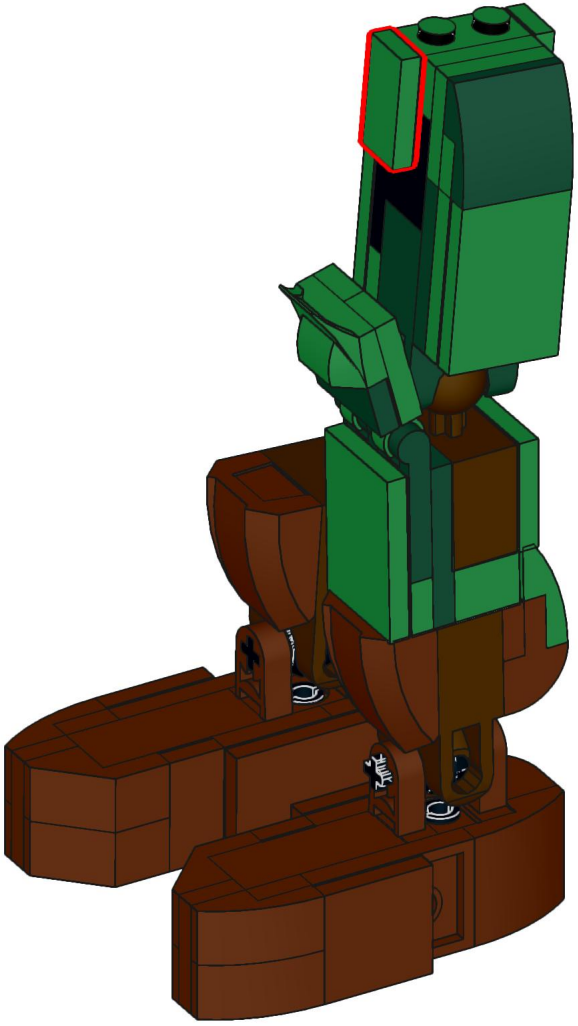
# 46



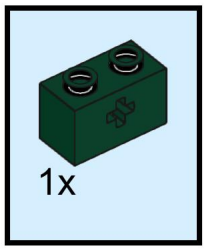



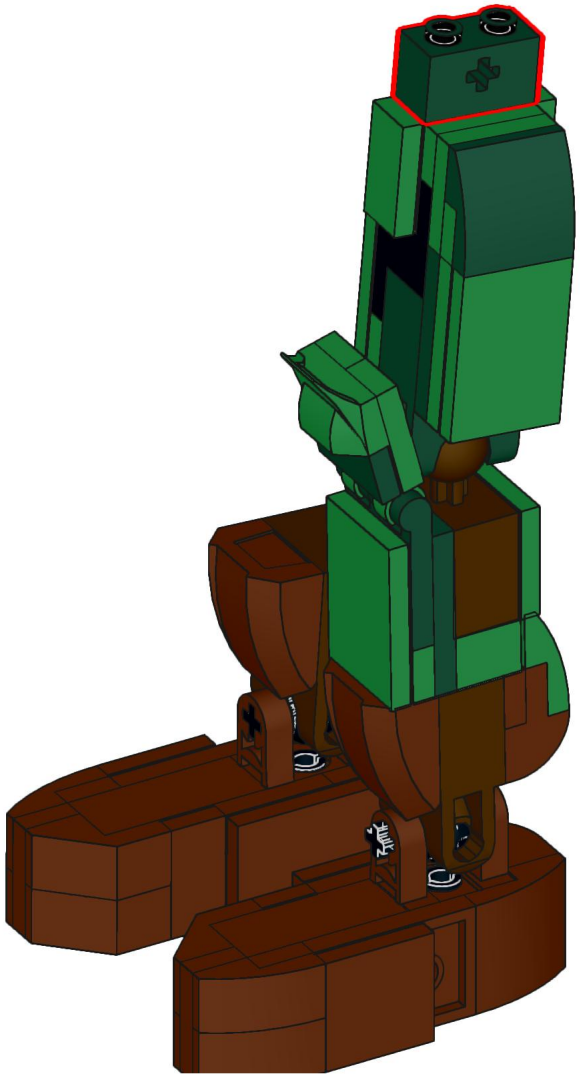
# 47



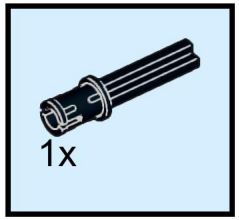



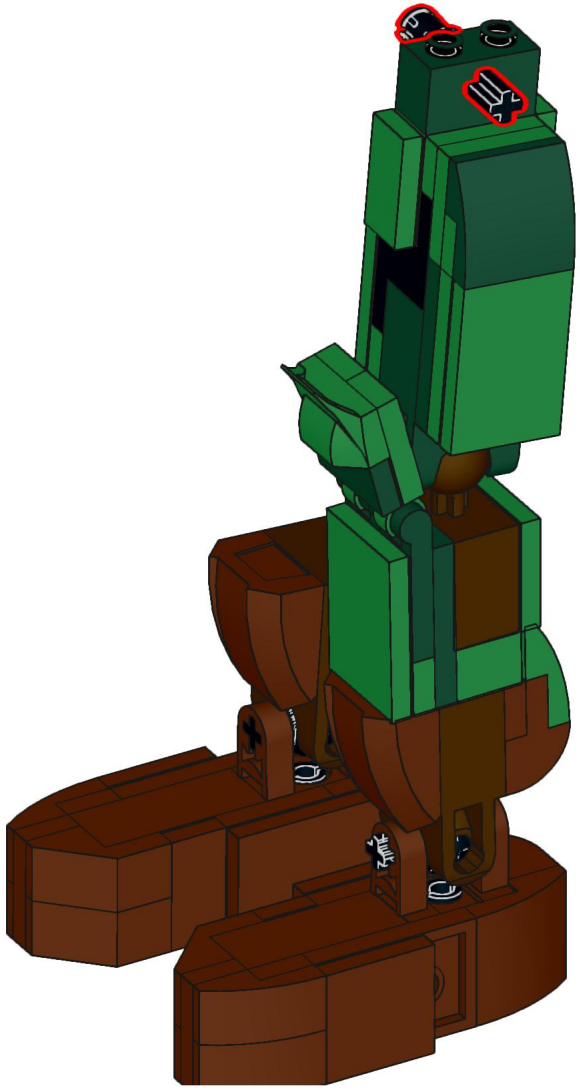
# 48



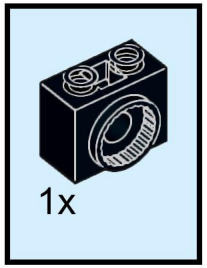



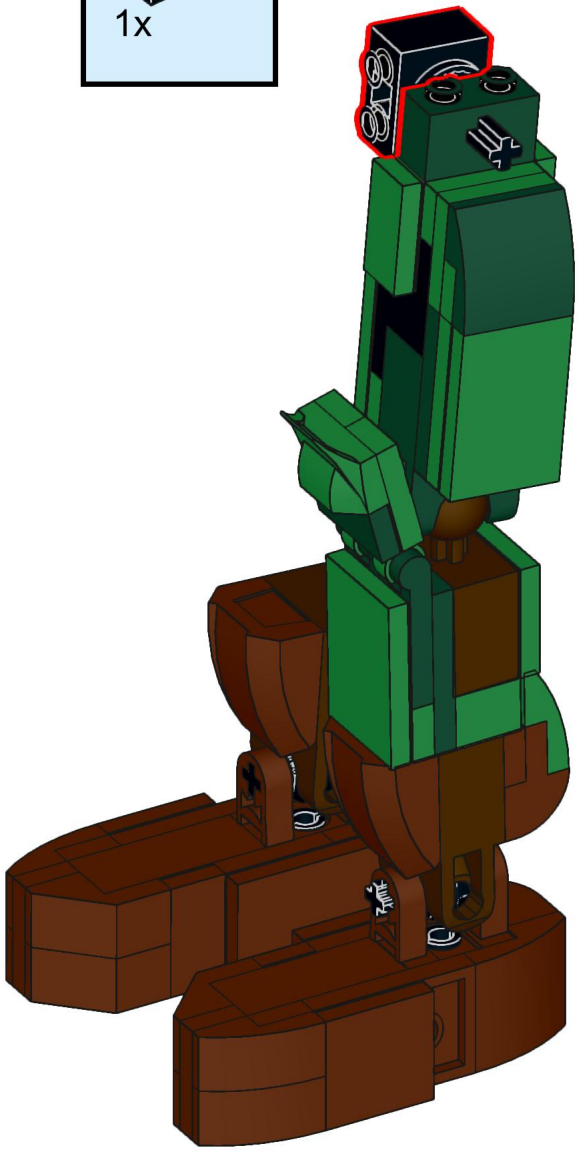
# 49



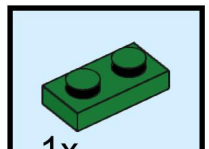



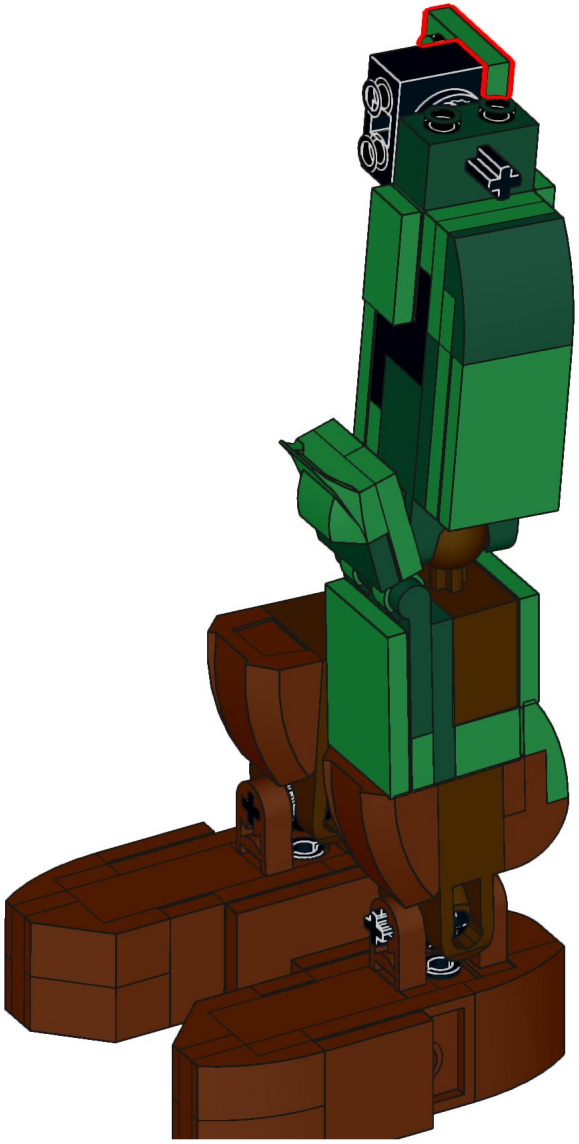
# 50



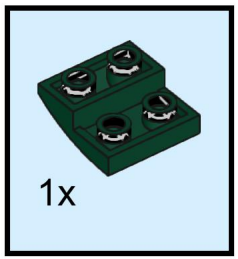



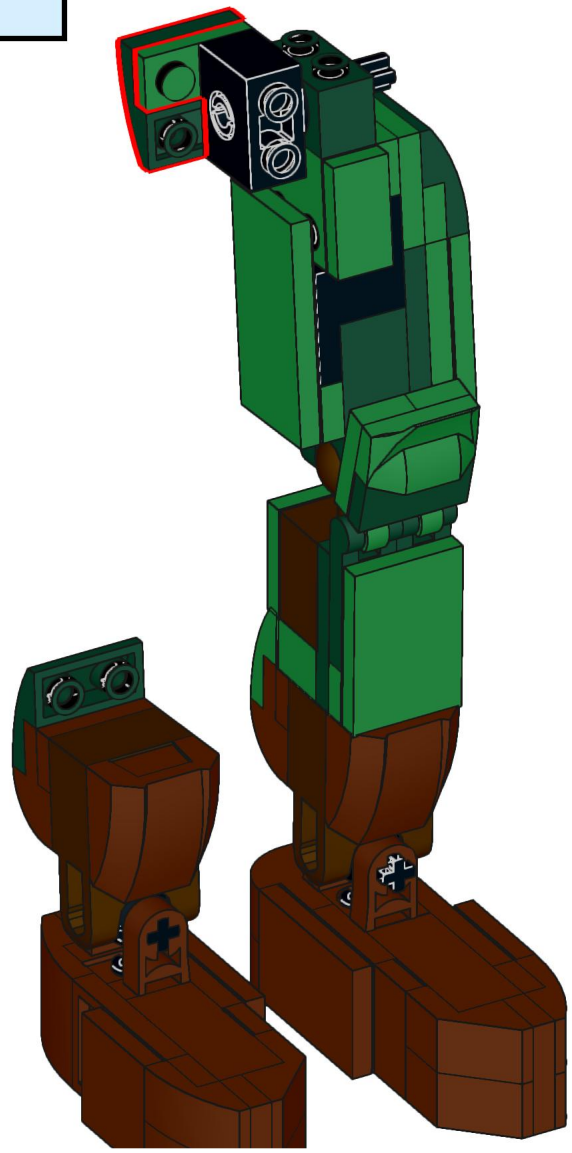
# 51



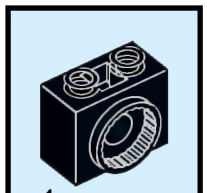



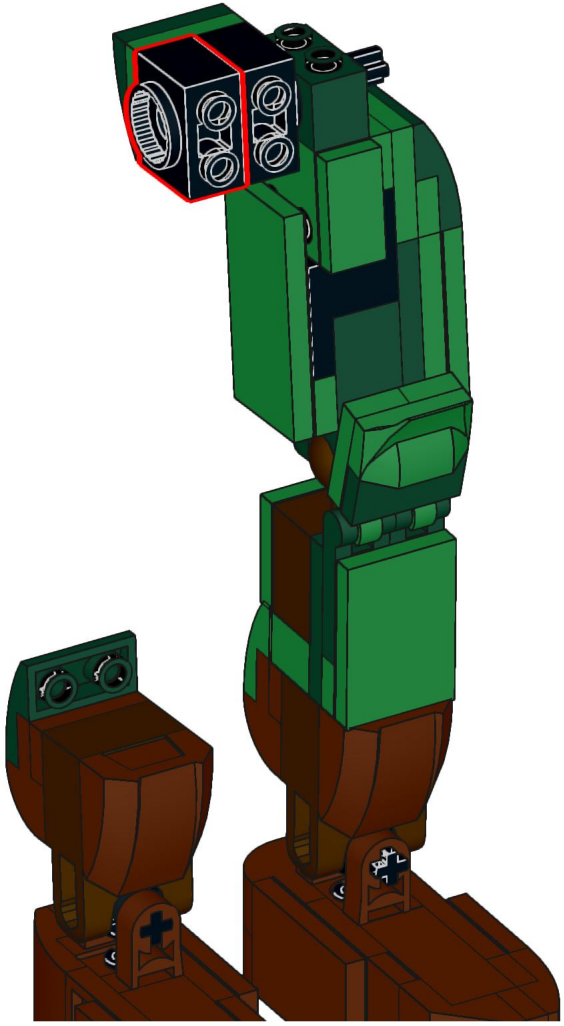
# 52



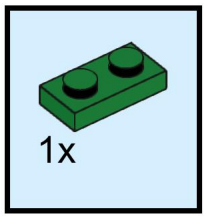



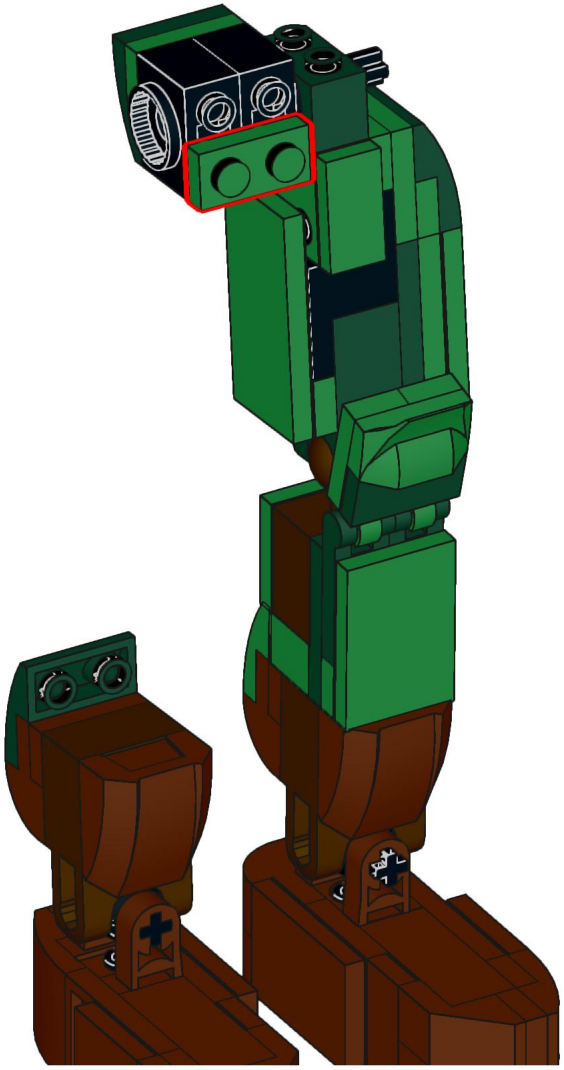
# 53



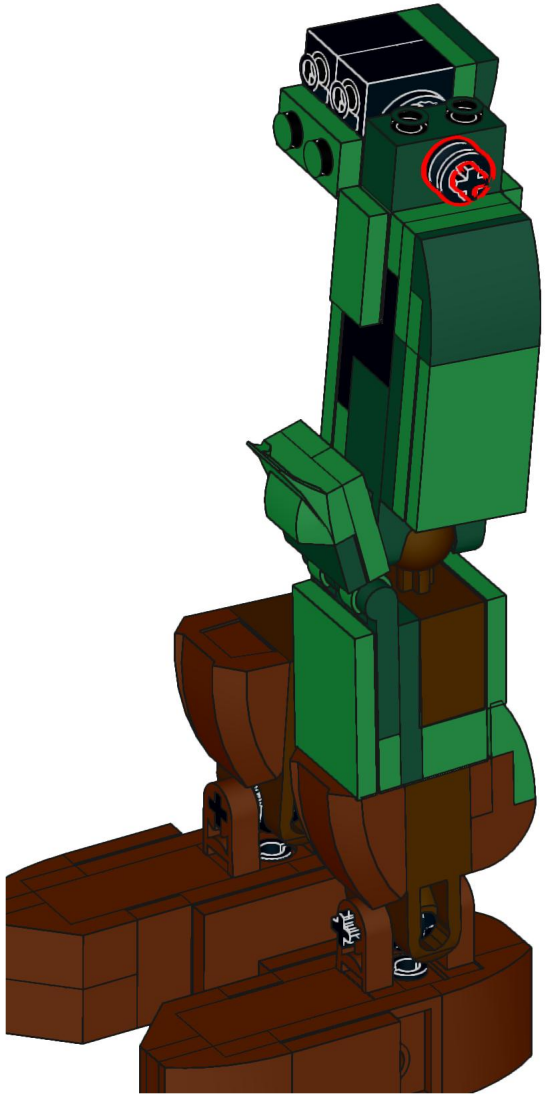
# 54



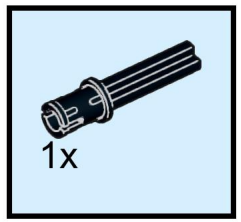



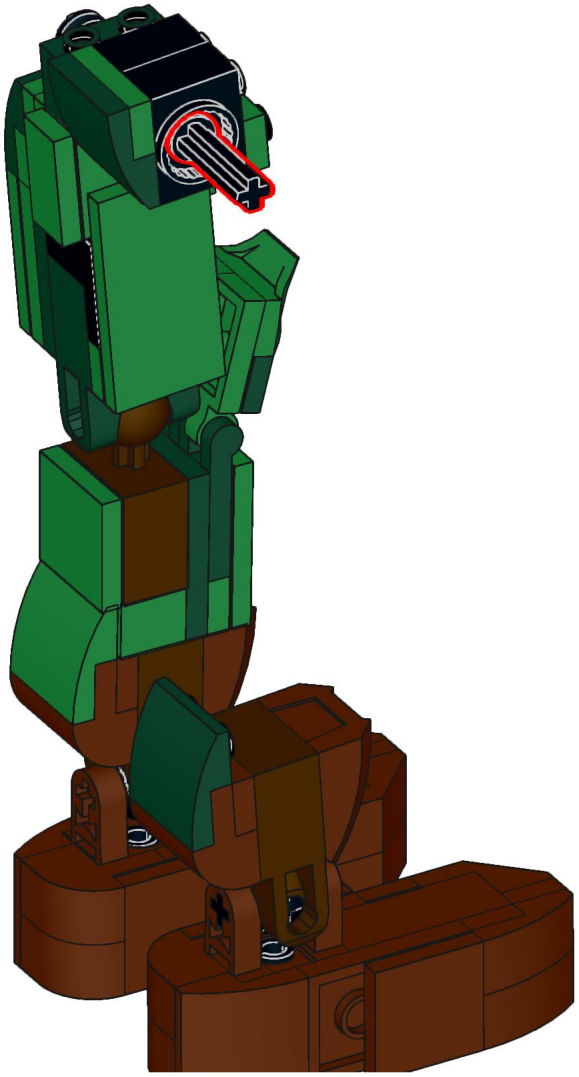
# 55



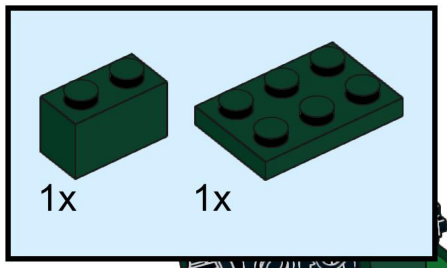



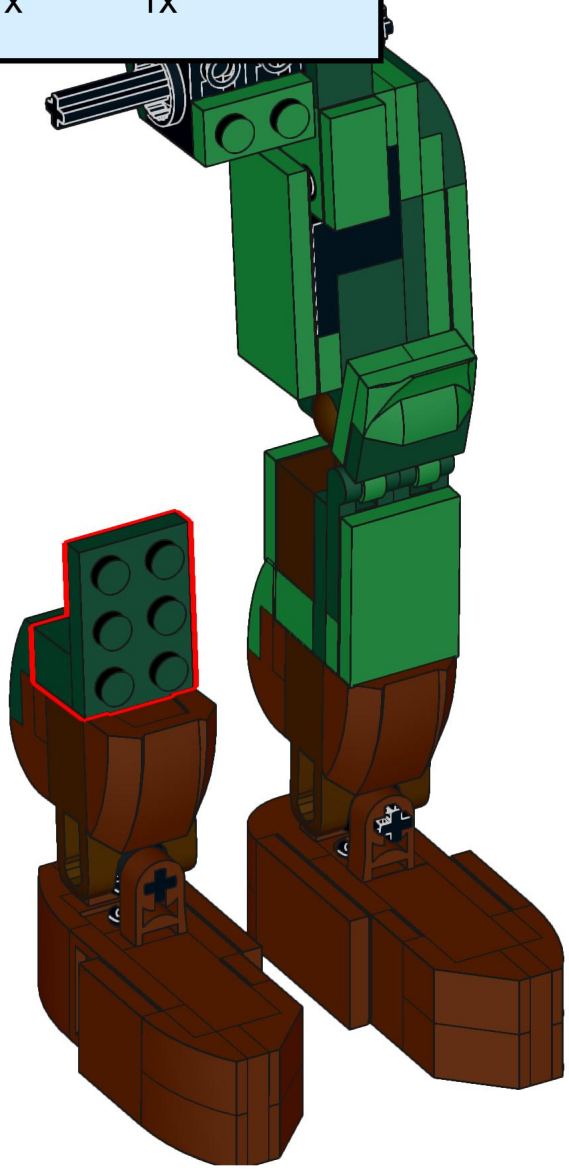
# 56



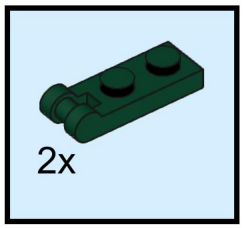



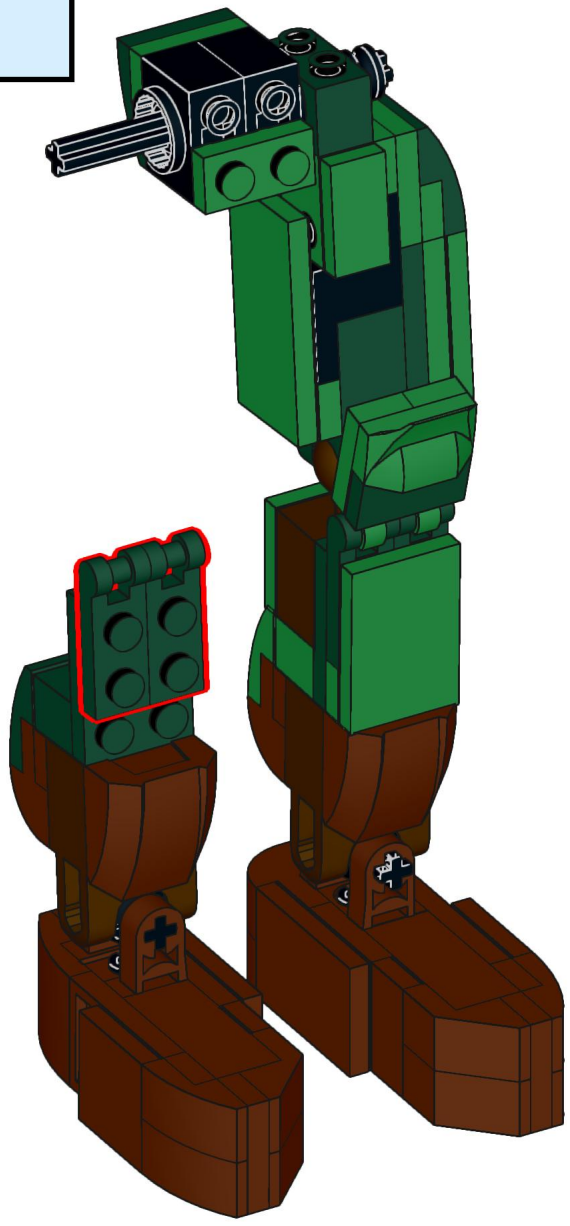
# 57



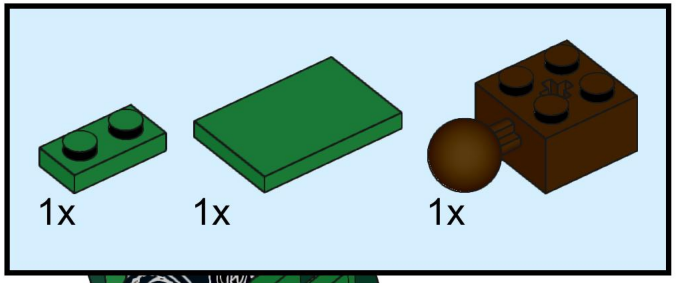



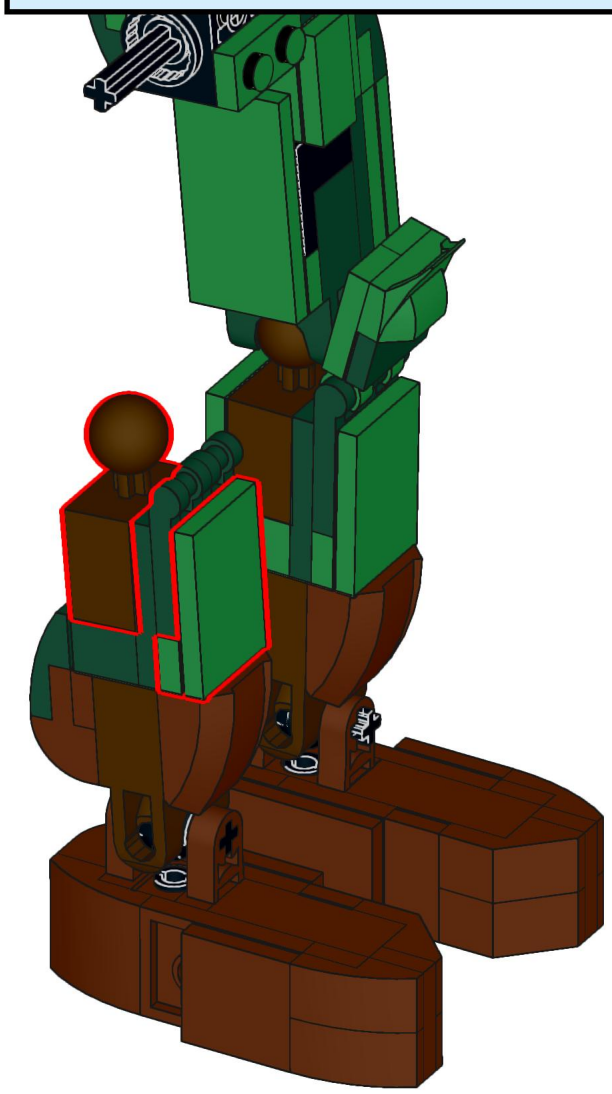
# 58



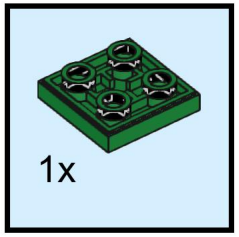



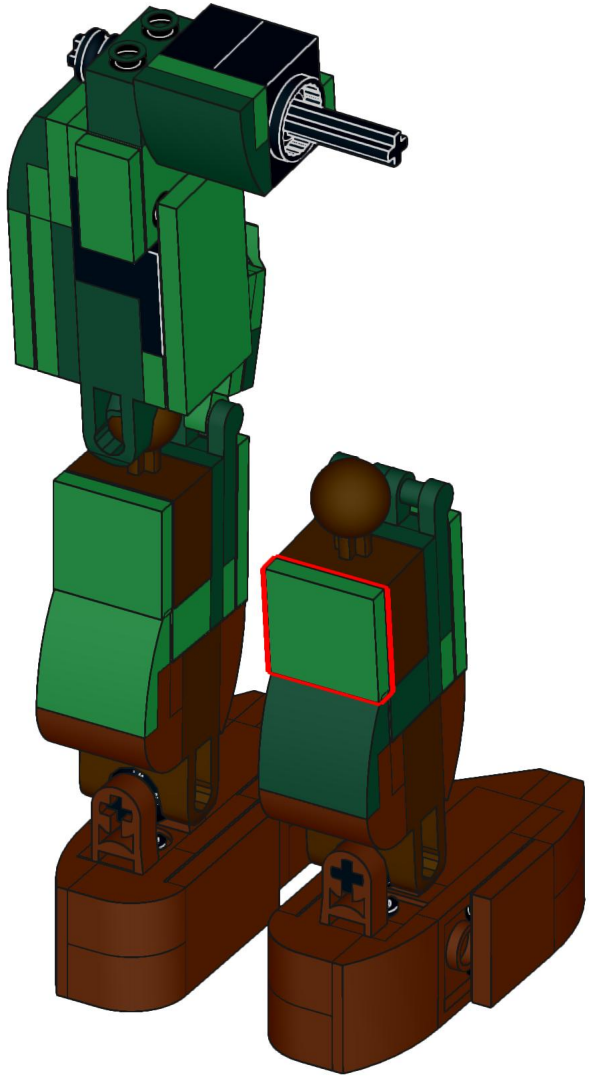
# 59



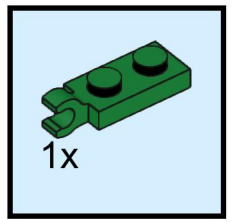



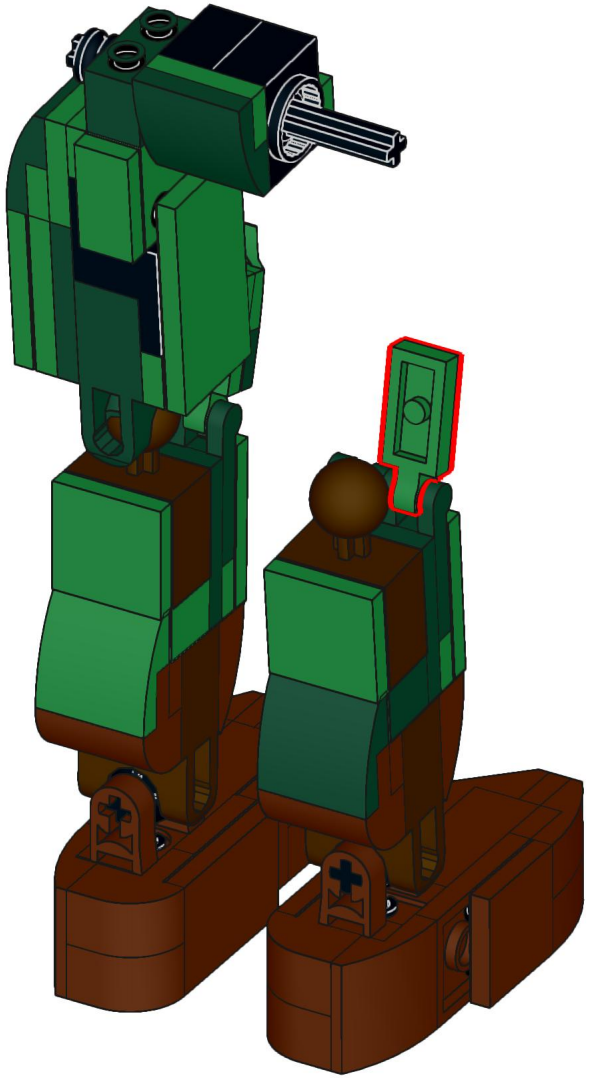
# 60



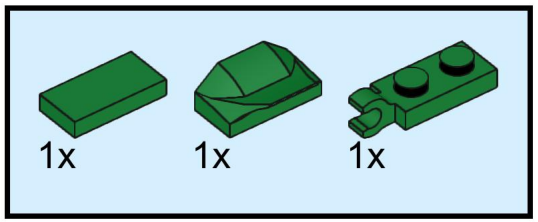



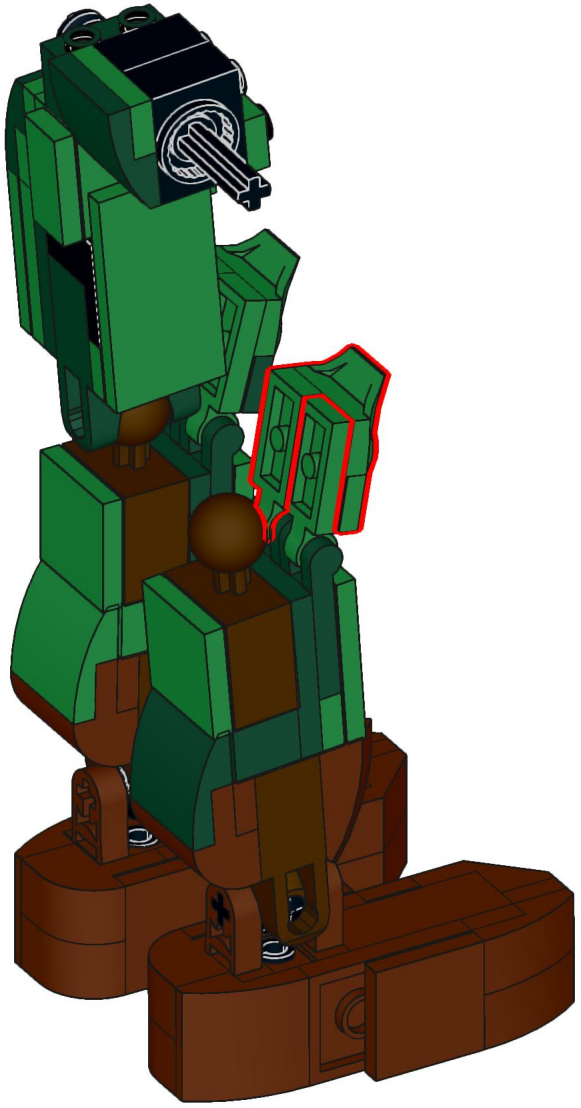
# 61



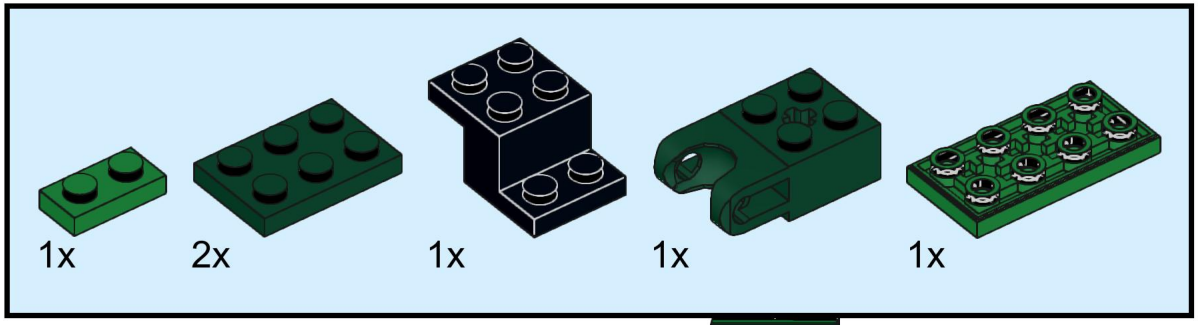



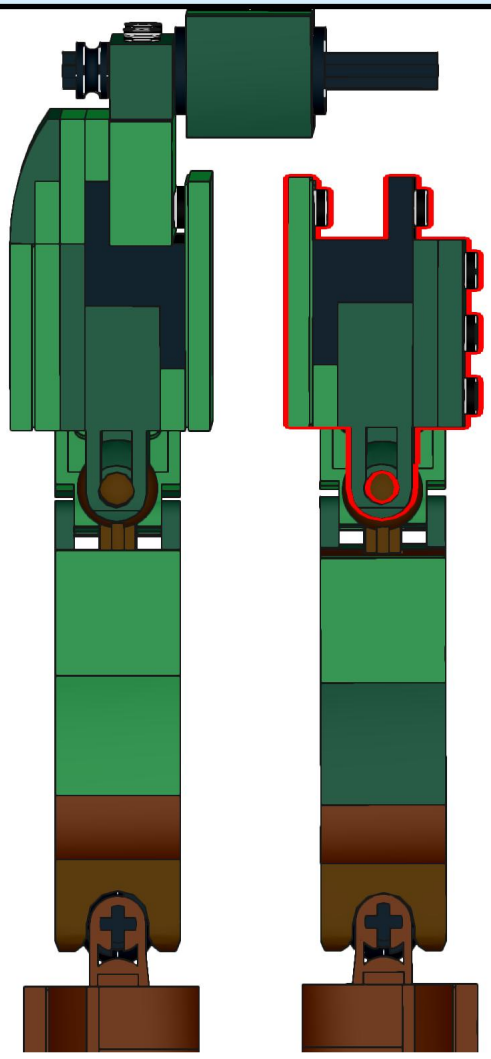
# 62



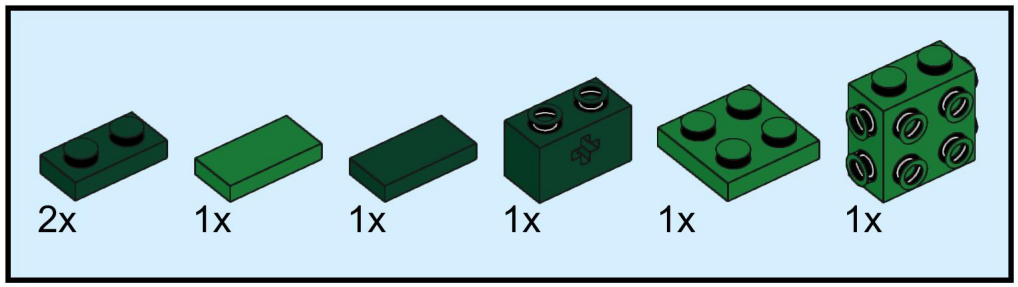



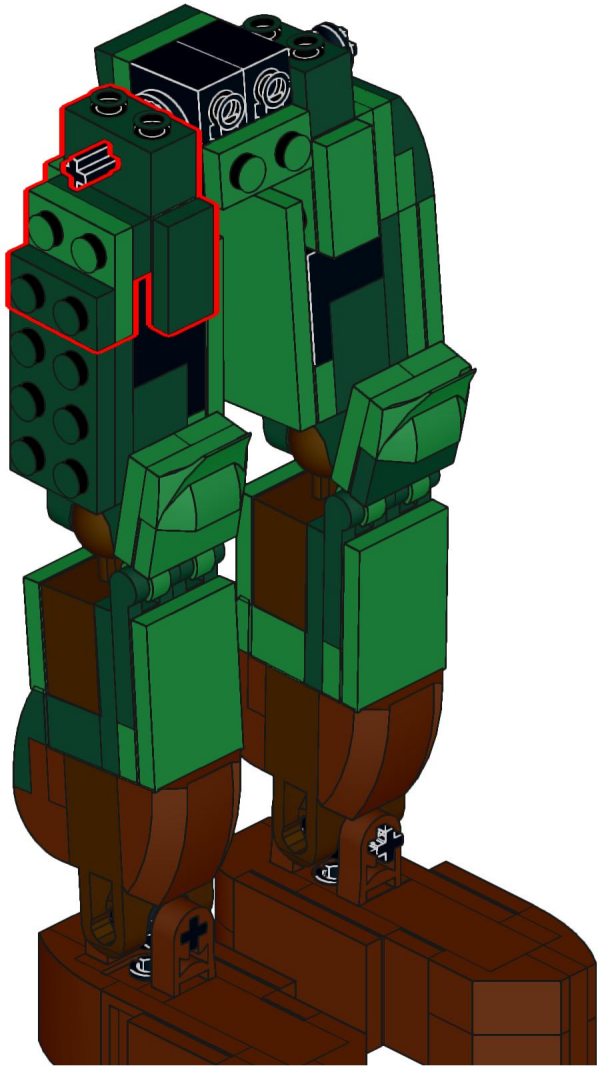
# 63



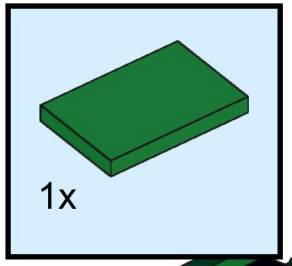



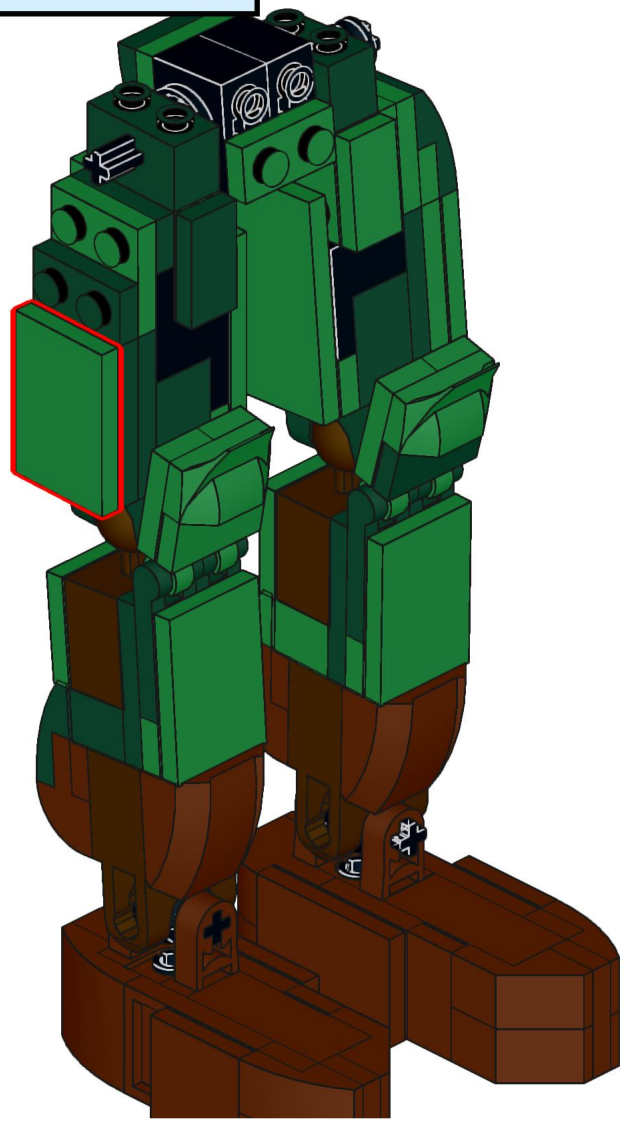
# 64



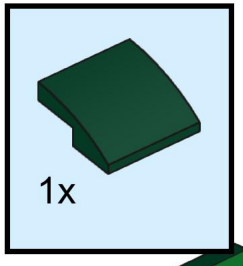



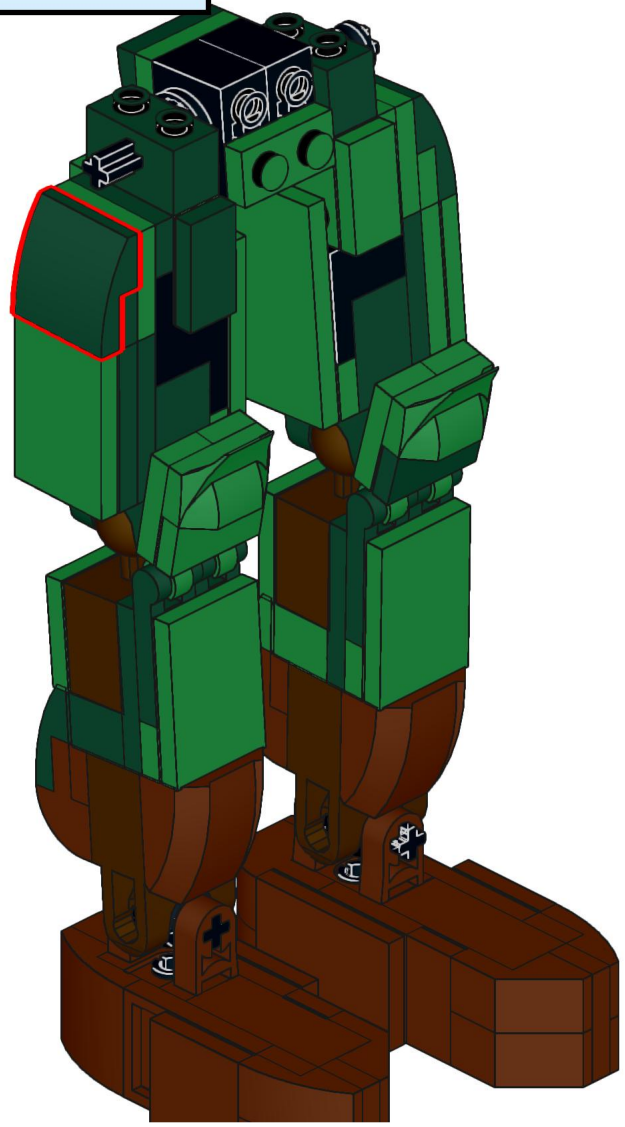
# 65



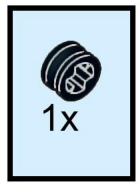



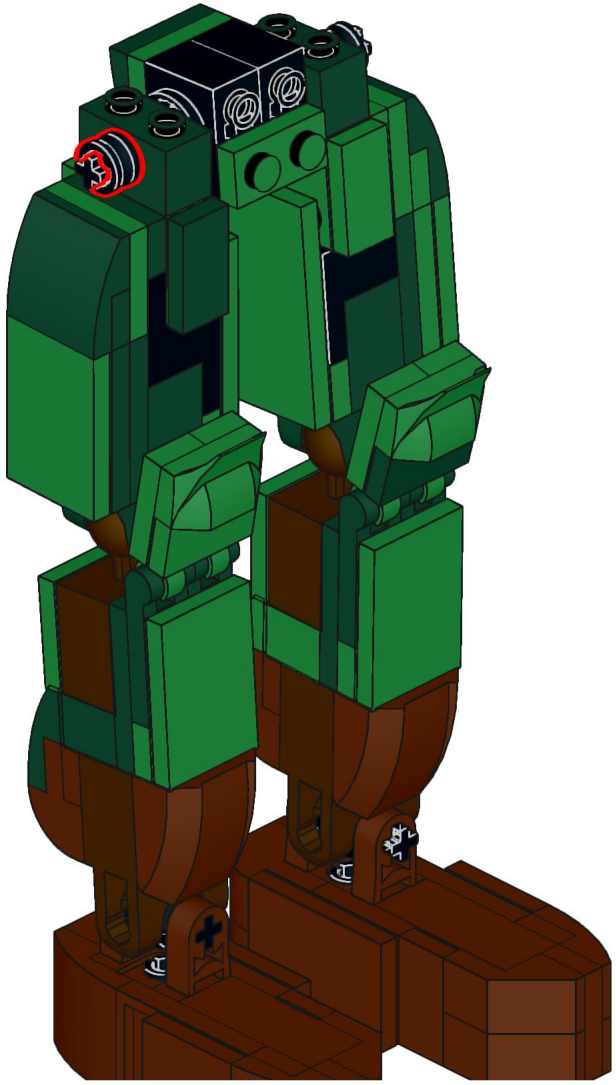
# 66



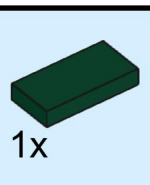



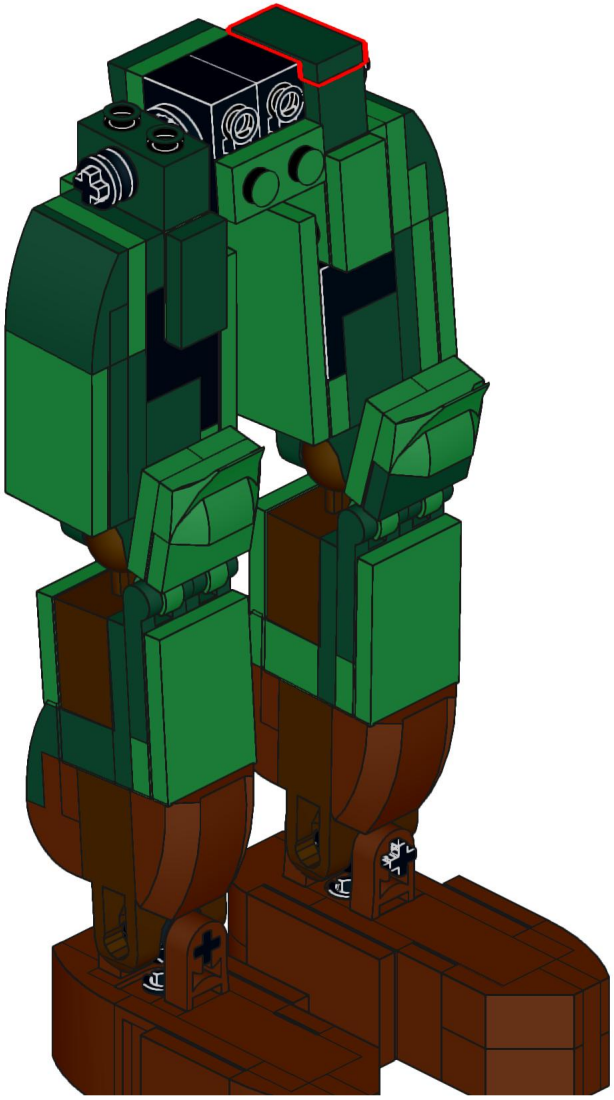
# 67



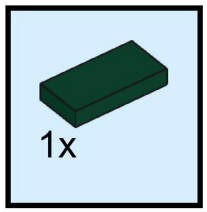



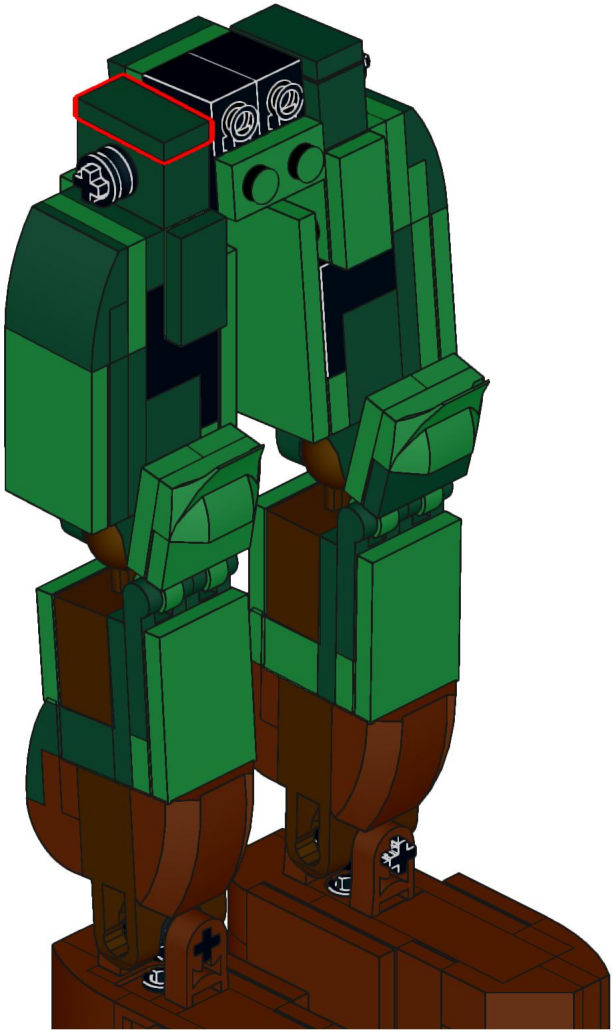
# 68



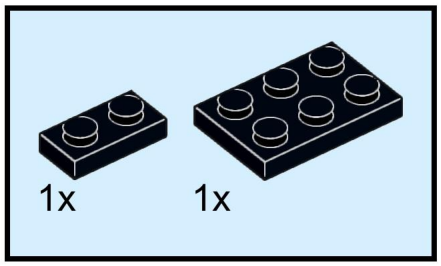



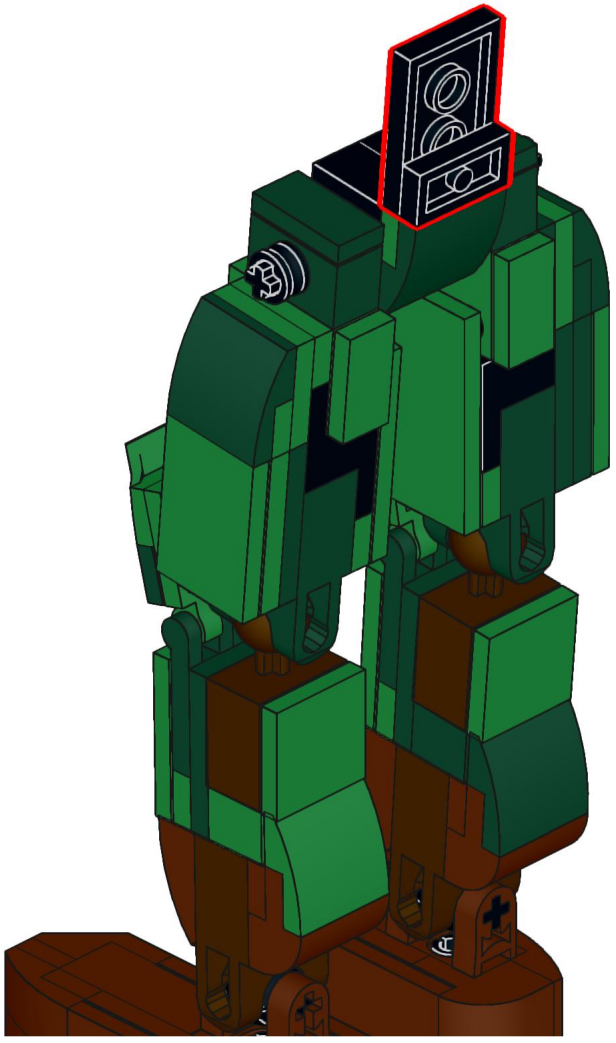
# 69



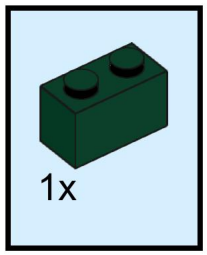



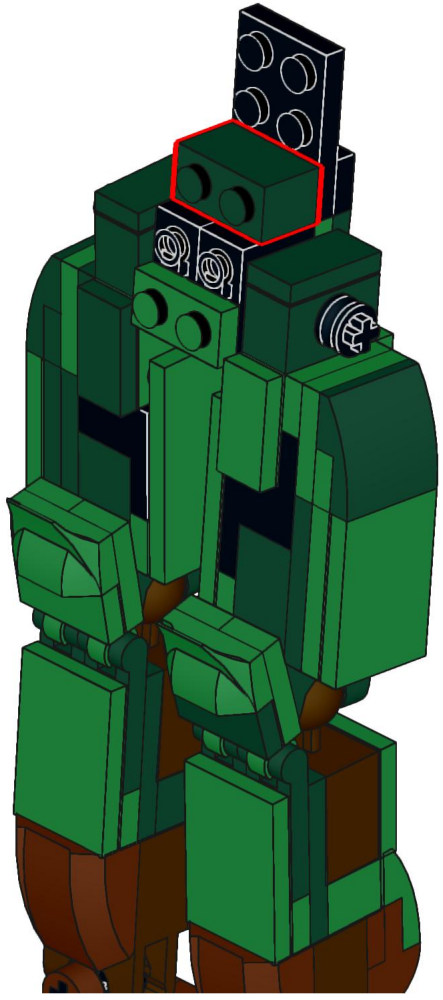
# 70



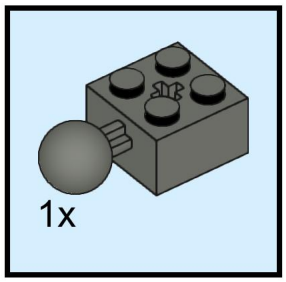



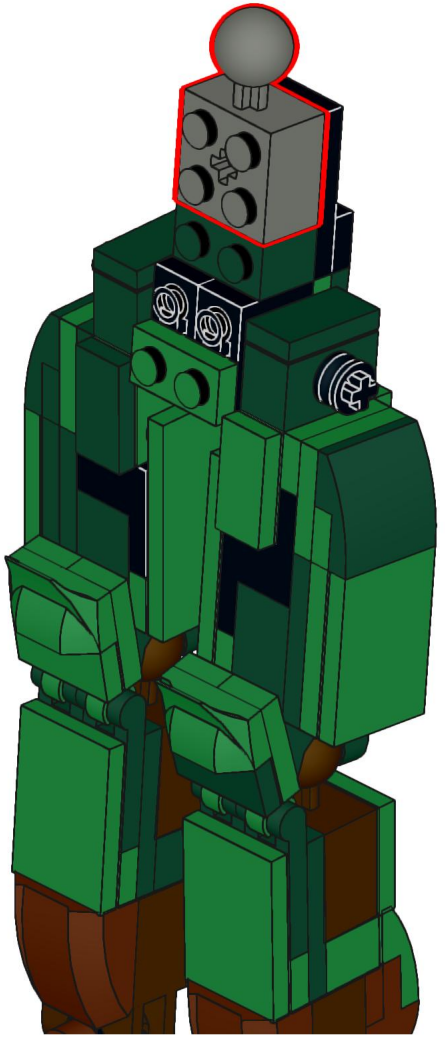
# 71



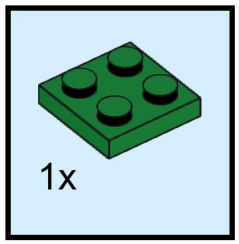



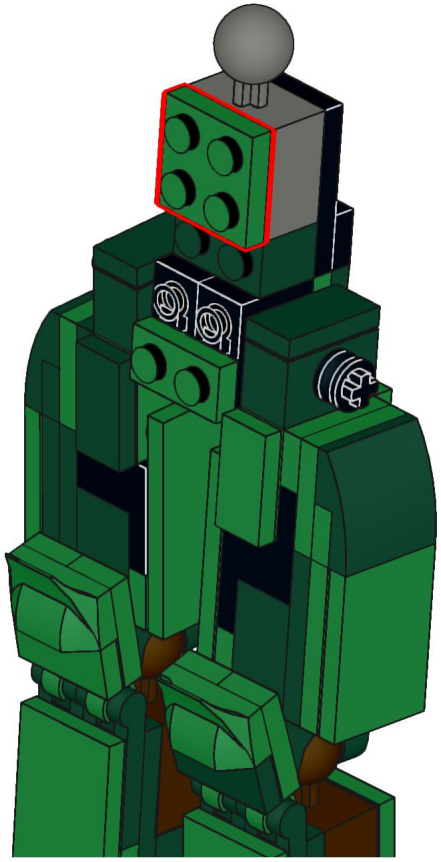
# 72



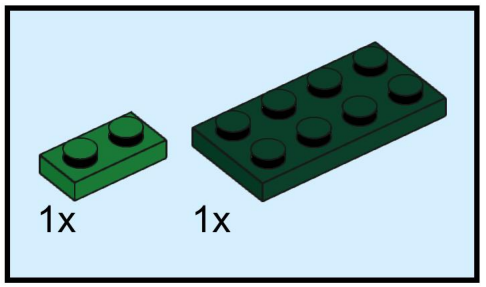



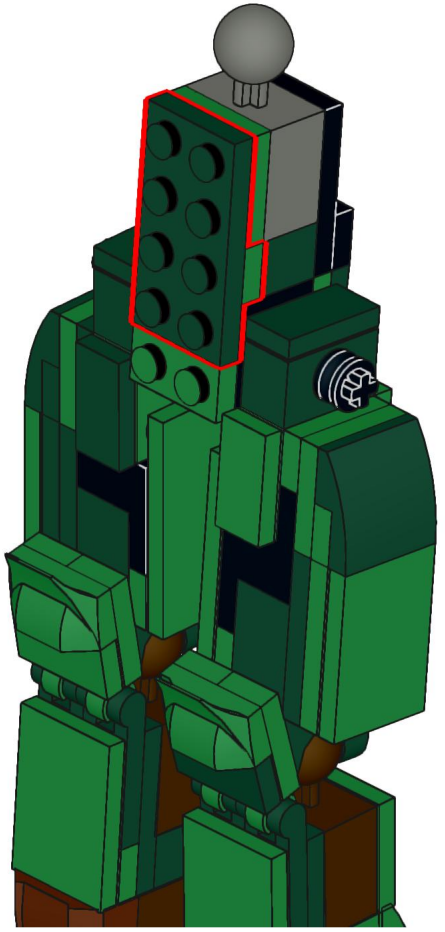
# 73



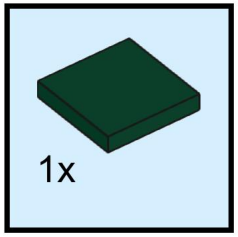



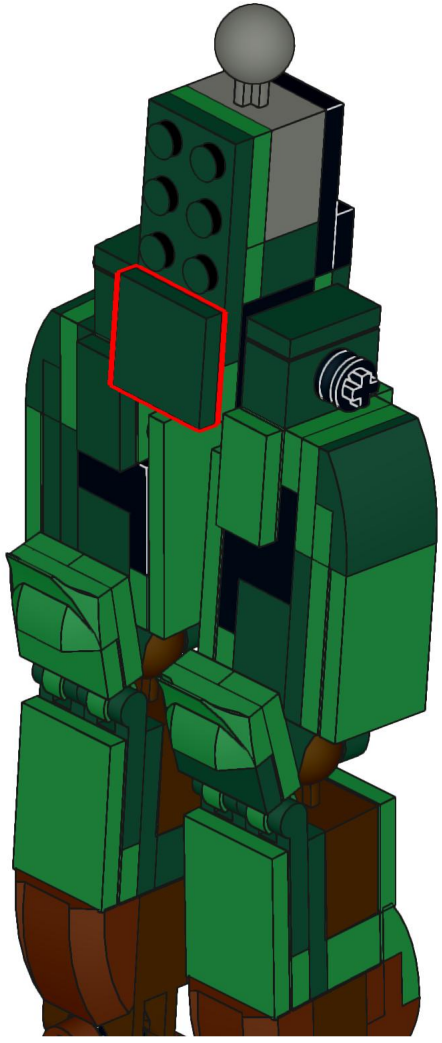
# 74



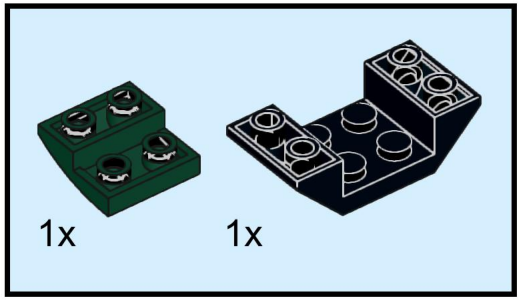



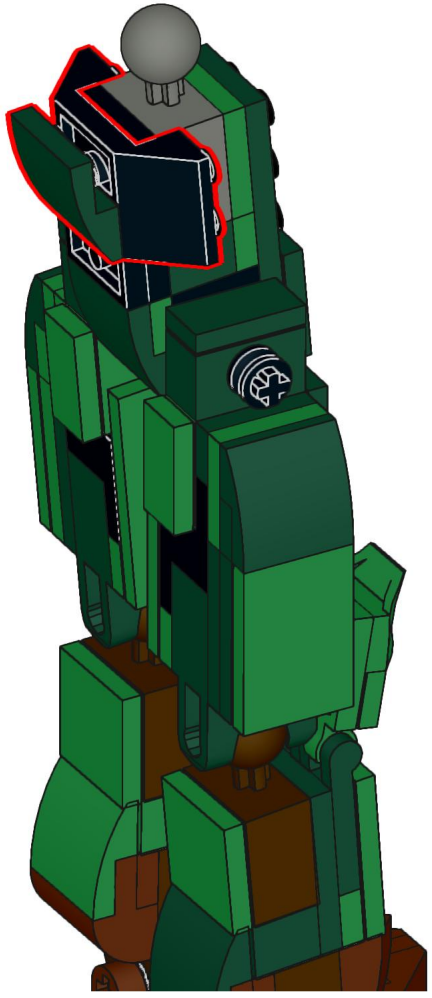
# 75



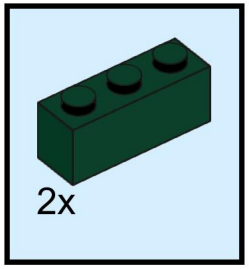



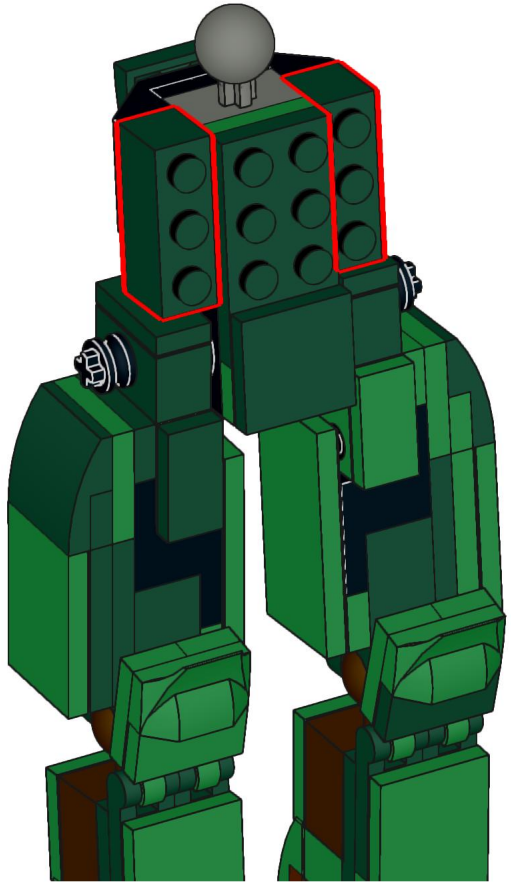
# 76



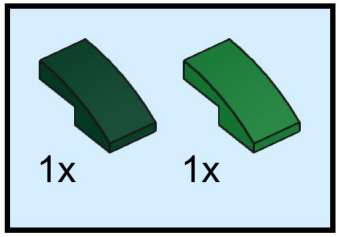



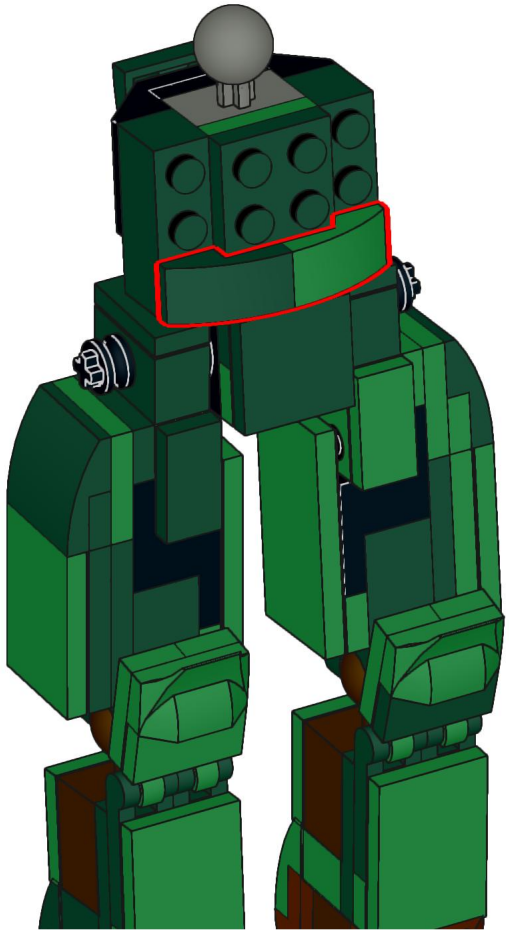
# 77



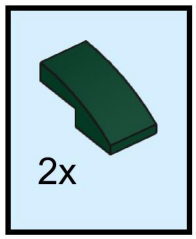



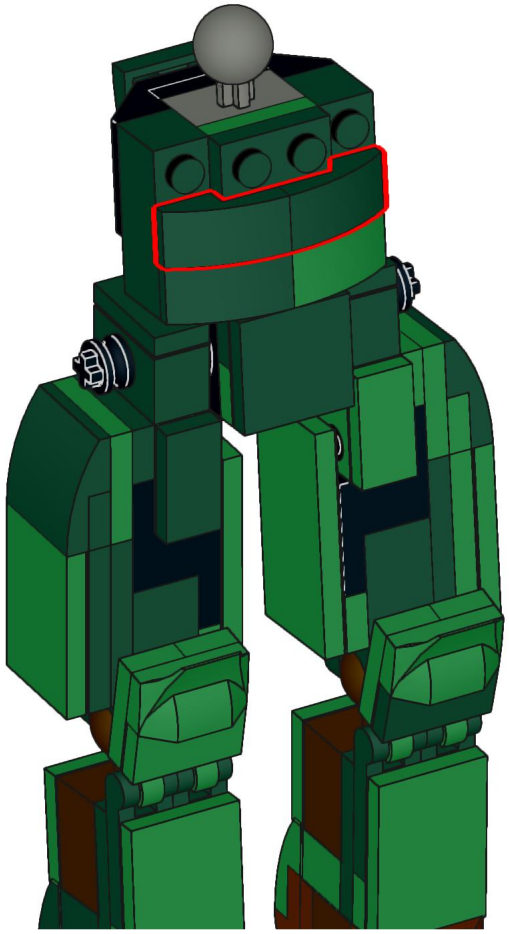
# 78



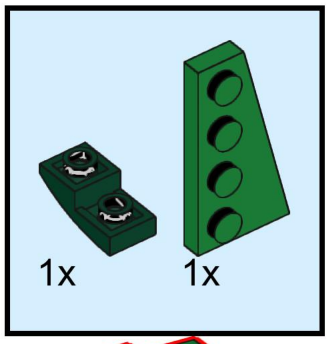



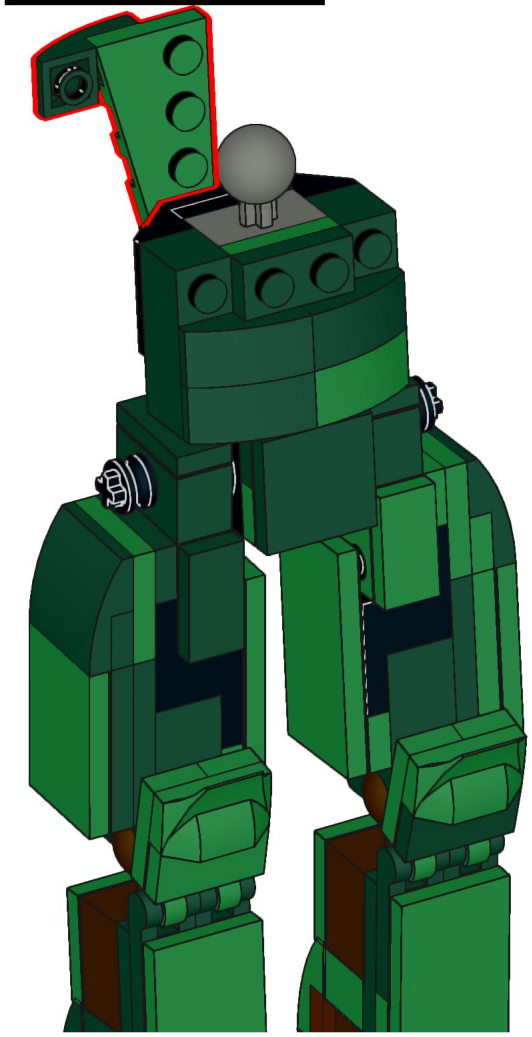
# 79



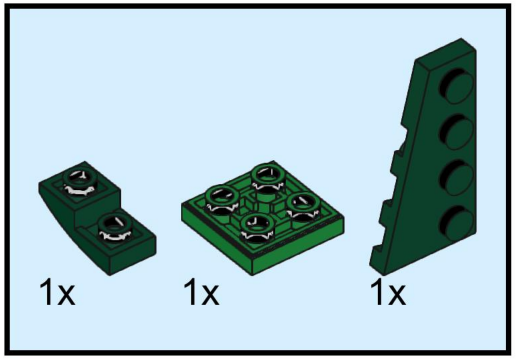



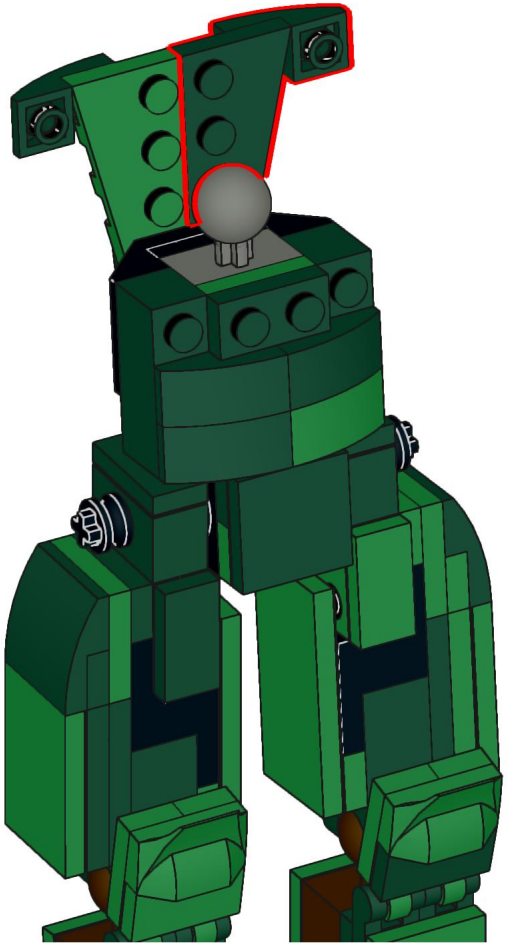
# 80



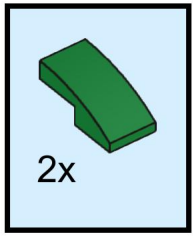



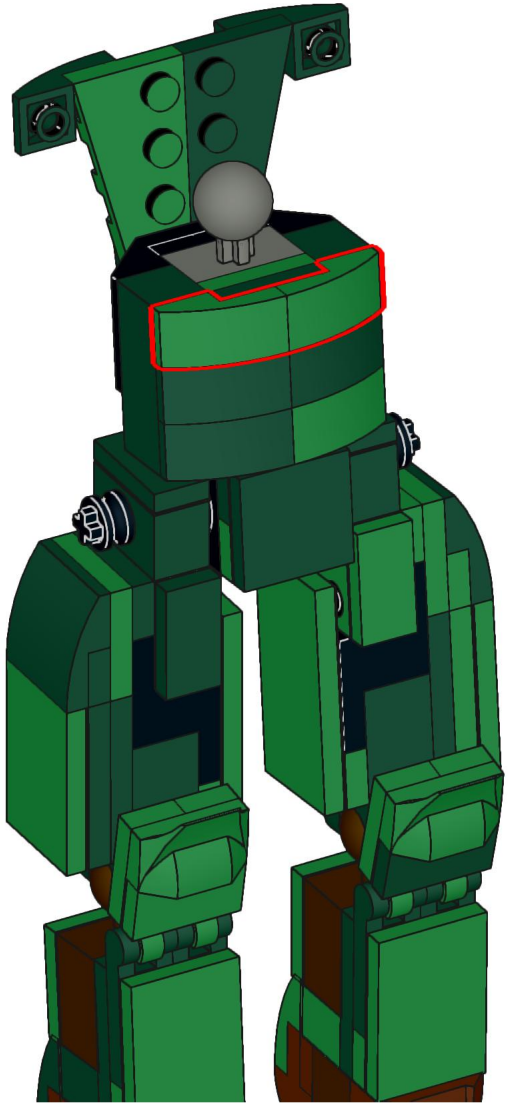
# 81



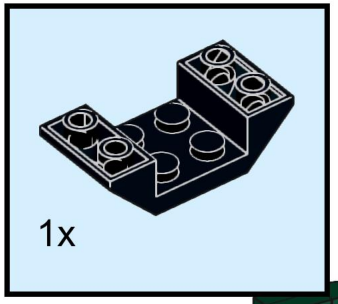



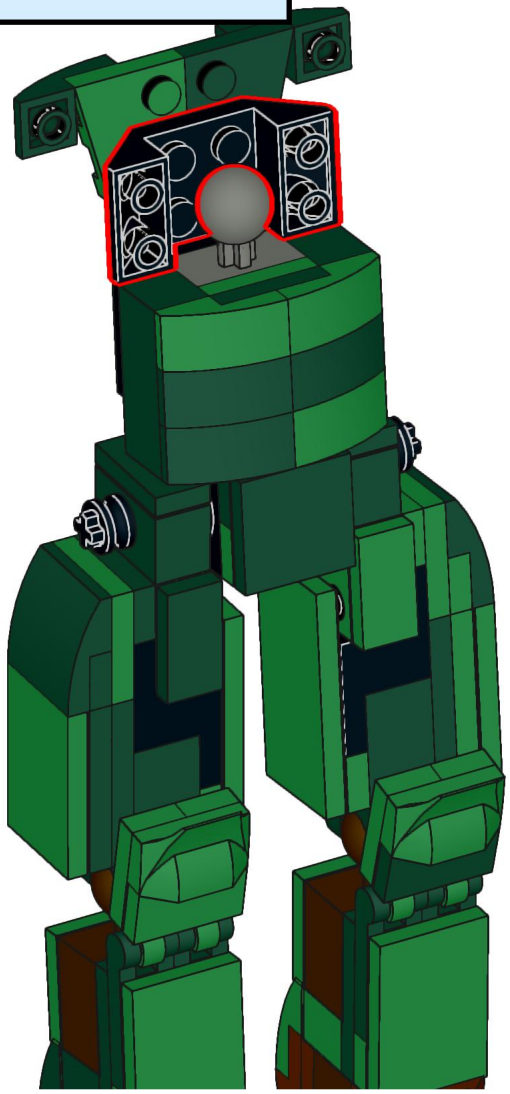
# 82



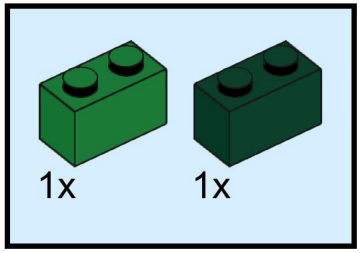



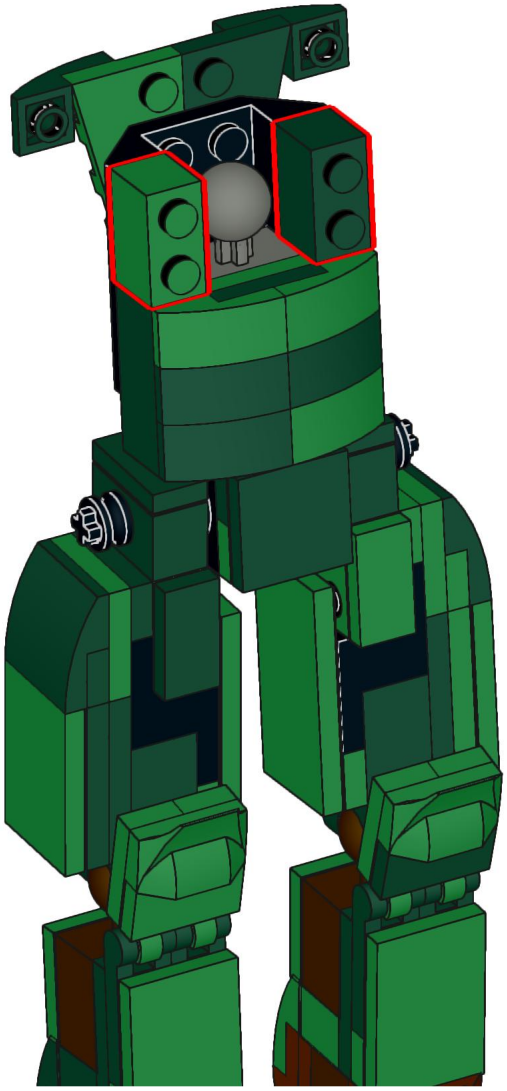
# 83



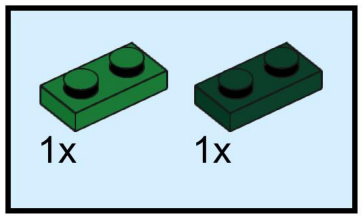



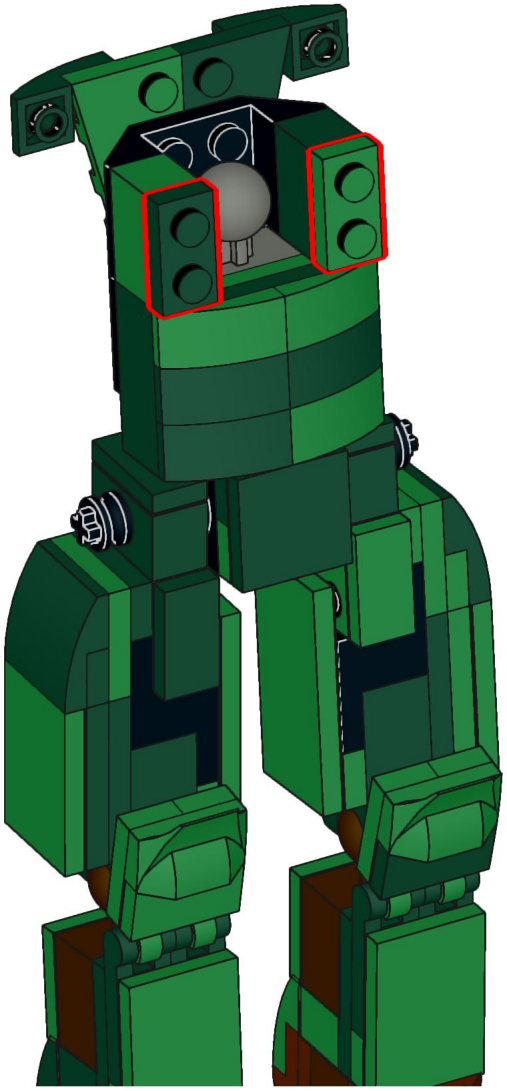
# 84



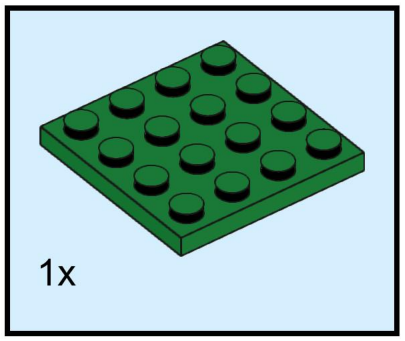



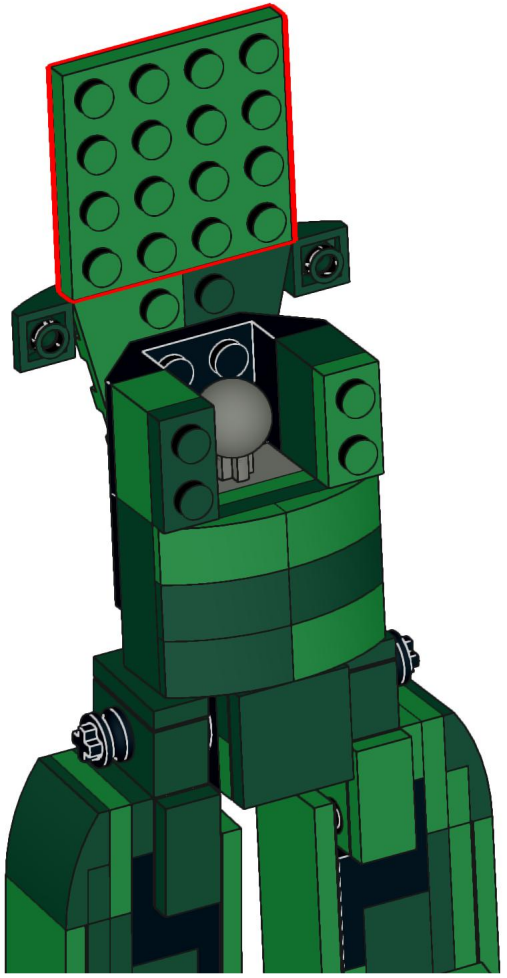
# 85



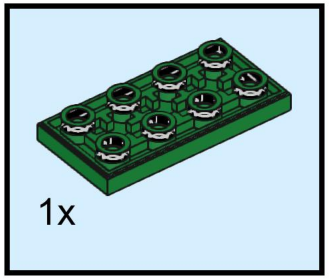



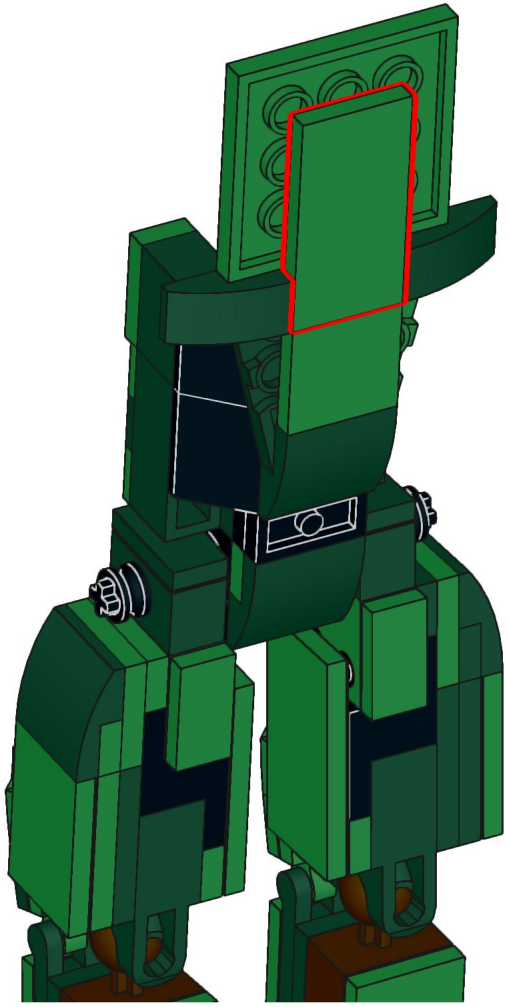
# 86



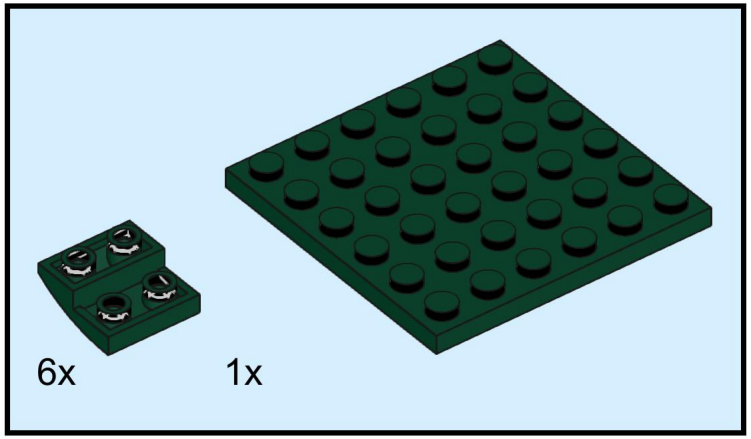



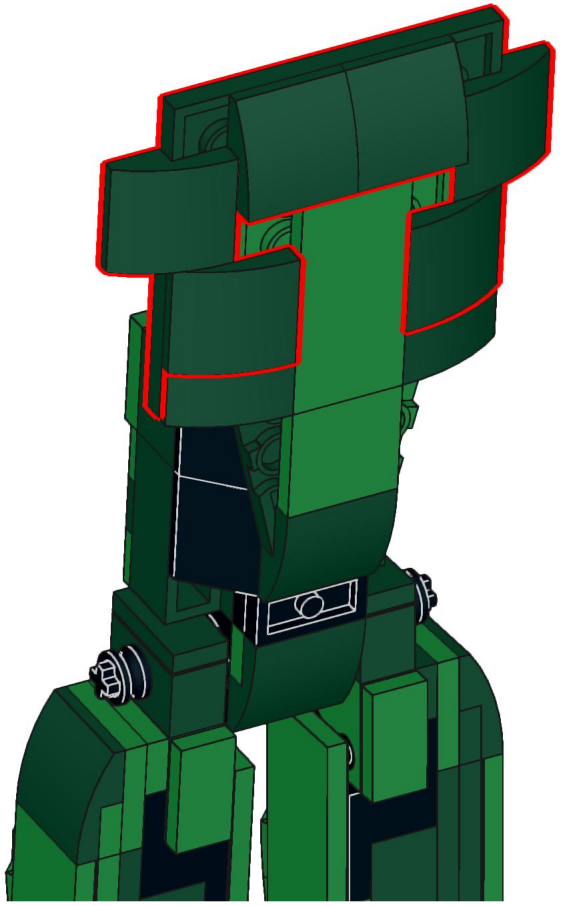
# 87



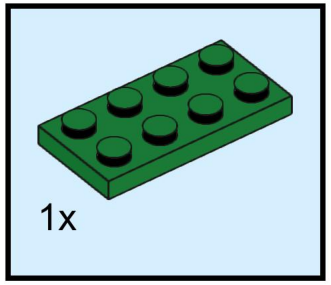



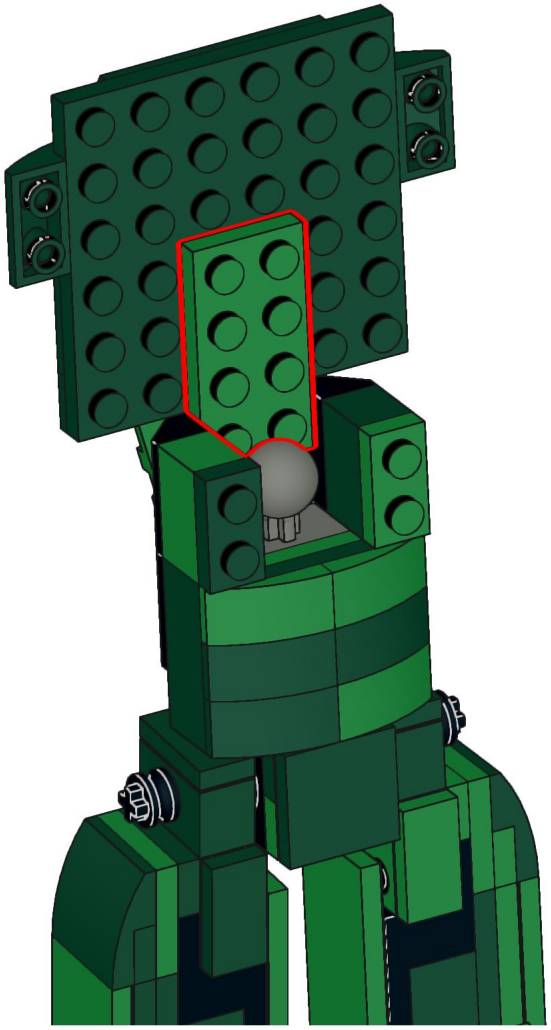
# 88



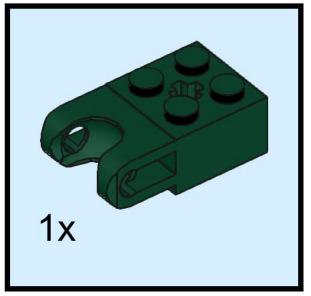



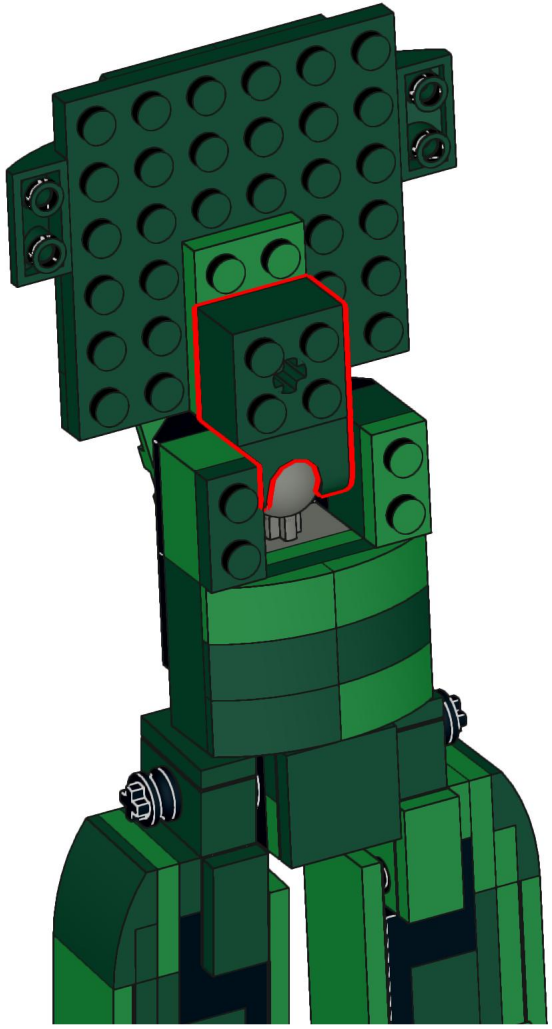
# 89



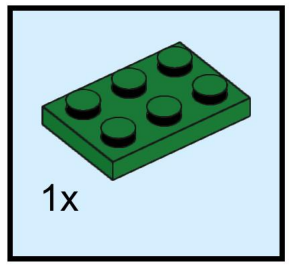



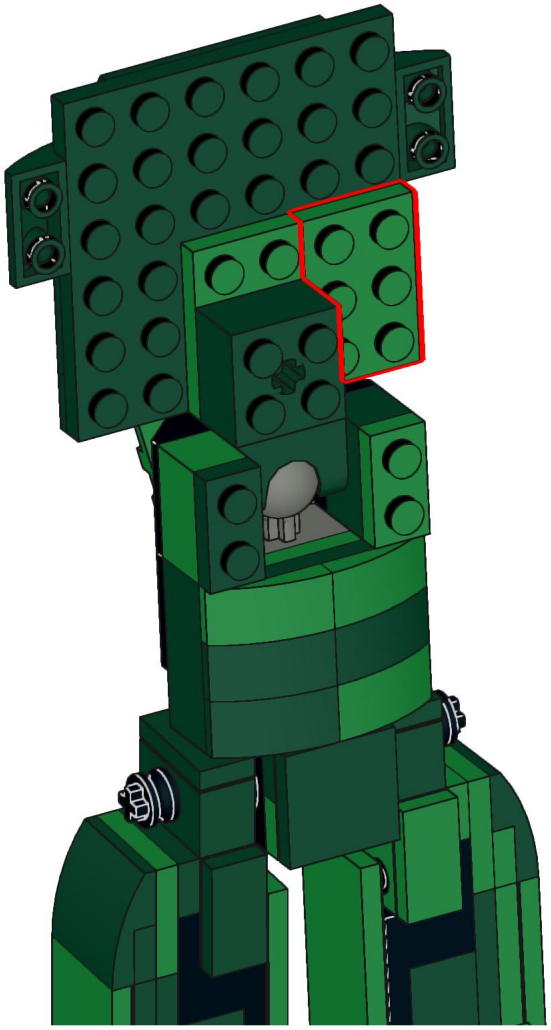
# 90



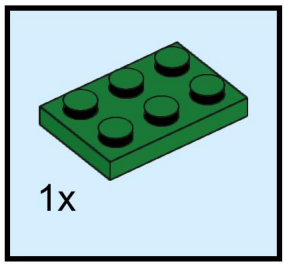



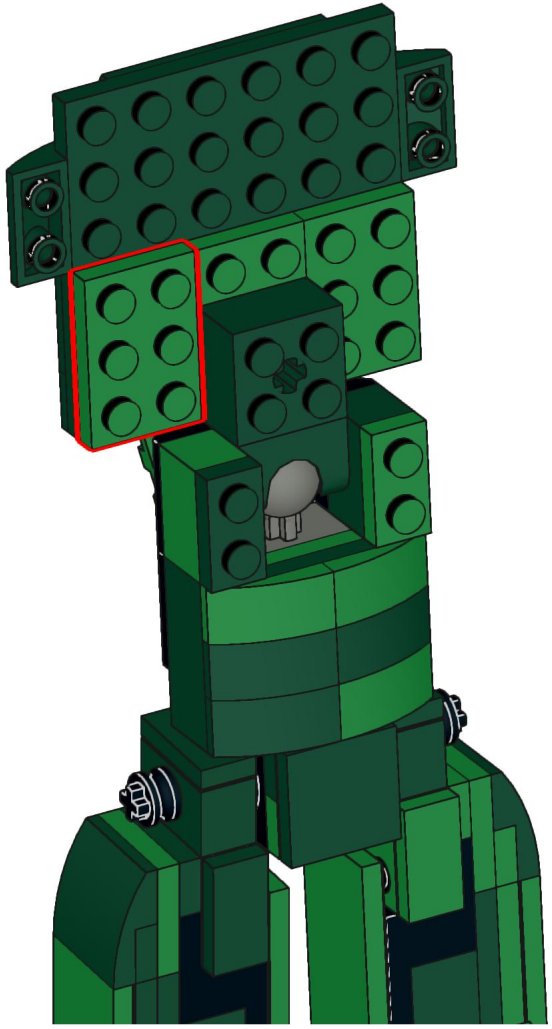
# 91



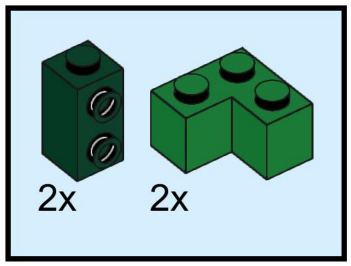



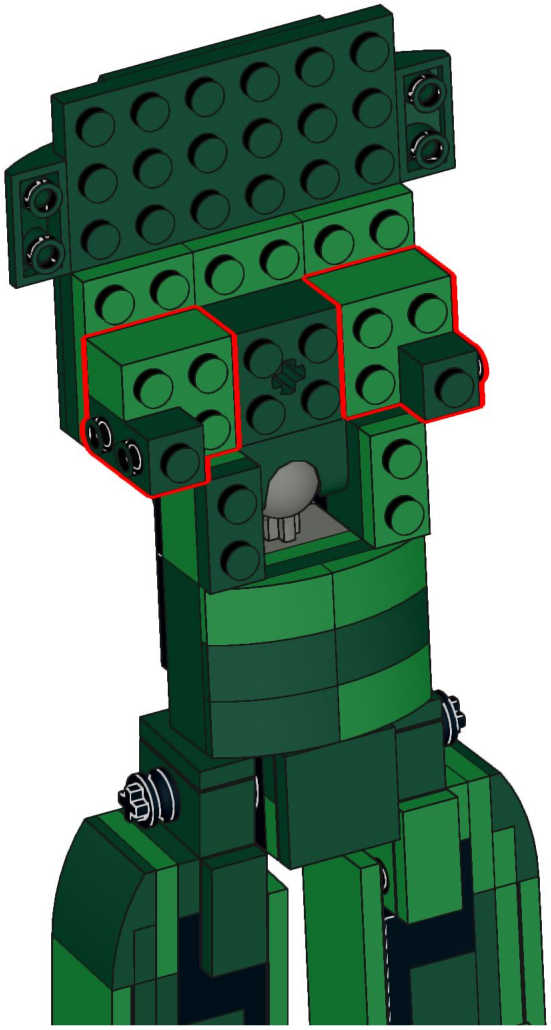
# 92



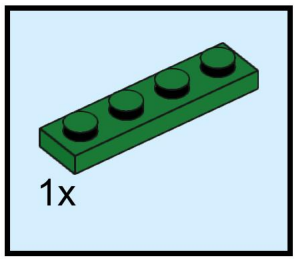



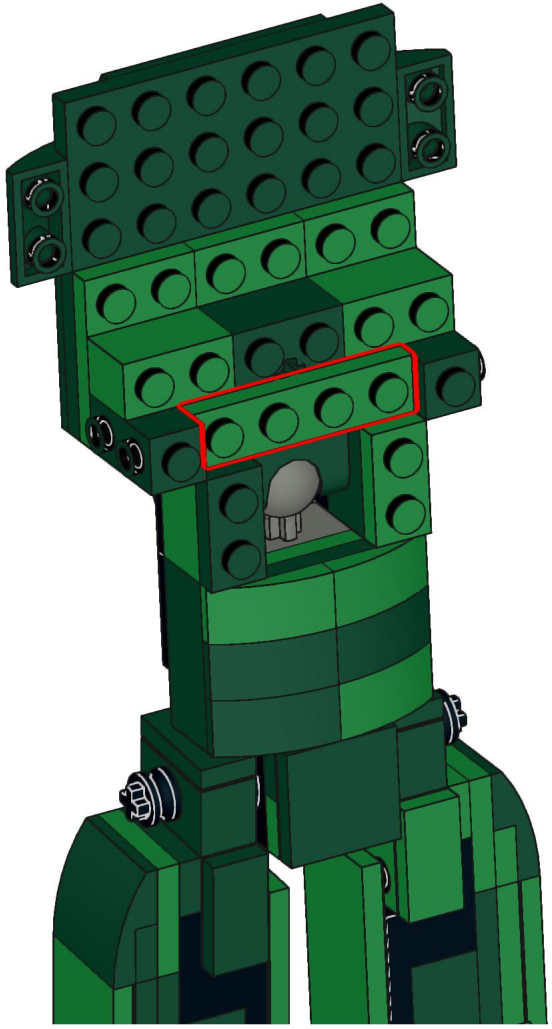
# 93



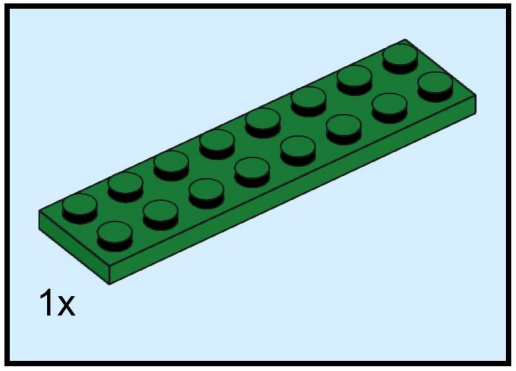



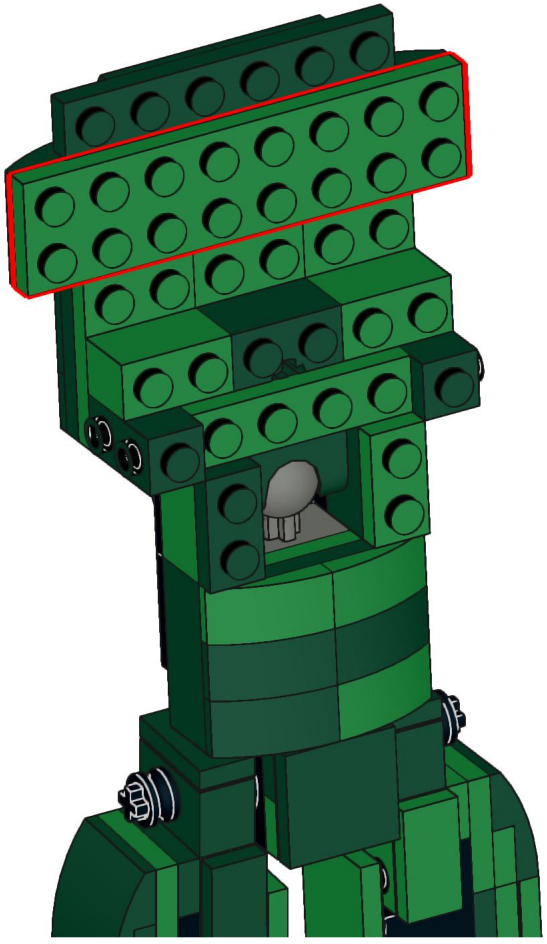
# 94



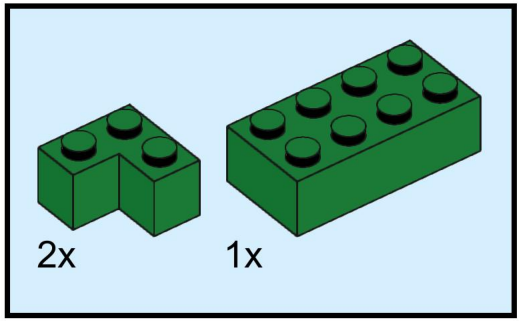



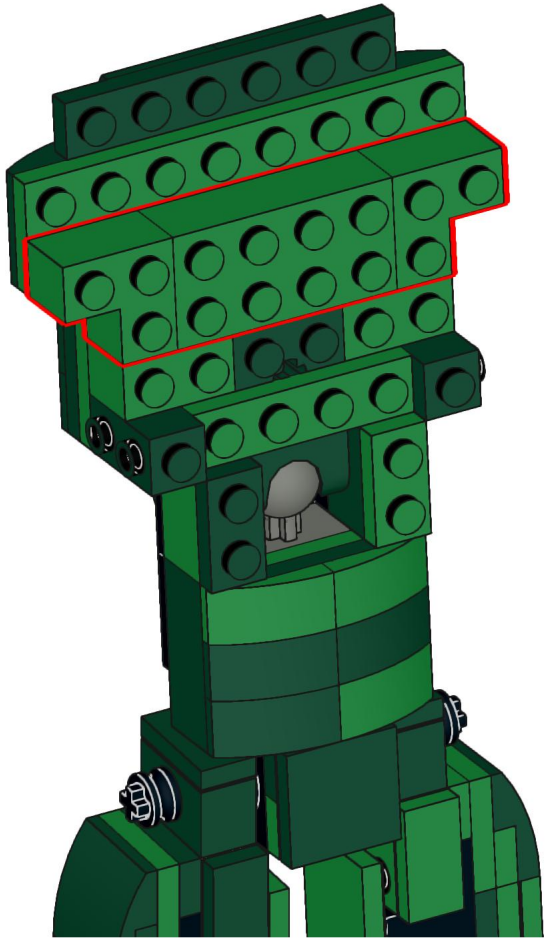
# 95



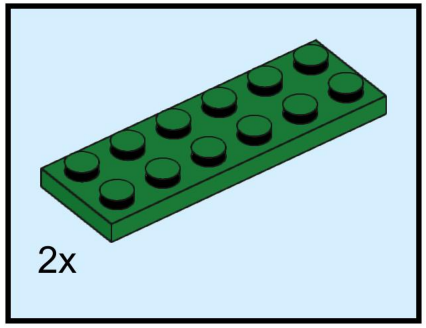



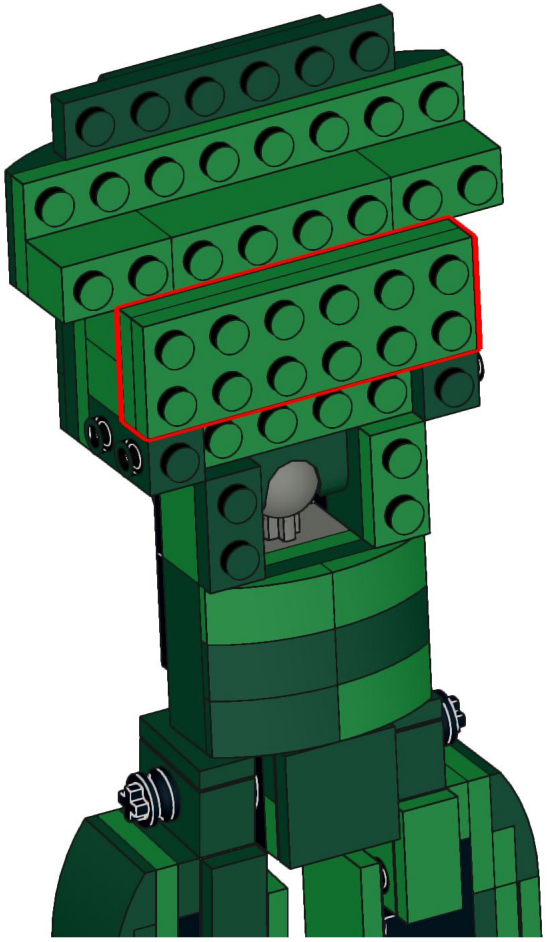
# 96



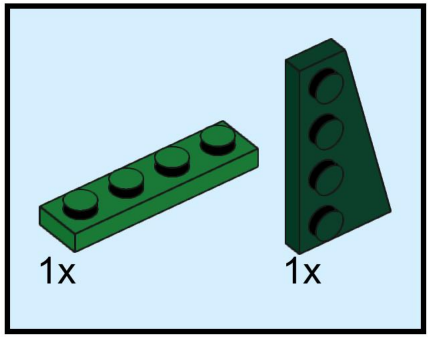



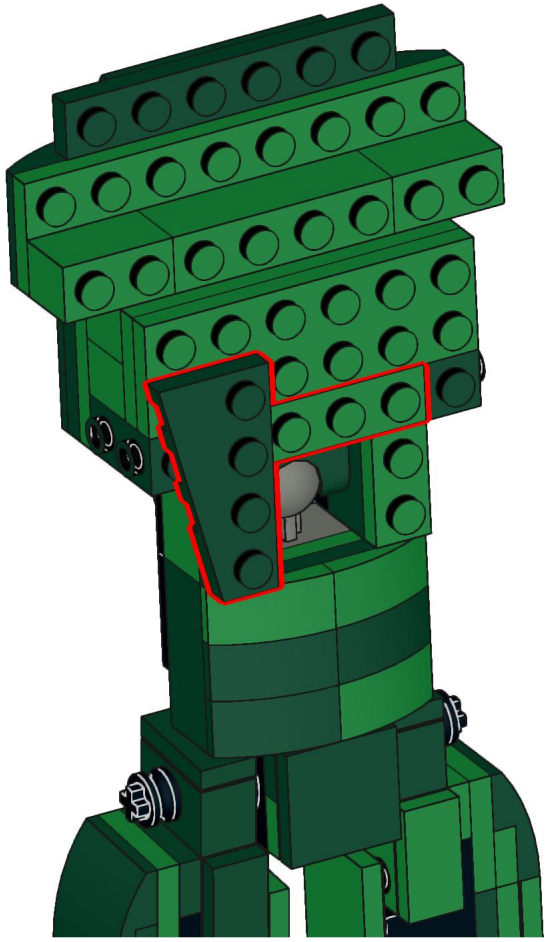
# 97



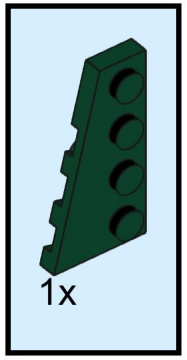



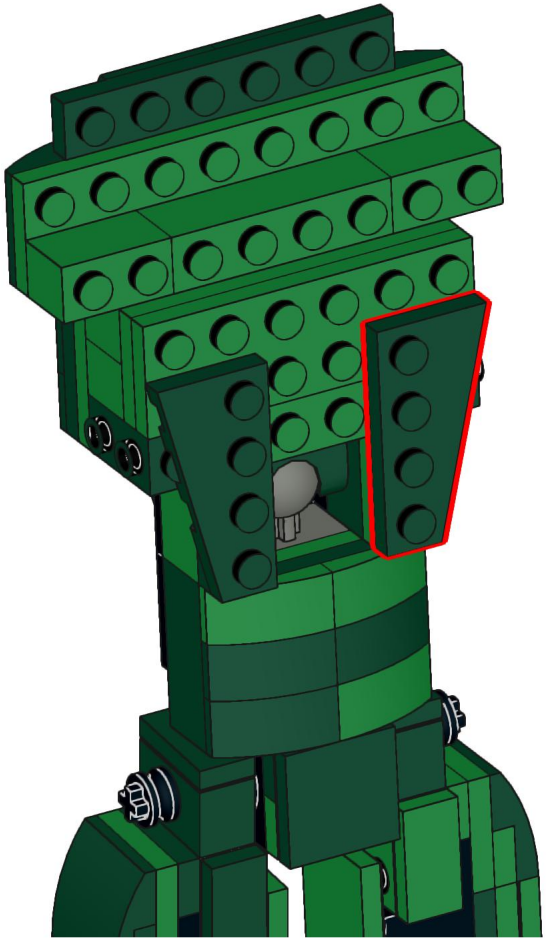
# 98



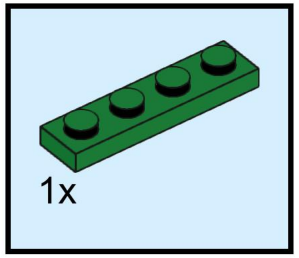



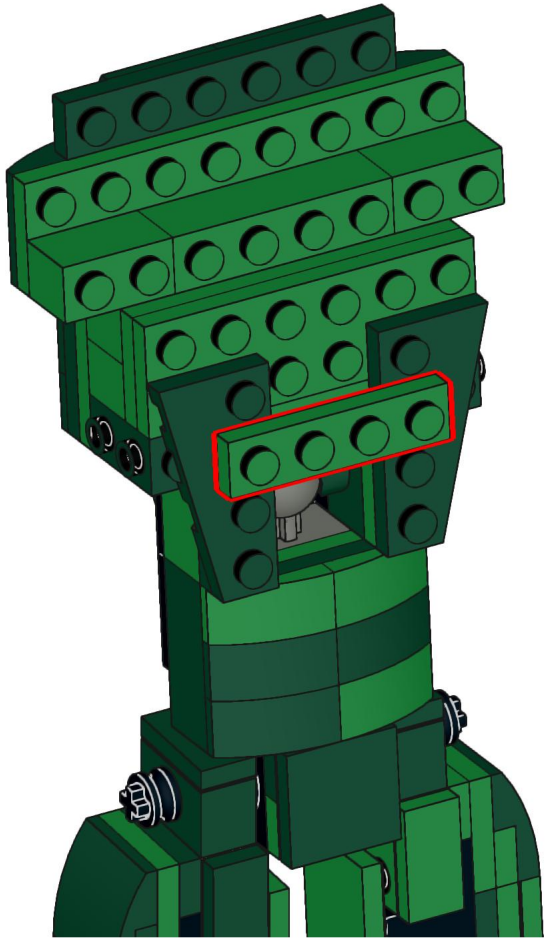
# 99



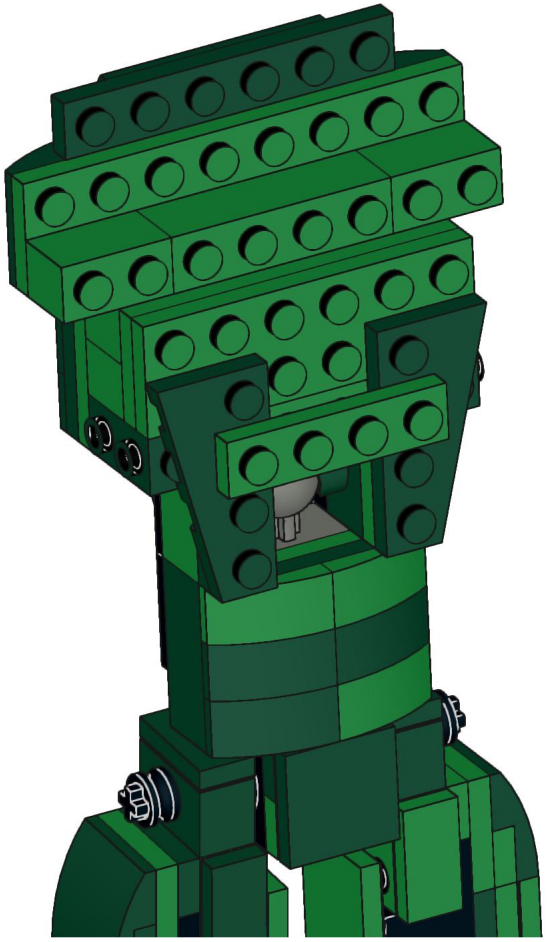



# 100

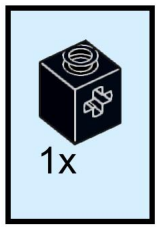


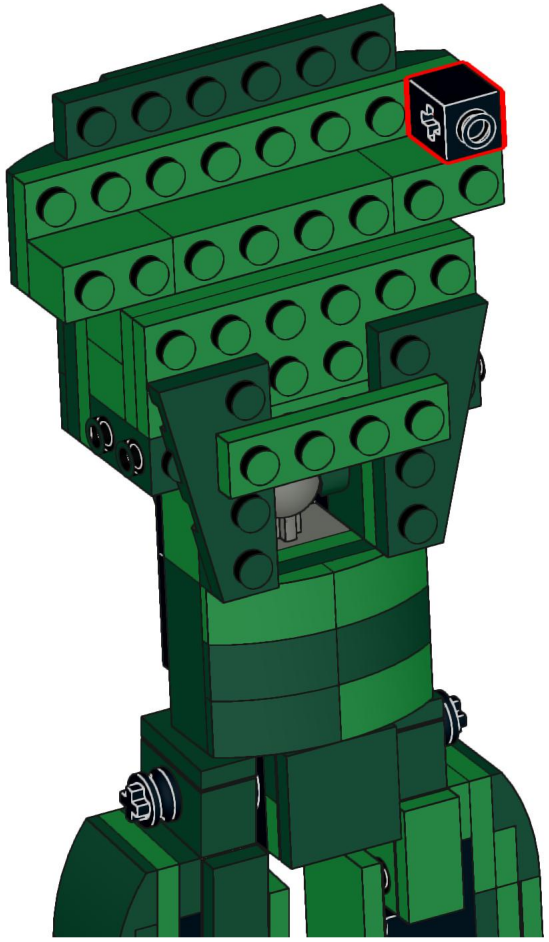



# 101

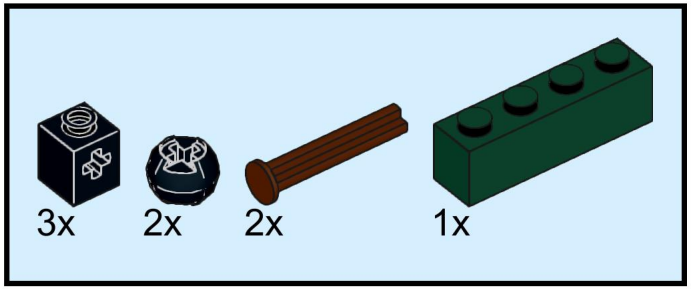


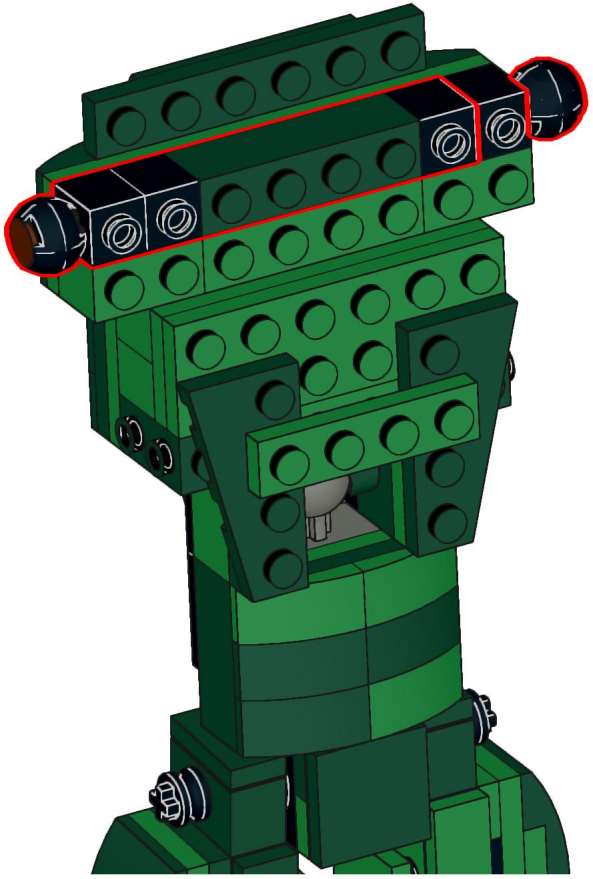
# 102



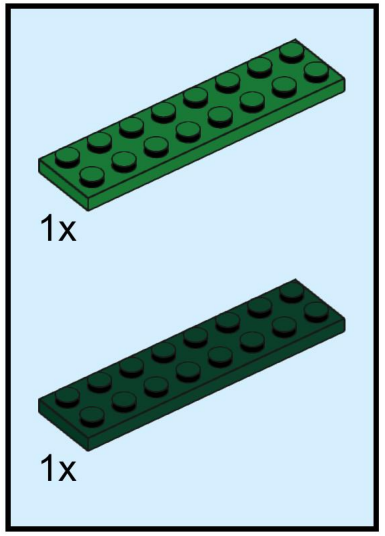



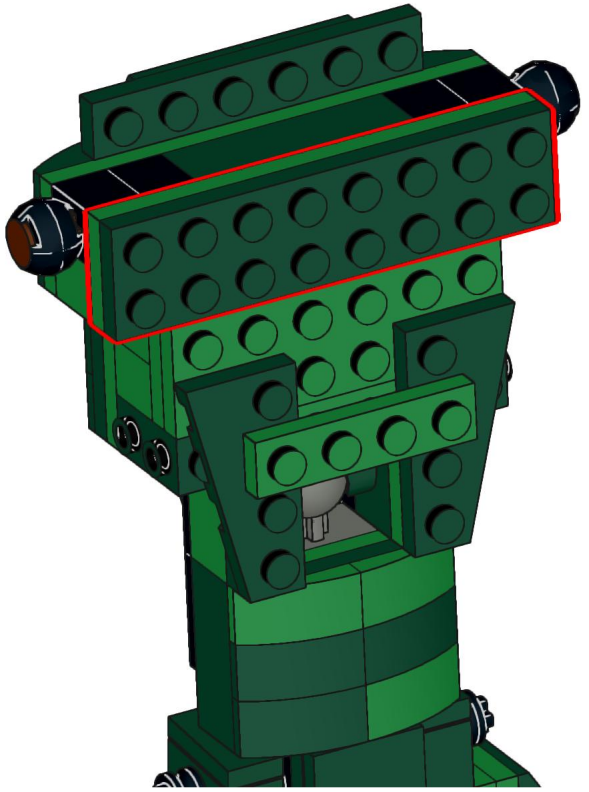
# 103



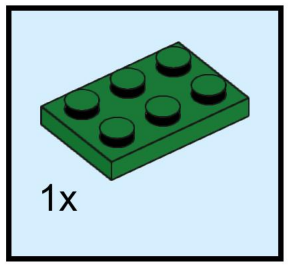



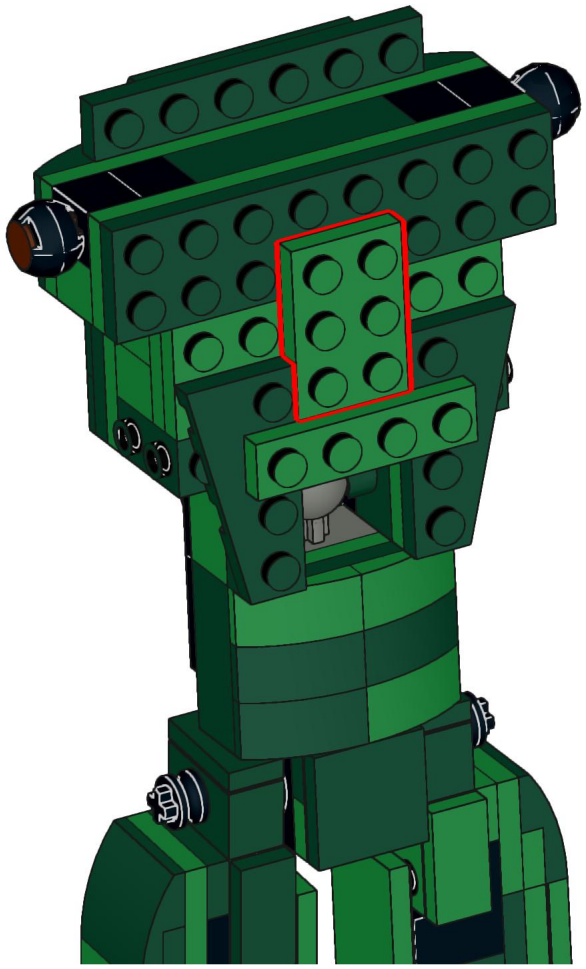
# 104



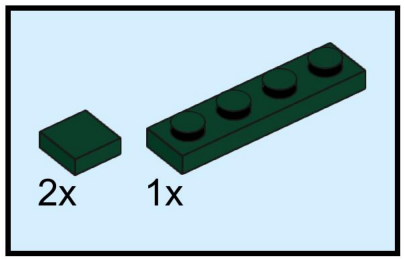



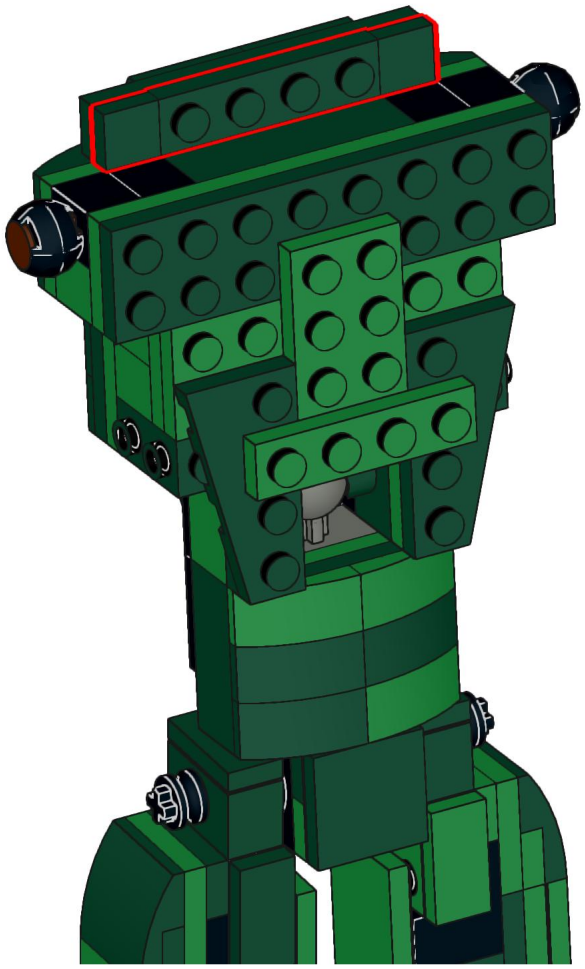
# 105



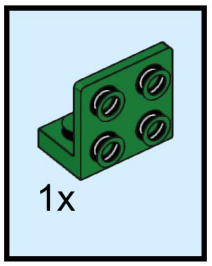



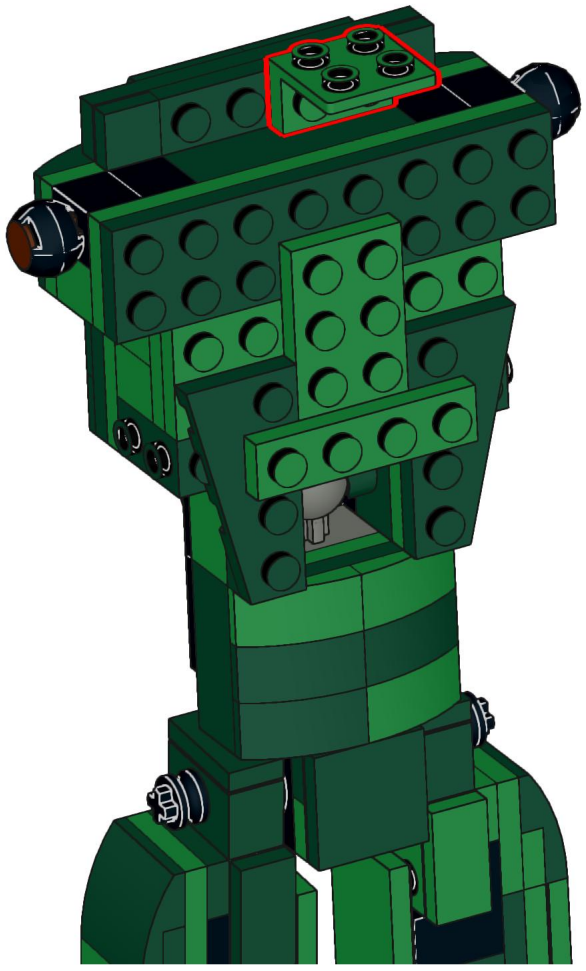
# 106



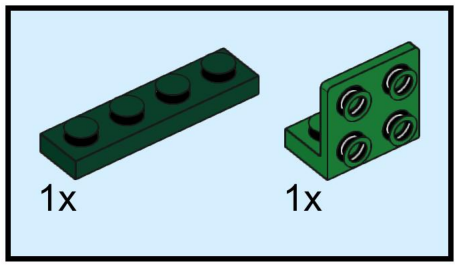



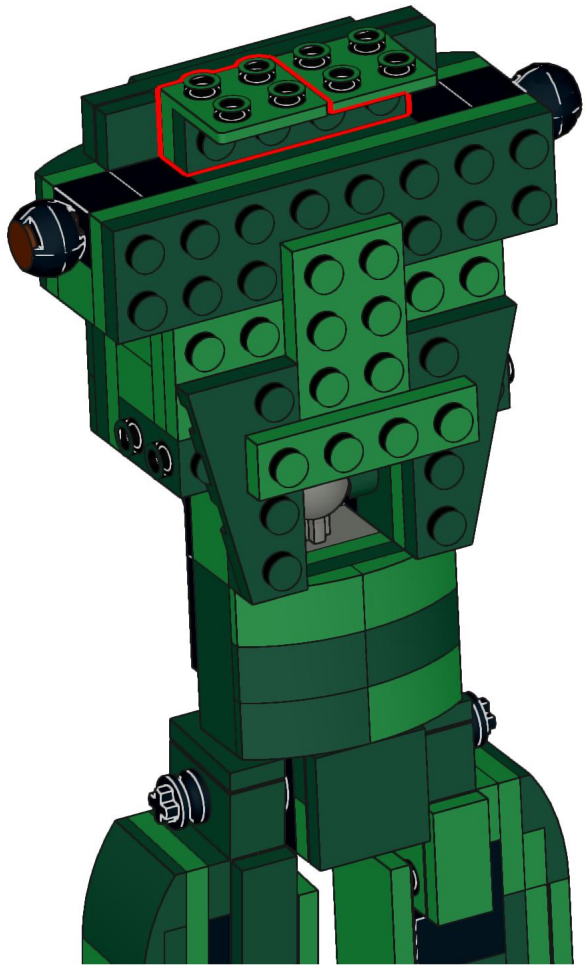
# 107



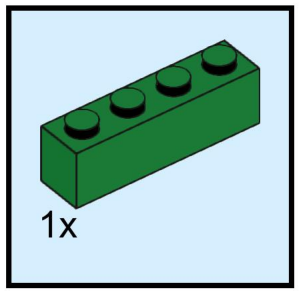



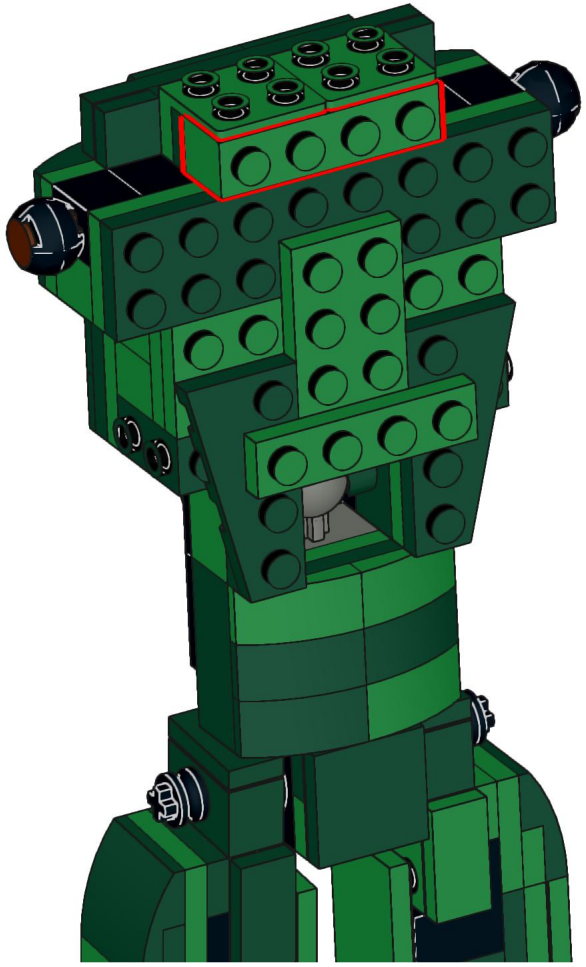
# 108



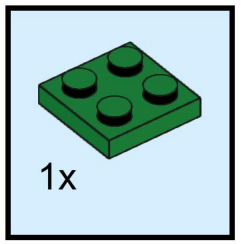



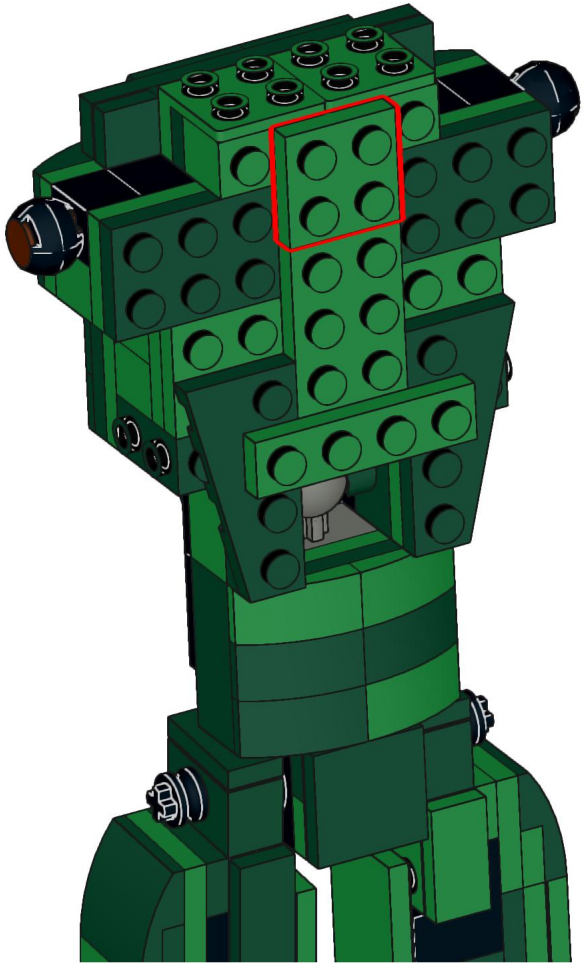
# 109



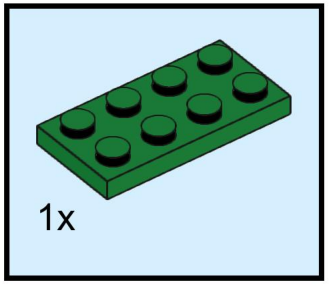



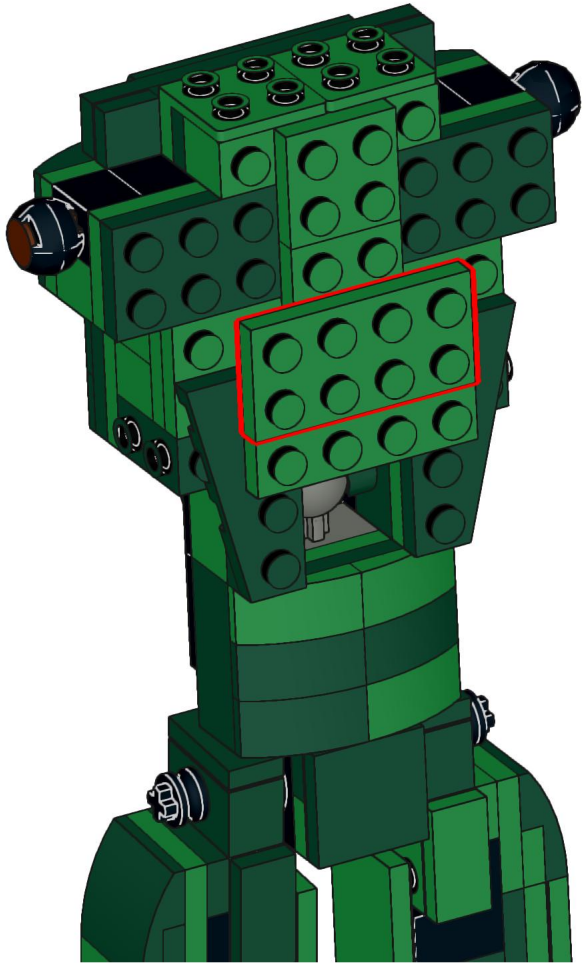
# 110



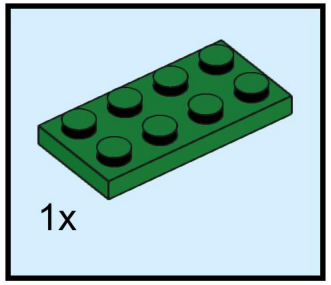



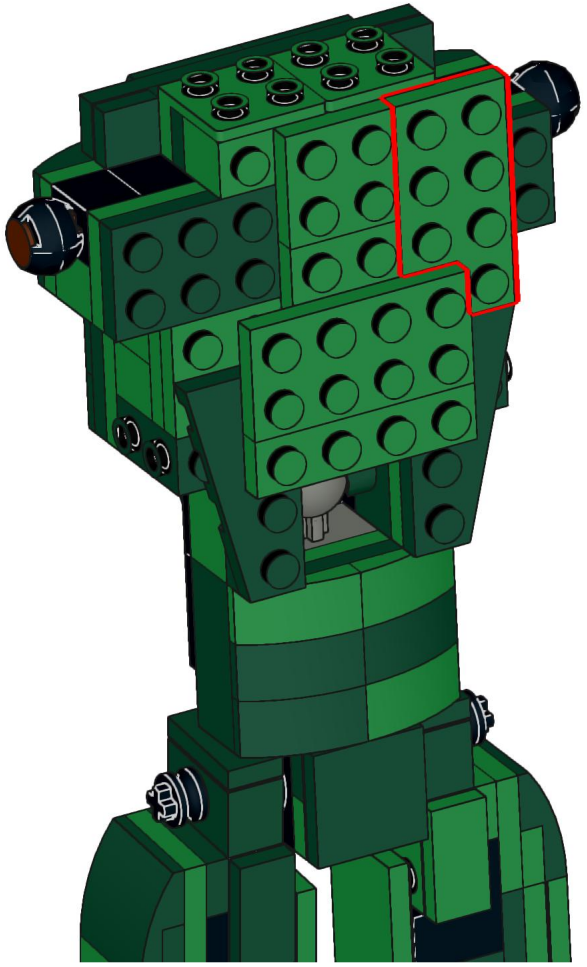
# 111



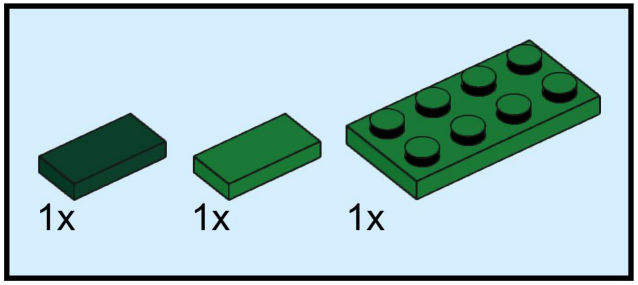



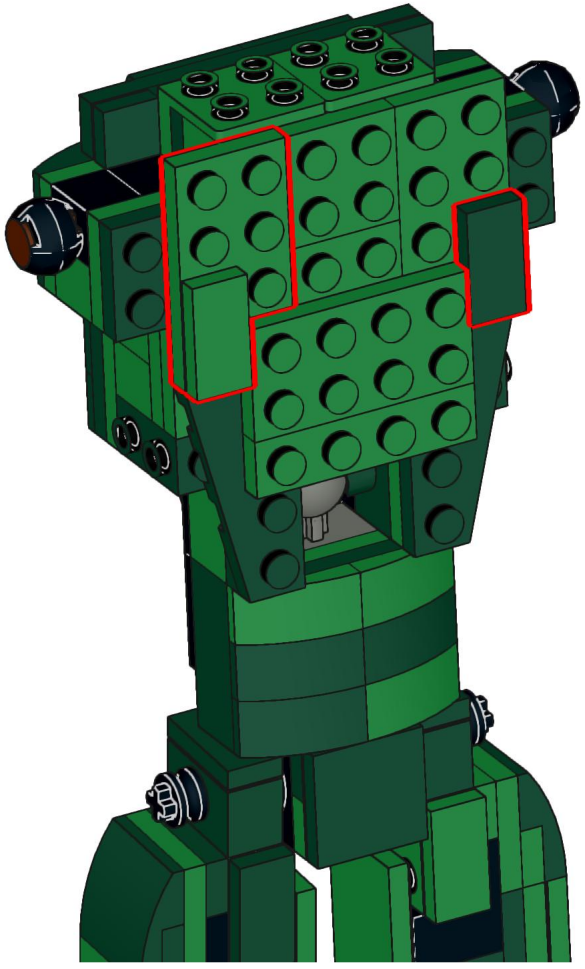
# 112



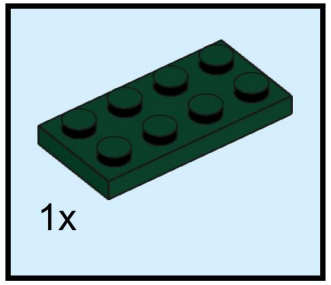



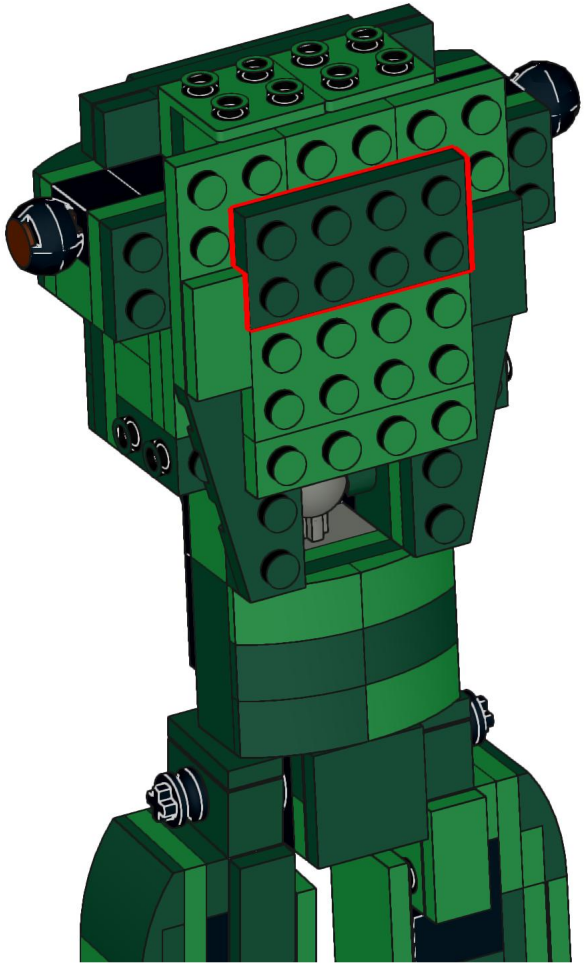
# 113



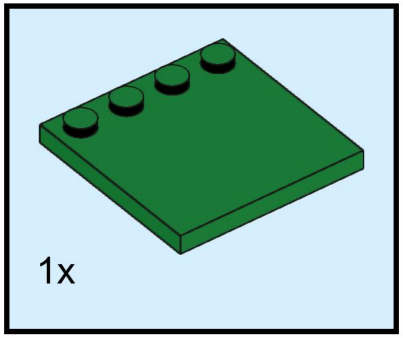



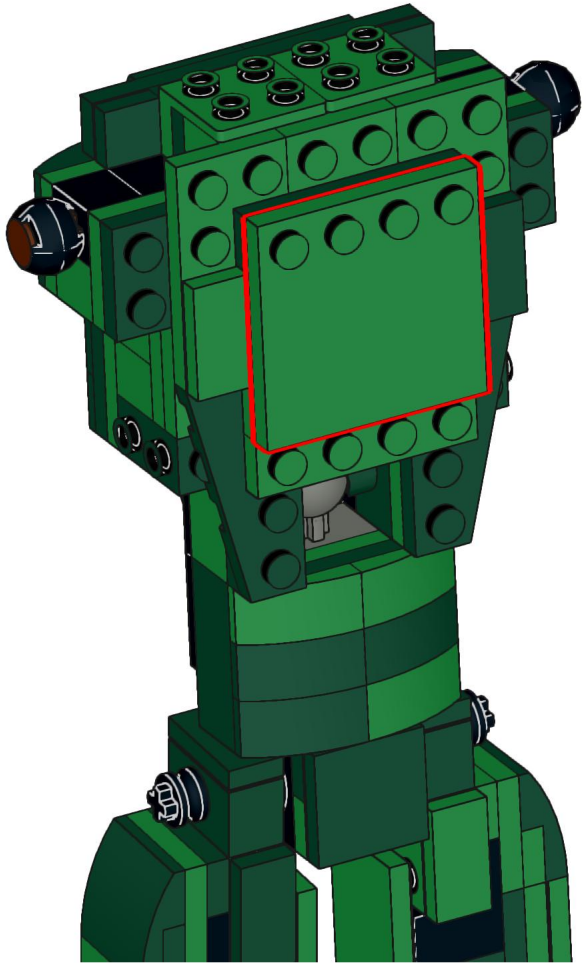
# 114



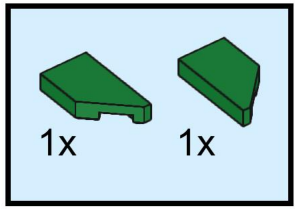



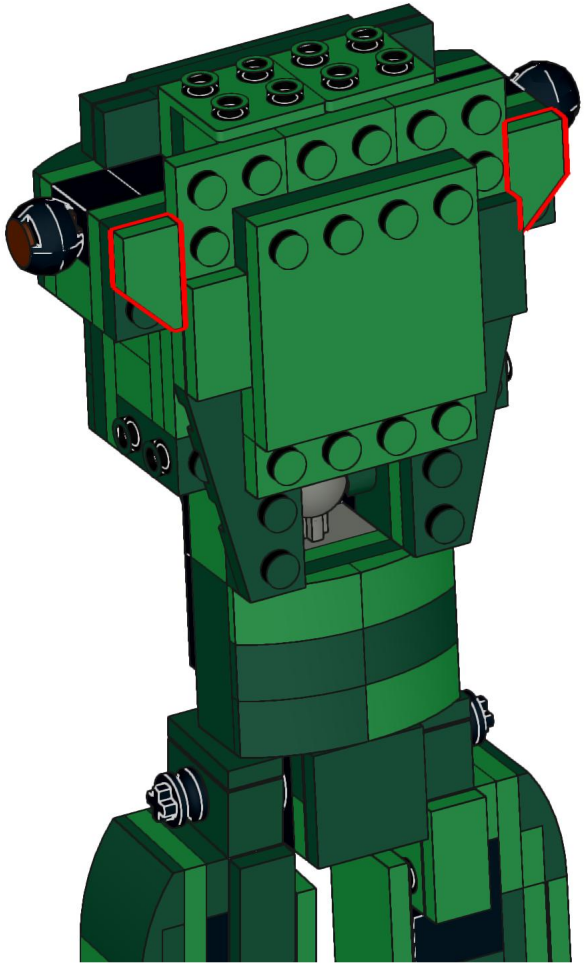
# 115



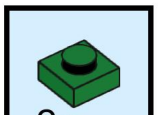



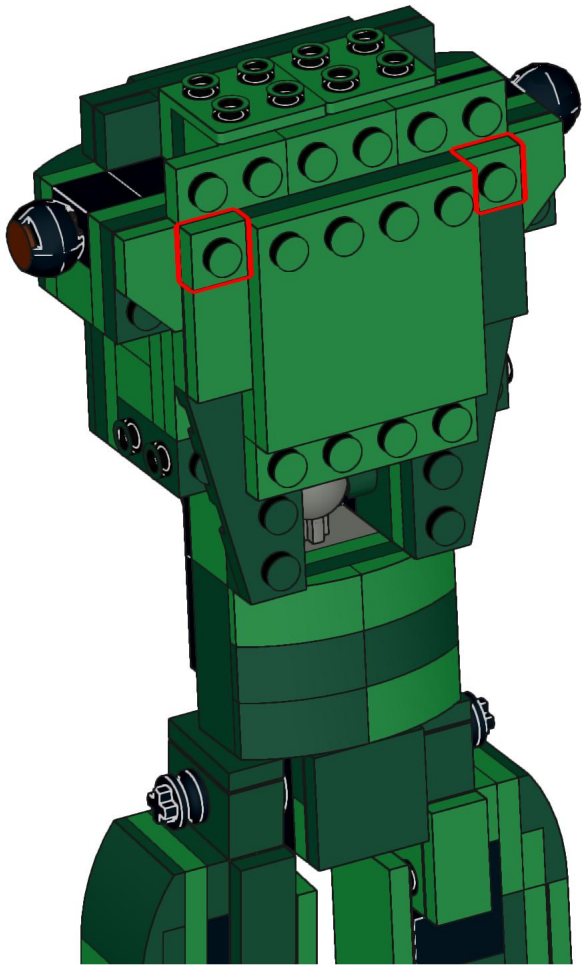
# 116



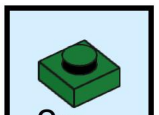



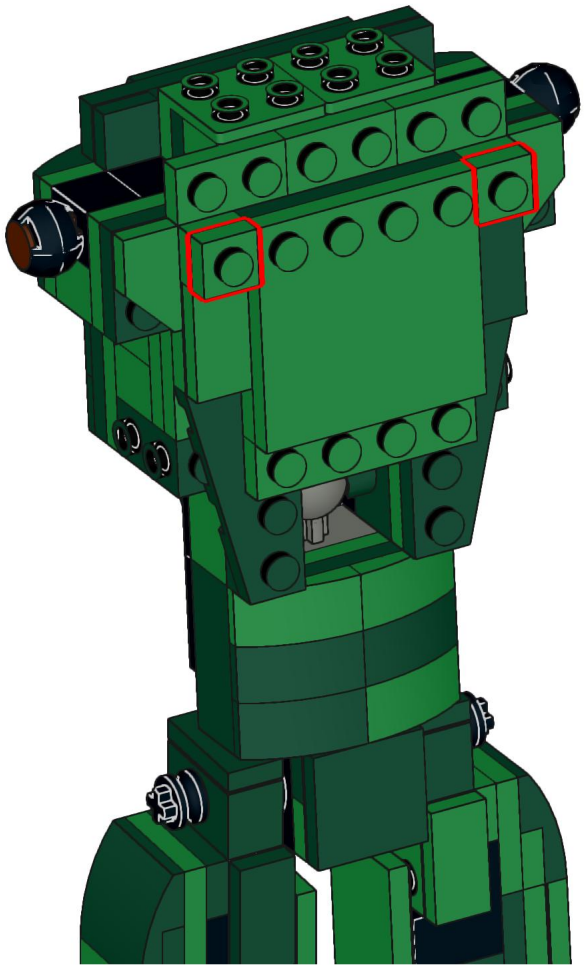
# 117



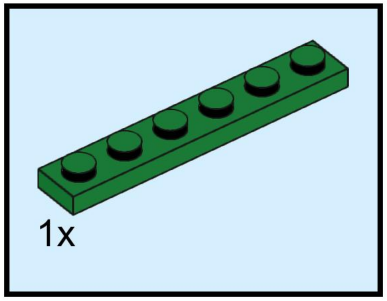



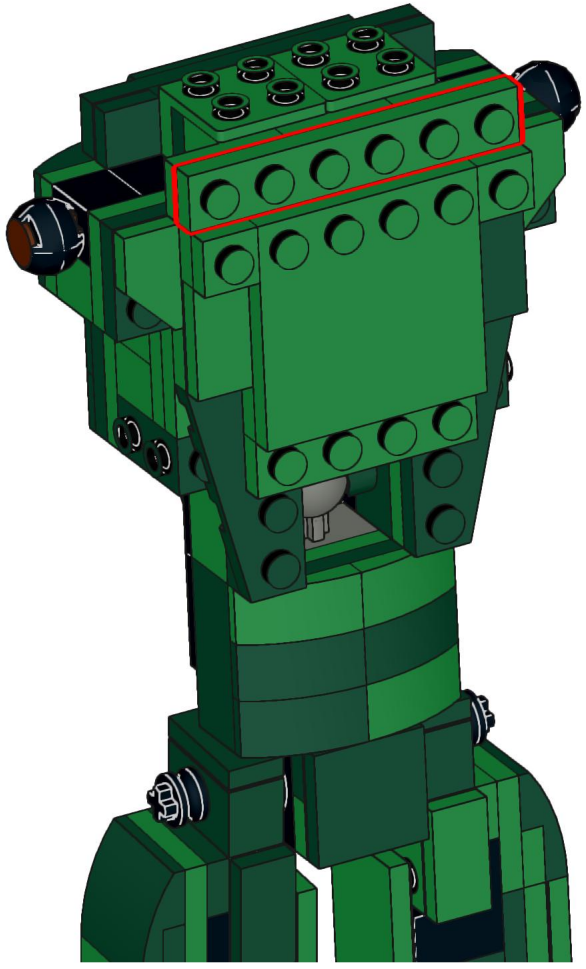
# 118



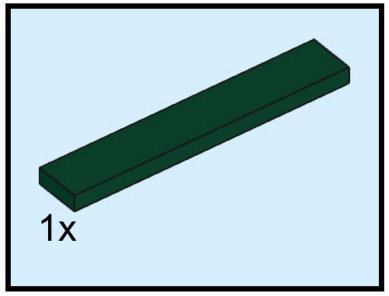



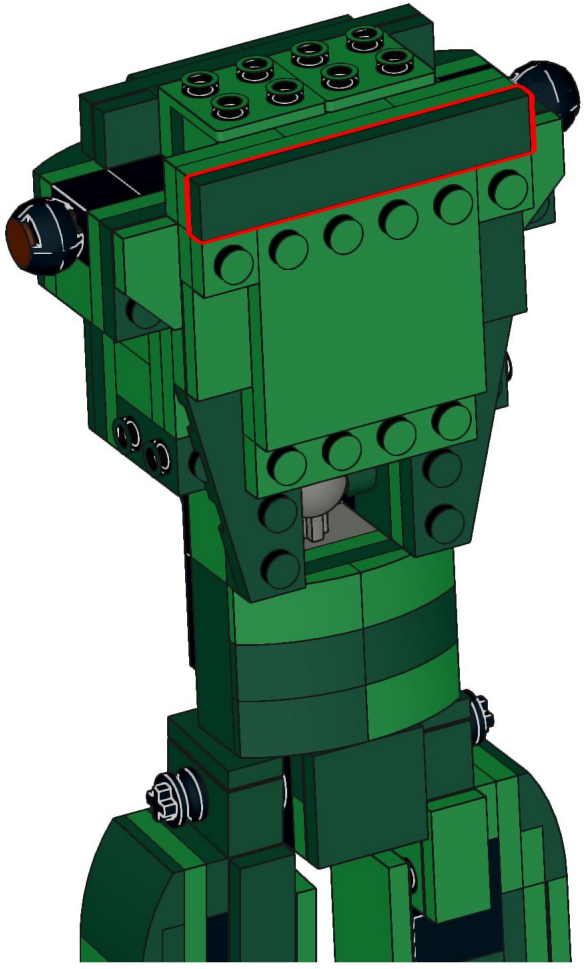
# 119



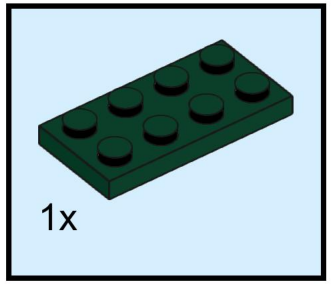



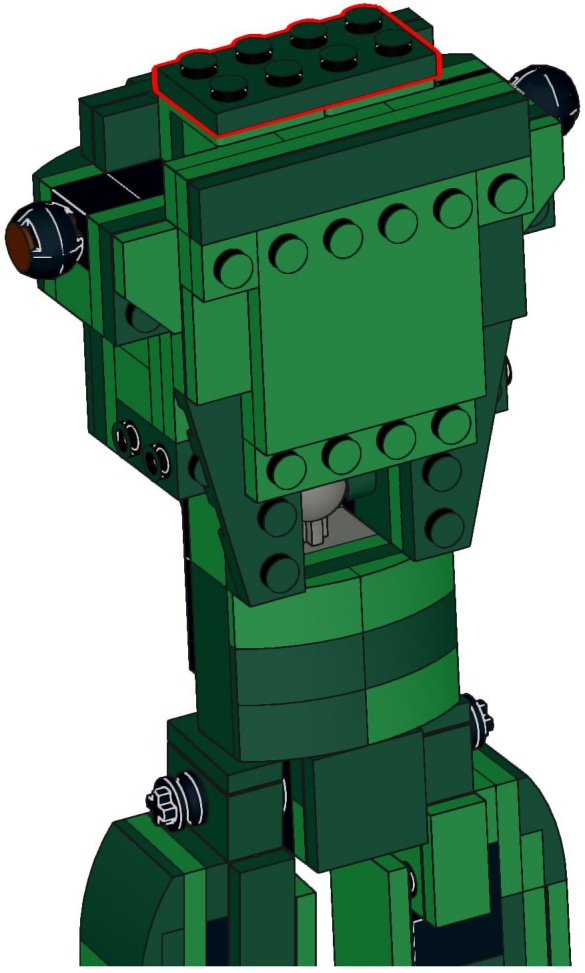
# 120



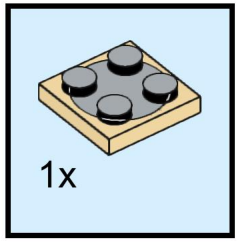



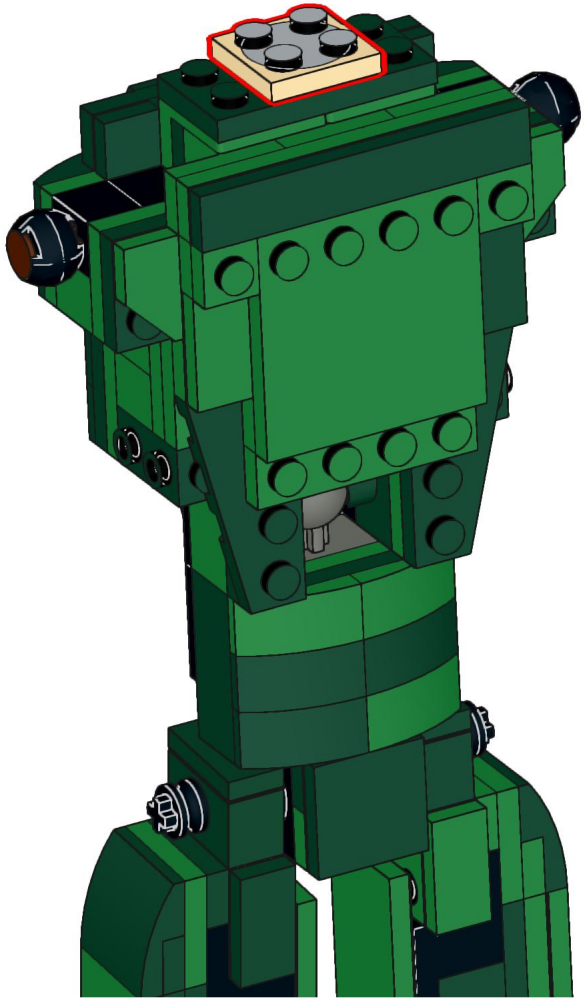
# 121



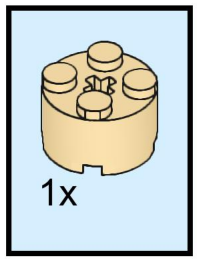



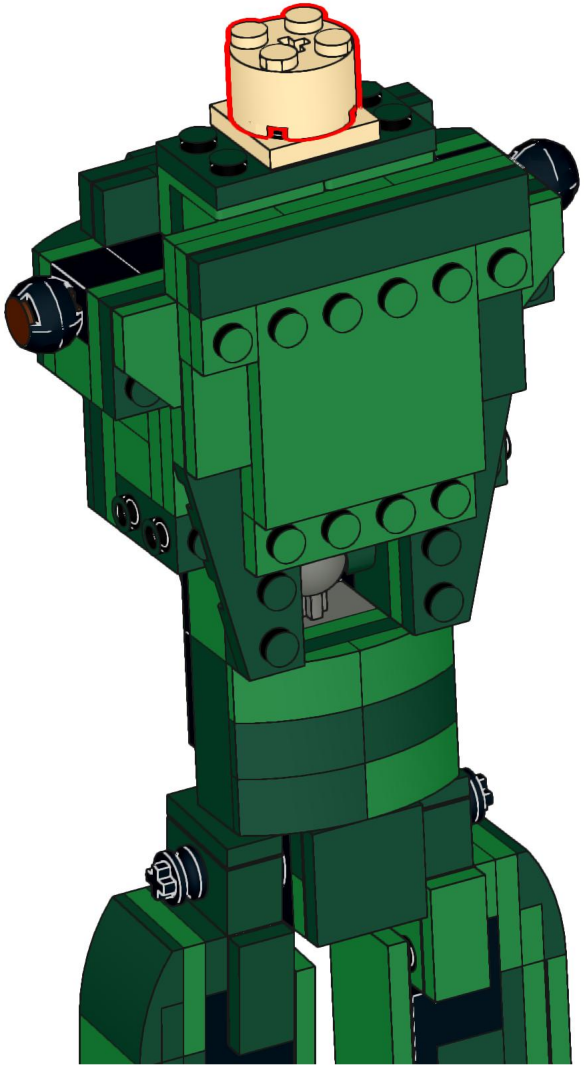
# 122



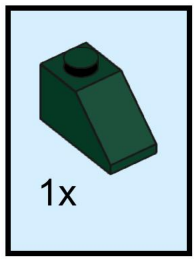



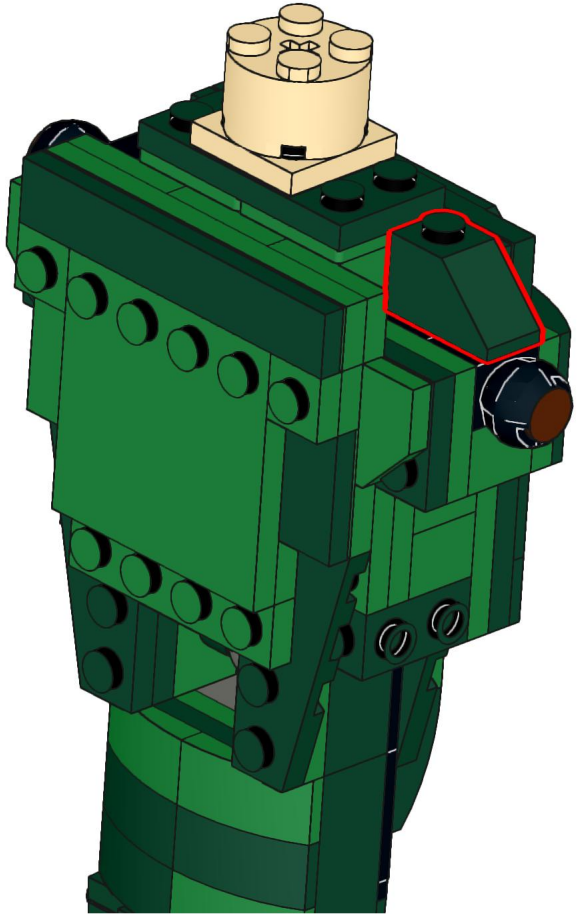
# 123



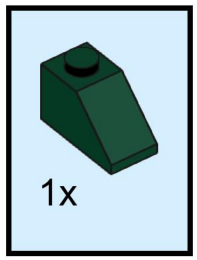



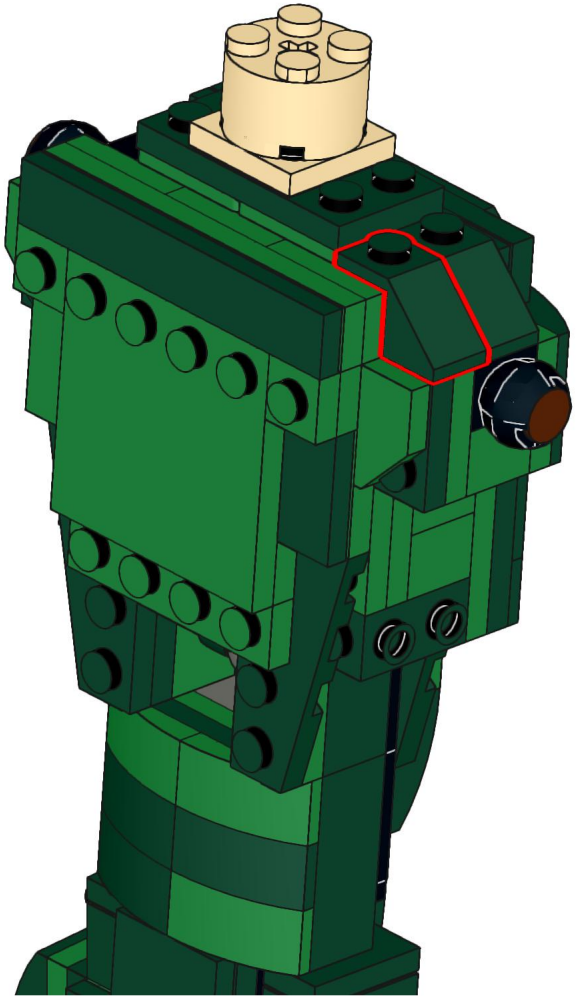
# 124



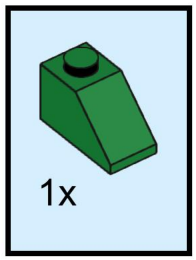



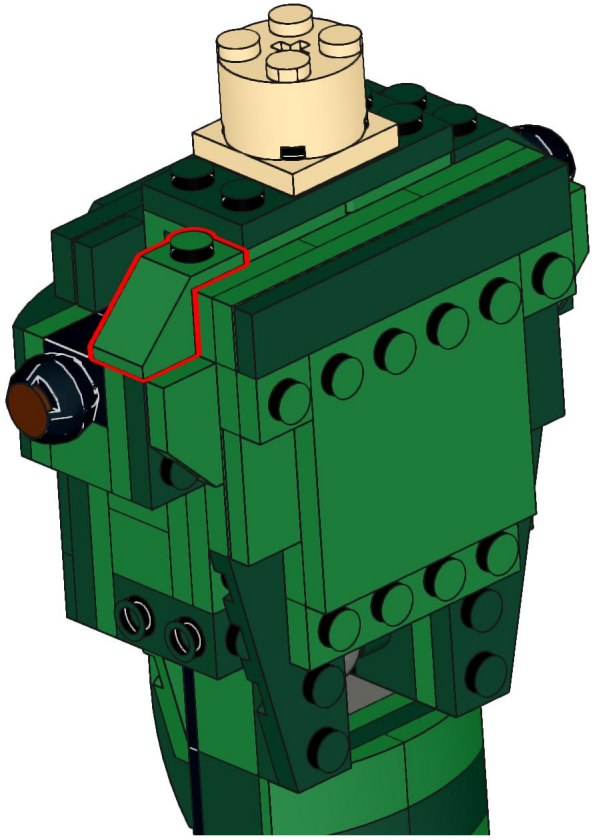
# 125



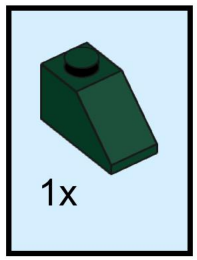



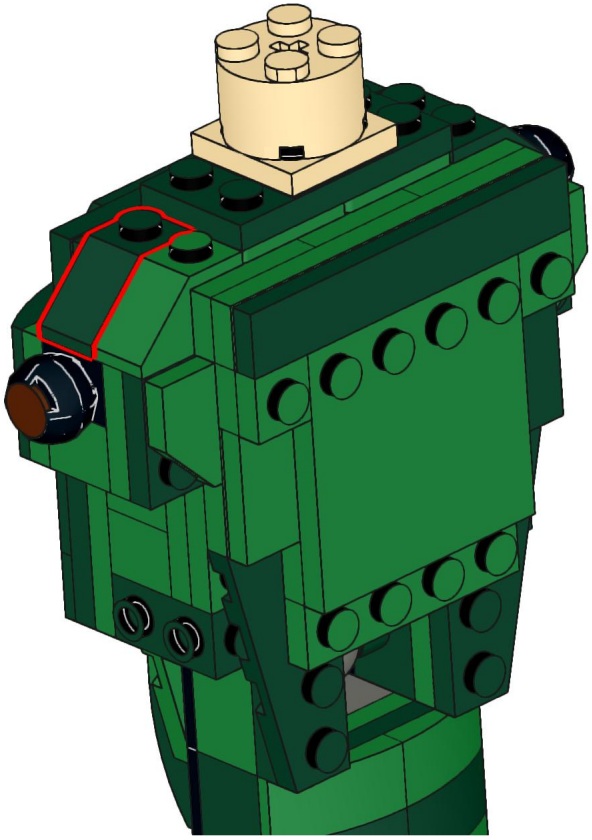
# 126



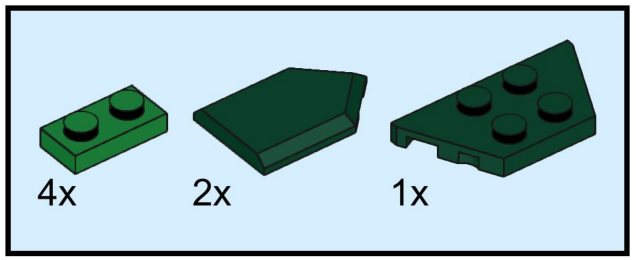



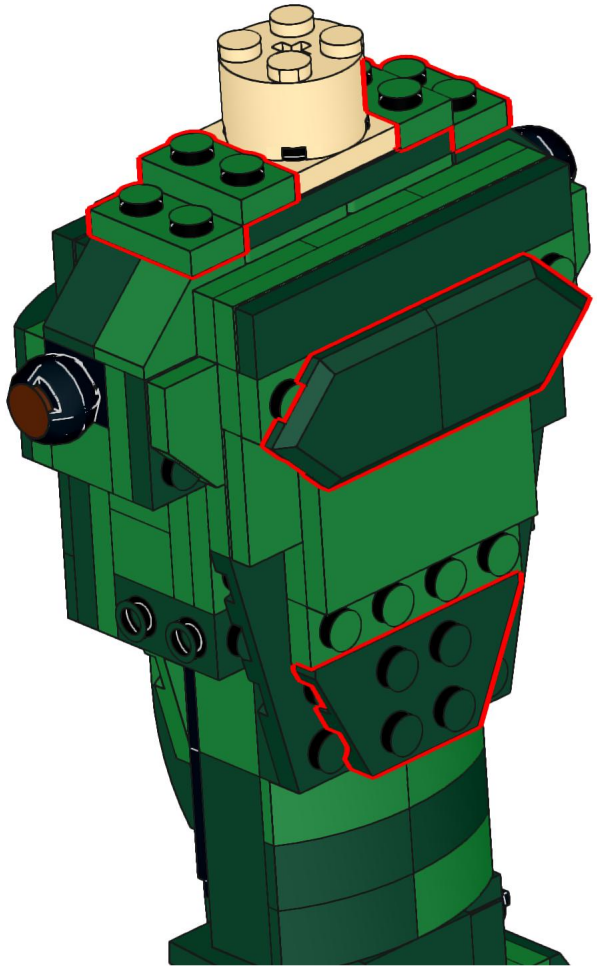
# 127



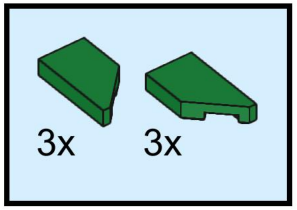



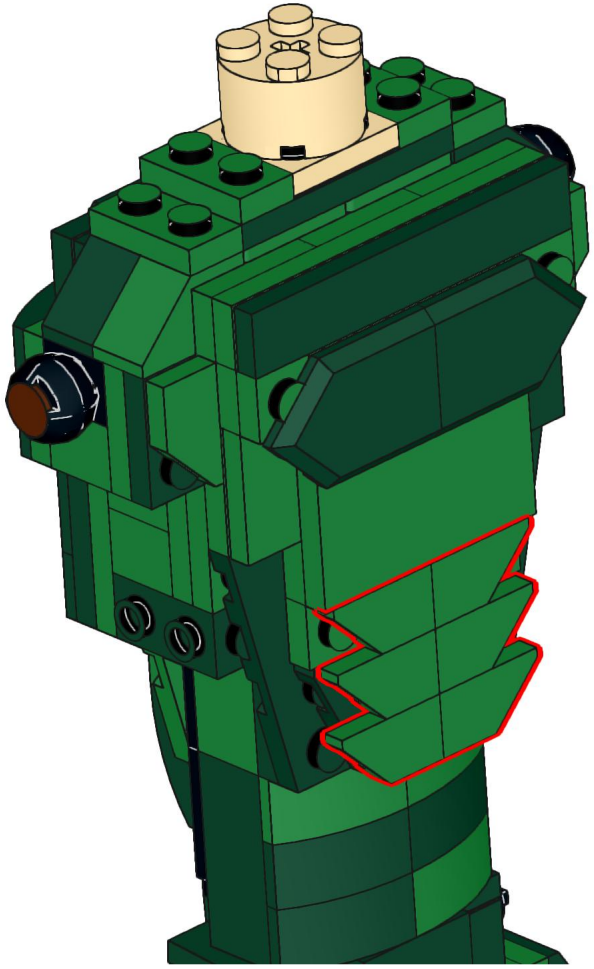
# 128



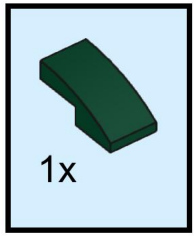



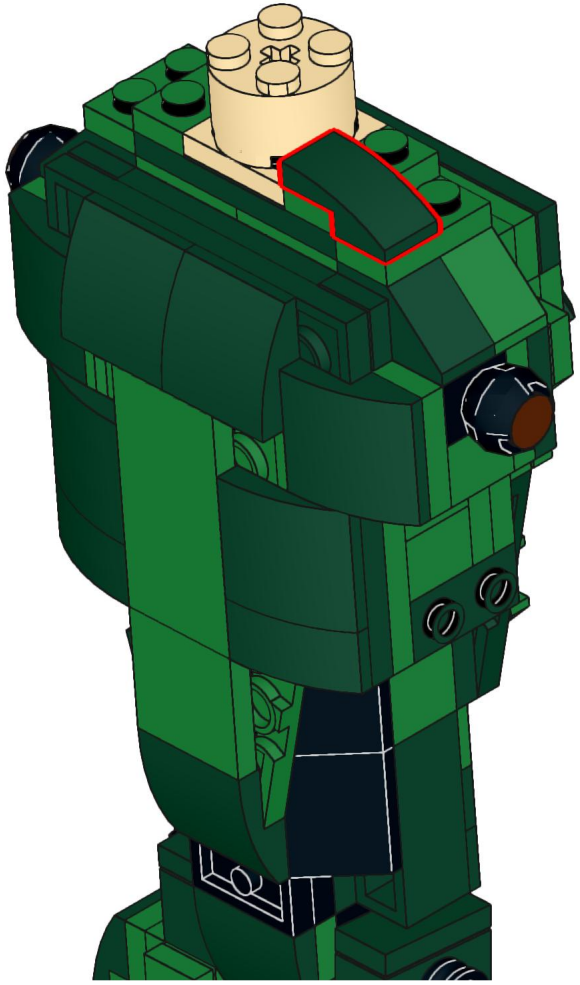
# 129



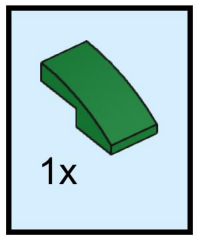



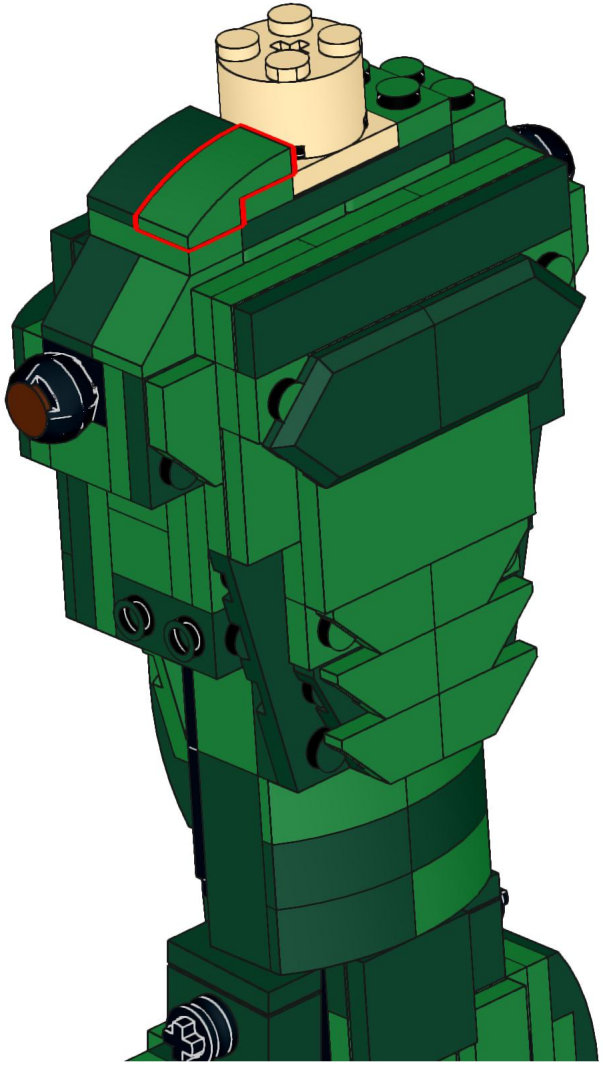
# 130



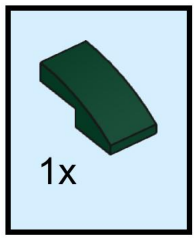



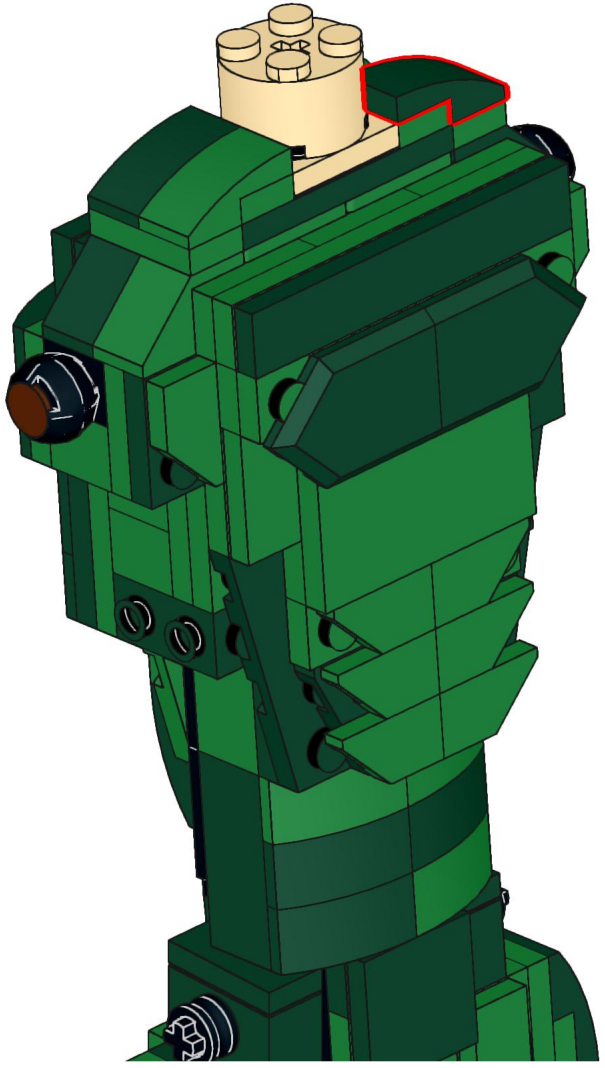
# 131



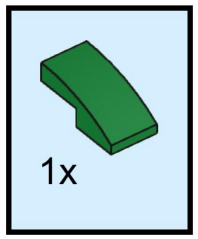



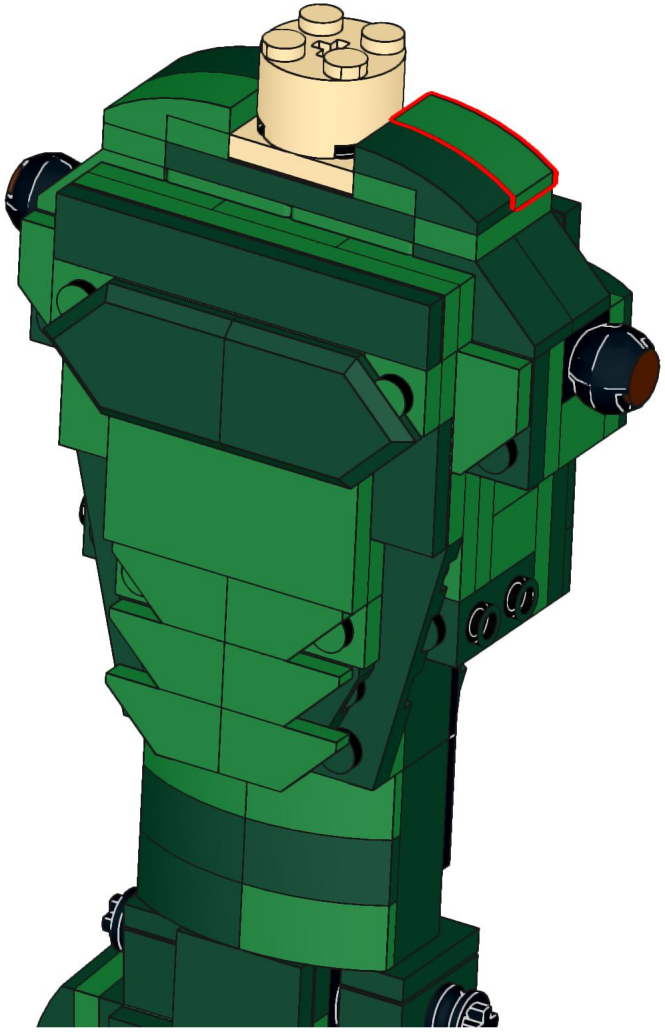
# 132



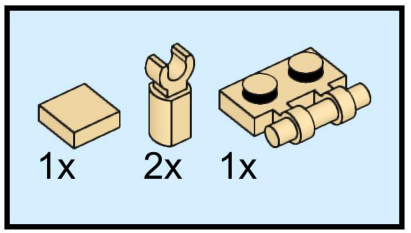



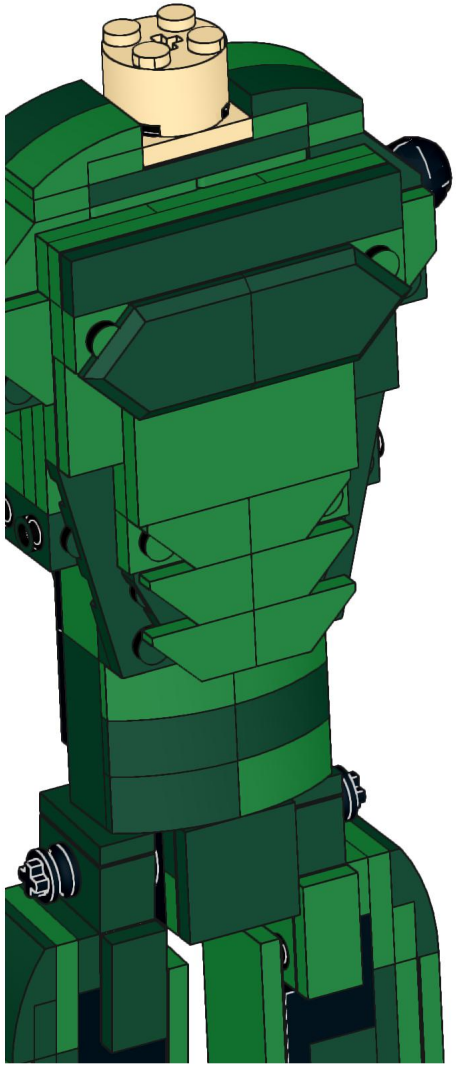
# 133

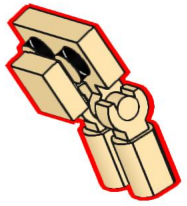


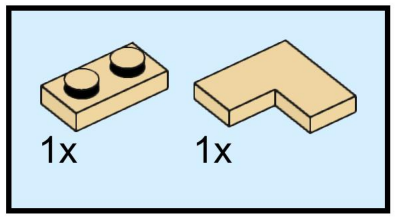
# 134

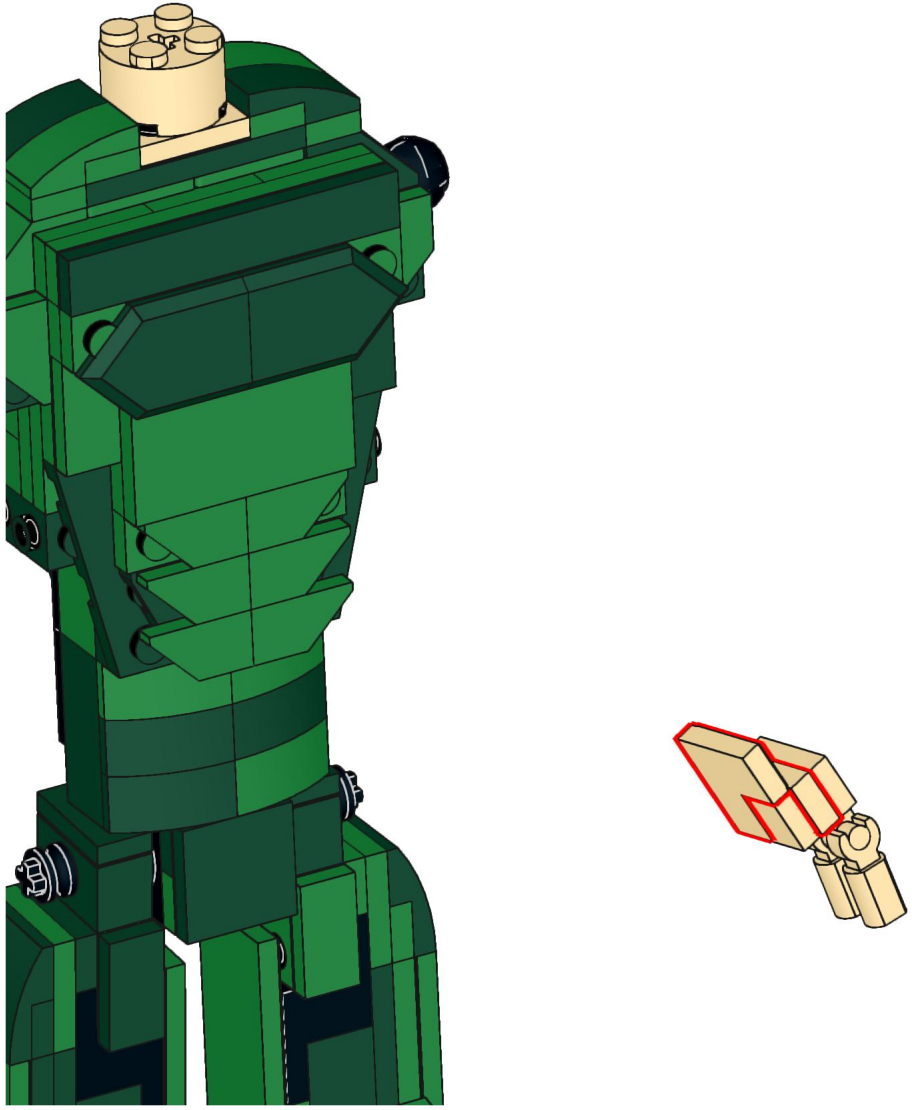


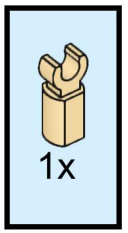


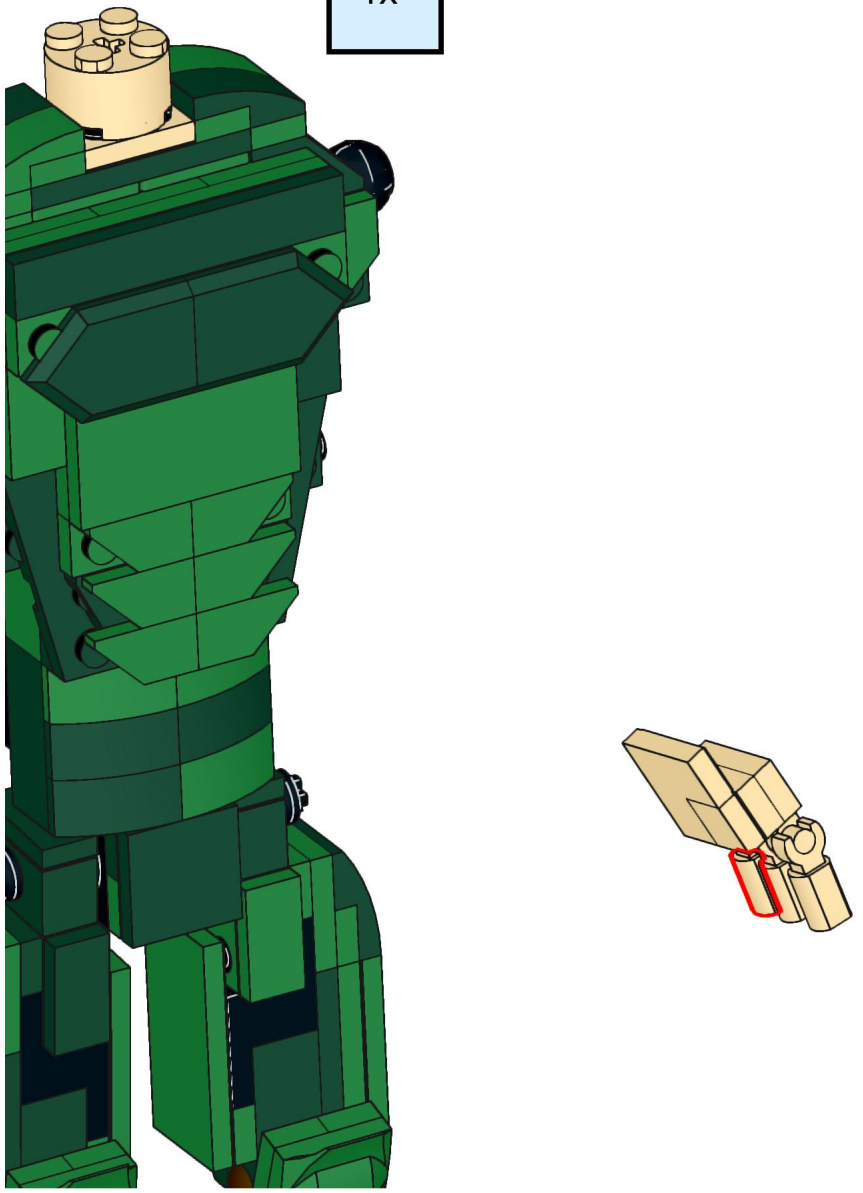
# 135



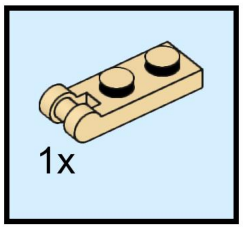



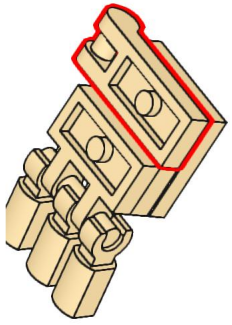
# 136

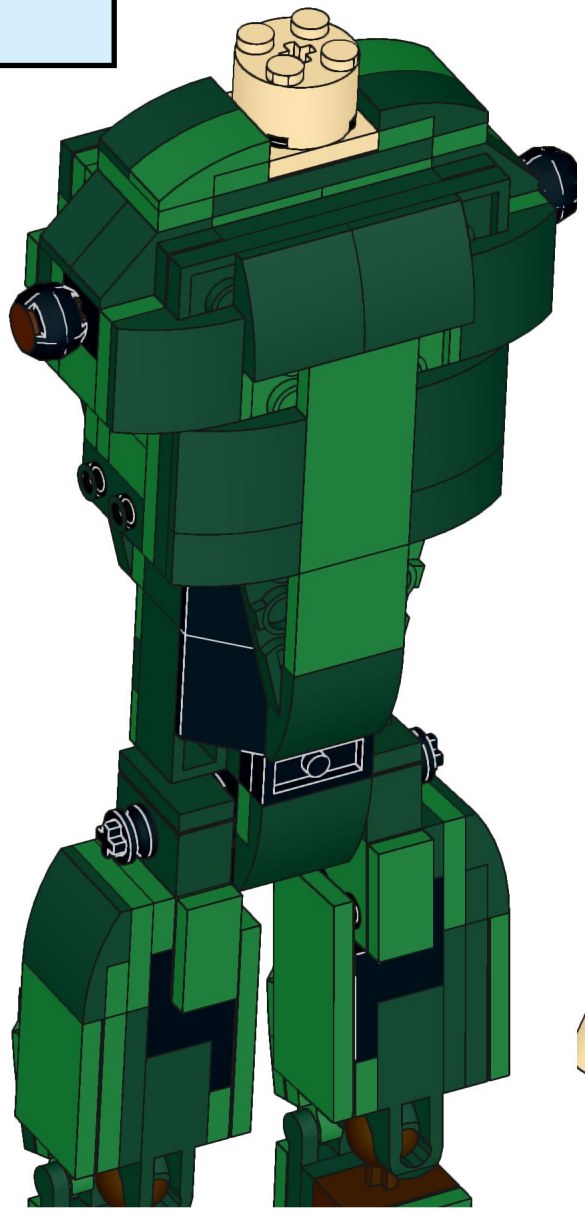


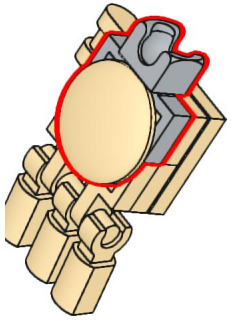



# 137

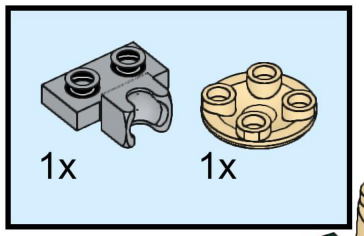


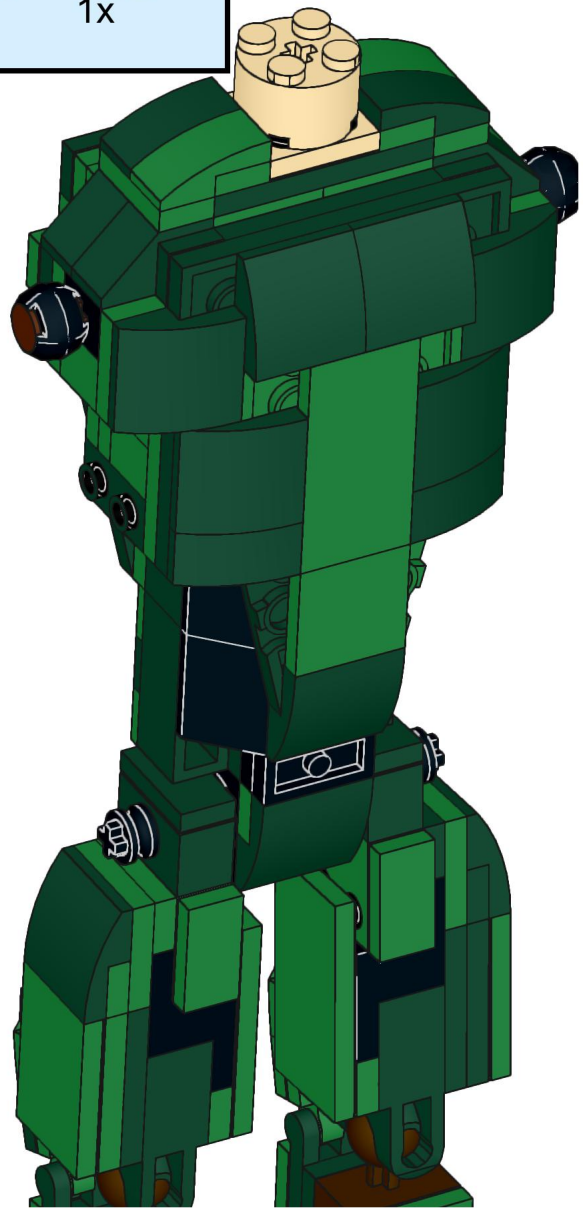





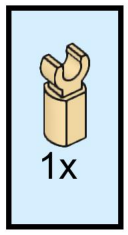


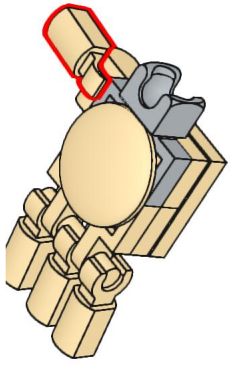
# 138

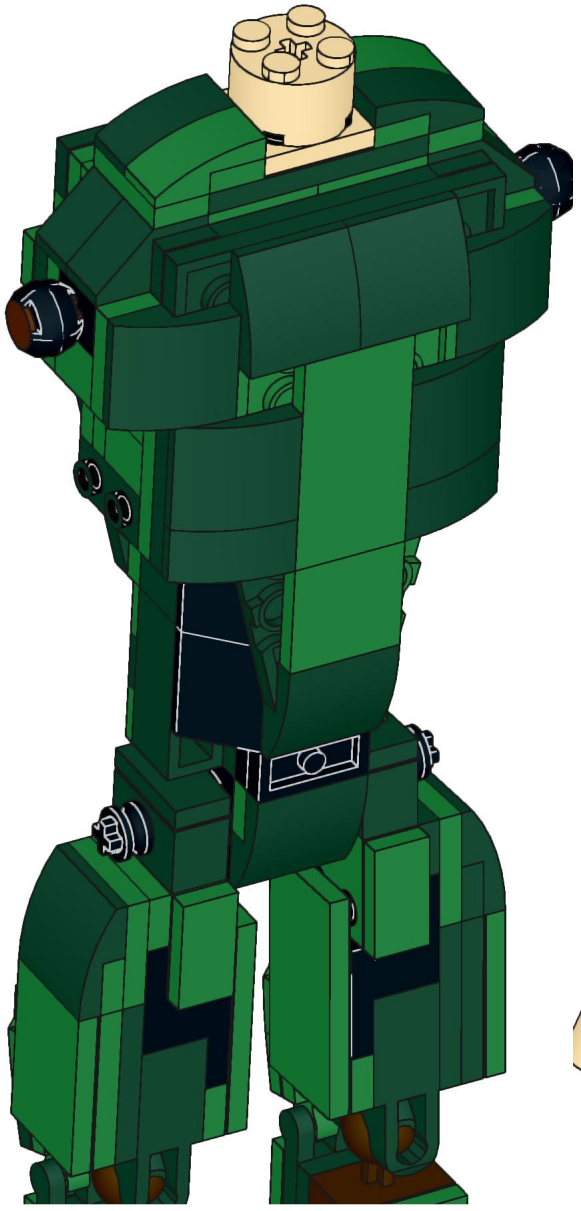


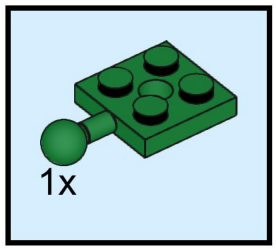
# 139

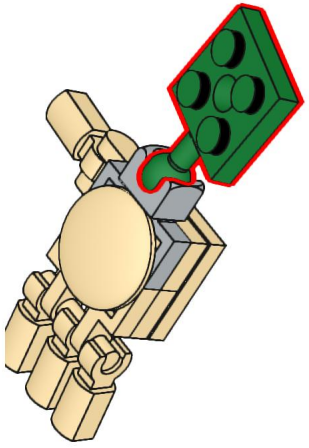


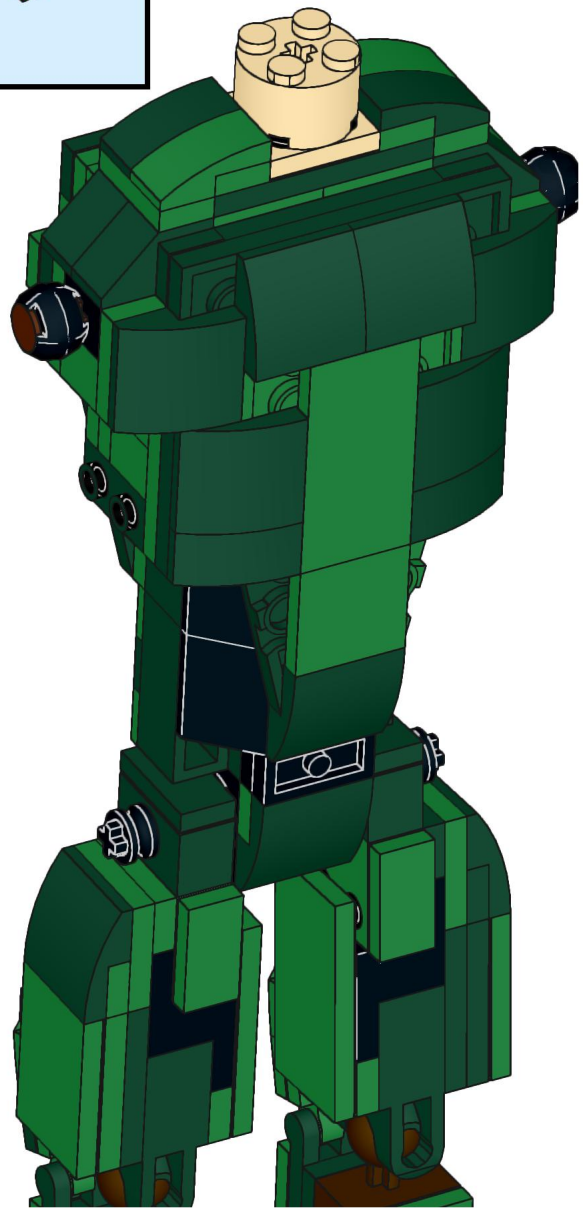





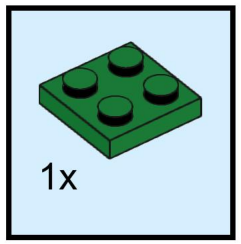
# 140

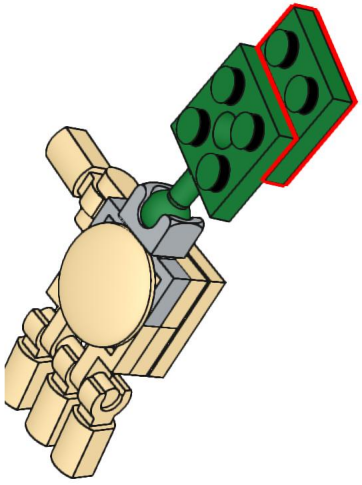


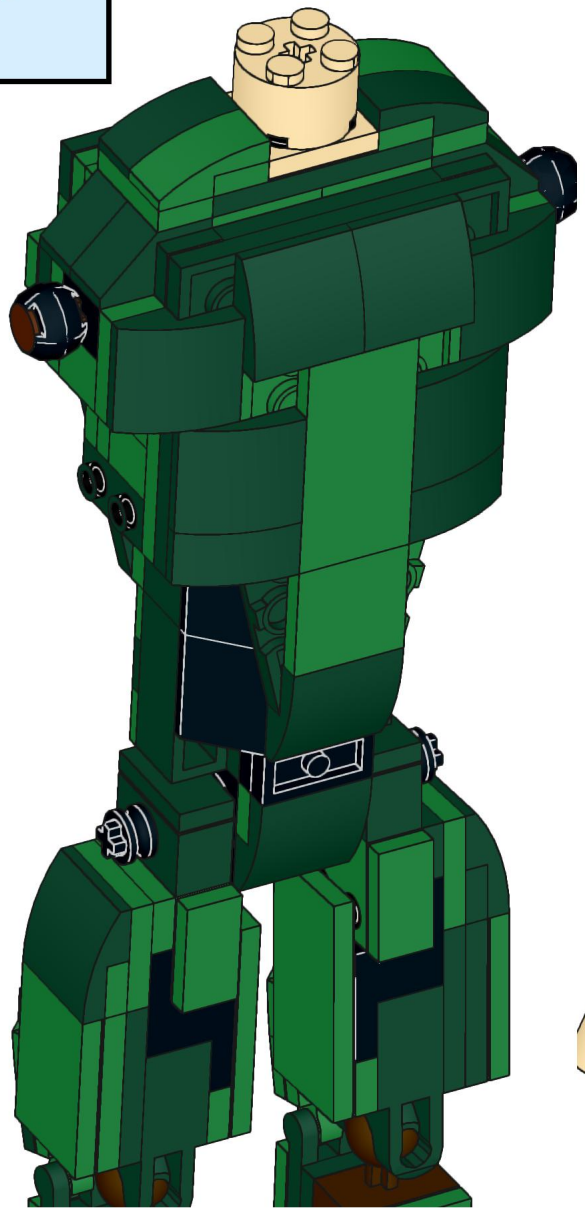





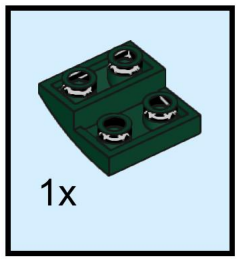
# 141

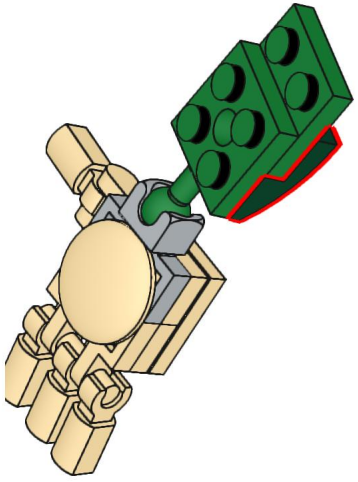


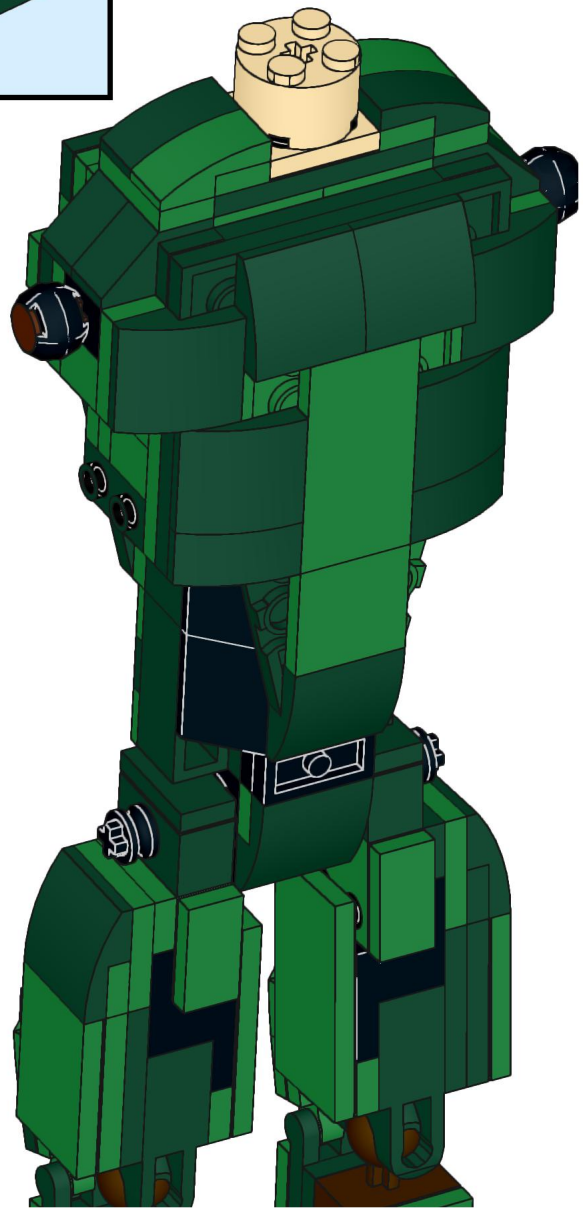





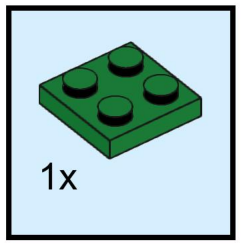
# 142

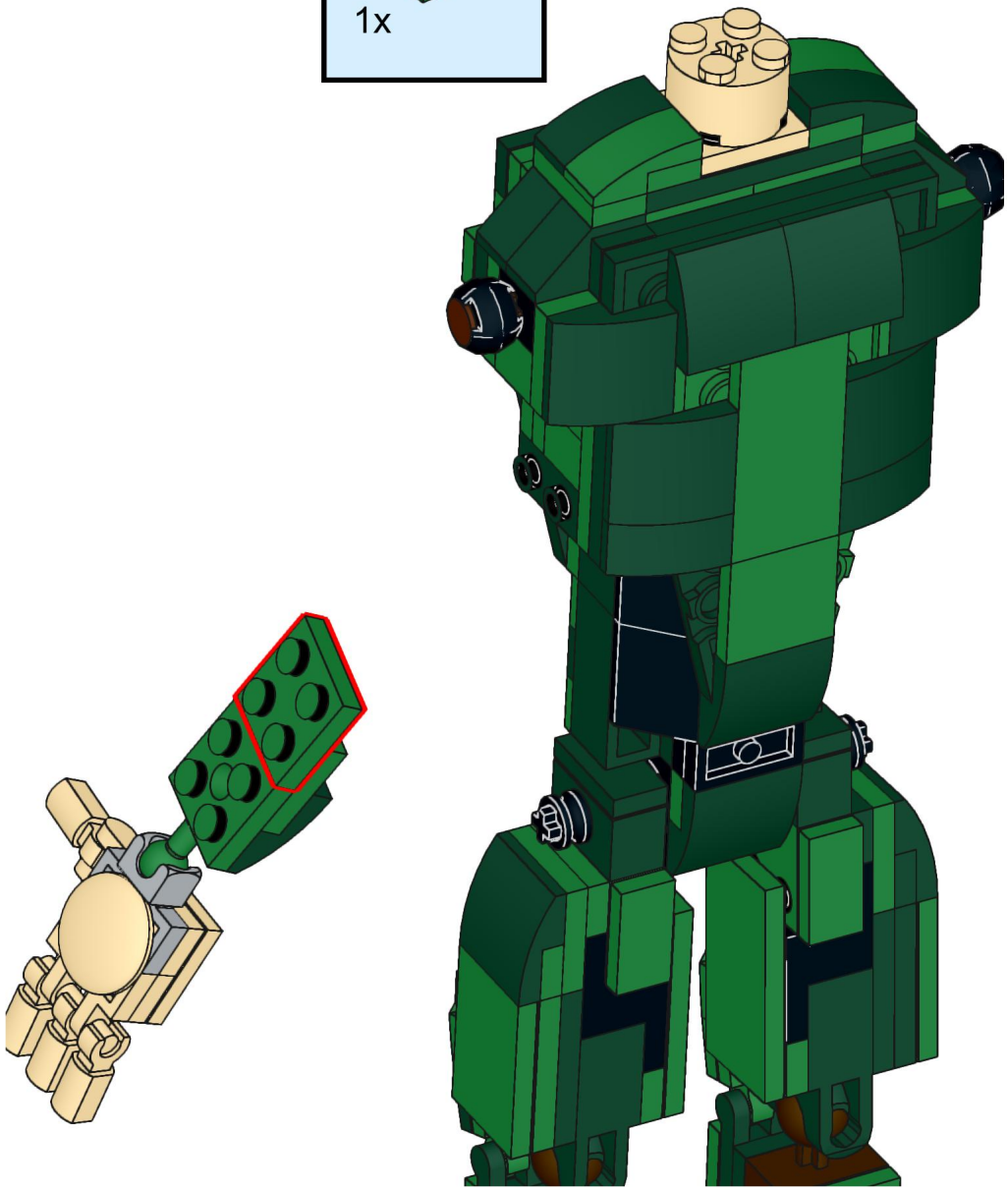


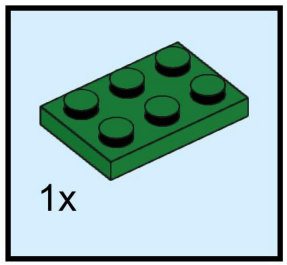


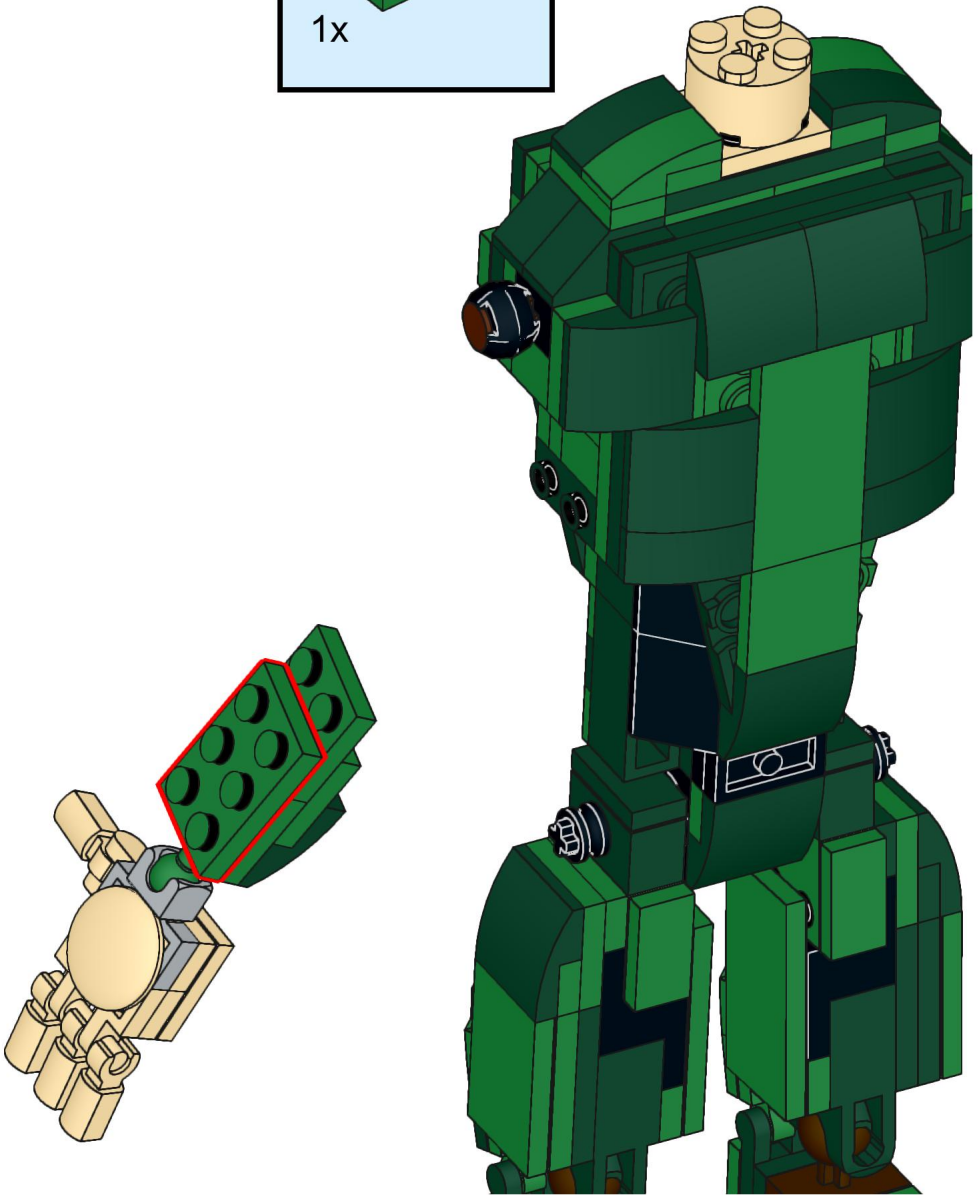
# 143



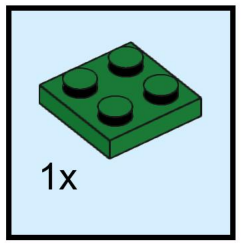



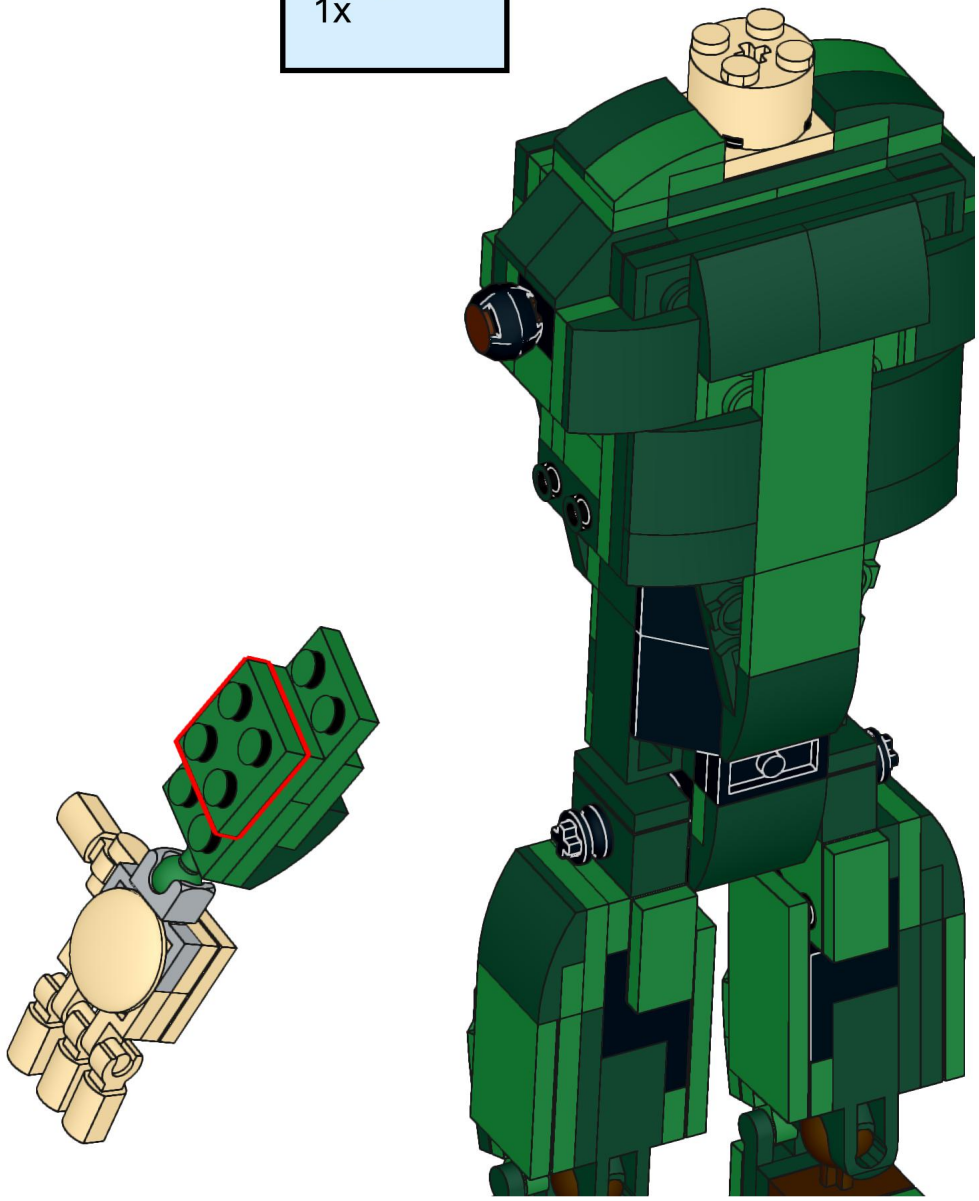
# 144



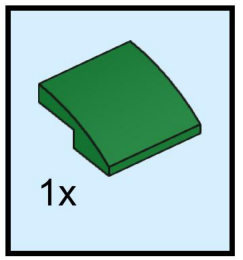



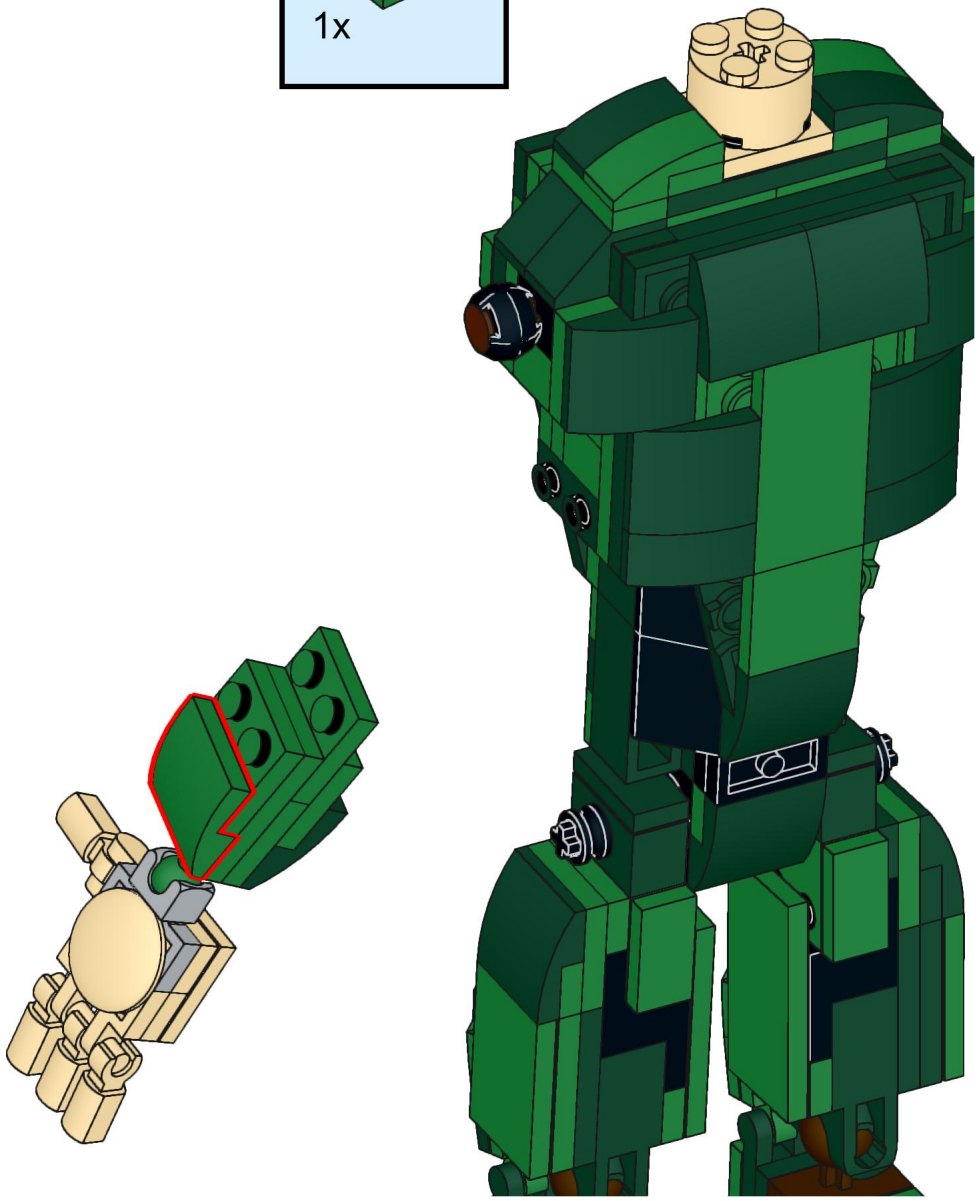
# 145



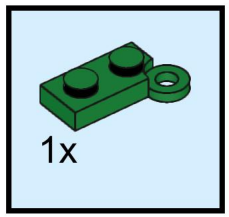



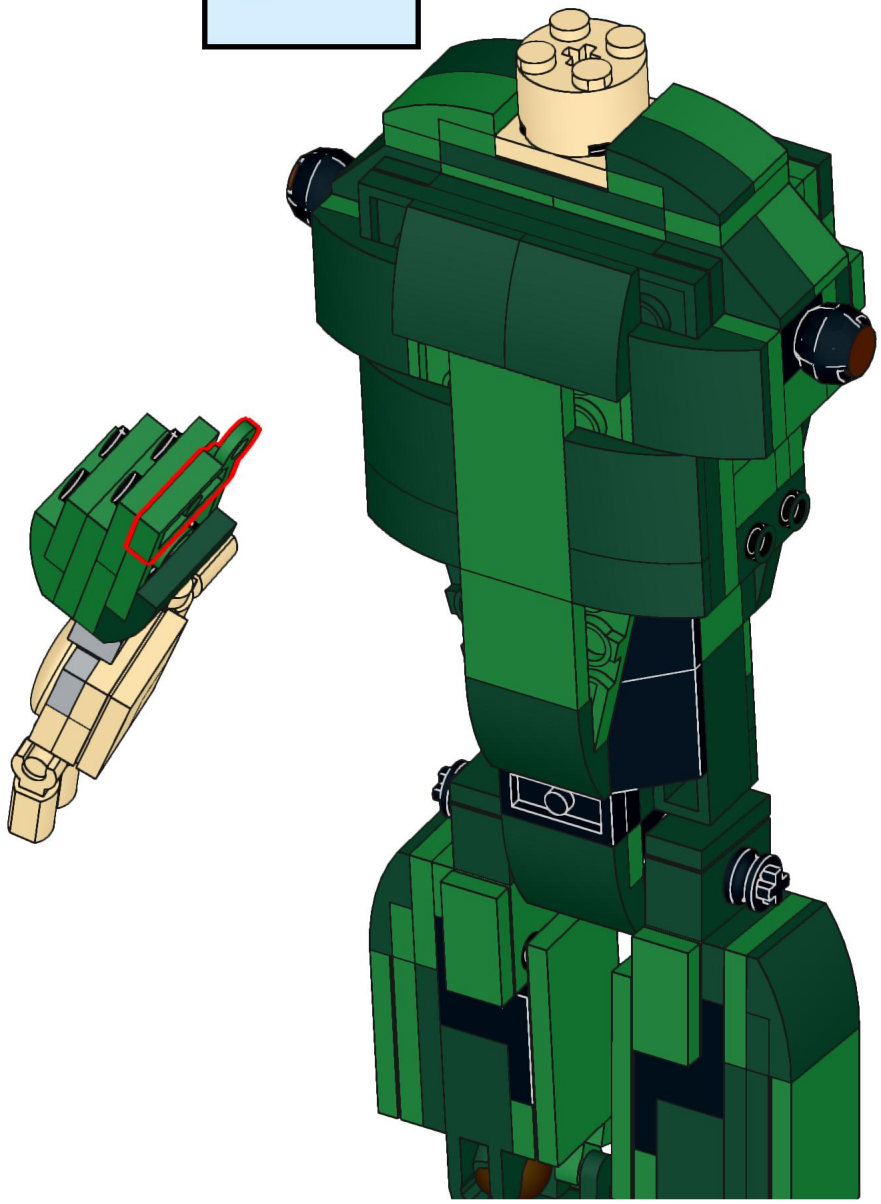
# 146



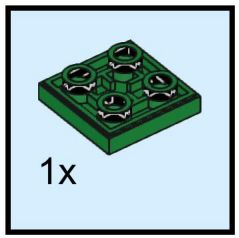



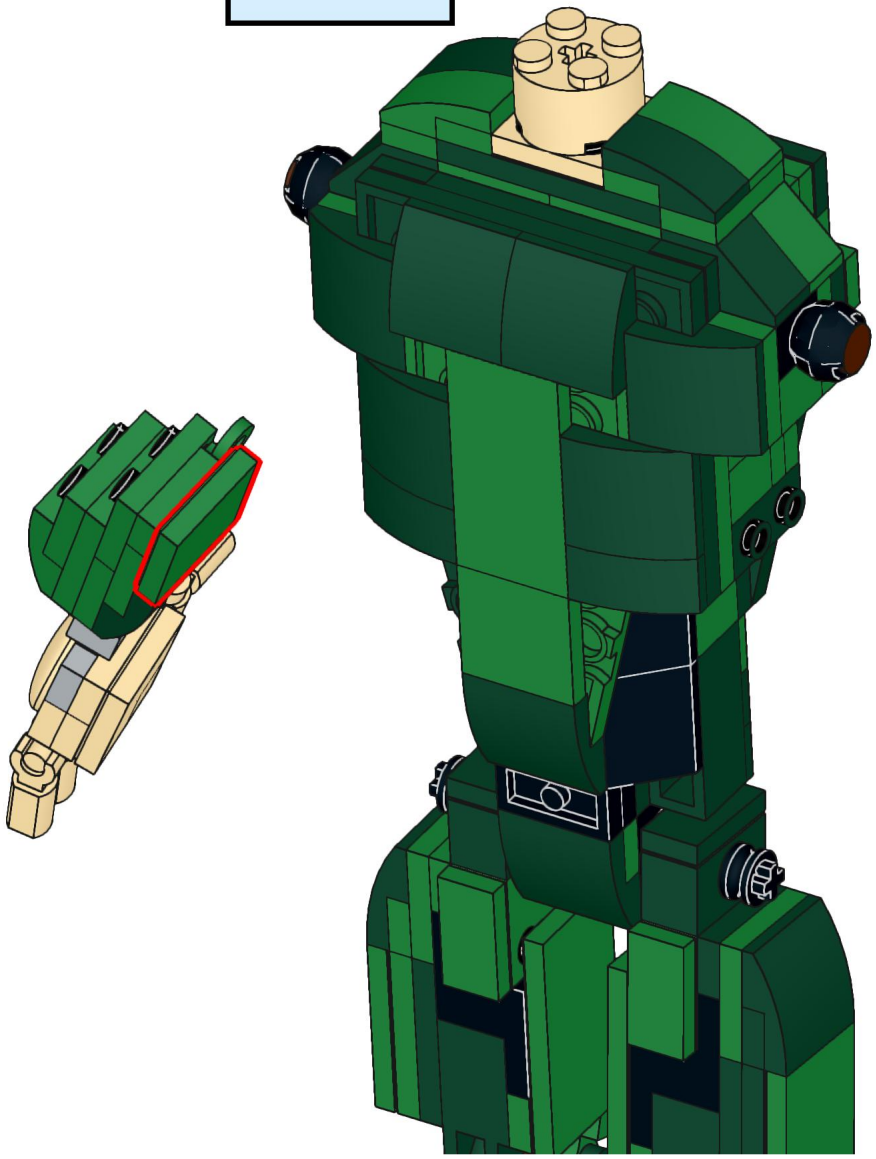
# 147



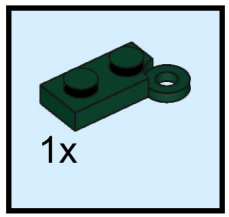



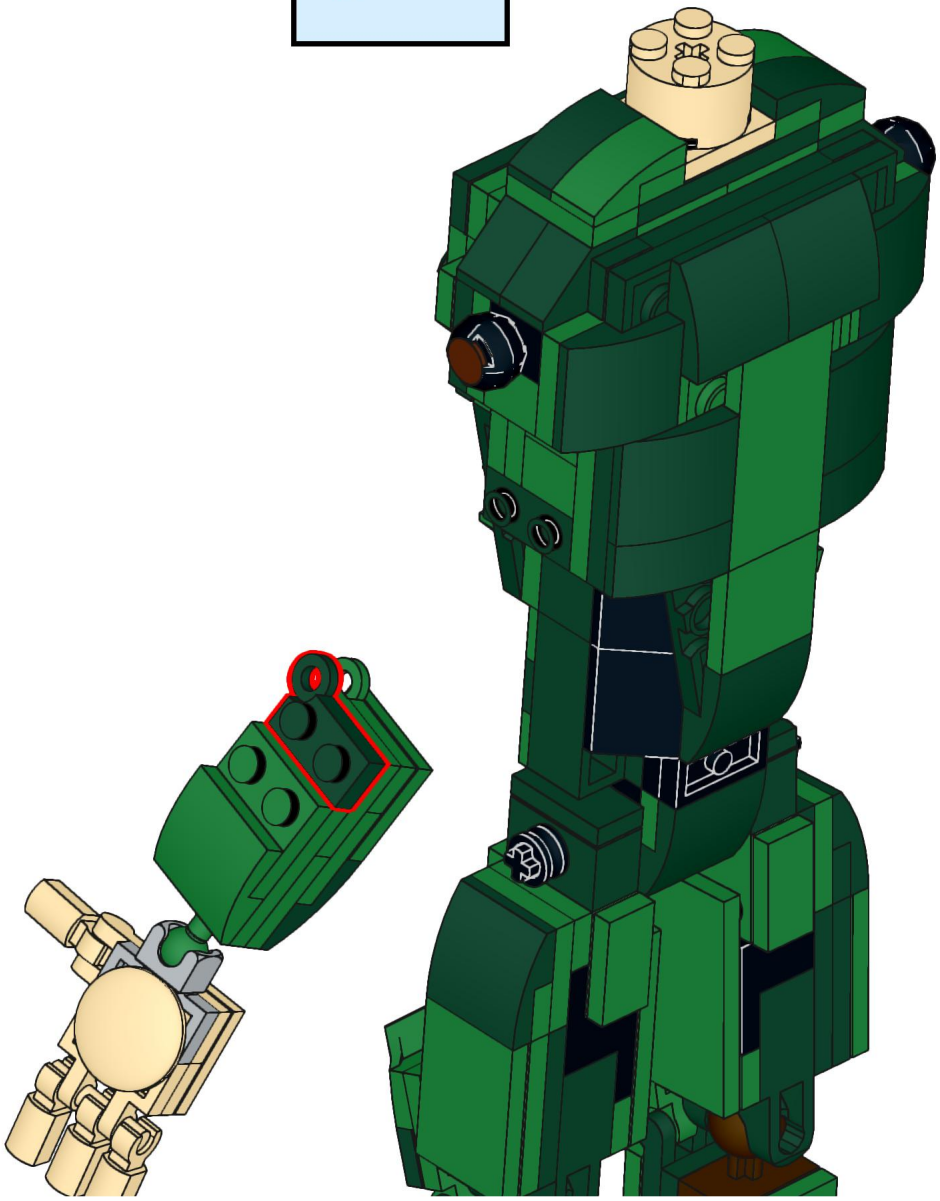
# 148



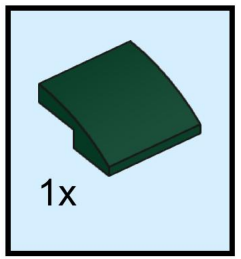



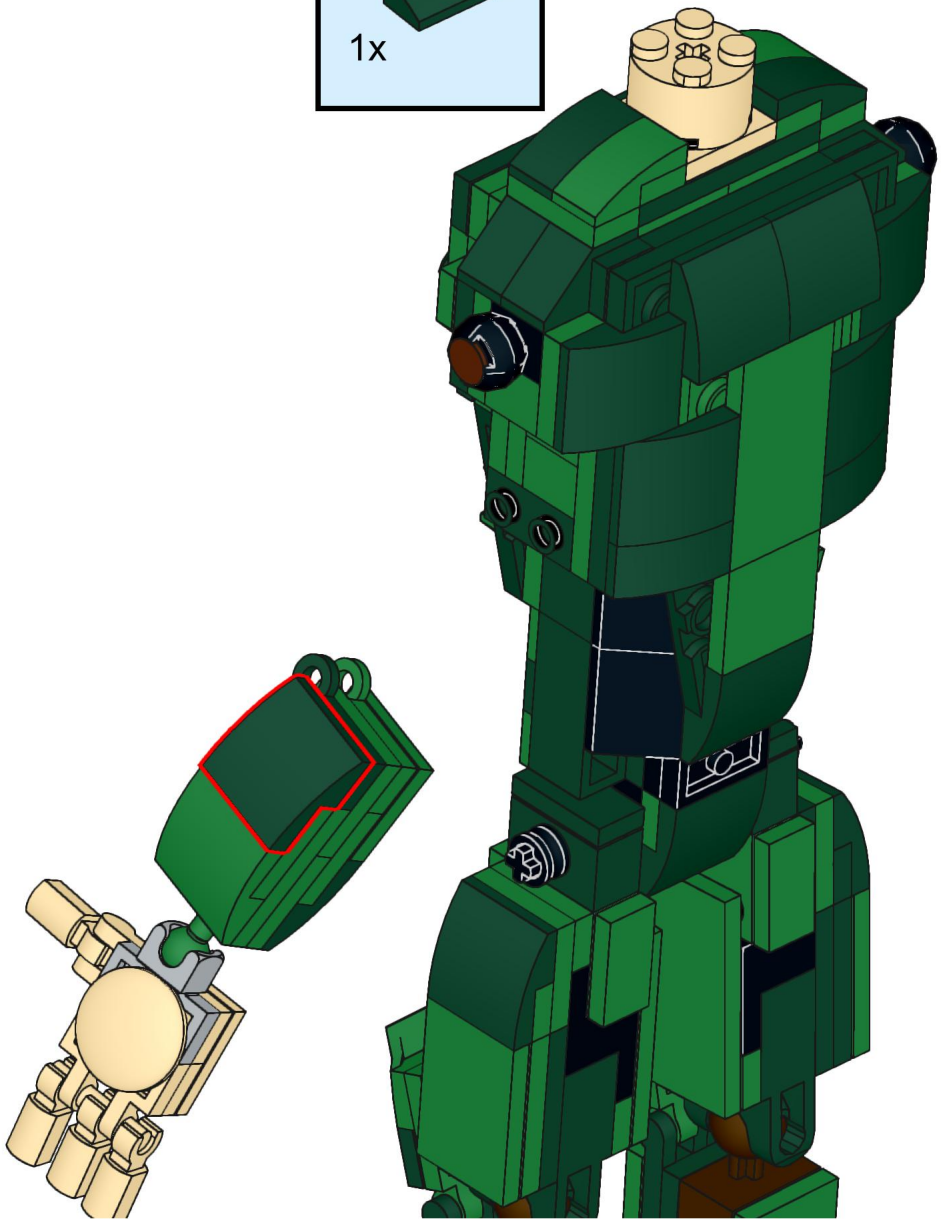
# 149



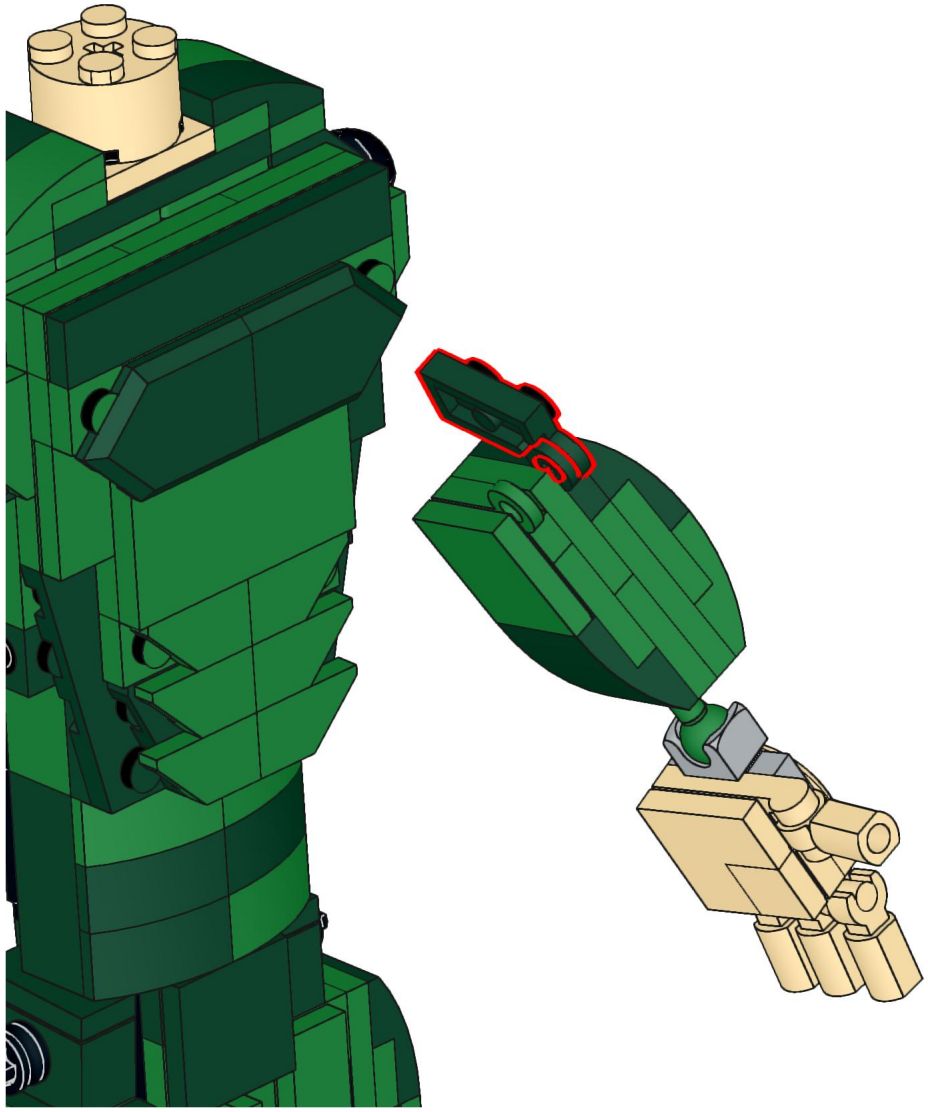
# 150



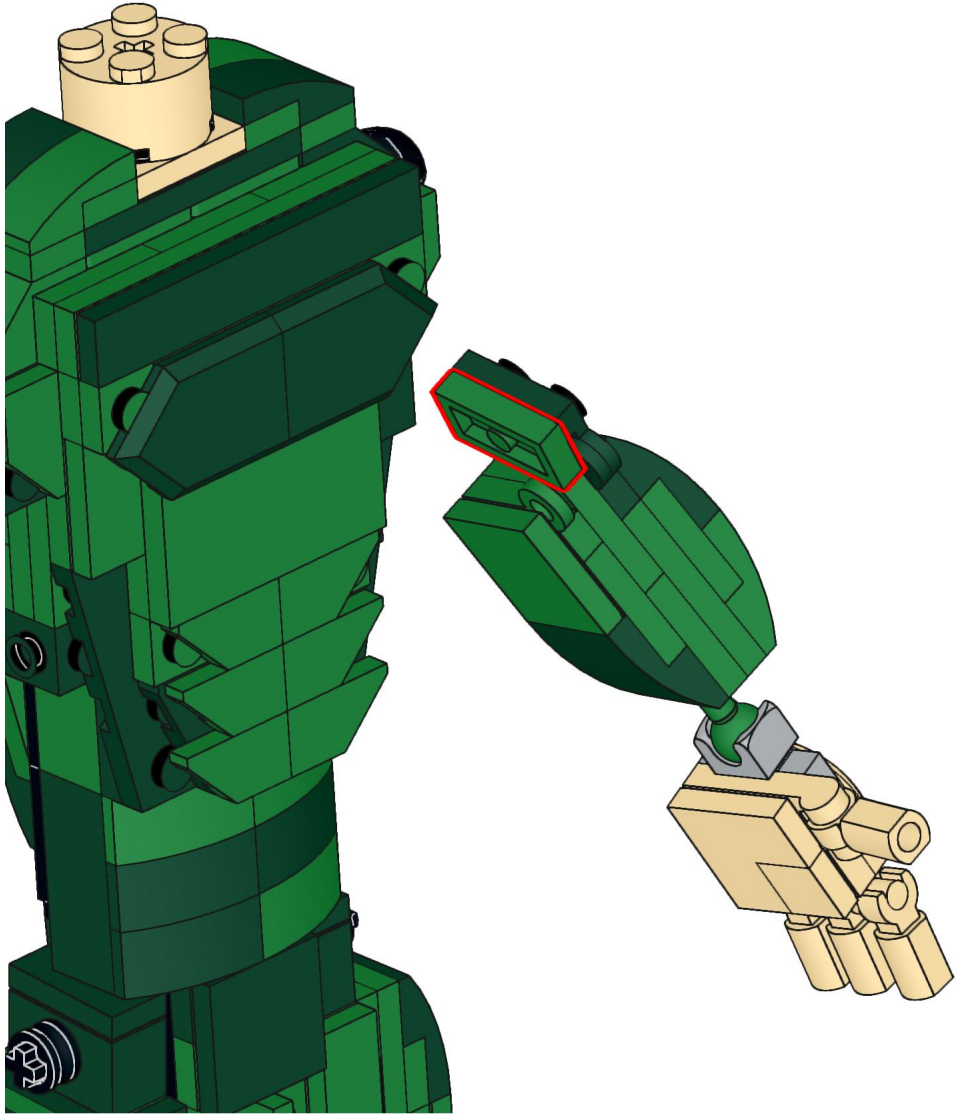
# 151

1x

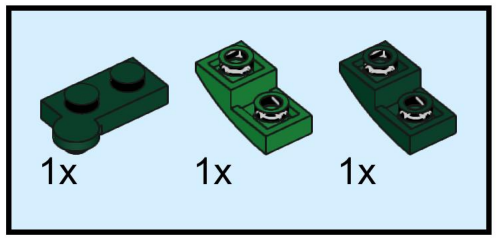


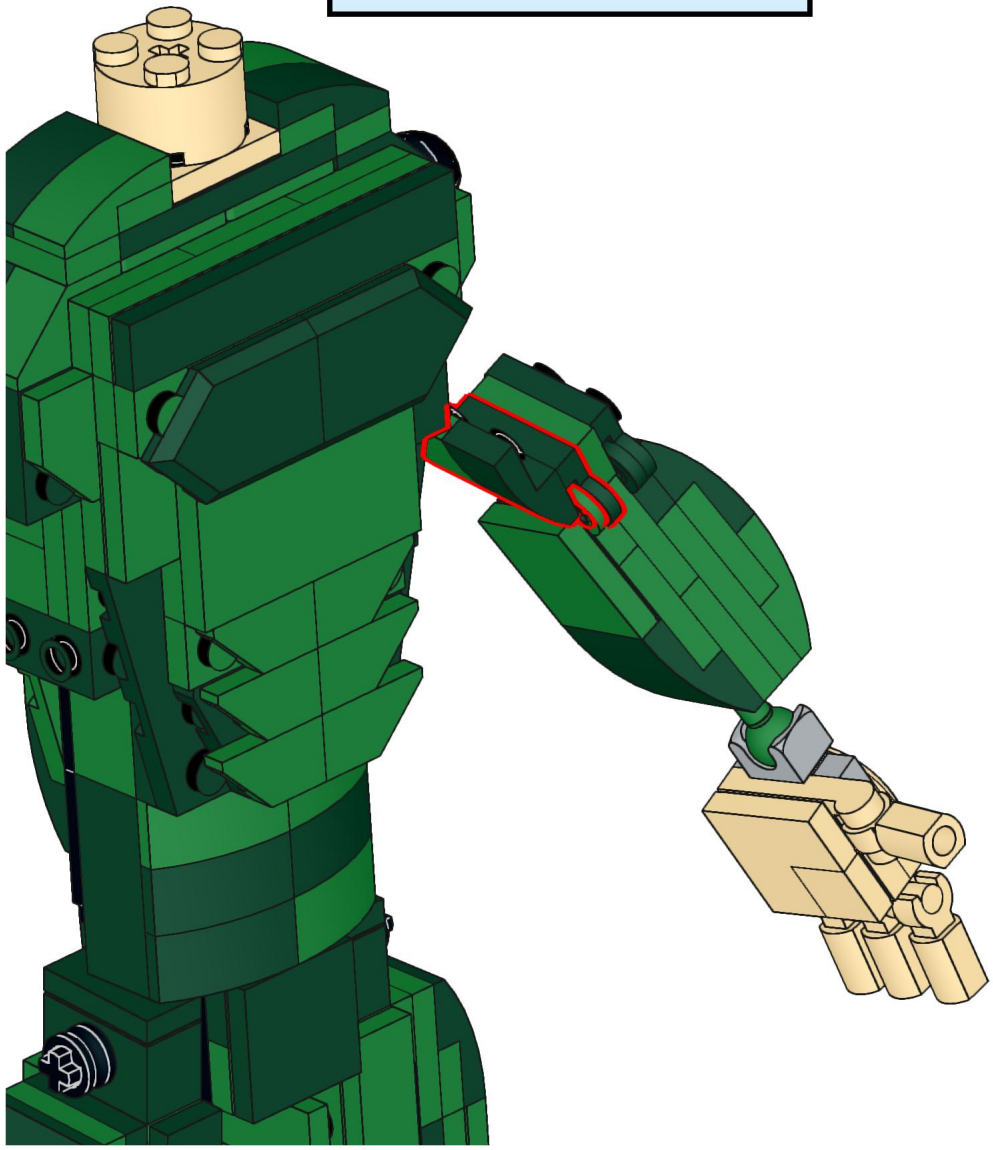
# 152

1x

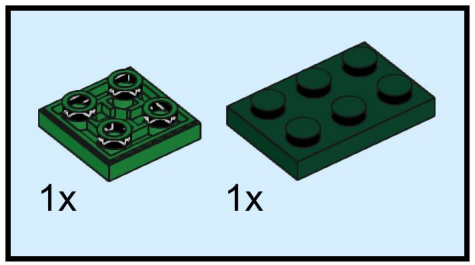


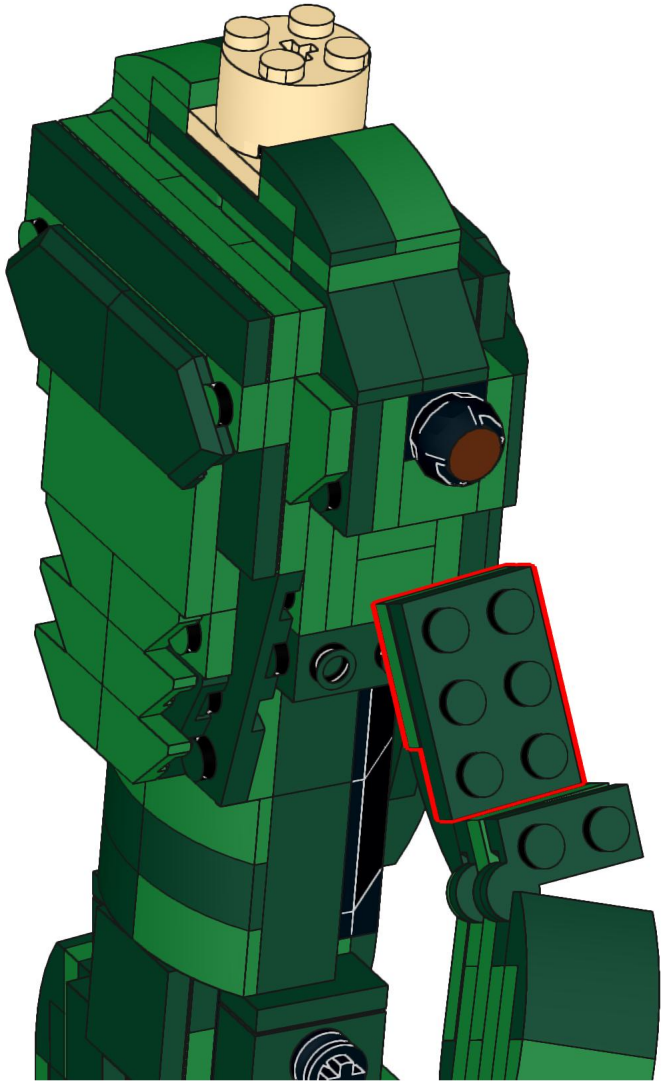
# 153



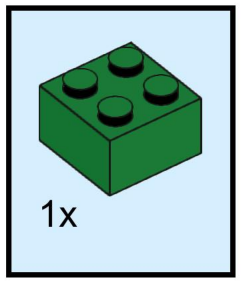



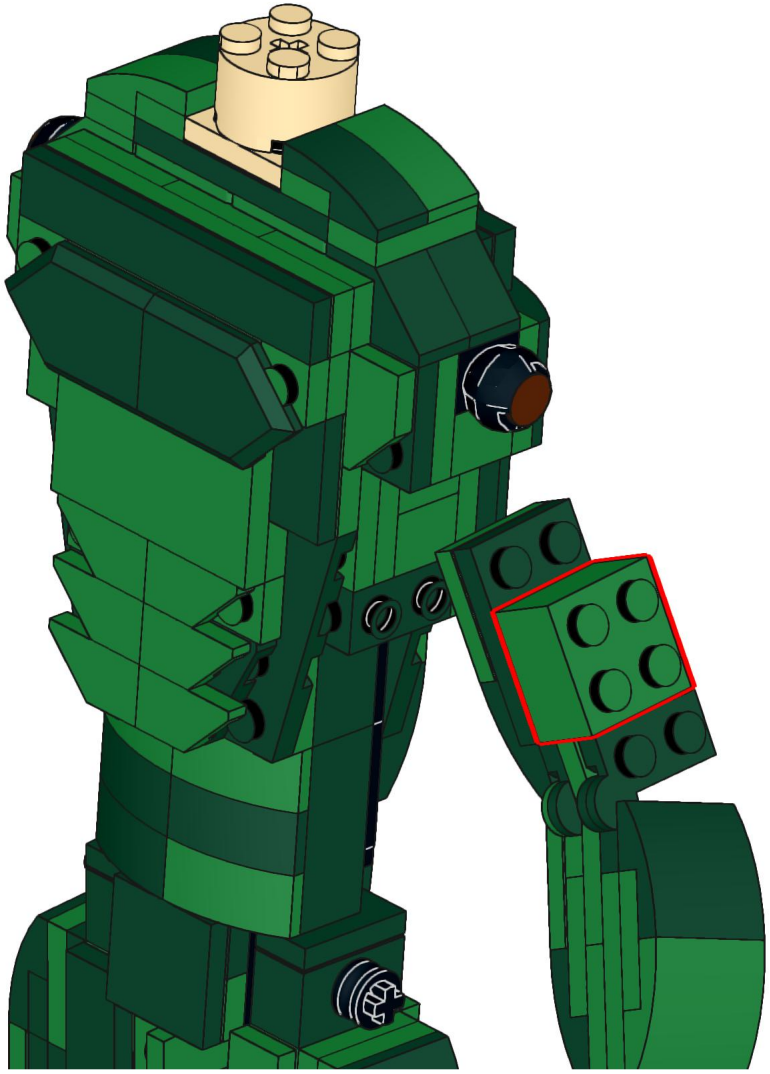
# 154



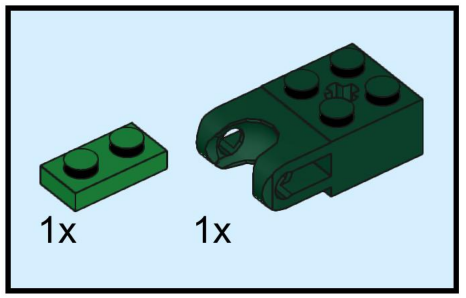



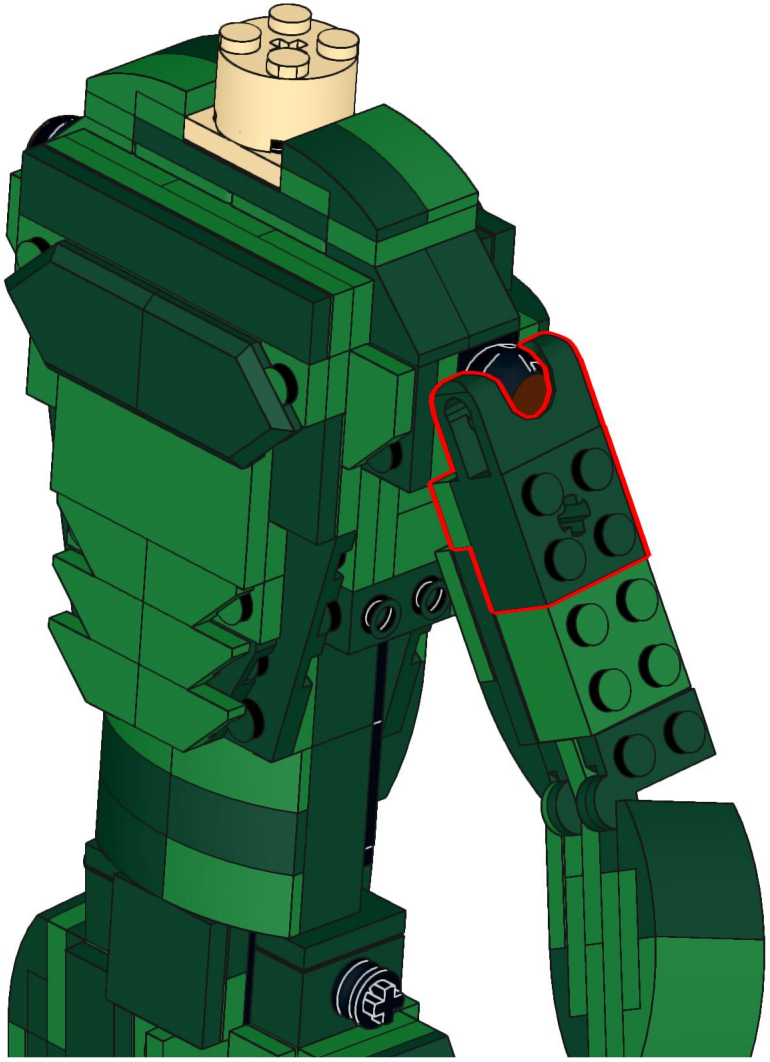
# 155



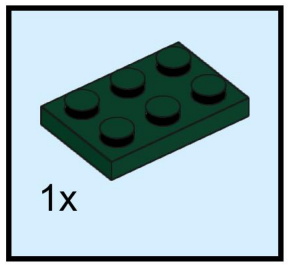



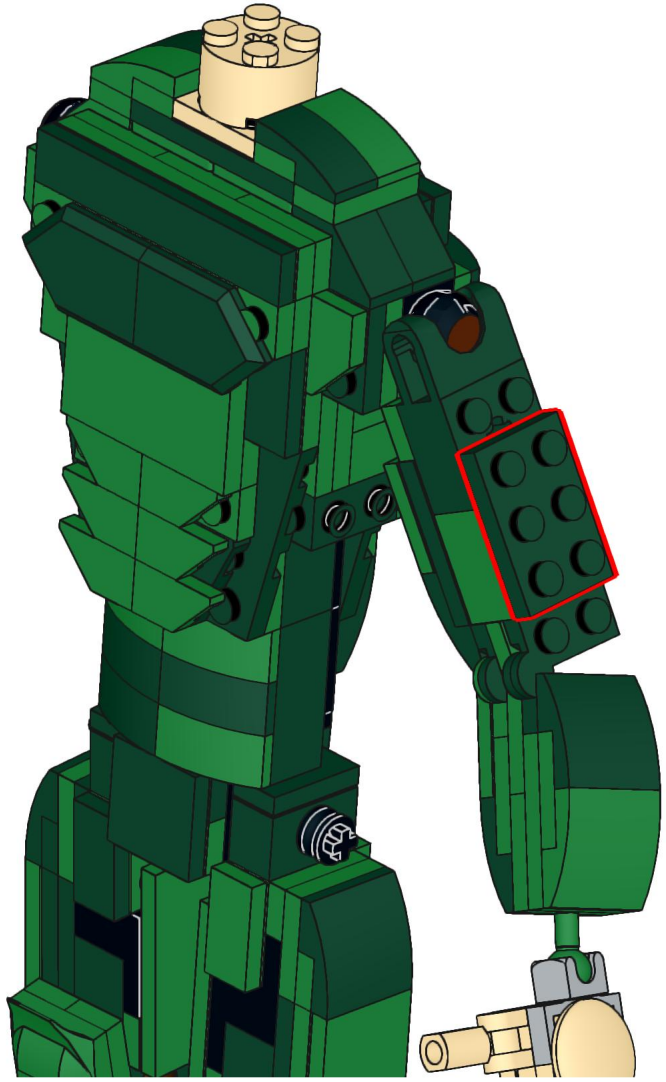
# 156



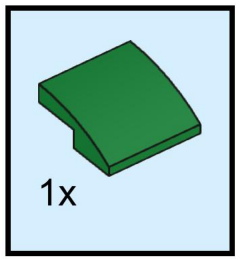



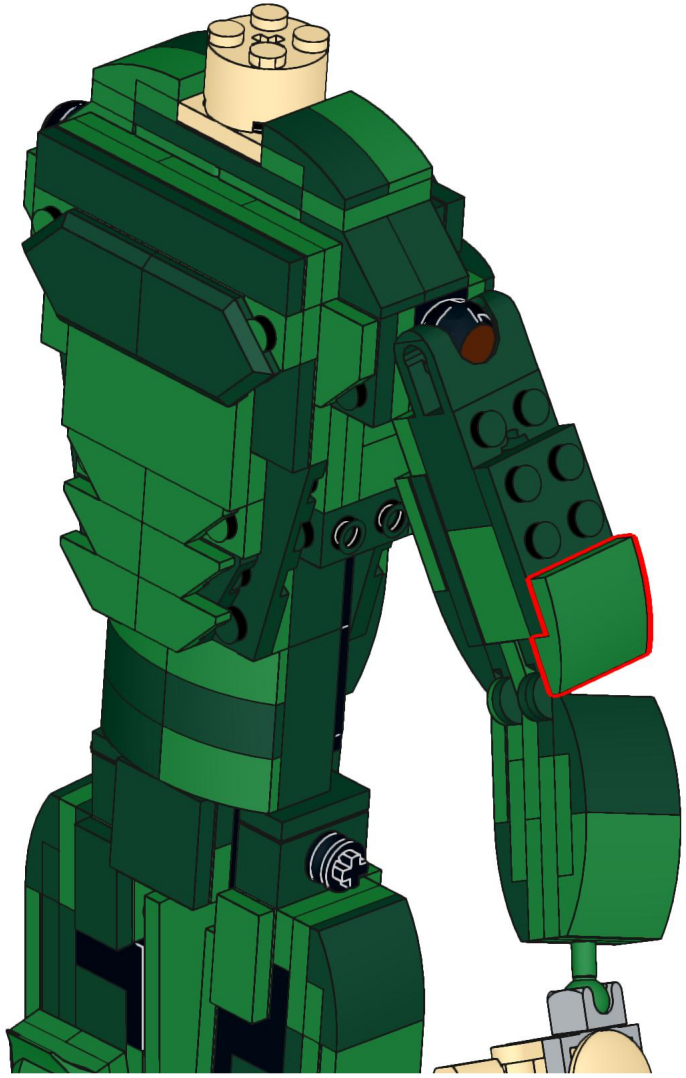
# 157



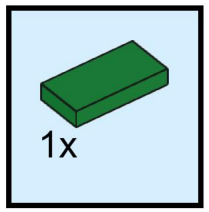



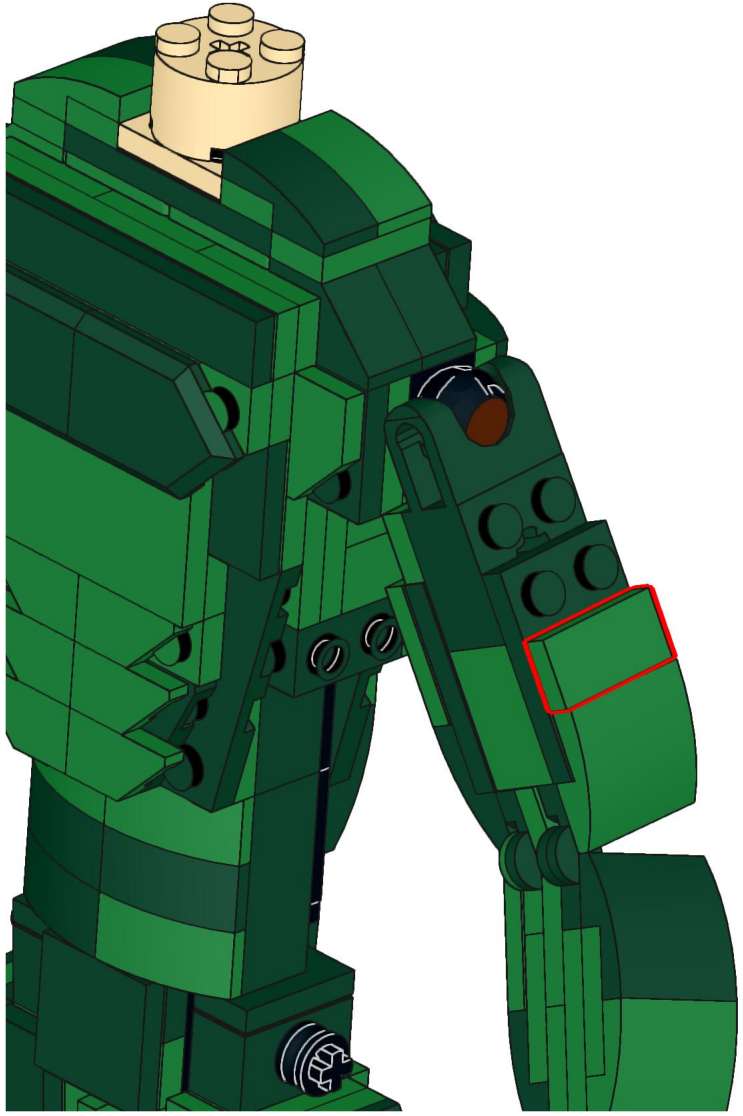
# 158



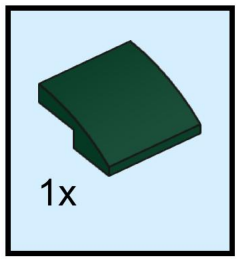



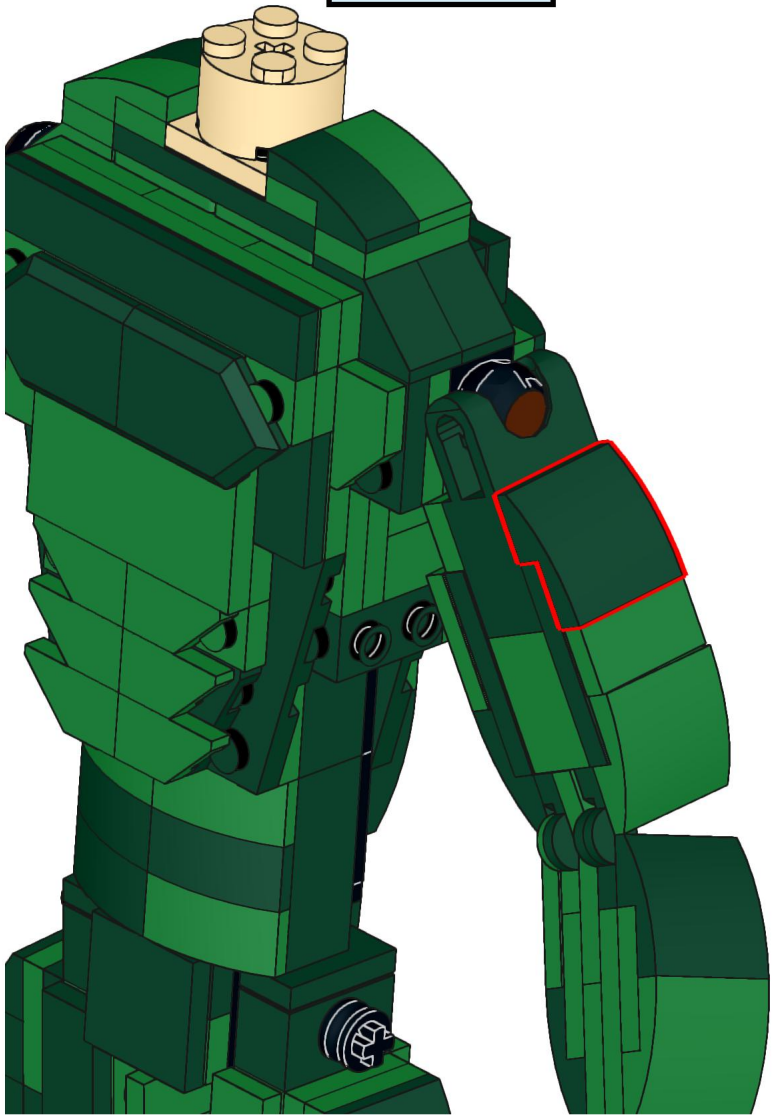
# 159



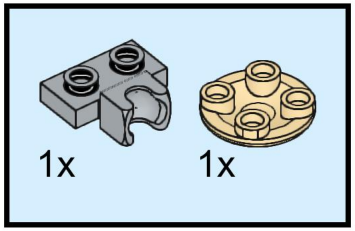



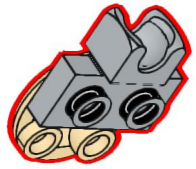
# 160

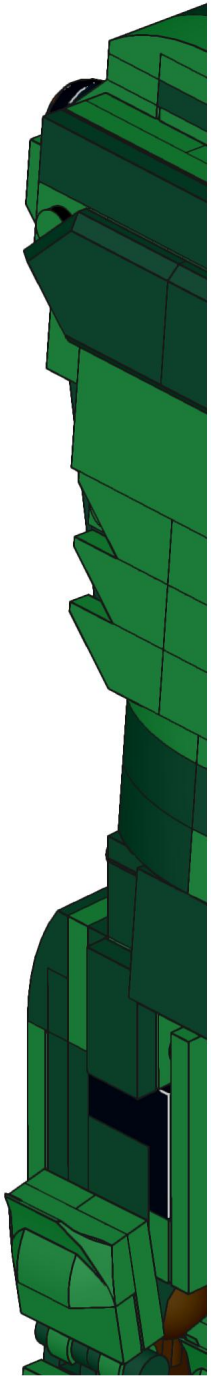


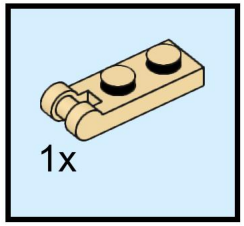
# 161

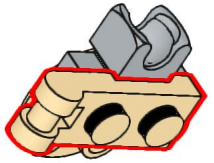


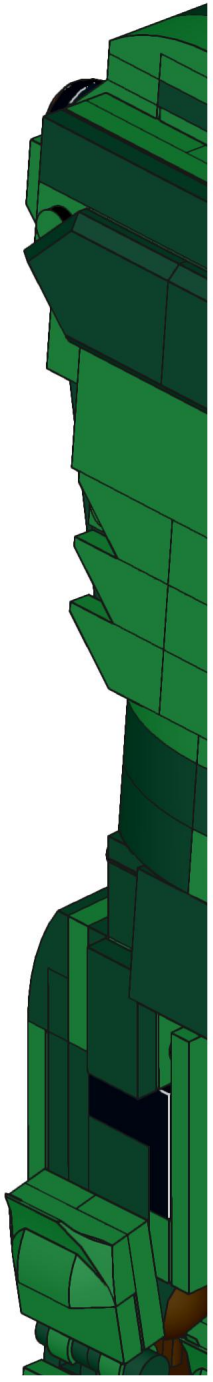





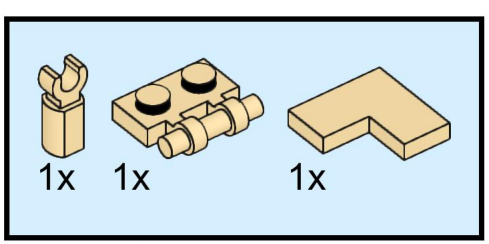
# 162

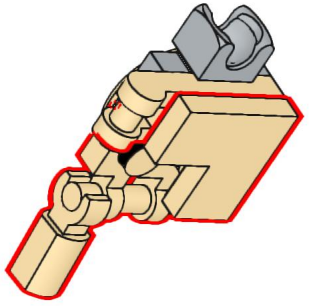


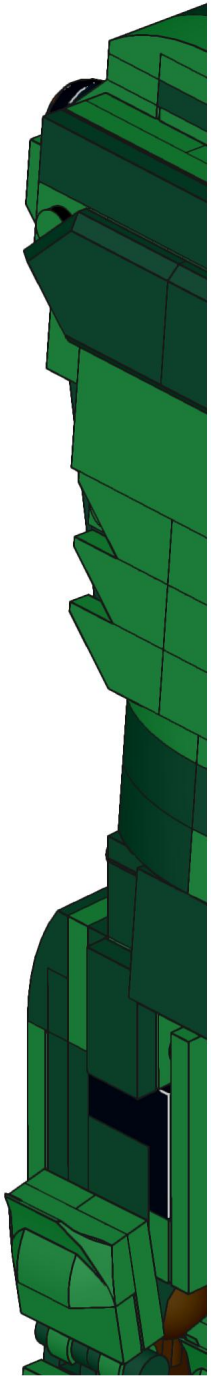





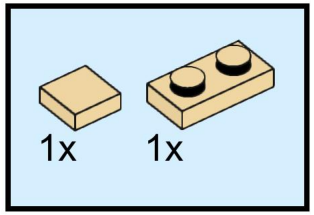
# 163

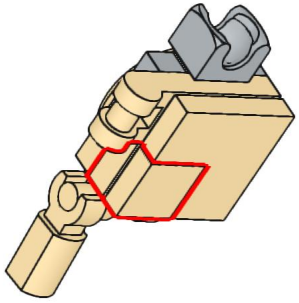


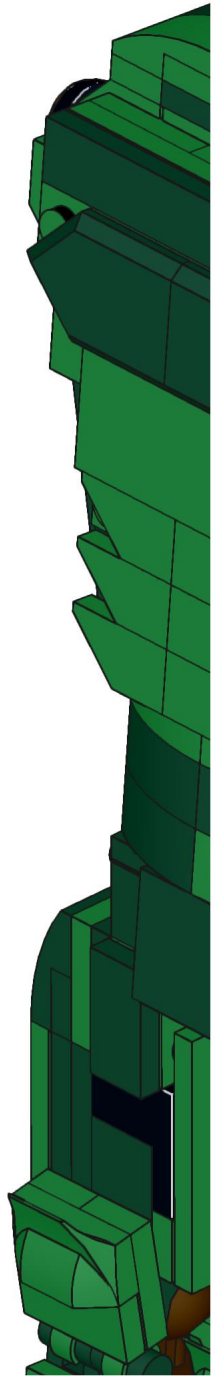





# 164

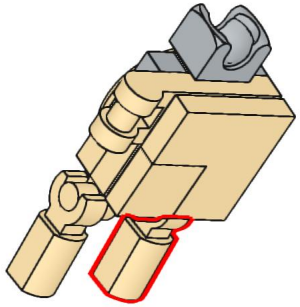


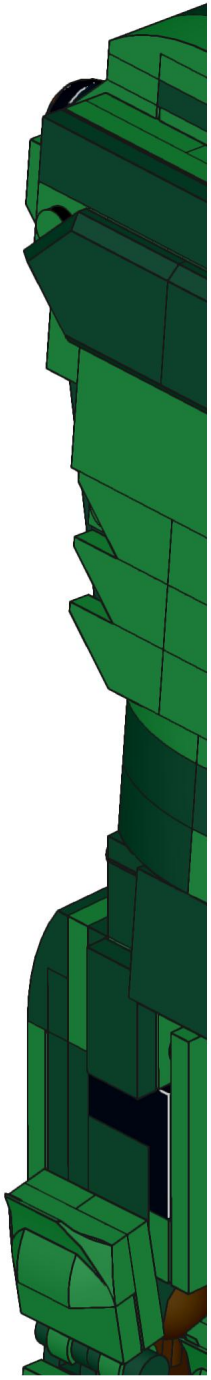





# 165

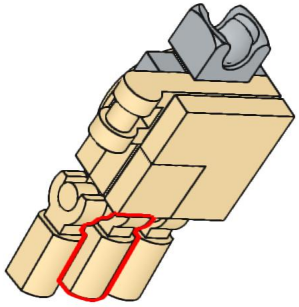
1x

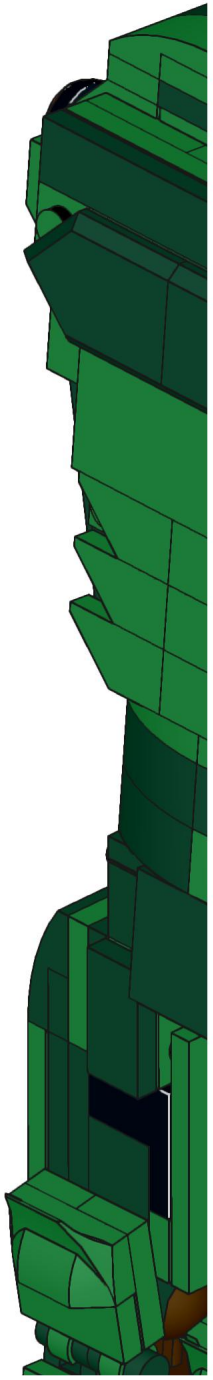




# 166

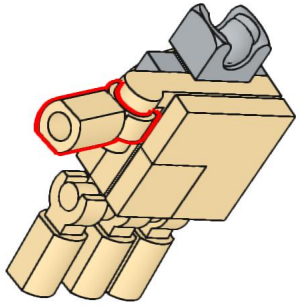
1x

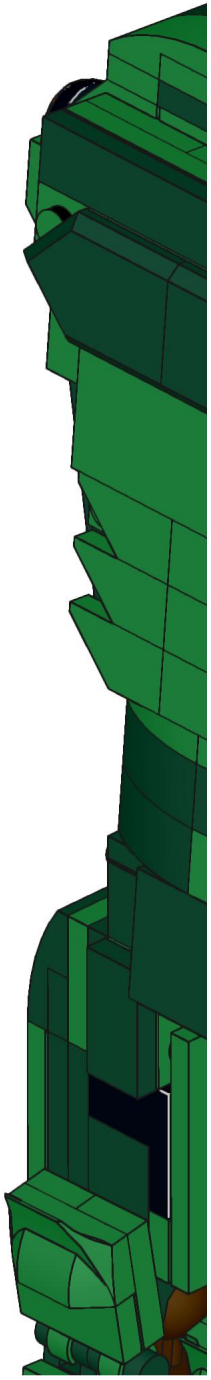




# 167

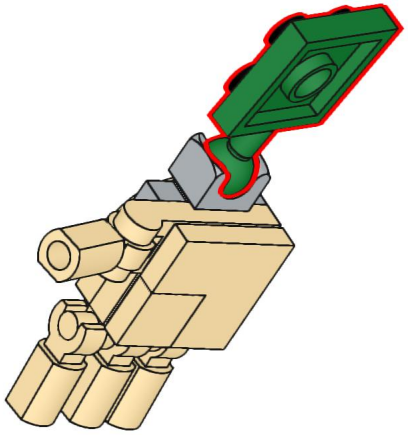
1x

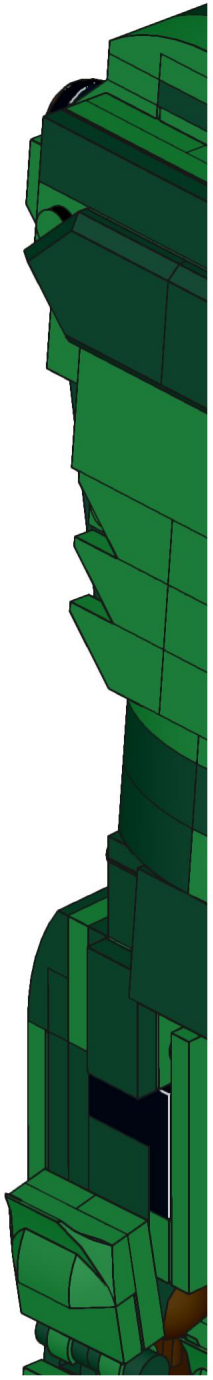




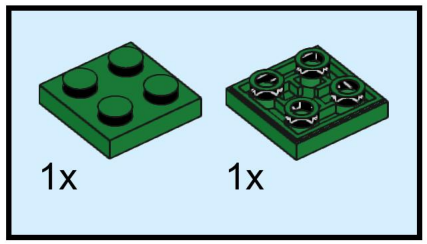
# 168

1x



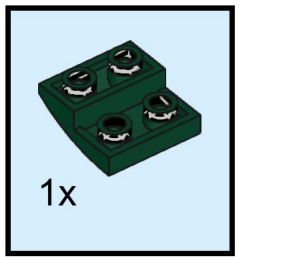


# 169

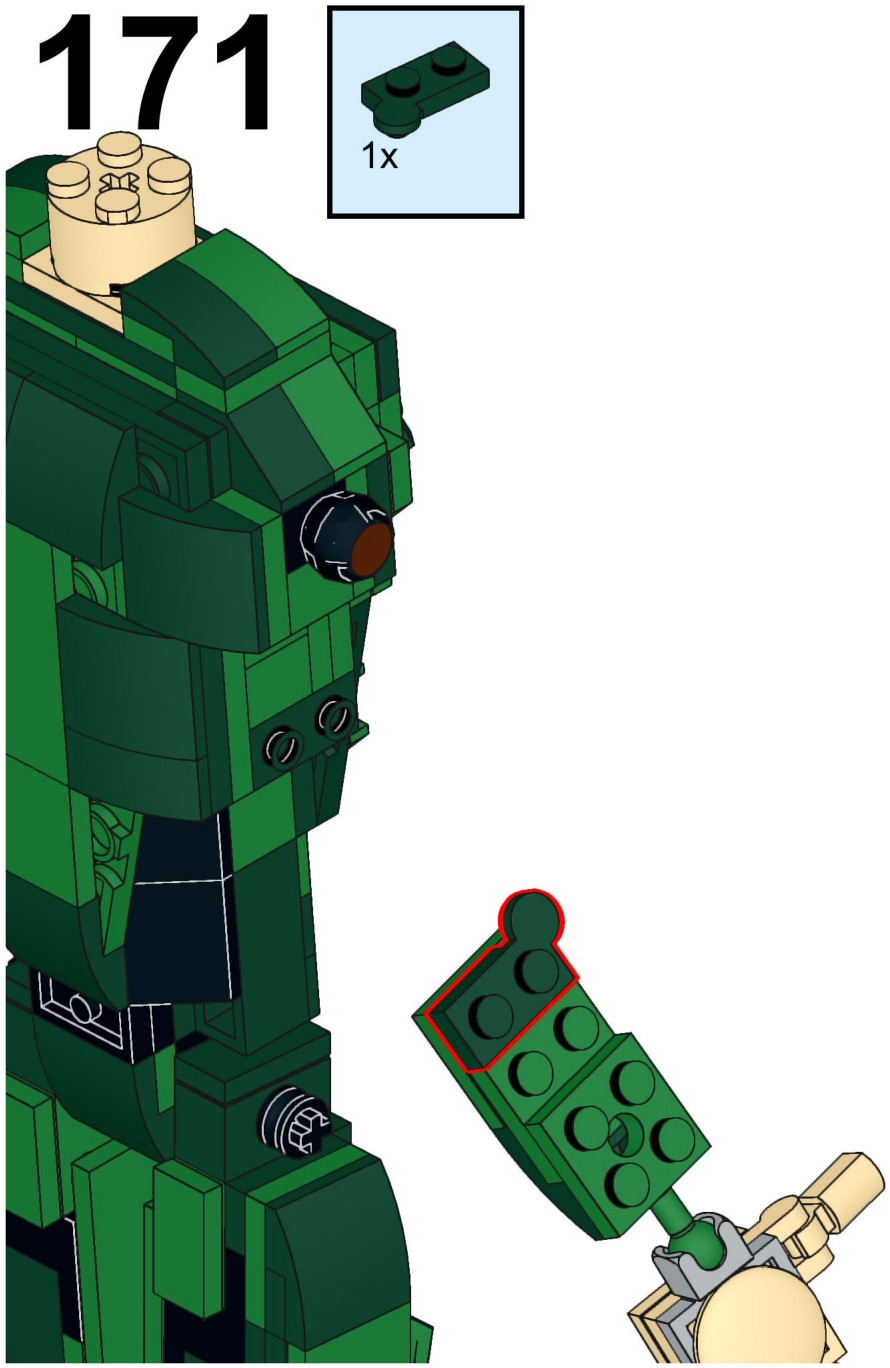




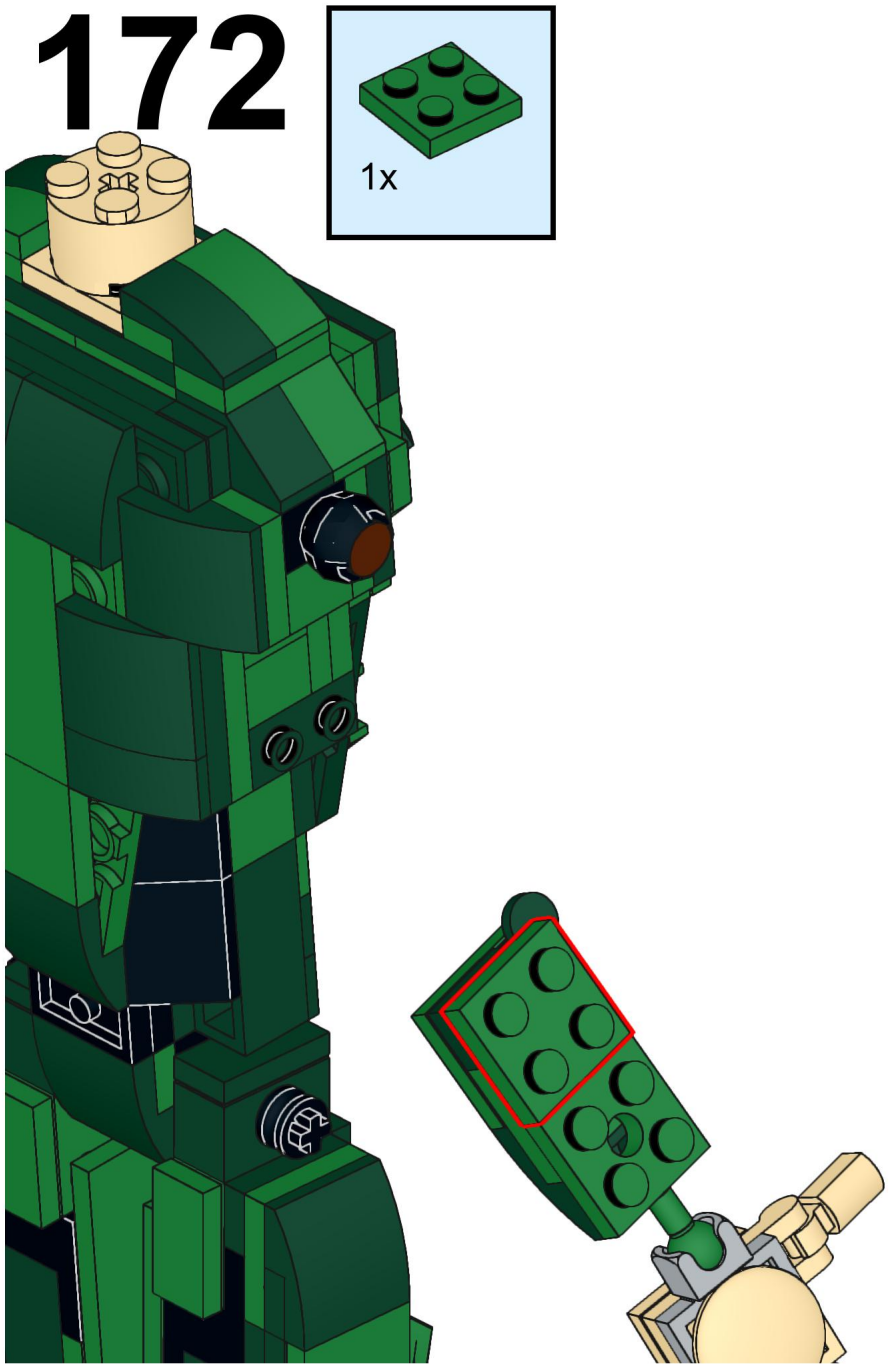

# 170



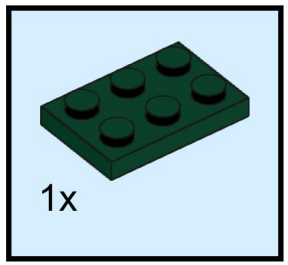
# 171

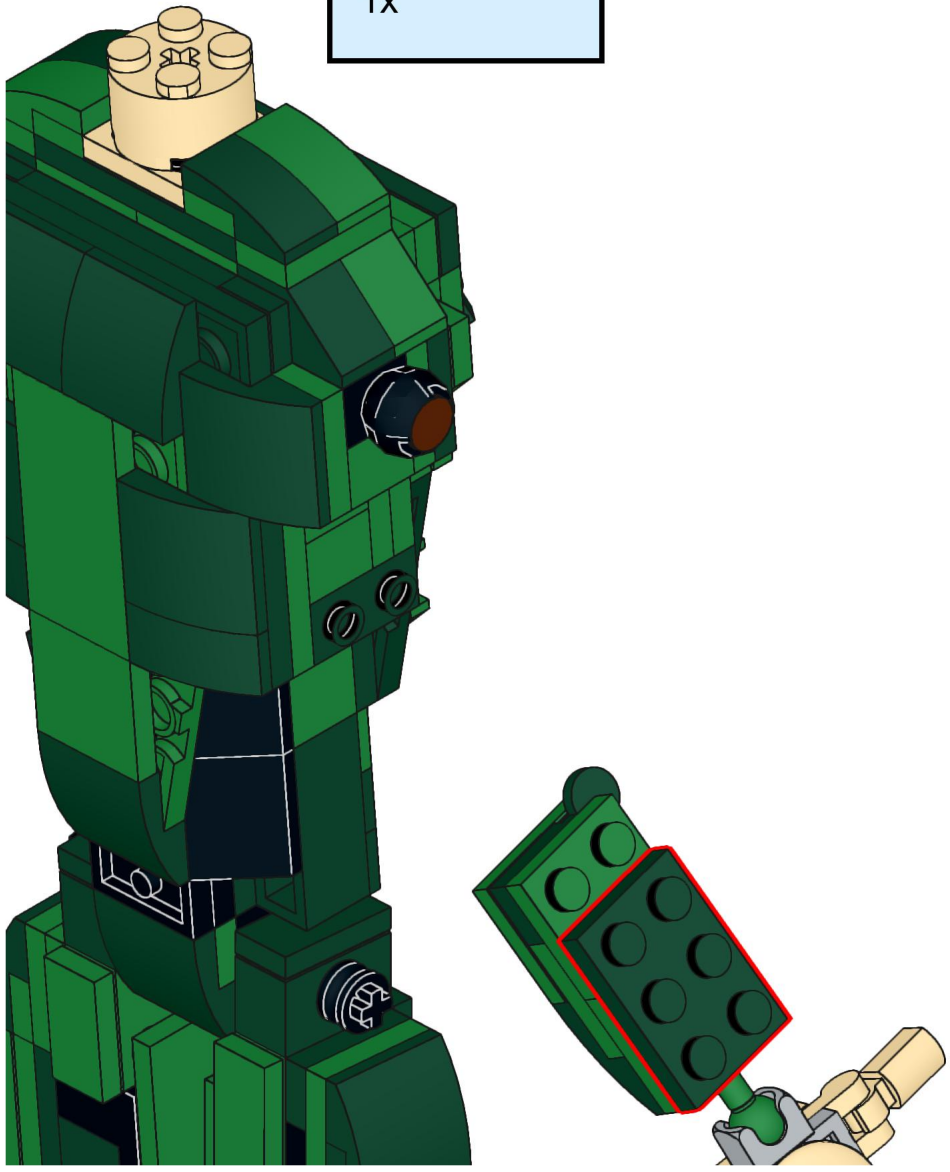



# 172

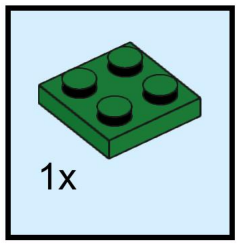


# 173



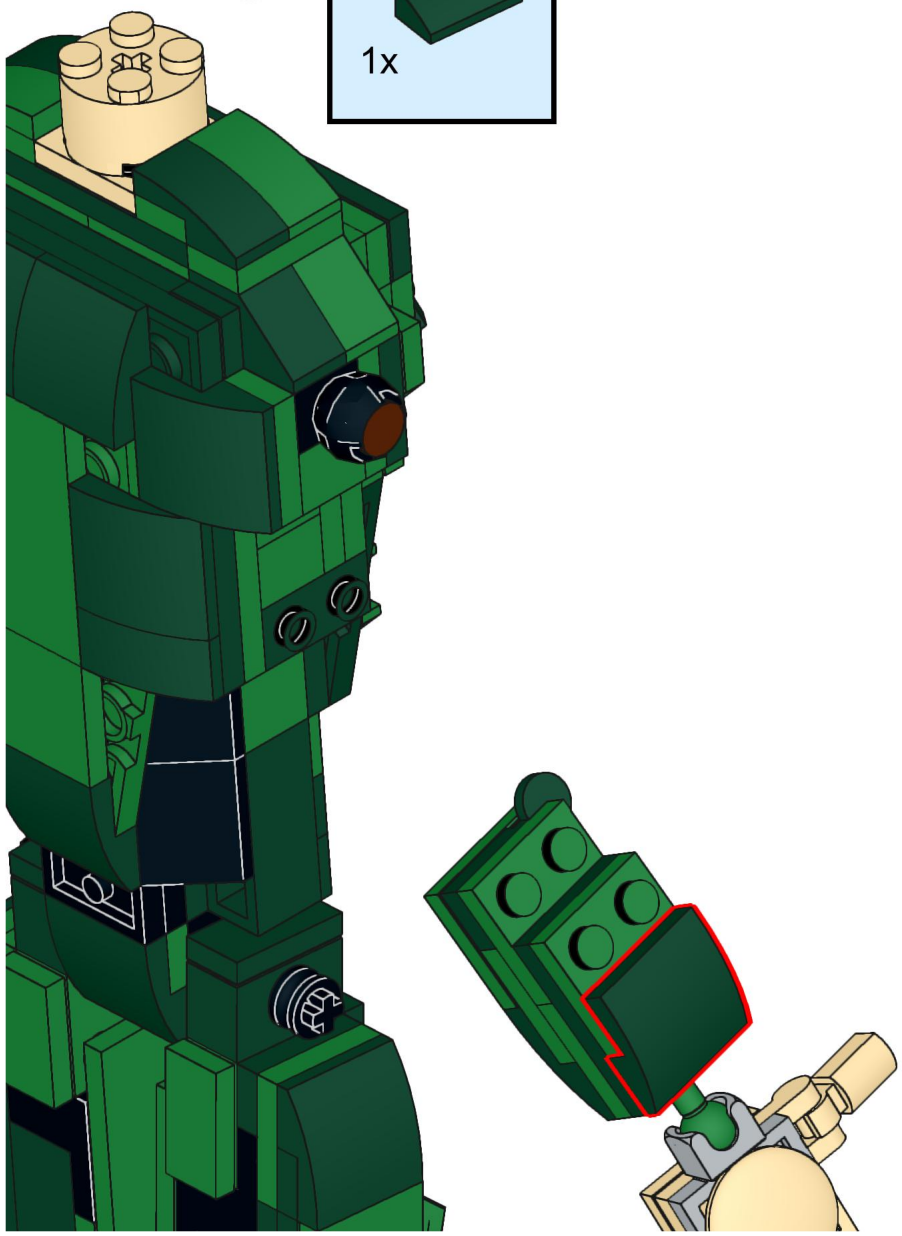
# 174





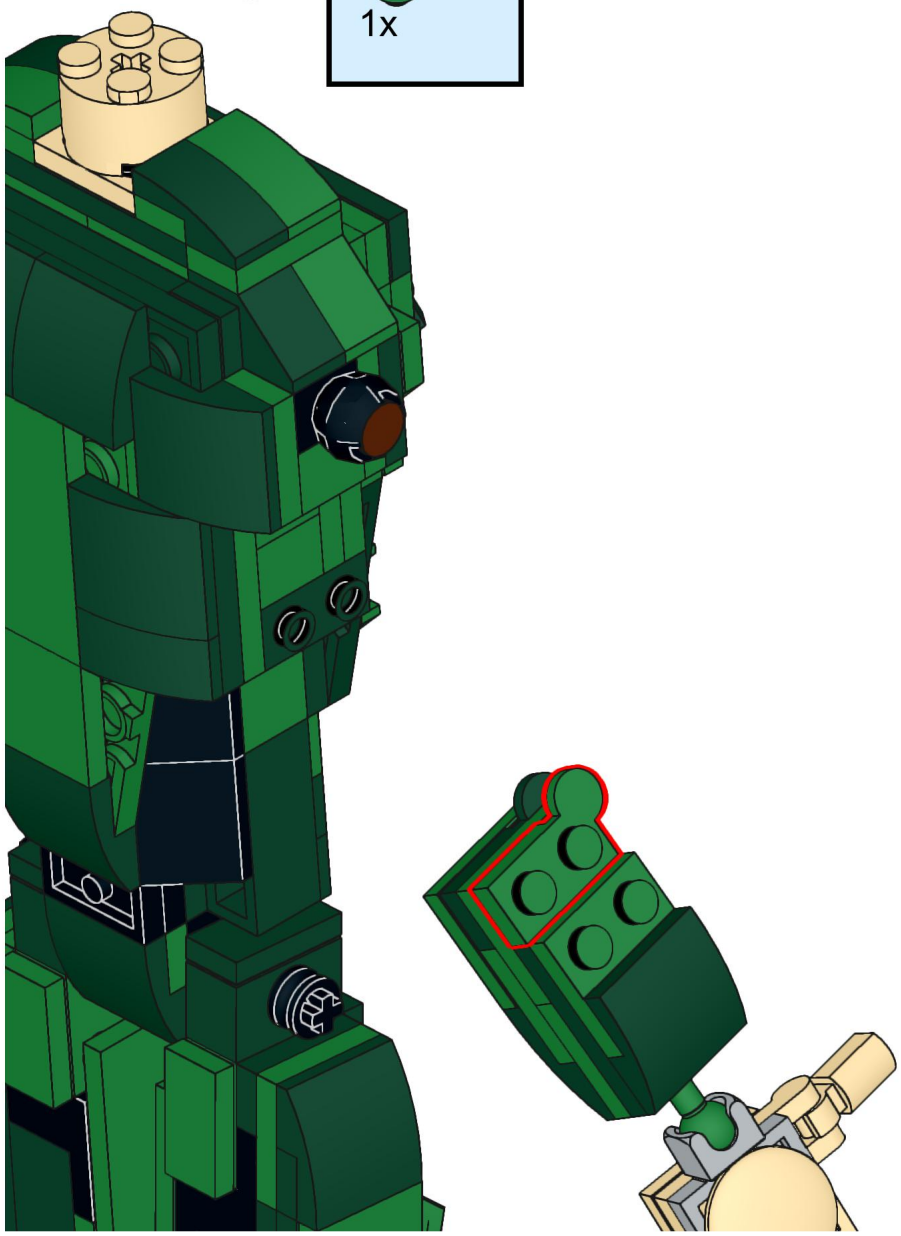

# 175

1x

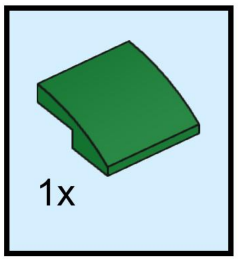


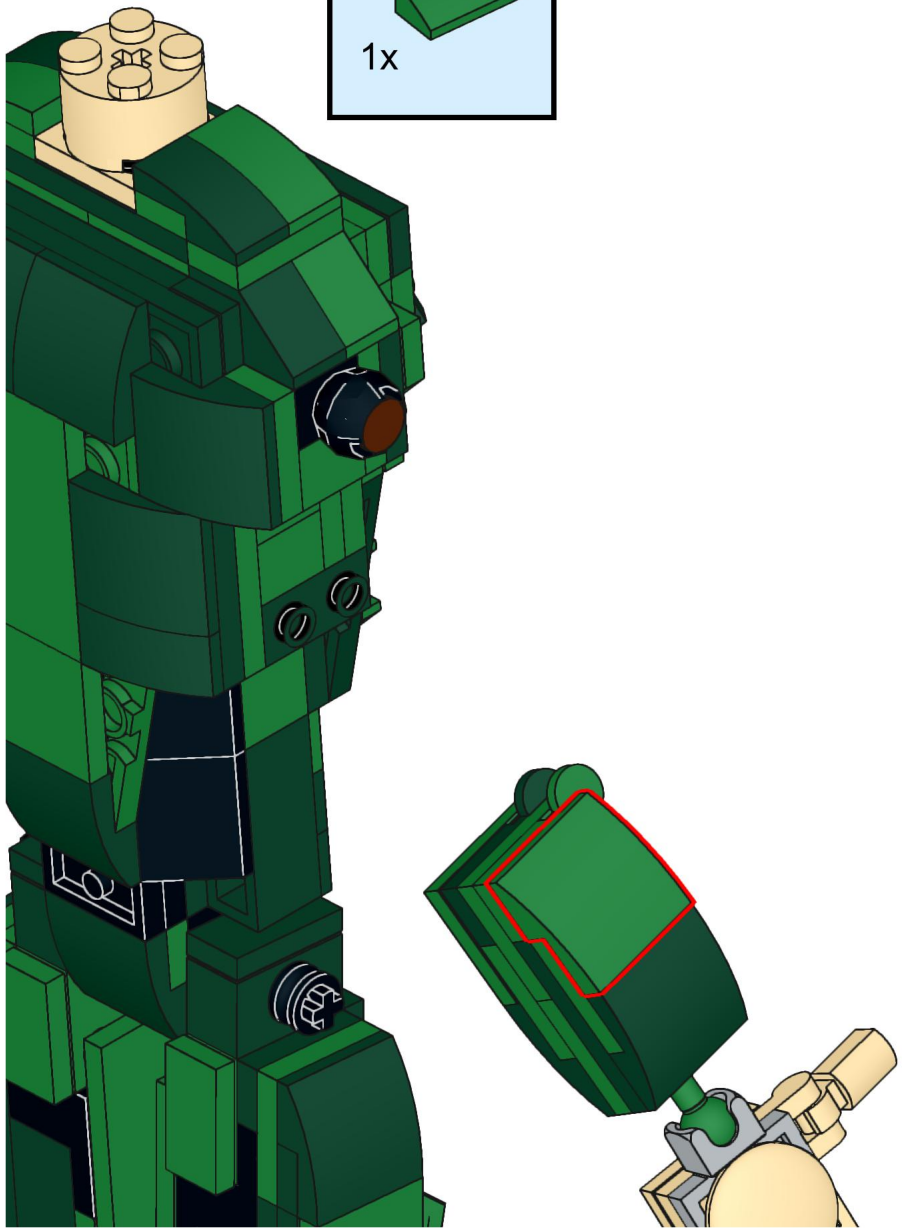
# 176

1x

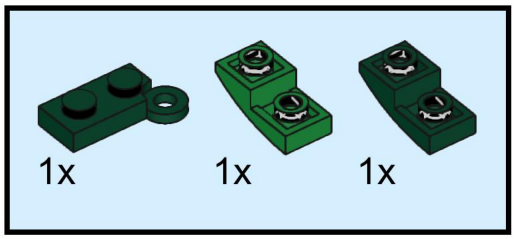


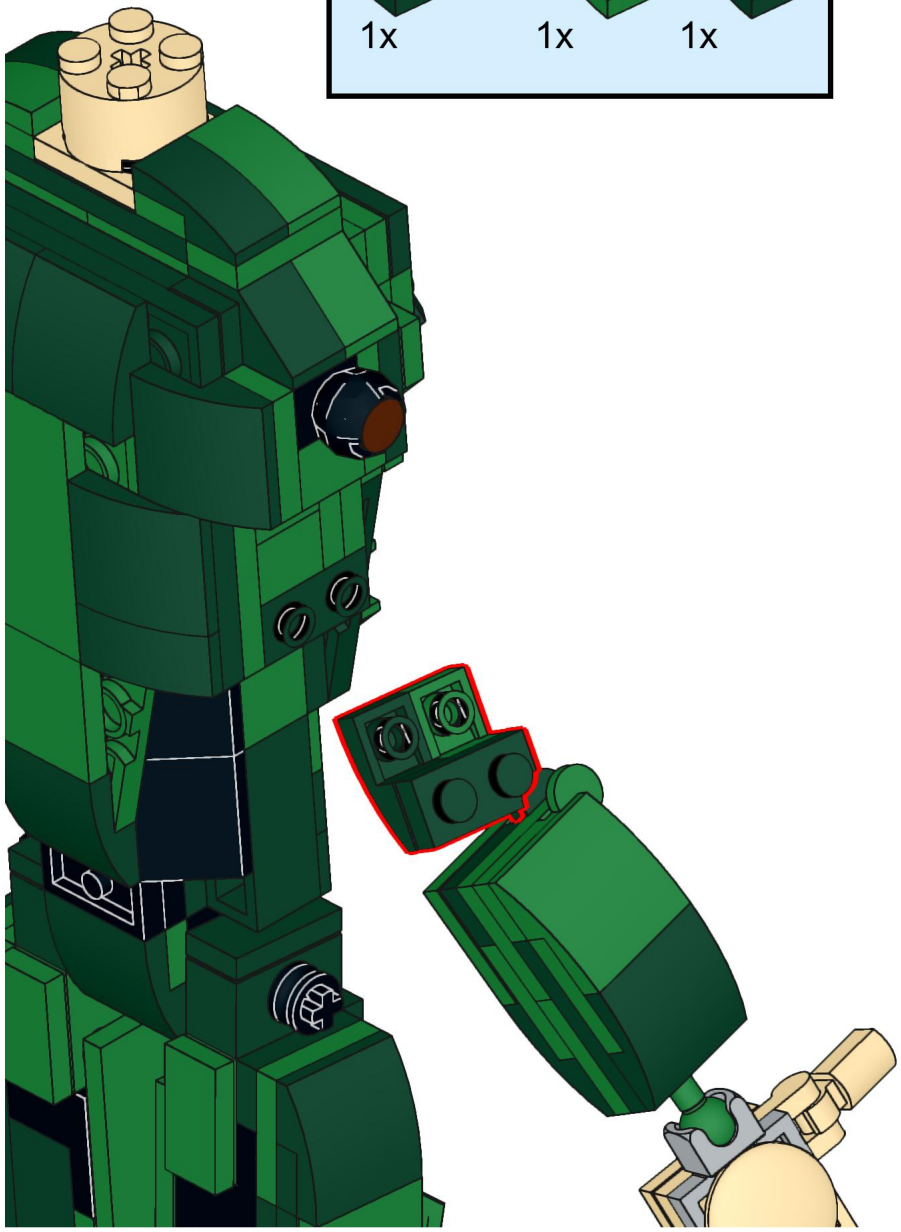
# 177



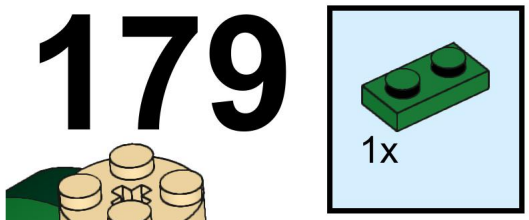



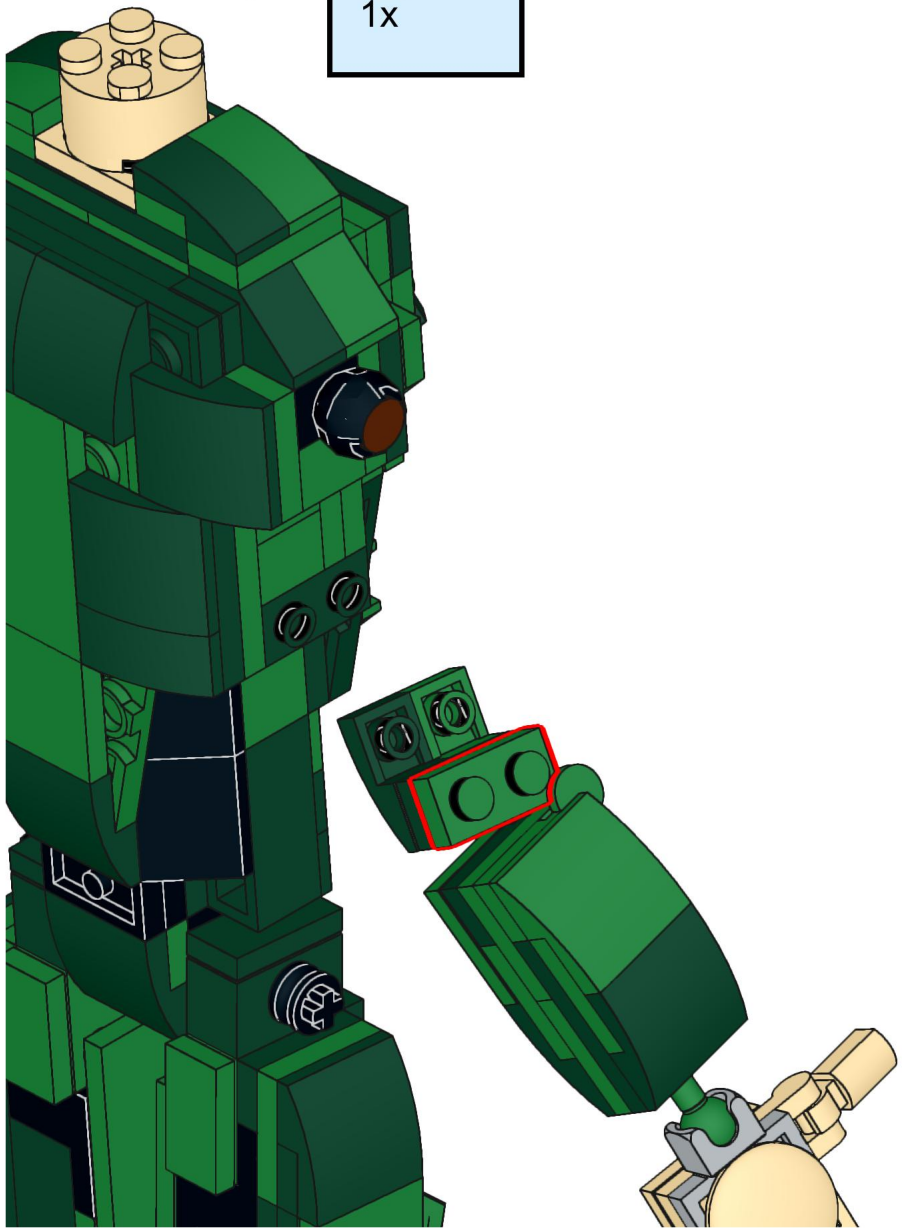
# 178



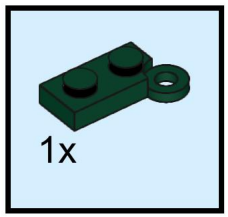



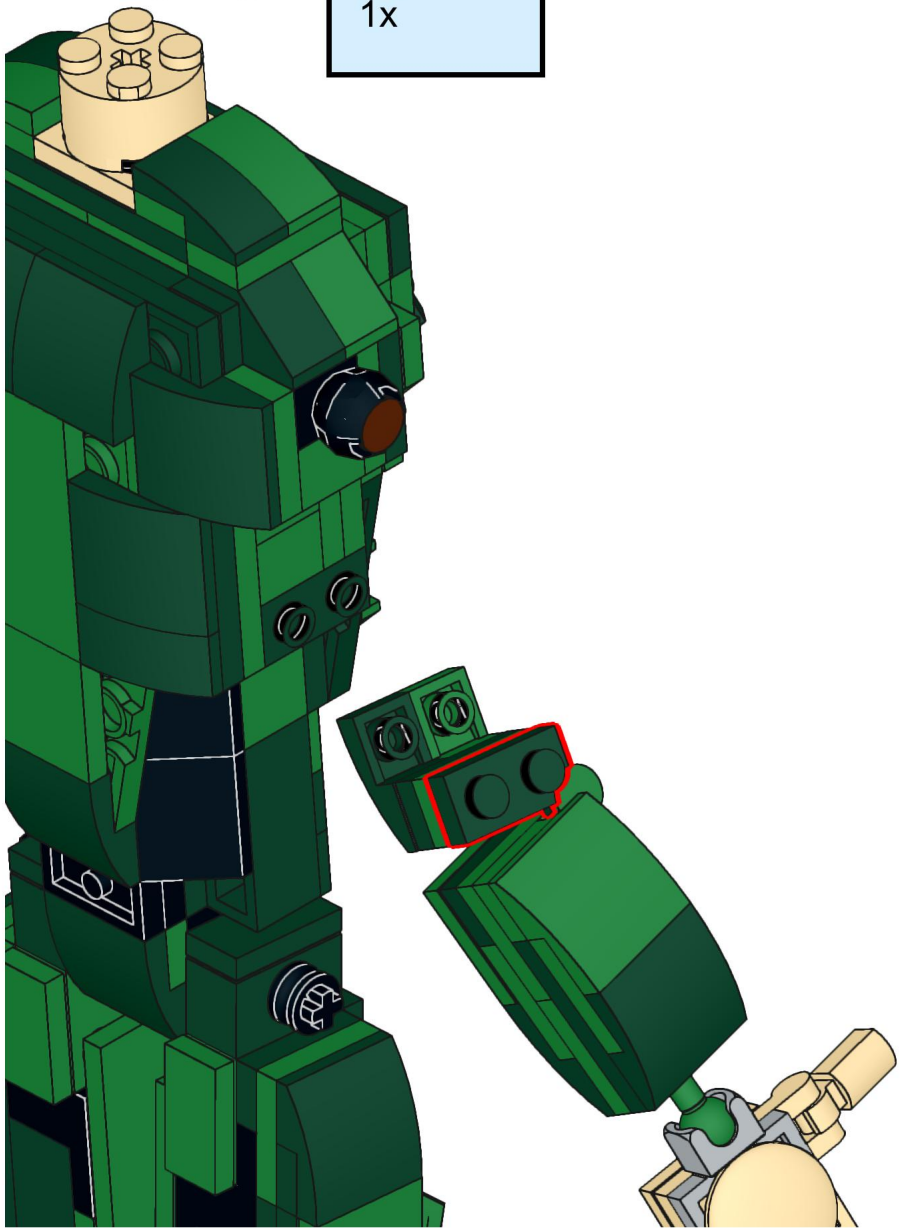
# 179



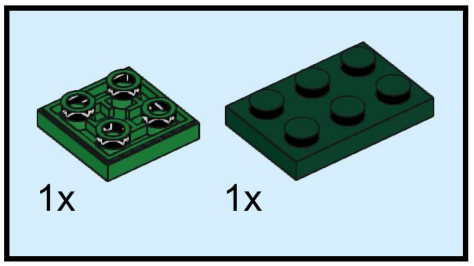



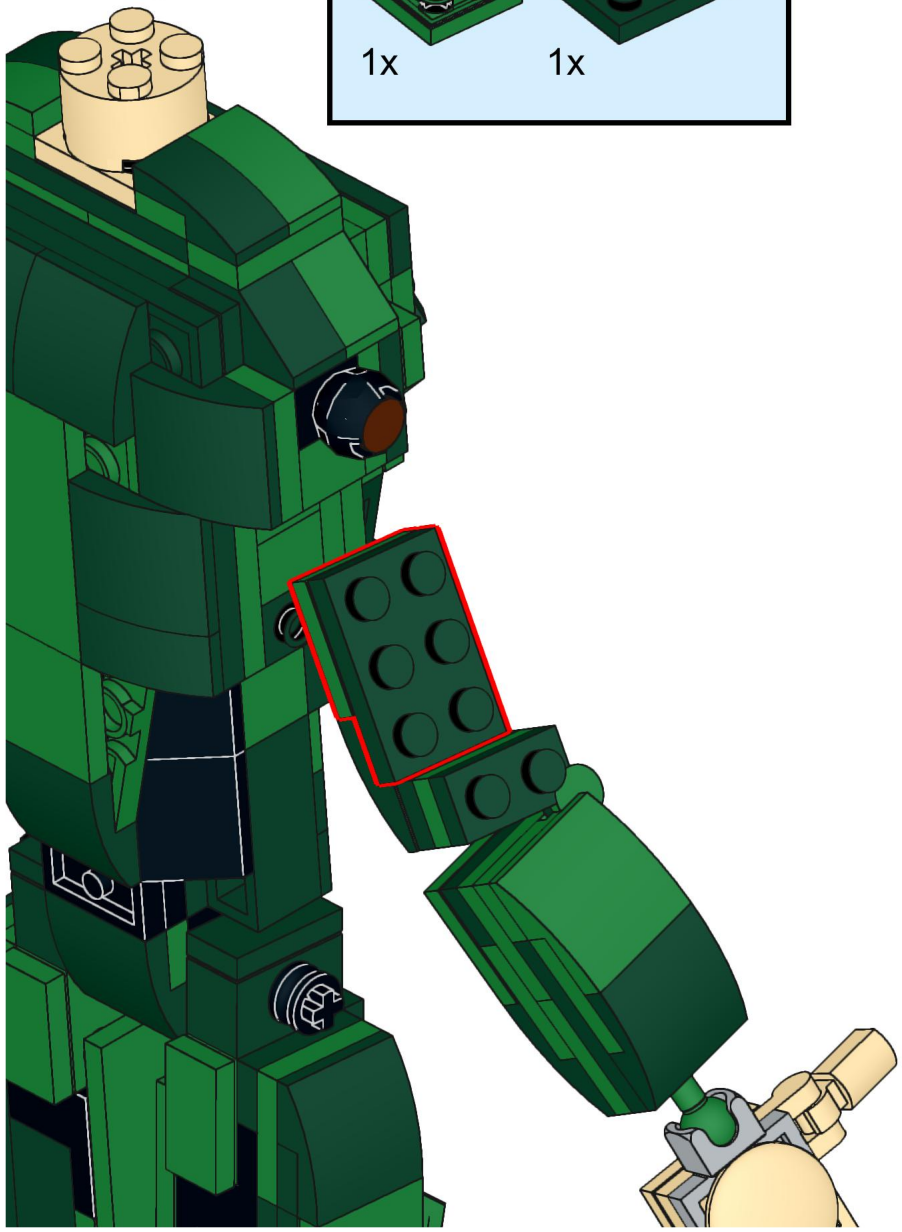
# 180



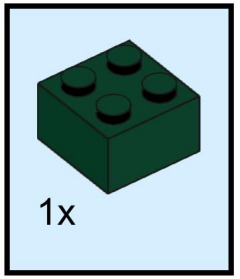



# 181

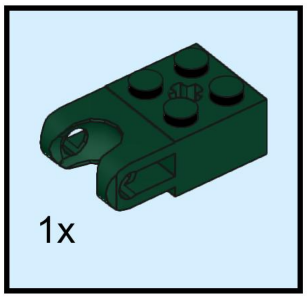


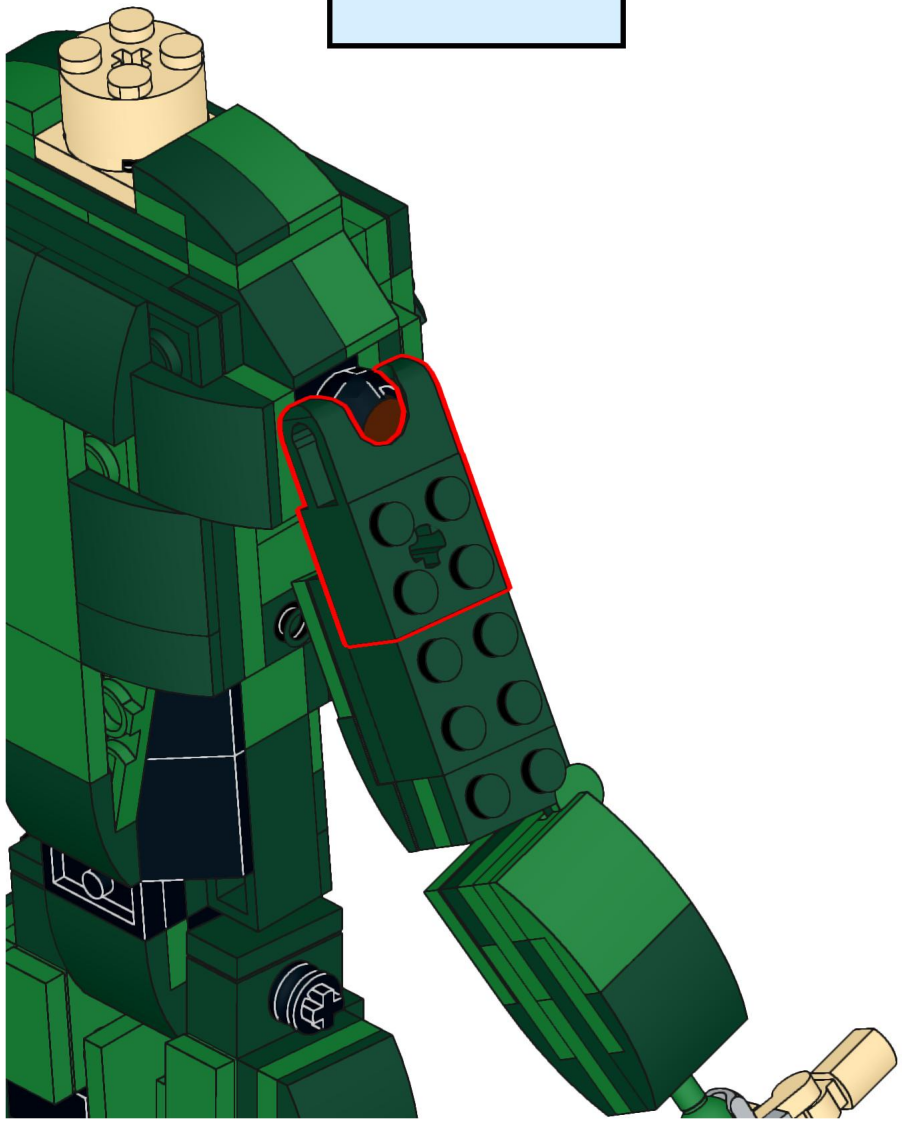
# 182



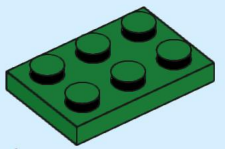
# 183



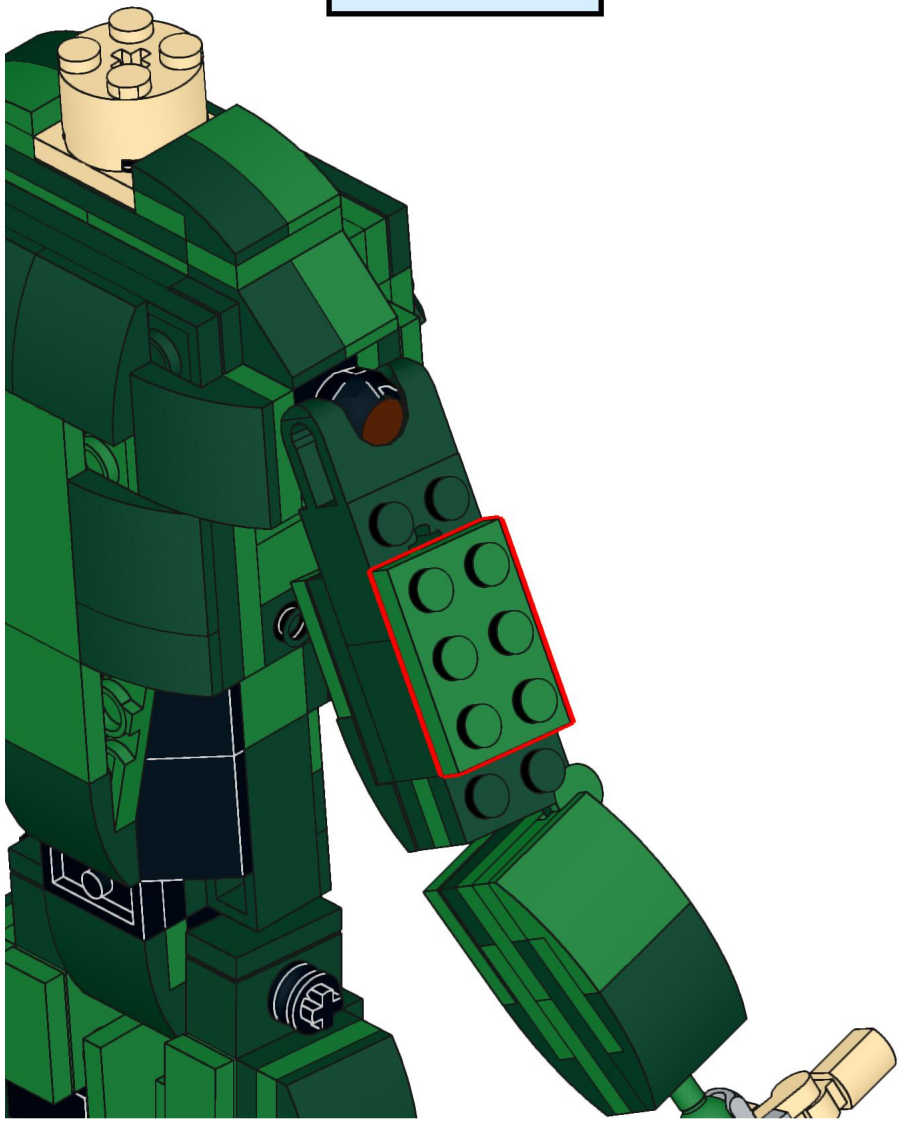
1x



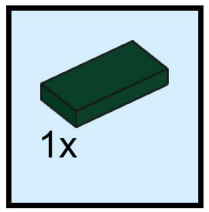
# 184



1x

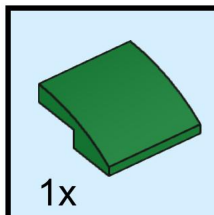


# 185



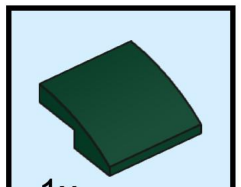


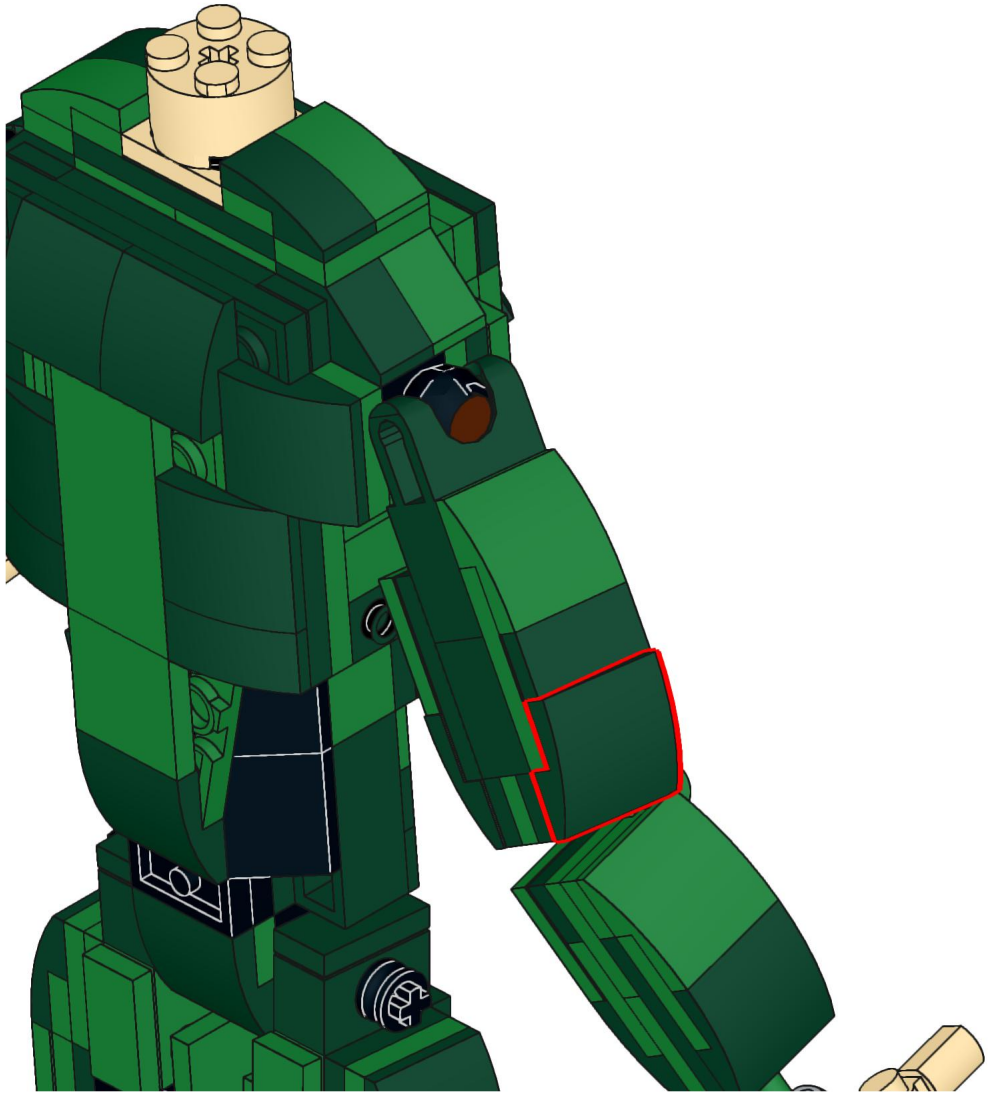

# 186






# 187



# 188

