

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño y simulación de un sistema de pruebas de impactos a la
cabeza en ambientes industriales para protección ocupacional**

Trabajo de graduación presentado por Ignacio Casado Schneider para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala,
2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería

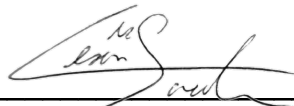


**Diseño y simulación de un sistema de pruebas de impactos a la
cabeza en ambientes industriales para protección ocupacional**

Trabajo de graduación presentado por Ignacio Casado Schneider para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

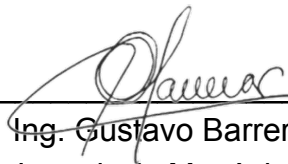
Guatemala,
2025

Asesor



ing. César Saavedra

Vo.Bo. Director



ing. Gustavo Barrera
Ingeniería Mecánica

Fecha de presentación: Guatemala, 18 de noviembre de 2025.

Índice	III
Lista de figuras	VI
Lista de cuadros	VIII
Resumen	X
Abstract	XI
1 Introducción	1
2 Antecedentes	2
2.1 Modelado biomecánico de impactos por caídas en la cabeza en entornos industriales	2
2.2 Indicadores de riesgo de lesión craneoencefálica en caídas	3
3 Justificación	5
4 Objetivos	6
4.1 Objetivo general	6
4.2 Objetivos específicos	6
5 Identificación de requisitos	7
6 Revisión del estado del arte	8
6.1 Abbreviated injury scale	8
6.2 Incidencia actual	8
6.3 Indicadores de riesgo	9
6.3.1 Head injury criterion (<i>HIC</i>)	10
6.3.2 Skull fracture criterion (<i>SFC</i>)	10
6.3.3 Brain injury criterion (<i>BrIC</i>)	11
6.3.4 Concussion probability	11
6.3.5 Valores de referencia	12
6.4 Pruebas en cascos	13
6.5 Pruebas a gran escala	14
6.5.1 Humanetics hybrid-III	14

6.5.2	Thor 50Th ATD	15
6.6	Biomecánica	15
6.6.1	Resbalones	15
6.6.2	Mecánicas al caerse	16
7	Metodología	17
7.1	Definición de requisitos	17
7.2	Diseños iniciales	18
7.2.1	Primeros prototipos	19
7.3	Cálculos preliminares	22
7.3.1	Cálculo teórico	22
7.3.2	Cálculos con simulación	24
7.3.3	Pruebas reales	25
7.4	Diseño a ser fabricado	27
7.4.1	Péndulo invertido	28
7.4.2	Marco móvil	29
7.4.3	Sistema de yunques modular	30
7.4.4	Cuello con biofidelidad	32
7.4.5	Headform	32
7.4.6	Piezas adaptadas del diseño original	33
7.5	Cálculos analíticos y validaciones teóricas	35
7.5.1	Selección del factor de seguridad	35
7.5.2	Estimación de energía cinética del impacto con base en masa y velocidad de la cabeza.	37
7.5.3	Estimación de la fuerza máxima por teorema del impulso	37
7.5.4	Evaluación de componentes estructurales	38
7.6	Simulaciones por elementos finitos	57
7.6.1	Análisis	57
7.6.2	Materiales	58
7.6.3	Análisis de los yunques de impacto	59
7.7	Elaboración de la documentación técnica	67
7.8	Análisis de costos	67
7.8.1	Costos de marco estructural	67
7.8.2	Costo de headform	68
7.8.3	Costo de cuello	69
7.8.4	Costos de piezas de acero	70
7.8.5	Costos de cordones de soldadura	72
8	Resultados	73
8.1	Cálculos teóricos	73
8.2	Simulaciones en ANSYS	74
8.2.1	Primer yunque-escalón	74
8.2.2	Segundo yunque-andamio	76
8.2.3	Placa de acople cabeza-cuello	78
8.3	Costo total	81
8.4	Cumplimiento de requisitos	82
8.5	Discusión de resultados	82

9 Conclusiones	85
10 Recomendaciones	87
11 Referencias	88
12 Anexos	91
13 Glosario	92

Lista de figuras

Figura 1	Efectos de impactos en la cabeza humana	10
Figura 2	Tabla de referencia CP	12
Figura 3	Máquina de pruebas de impacto en cascos	13
Figura 4	Maniquí de choques Hybrid III	14
Figura 5	Maniquí de choques Thor ATD	15
Figura 6	Planos del cuello del Hybrid III ATD	18
Figura 7	Headform usado en la empresa	19
Figura 8	Primer prototipo de placa de acople superior	20
Figura 9	Parte inferior del headform	21
Figura 10	Prototipo para alineamiento	22
Figura 11	DCL inicial	23
Figura 12	DCL del impacto	24
Figura 13	Cuerpo representado por 2 barras	24
Figura 14	Cuerpo representado por 3 barras	25
Figura 15	Escenarios del protocolo de pruebas	26
Figura 16	Vista explotada, máquina diseñada	28
Figura 17	Péndulo invertido	29
Figura 18	Marco móvil con perfiles estructurales	29
Figura 19	Sistema de yunques modular	30
Figura 20	Escenarios de caída considerados en el estudio.	30
Figura 21	Primer yunque de impacto, escalera	31
Figura 22	Segundo yunque de impacto, andamio	32
Figura 23	Diseño preliminar de cabeza y cuello	33
Figura 24	Placa de acople de cabeza	34
Figura 25	Placa de acople al cuerpo	35
Figura 26	Impacto en componente estructural	39
Figura 27	Diagrama de cuerpo libre, pieza estructural	39
Figura 28	Diagrama de cuerpo libre, eje de soporte	43
Figura 29	Representación de impacto, primer yunque	45
Figura 30	Triángulo del impacto, primer yunque	46
Figura 31	Diagrama de cuerpo libre, primer yunque	47
Figura 32	Representación de impacto, segundo yunque	50
Figura 33	Triángulo del impacto, segundo yunque	50
Figura 34	Diagrama de cuerpo libre, segundo yunque	51
Figura 35	Composición de simulación en ANSYS	58

Figura 36	Geometría de primer yunque	59
Figura 37	Contactos <i>bonded</i> simulando soldadura, primer yunque	60
Figura 38	Contactos <i>bonded</i> simulando tornillería, primer yunque	60
Figura 39	Contactos <i>frictionless</i> , primer yunque	61
Figura 40	Soportes fijos del ensamble, primer yunque	61
Figura 41	Fuerza en superficie, primer yunque	62
Figura 42	Geometría, segundo yunque	62
Figura 43	Contactos <i>bonded</i> simulando soldadura, segundo yunque	63
Figura 44	Contactos <i>bonded</i> simulando tornillería, segundo yunque	64
Figura 45	Contactos <i>frictionless</i> , segundo yunque	64
Figura 46	Fuerza ejercida en superficie por componentes, segundo yunque	65
Figura 47	Geometría a evaluar, placa de acople	65
Figura 48	Soportes fijos, placa de acople	66
Figura 49	Fuerza ejercida en corte, placa de acople	66
Figura 50	Diseño del marco estructural	68
Figura 51	Esfuerzo de Von Mises, primer yunque	74
Figura 52	Esfuerzo cortante máximo, primer yunque	75
Figura 53	Deformación máxima, primer yunque	75
Figura 54	Factor de seguridad, primer yunque	76
Figura 55	Esfuerzo de Von Mises, segundo yunque	76
Figura 56	Esfuerzo cortante, segundo yunque	77
Figura 57	Deformación máxima, segundo yunque	77
Figura 58	Factor de seguridad, segundo yunque	78
Figura 59	Esfuerzo de Von Mises, placa de acople cabeza-cuello	78
Figura 60	Esfuerzo cortante, placa de acople cabeza-cuello	79
Figura 61	Deformación máxima, placa de acople cabeza-cuello	79
Figura 62	Factor de seguridad, placa de acople cabeza-cuello	80
Figura 63	Resumen consolidado de costos del proyecto	81

Lista de cuadros

Cuadro 1	Puntajes AIS	8
Cuadro 2	Puntajes y estados	9
Cuadro 3	Relación entre HIC, posibilidad de fractura y puntaje AIS	12
Cuadro 4	Relación entre BrIC y niveles AIS	13
Cuadro 5	Identificación de códigos	17
Cuadro 6	Tabla de requisitos ampliada	17
Cuadro 7	Parámetros de la persona promedio	22
Cuadro 8	Tabla de Parámetros del Modelo	23
Cuadro 9	Indicadores de riesgo de las simulaciones	25
Cuadro 10	Resultados de velocidades de impacto obtenidas en las pruebas físicas	27
Cuadro 11	Tabla de resultados finales de pruebas físicas	27
Cuadro 12	Selección del factor de seguridad requerido	36
Cuadro 13	Parámetros del impacto estimados por impulso	38
Cuadro 14	Resumen de esfuerzos y verificación del diseño para acero estructural A36	40
Cuadro 15	Ensayo de fatiga para pieza estructural	41
Cuadro 16	Verificación de soldadura para unión estructural con electrodo E6013	42
Cuadro 17	Análisis de eje sometido a cargas puntuales	44
Cuadro 18	Dimensiones del perfil estructural equivalente	45
Cuadro 19	Análisis de viga en voladizo bajo cargas combinadas	48
Cuadro 20	Evaluación de fatiga para viga en voladizo	49
Cuadro 21	Análisis de esfuerzos en voladizo de acero A36	52
Cuadro 22	Ensayo de fatiga para voladizo estructural	53
Cuadro 23	Análisis por energía de distorsión en barra de acero 1018	56
Cuadro 24	Propiedades mecánicas de ASTM A36	58
Cuadro 25	Propiedades mecánicas de acero 1018 CD	58
Cuadro 26	Resultados del parámetro de <i>skewness</i> del mallado 1	60
Cuadro 27	Resultados del parámetro de <i>skewness</i> del mallado 2	63
Cuadro 28	Resultados del parámetro de <i>skewness</i> del mallado 3	66
Cuadro 29	Estimado de costo importado en quetzales (puesto aduana)	69
Cuadro 30	Estimado de costo de materiales del cuello del Hybrid III	70
Cuadro 31	Listado de piezas y materiales necesarios para el sistema de pruebas	70
Cuadro 32	Estimación de costos de materiales para la fabricación del sistema	71

Cuadro 33	Fuerzas aplicadas por componente	73
Cuadro 34	Evaluación de seguridad estructural y fatiga	74
Cuadro 35	Evaluación de cumplimiento de requisitos del proyecto	82

Los accidentes por resbalones y caídas en entornos industriales representan una de las principales causas de traumatismos craneoencefálicos en trabajadores. En el esquema mundial, la ausencia de protocolos de prueba que reproduzcan de forma realista los escenarios de impacto limita la capacidad de las empresas para evaluar la eficacia de los cascos de seguridad. Este trabajo tuvo como objetivo desarrollar un modelo físico que simulará los impactos a la cabeza en caídas industriales, con el fin de diseñar un sistema de pruebas de bajo costo y alta biofidelidad .

Se definieron requisitos funcionales, estructurales y económicos en colaboración con la empresa interesada dedicada al diseño de sistemas de amortiguación para cascos de seguridad industrial. A partir de estudios biomecánicos y modelos antropomórficos, se diseñó un sistema modular compuesto por un péndulo invertido, cuello con biofidelidad , *headform* y yunques intercambiables. Se realizaron cálculos teóricos de energía, impulso y esfuerzos estructurales, complementados con simulaciones por elementos finitos en ANSYS para validar los factores de seguridad. Asimismo, se elaboraron los manuales de ensamblaje y pruebas basados en la norma ANSI Z89.1, lo que garantizó la trazabilidad y reproducibilidad del sistema.

Los resultados muestran factores de seguridad superiores a 5 en todos los componentes, vida útil infinita por fatiga y un costo total de Q11,282.09, dentro del límite de diseño. El sistema cumple con los requisitos definidos, demostrando que es estructuralmente seguro, económicamente viable y adaptable a futuras configuraciones de ensayo. Se concluye que el modelo desarrollado constituye una herramienta efectiva para el diseño y validación de protección craneal en entornos industriales.

Palabras clave: impactos en la cabeza, traumatismo craneoencefálico, seguridad ocupacional, cascos industriales, biomecánica de impactos, modelado biomecánico, caídas y resbalones, HIC, BrIC, SFC, biofidelidad, Hybrid III, headform, simulación por elementos finitos, ANSYS, diseño mecánico, ensayos de impacto.

Slip and fall accidents in industrial environments are one of the leading causes of traumatic brain injuries among workers, significantly affecting safety and productivity. This work presents the development of a physical and computational model to simulate head impacts under conditions representative of industrial accidents, aiming to improve the evaluation of protective helmets.

A modular testing system was designed, integrating an inverted pendulum, a biofidelic neck, an instrumented headform, and a set of interchangeable anvils to reproduce different impact scenarios. The model allows the quantification of relevant parameters such as linear and angular accelerations, impact energy, and biomechanical injury criteria.

The results demonstrate that the system can replicate realistic impact conditions, reaching energy levels close to 65 J while maintaining structural safety factors greater than 5 in all components. Additionally, the design proved to be economically feasible, with a total cost of Q11,282.09 within the defined constraints.

It is concluded that the developed system constitutes an effective tool for assessing head impact risks in industrial environments, supporting improvements in the design and validation of safety helmets. Its use is recommended as a basis for more representative testing protocols and future adaptation to additional impact scenarios.

Keywords: head impacts, traumatic brain injury, occupational safety, industrial helmets, impact biomechanics, biomechanical modeling, slips and falls, HIC, BrIC, SFC, biofidelity, Hybrid III, headform, finite element simulation, ANSYS, mechanical design, impact testing.

Los impactos en la cabeza ocasionados por resbalones, tropiezos o caídas representan una de las principales causas de lesiones craneoencefálicas en entornos industriales, lo que afecta la seguridad y la productividad de los trabajadores. A pesar de los avances en el diseño de cascos de protección, los métodos de evaluación no reproducen con precisión las condiciones reales de los accidentes laborales, lo que genera una brecha entre los ensayos de laboratorio y los escenarios cotidianos en el campo industrial.

En los últimos años, diversas investigaciones internacionales han abordado la biomecánica de impactos craneales mediante el uso de maniquíes antropomórficos, modelos computacionales y simulaciones experimentales (Caccese et al., 2016; Hajiaghamemar et al., 2015; Yu et al., 2024). Estos estudios han permitido establecer indicadores de riesgo como el *head injury criterion* (HIC) y el *brain injury criterion* (BrIC), utilizados para evaluar el nivel de severidad de una lesión. Sin embargo, la mayoría de estos trabajos se centran en el ámbito automotriz o deportivo, existiendo una carencia de sistemas de evaluación específicos para caídas industriales, especialmente en contextos latinoamericanos donde los recursos tecnológicos son limitados.

El presente trabajo se delimita al diseño y modelado de un sistema físico que simula impactos a la cabeza en entornos industriales, con el objetivo de desarrollar una herramienta de prueba modular y económica de alta biofidelidad. El modelo propuesto incorpora un cuello con características inspiradas en el Hybrid III ATD, un sistema de yunques intercambiables y un headform instrumentado para registrar aceleraciones lineales y angulares. Mediante cálculos analíticos, simulaciones por elementos finitos y elaboración de documentación técnica, se busca establecer un protocolo estandarizado que permita a la industria nacional evaluar la efectividad de los cascos de seguridad con base en parámetros biomecánicos cuantificables.

En síntesis, esta investigación integra fundamentos de biomecánica, ingeniería estructural y análisis numérico para resolver un problema en la seguridad ocupacional. Su desarrollo contribuye a la generación de conocimiento aplicado en el ámbito de la protección craneal y sienta las bases para futuras mejoras en los estándares de ensayo y diseño de cascos industriales en Guatemala y la región.

2.1. Modelado biomecánico de impactos por caídas en la cabeza en entornos industriales

Varios estudios recientes han investigado la biomecánica de impactos craneales resultantes de resbalones, tropiezos o caídas en entornos laborales. Hajiaghamemar *et al.* (2015) realizaron uno de los primeros análisis experimentales, dejando caer maniqués antropomórficos (Hybrid III, percentil 5 femenino y 50 masculino) desde posición de pie en distintas posturas (caídas hacia atrás con/sin flexión de cadera, hacia delante con/sin flexión de rodilla y laterales). Observaron que la cinemática del impacto de cabeza variaba significativamente según el escenario de la caída, registrando aceleraciones lineales pico de 146 a 502 g, aceleraciones angulares de 8.8–43.3 krad/s², fuerzas de 3.9–24.5 kN y velocidades de impacto de 2.0–7.4 m/s, demostrando la influencia de la postura en la severidad del impacto (Hajiaghamemar *et al.*, 2015).

Caccese *et al.* (2016) desarrollaron un sistema de ensayo específico para simular impactos de cabeza por caídas de forma controlada y reproducible. Adaptaron una torre de caída de doble guía (*twin-wire drop tower*) incorporando una cabeza y cuello Hybrid III instrumentados para medir aceleraciones lineales y angulares Caccese *et al.*, 2016. Su objetivo fue evaluar cascos y otros equipos de protección ante caídas, incluyendo el componente rotacional de la cabeza, que típicamente no se aborda en pruebas industriales convencionales. El sistema mostró buena repetibilidad, con coeficientes de variación entre 0.4% y 6.7% para aceleración lineal pico y aproximadamente 16% en aceleración angular para impactos laterales, demostrando una alta biofidelidad biomecánica manteniendo costos reducidos.

En la misma línea, Seidi *et al.* (2025) compararon distintos métodos de ensayo y simulación de impactos de cabeza por caídas desde altura de pie, con el fin de recomendar configuraciones de prueba óptimas en términos de realismo y repetibilidad Seidi *et al.*, 2025. Basándose en trabajos previos del mismo grupo, determinaron que la masa efectiva involucrada en impactos craneales equivale aproximadamente a la masa de la cabeza más el

47–49 % de la masa del cuello. Sus hallazgos permitieron proponer un método de ensayo estandarizado y reproducible, aplicable a laboratorios de seguridad industrial con recursos limitados.

Yu *et al.* (2024) abordaron el problema mediante simulación computacional en dinámica multibloque, utilizando un modelo humano validado en *MADYMO* para reproducir 1692 escenarios de caídas en el trabajo Yu et al., 2024. Sus resultados mostraron que las caídas hacia atrás generan las velocidades de impacto de cabeza más altas (en promedio mayores a 9 m/s), mientras que los tropiezos producen velocidades menores pero con ángulos de impacto más tangenciales. Además, identificaron cinco condiciones representativas de impacto —dos para tropiezos, dos para caídas frontales y una para caídas hacia atrás— que podrían emplearse como base para el diseño de pruebas de cascos industriales más realistas.

Wang *et al.* (2025) complementaron estos hallazgos mediante simulaciones de caídas desde escaleras y plataformas industriales a alturas entre 1 m y 5.3 m, obteniendo velocidades de impacto promedio de 6.5 m/s y velocidades angulares de la cabeza cercanas a 14.3 rad/s Wang et al., 2025. Los autores destacaron que los impactos en la región occipital inferior —fuera de la zona de cobertura de la mayoría de cascos industriales— son frecuentes, lo que subraya la necesidad de actualizar las normas de ensayo de cascos para incluir escenarios de caídas verticales reales.

Finalmente, aunque la literatura latinoamericana sobre modelado biomecánico de impactos craneales es limitada, los resultados de estos estudios internacionales proporcionan una base teórica sólida para el desarrollo de sistemas de prueba locales. La ausencia de investigaciones en Guatemala refuerza la relevancia del presente proyecto como contribución pionera en el contexto regional.

2.2. Indicadores de riesgo de lesión craneoencefálica en caídas

Para evaluar la probabilidad de lesiones craneales durante impactos, la comunidad científica ha desarrollado diversos criterios biomecánicos de lesión. El más utilizado es el *Head Injury Criterion* (HIC), el cual se calcula a partir de la aceleración lineal de la cabeza en un intervalo de tiempo breve durante el impacto Mueller et al., 2015. Este indicador fue desarrollado originalmente para la industria automotriz y permite estimar el riesgo de fractura de cráneo o contusión cerebral focal. No obstante, el HIC se limita a impactos puramente lineales y no refleja adecuadamente las lesiones por aceleraciones rotacionales.

Para complementar esta limitación, la *National Highway Traffic Safety Administration* desarrolló el *Brain Injury Criterion* (BrIC), basado en aceleraciones angulares máximas E. Takhounts et al., 2013. Este índice ha demostrado correlacionarse con lesiones cerebrales difusas, como concusiones o daño axonal. En investigaciones recientes de caídas, ambos índices —HIC y BrIC— se aplican de forma conjunta para obtener un panorama más completo del riesgo de lesión.

Otro indicador relevante es el *Skull Fracture Correlate* (SFC), que se calcula como la aceleración promedio durante el intervalo crítico de impacto y se relaciona directamente con la probabilidad de fractura craneal Chan, Takhounts et al., 2007. Estudios experimentales han

mostrado que valores de SFC superiores a 240–290 g se asocian con una alta probabilidad de fractura. Finalmente, índices probabilísticos, como la *Concussion Probability* (CP), combinan aceleraciones lineales y rotacionales en una función logística que estima la probabilidad de sufrir una conmoción cerebral Rowson y Duma, 2013a.

En conjunto, estos indicadores constituyen una base cuantitativa para evaluar la severidad de impactos y diseñar sistemas de protección más eficaces. Su integración en modelos de ensayo físico de bajo costo, como el desarrollado en este trabajo, permite una evaluación más completa del riesgo real de lesión en entornos industriales.

Los resbalones y tropiezos en el ámbito industrial son una preocupación significativa debido a la alta frecuencia de accidentes laborales que resultan en lesiones graves, especialmente en la cabeza. Esta problemática surge de la combinación de factores como superficies resbaladizas, uso inadecuado de equipo de protección y falta de entrenamiento adecuado. Las consecuencias de estos accidentes no solo afectan la salud de los trabajadores, sino que también generan costos elevados para las empresas, tanto en términos de compensaciones como en pérdidas de productividad. A pesar de los esfuerzos por reducir estos incidentes, persiste una necesidad de herramientas más precisas que permitan predecir y mitigar los riesgos asociados a los impactos en la cabeza derivados de resbalones y tropiezos.

La realización de este proyecto es crucial debido a la necesidad de mejorar la seguridad en entornos industriales, donde los resbalones y caídas representan un riesgo significativo de lesiones craneoencefálicas. Las empresas que fabrican cascos de seguridad requieren métodos de prueba más precisos que reflejen las condiciones reales de impacto, para garantizar que sus productos ofrezcan la máxima protección posible. Este proyecto permitirá desarrollar un protocolo basado en datos biomecánicos reales, lo que es esencial para avanzar en la eficacia de los cascos y reducir la frecuencia y gravedad de las lesiones en el lugar de trabajo.

El propósito de este proyecto es diseñar un protocolo de pruebas que simule con exactitud las condiciones biomecánicas que ocurren durante accidentes industriales. Al término del proyecto, se espera obtener un protocolo validado que pueda ser adoptado por la industria para mejorar la efectividad de los cascos. Este protocolo no solo ayudará a proteger mejor a los trabajadores, sino que también proporcionará a las empresas una herramienta para reducir los costos asociados con accidentes laborales y promover mejoras más rigurosas de las normativas de seguridad actuales.

4.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo de impactos que simule con precisión el comportamiento de la cabeza humana durante caídas y resbalones en entornos industriales, para mejorar la seguridad de cascos de industriales.

4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las principales condiciones de riesgo para la cabeza en entornos industriales mediante el análisis de datos de accidentes y estudios biomecánicos relevantes.
- Identificar las ubicaciones y magnitudes específicas de los impactos en la cabeza con mayor factor de riesgo a través de simulaciones detalladas de escenarios de caídas y resbalones.
- Modelar físicamente el comportamiento del cuerpo y la región cervical de un operario industrial en situaciones de caídas y tropiezos mediante estudios biomecánicos y experimentación controlada.
- Evaluar las áreas de mejora en los estándares de seguridad actuales mediante la comparación de resultados de estudios biomecánicos con las normativas vigentes
- Redactar un protocolo de pruebas estandarizado para la tipificación de impactos en la cabeza debido a resbalones y tropiezos, basado en los hallazgos obtenidos a lo largo del trabajo.

Identificación de requisitos

El proyecto debe incluir un protocolo detallado que describa los pasos para realizar pruebas de impacto en la cabeza, considerando las condiciones específicas de caídas y resbalones en entornos industriales. Este protocolo deberá ser diseñado para ser aplicable con el equipo actualmente disponible en la empresa, asegurando que no requiera la adquisición de nuevos dispositivos. Este requisito fue realizado con el director de ingeniería de la empresa, con el cual se elaboró el presente trabajo.

Asimismo, se requiere el desarrollo de un modelo biomecánico del cráneo y el cuello humano, adaptado para replicar las dinámicas propias de caídas y resbalones en el contexto industrial. El modelo debe ser compatible con las herramientas de análisis ya utilizadas por la empresa, evitando la necesidad de inversiones adicionales en software o hardware. Este requisito fue establecido tras una reunión con el director de ingeniería de la empresa.

El proyecto tiene un tiempo límite de desarrollo de 10 meses. Durante este periodo, deberán realizarse entregas parciales que incluyan avances en el modelo biomecánico, el protocolo de pruebas, un manual de ensamble y operación junto con un conjunto de planos para su futura fabricación. Este plazo fue acordado mediante una reunión con el director de ingeniería de la empresa.

Finalmente, tanto el protocolo de pruebas como el modelo de impacto deben ser diseñados de manera modular. Esto permitirá su adaptación a pruebas adicionales en futuros desarrollos, facilitando la integración de nuevas tecnologías o escenarios de análisis. Este requerimiento fue señalado en un correo enviado por el jefe de investigación y desarrollo de la empresa.

6.1. Abbreviated injury scale

La Escala Abreviada de Lesiones (AIS, por sus siglas en inglés) se desarrolló como una herramienta para proporcionar datos de seguridad en el diseño automotriz. Originalmente incluía un conjunto inicial de 73 lesiones no penetrantes, asignando a cada una un nivel de severidad en un rango del 1 al 6. Sin embargo, este sistema presenta limitaciones, ya que ofrece solo una planificación aproximada y la relación con el aumento de la mortalidad no es lineal. A pesar de estas limitaciones, la AIS constituye la base para el cálculo de otros sistemas de puntuación en el ámbito del trauma. (Rapsang y Shyam, 2015)

Cuadro 1. Puntajes AIS

Puntaje	Herida
1	Leve
2	Moderada
3	Seria
4	Severa
5	Critica
6	Incompatible con la vida

Nota. Adaptada de (Rapsang y Shyam, 2015)

6.2. Incidencia actual

En los ambientes industriales, las caídas y tropiezos son los principales mecanismos de herida para traumatismos craneoencefálicos. (Yu et al., 2023) Un estudio por la sociedad de neurociencia de Canadá, encontró que casi el 80 % de los traumatismos craneoencefálicos fueron a causa de caídas. (Paci et al., 2017)

Estas se dividían en 3 categorías:

- Elevación
- La misma altura de la persona
- Altura desconocida

En este estudio, se clasificaron todos los pacientes según la severidad de su herida, y al ser dados de alta fueron valorados por la Glasgow Outcome Scale extended, ninguno de los pacientes mostró mejoría superior. (Paci et al., 2017)

Cuadro 2. Puntajes y estados

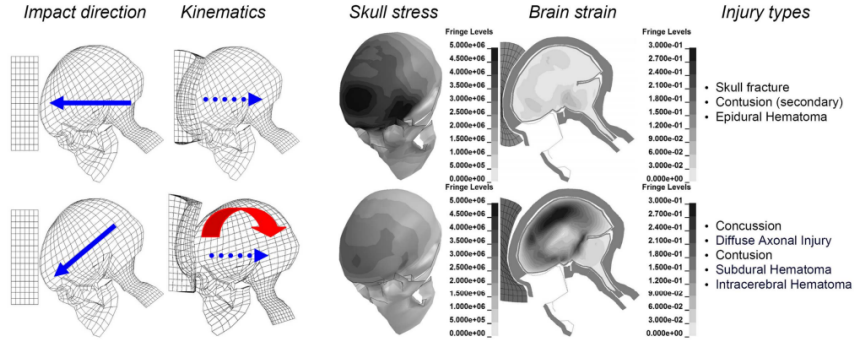
Puntaje	Estado	Porcentaje (%)
1	Muerte	8.7
2	Estado vegetativo	0
3	Discapacidad grave superior	1.1
4	Discapacidad grave inferior	9.1
5	Discapacidad moderada superior	30.3
6	Discapacidad moderada inferior	46.2
7	Recuperación inferior	4.5
8	Recuperación superior	0

Nota. Adaptada de (Rapsang y Shyam, 2015)

6.3. Indicadores de riesgo

Existen varios indicadores de riesgo de una lesión cerebral, estos utilizan principalmente las velocidades y aceleraciones que experimenta la cabeza. El mecanismo de herida y movimiento que experimenta la cabeza tienen relación con la lesión que puede sufrir. Los impactos lineales a la cabeza tienen mayor incidencia en las fracturas de cráneo, mientras que impactos que provocan movimiento rotacional tienen mayor incidencia en heridas en los tejidos blandos del cerebro. (Kleiven, 2013)

Figura 1. Efectos de impactos en la cabeza humana



Nota. Adaptada de (Kleiven (2013))

Varios de estos indicadores son usados para la evaluación de cascos de seguridad industrial, pero tienen sus inicios en investigaciones de impactos automovilísticos.

6.3.1. Head injury criterion (*HIC*)

Este es uno de los indicadores de riesgo más antiguo, utiliza la aceleración lineal máxima experimentada en un periodo de tiempo (normalmente 15 milisegundos). Este fue desarrollado por la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las Carreteras (NHTSA) para pruebas a gran escala en autos para evaluar su seguridad (E. G. Takhounts et al., 2013).

$$HIC_{15} = \max \left[\frac{1}{t_2 - t_1} * \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} * (t_2 - t_1)$$

NHTSA establece un valor máximo de 700. Este no es un indicador directo de herida pero puede usarse para calcular la probabilidad de una fractura de cráneo (Henn, 1998).

$$Fractura = N \left[\frac{\ln(HIC_{15}) - 6.96352}{0.84664} \right]$$

El valor máximo de 700 es equivalente a una probabilidad del 31 % de sufrir una fractura de cráneo.

6.3.2. Skull fracture criterion (*SFC*)

Este es un derivado de HIC, que utilizó pruebas en cadáveres, los datos originales del desarrollo de HIC y un modelo de elementos finitos para observar los efectos sobre el cráneo (Yu et al., 2023). Es el criterio de daño por impactos lineales más comprensivo a la fecha (Chan, Lu et al., 2007).

$$SFC = \frac{\Delta V_{HIC}}{\Delta T_{HIC}}$$

V_{HIC} es el promedio de velocidad en 15 mili segundos y T_{HIC} son 15 milisegundos

6.3.3. Brain injury criterion (*BrIC*)

Este indicador de riesgo utiliza las velocidades angulares máximas experimentadas durante el impacto para obtener un valor representativo de la probabilidad de sufrir una herida a los tejidos blandos del cerebro. (Bian y Mao, 2020) El valor máximo permitido es 1.

$$BrIC = \sqrt{\frac{w_x^2}{66.25} + \frac{w_y^2}{56.45} + \frac{w_z^2}{42.87}}$$

$W_{x,y,z}$ son las velocidades angulares máximas en los ejes X, Y, Z respectivamente.

6.3.4. Concussion probability

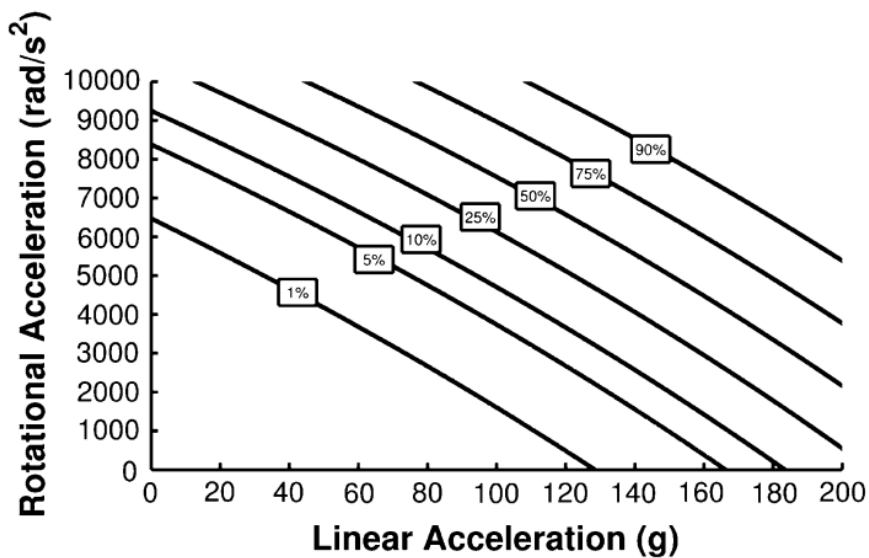
Este es el indicador más reciente, fue desarrollado en Virginia Tech como parte de una investigación sobre encefalopatías traumáticas crónicas. Este utiliza la aceleración angular y lineal máximas al tiempo del impacto para calcular una probabilidad de sufrir una concusión.

Esta tiene la curva que mejor se ajusta a escenarios más complicados que experimentan ambas aceleraciones al mismo tiempo, que constituye la mayoría de impactos. (Rowson y Duma, 2013b)

$$CP = \frac{1}{1 + e^{-10.2 + 0.0433*a + 0.000873*\alpha - 0.000000920*a*\alpha}}$$

α es la aceleración angular máxima, y a es la aceleración lineal máxima.

Figura 2. Tabla de referencia CP



Nota. Adaptada de (Rowson et al., 2020)

6.3.5. Valores de referencia

Cuadro 3. Relación entre HIC, posibilidad de fractura y puntaje AIS

HIC	Fractura	AIS 4	AIS 3
200	2 %	1 %	5 %
250	4 %	1 %	7 %
300	7 %	2 %	9 %
350	10 %	3 %	13 %
400	13 %	4 %	17 %
450	16 %	5 %	21 %
500	19 %	6 %	27 %
550	22 %	8 %	33 %
560	23 %	9 %	34 %
600	25 %	11 %	39 %
650	28 %	13 %	46 %
700	31 %	17 %	53 %
750	34 %	21 %	60 %
800	37 %	26 %	66 %
850	40 %	31 %	72 %

Nota. Adaptada de (Virzi Mariotti, 2019)

Cuadro 4. Relación entre BrIC y niveles AIS

BrIC	AIS 2	AIS 4
0.55	60 %	0.3 %
0.6	69 %	2.1 %
0.65	77 %	5.2 %
0.7	84 %	9.2 %
0.8	93 %	19.5 %
0.9	98 %	31.5 %
1.2	100 %	66.2 %

Nota. Adaptada de (E. G. Takhounts et al., 2013)

6.4. Pruebas en cascos

Los fabricantes de cascos utilizan máquinas de prueba especializadas para poder evaluar la protección de sus cascos a diferentes escenarios, estos utilizan un headform con el casco a evaluar montado en el mismo. Luego este se somete a una prueba de impacto con un impactador semiesférico y se observan las velocidades/ aceleraciones que experimenta el headform y se calculan los indicadores de riesgo para evaluar lo seguro que es el casco.

Figura 3. Máquina de pruebas de impacto en cascos



Nota. Adaptada de (Biophlox Laboratories, 2025)

6.5. Pruebas a gran escala

Uno de los enfoques más utilizados en la investigación de impactos y lesiones craneoencefálicas es la utilización de maniqués antropomórficos para simular el comportamiento del cuerpo humano durante accidentes, observando las fuerzas que experimentan las diferentes partes y comparándolas con los límites conocidos del cuerpo humano. Esto se conoce como *Full scale testing* (pruebas a gran escala), en donde la biofidelidad de los Dummies es importante para asegurar un resultado parecido a como reaccionaría una persona ordinaria.

6.5.1. Humanetics hybrid-III

Entre estos, el Hybrid III ha sido ampliamente adoptado, especialmente en la industria automotriz y en investigaciones sobre seguridad vial. Desarrollado en 1970, el Hybrid III incluye sensores que miden la aceleración, la fuerza y la deformación en varias partes del cuerpo, como el cráneo, el cuello y el tórax. Este exhibe un alto rango de biofidelidad (Zeng et al., 2023) y también es usado en evaluaciones de equipo médico, equipo de protección deportiva y de montañismo.

Figura 4. Maniqué de choques Hybrid III



Nota. Adaptada de *Humanetics Innovative Solutions* (2025)

6.5.2. Thor 50Th ATD

El THOR 50th es la versión actualizada del Hybrid III, ha sido diseñado específicamente para mejorar la precisión en pruebas de seguridad, sobre todo en impactos vehiculares. Este modelo se destaca por su mayor cantidad de sensores, los cuales permiten una medición más detallada de la respuesta biomecánica del cuerpo humano en situaciones de impacto. A diferencia del Hybrid III, el THOR 50th está equipado para simular mejor la dinámica de impactos complejos, como los que involucran movimientos rotacionales y aceleraciones multidireccionales, características esenciales para estudiar caídas y resbalones industriales.

Figura 5. Maniquí de choques Thor ATD



Nota. Adaptada de (Humanetics Innovative Solutions, 2025)

6.6. Biomecánica

6.6.1. Resbalones

Los resbalones ocurren en la interacción entre el calzado y el piso cuando el coeficiente de fricción requerido (RCOF) para caminar supera el coeficiente de fricción disponible (ACOF). La investigación biomecánica sobre resbalones también se ha centrado en las respuestas humanas frente a contaminaciones inesperadas en superficies. Esto incluye mediciones cinemáticas en el momento del contacto del talón justo antes de un incidente de resbalón, como desplazamientos, velocidades del talón, ángulos articulares y posiciones del cuerpo. Los estudios buscan identificar parámetros relacionados con el RCOF y las reacciones anticipadas a superficies potencialmente resbalosas, con el objetivo de comprender mejor las dinámicas

que conducen a los resbalones y mejorar la prevención de estos incidentes (Chang et al., 2016).

6.6.2. Mecánicas al caerse

Las dinámicas no lineales se han utilizado para investigar la estabilidad dinámica durante la caminata, evaluada mediante acelerómetros en cintas de correr o caminos normales. En lugar de tratar cada paso como un evento independiente, los movimientos corporales en varios pasos consecutivos se analizaron para cuantificar variaciones en el dominio. Sin embargo, aún se requiere más investigación para evaluar los efectos de tareas laborales y condiciones ambientales en la estabilidad dinámica, así como para validar la relación entre esta y los accidentes por caídas (Kim y Ashton-Miller, 2003).

En cuanto a los tropiezos, se ha estudiado la distribución estadística de la mínima distancia del pie al suelo durante la fase media del balanceo en caminatas repetidas (Chang et al., 2016). Las respuestas a tropiezos varían según la fase en que ocurren: en la fase inicial del balanceo, se utiliza una estrategia de elevación del miembro oscilante para superar el obstáculo, mientras que en la fase tardía se adopta una estrategia de acortamiento del paso. La recuperación tras un tropiezo depende de factores como la fuerza muscular de las extremidades inferiores, la capacidad de controlar la flexión del tronco, el tiempo de reacción, la longitud del paso y la velocidad al caminar. Por ejemplo, la fuerza de las extremidades inferiores se ha identificado como un factor crítico en la recuperación de tropiezos, lo que sugiere que el entrenamiento de fuerza podría ayudar a reducir el riesgo de caídas (Kim y Ashton-Miller, 2003).

7.1. Definición de requisitos

Cuadro 5. Identificación de códigos

ID	Significado
FU	Funcionalidad
PR	Precisión
CO	Costo
DO	Documentación

Cuadro 6. Tabla de requisitos ampliada

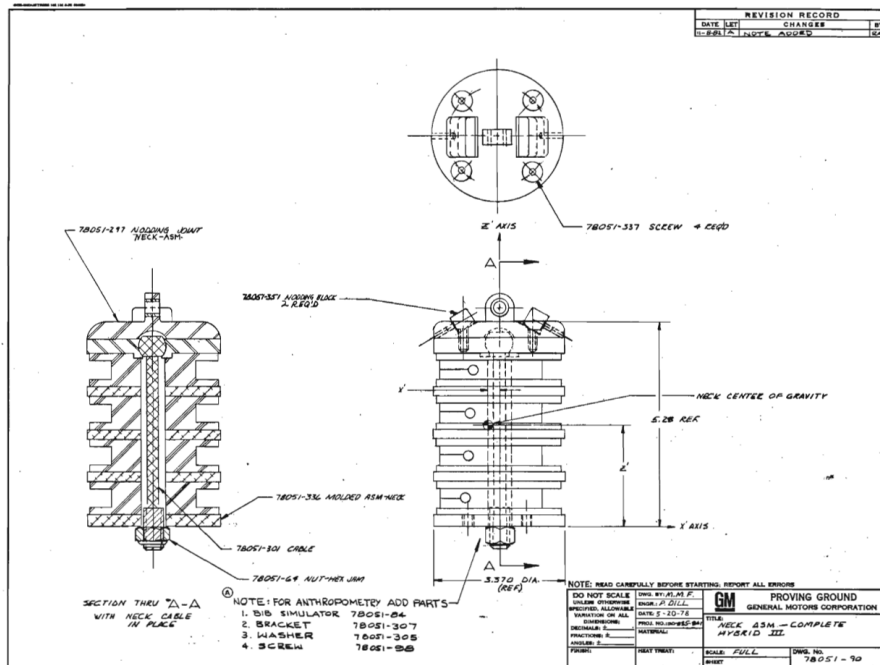
Código	Requisito
FU01	El modelo debe ser capaz de medir las aceleraciones y velocidades implicadas en los impactos, comparándolas con los indicadores de riesgo de traumatismo craneoencefálico.
FU02	Debe incluir al menos el 80 % de escenarios comunes en caídas.
FU03	Debe soportar escenarios de impacto comunes que exhiben 65 J sin falla estructural.
FU04	Las piezas deben mantener un factor de seguridad ≥ 5 en carga crítica.
FU05	Debe garantizar vida útil infinita bajo cargas cíclicas.
PR01	El modelo debe replicar impactos reales con ≥ 95 % de precisión.
CO01	El costo total de materiales por unidad no debe exceder Q15000.
CO02	El diseño debe usar materiales con disponibilidad en Guatemala.
DO01	Elaborar protocolo de pruebas con escenarios, pasos y criterios de evaluación.
DO02	Incluir manual de ensamblaje y operación.

Nota. Elaboración propia

7.2. Diseños iniciales

Como primer paso se busca diseñar un cuerpo con alta biofidelidad, para esto se va a tomar de referencia el cuello del Hybrid III ATD. Este es diseñado para impactos frontales y cuenta con una biofidelidad alta. (Mertz, 1985) Este diseño se conforma con 5 placas de aluminio y 4 segmentos de poliuretano que son unidas con un cable de acero galvanizado, las placas de aluminio simulan el cuerpo vertebral y los segmentos de poliuretano los discos intervertebrales. Este cuenta con placas de acoplamiento en cada extremo para unirse a los otros segmentos del Hybrid III.

Figura 6. Planos del cuello del Hybrid III ATD



Nota. Adaptado de (United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), 2009)

Los criterios básicos de diseño son los siguientes.

- Versatilidad de escenarios de impacto: el modelo debe permitir simular una variedad de tipos de impacto comunes en entornos industriales, como caídas a diferentes alturas y ángulos, golpes laterales o frontales y resbalones.
- Ampliación futura: la estructura del modelo y del protocolo de pruebas debe facilitar su expansión o ajuste para futuros diseños o nuevos parámetros de evaluación.
- Precisión biomecánica: el modelo debe reflejar de manera realista las características del cráneo y cuello humano para simular caídas y resbalones en entornos industriales.
- Simplicidad y eficiencia: el modelo debe diseñarse para ser simple y fácil de implementar, reduciendo costos sin comprometer la precisión o relevancia de los resultados.

Se usaron los planos originales de 1978 como referencia principal, pero las piezas de acople van a ser modificadas para que sean compatibles con el headform y acelerómetros disponibles dentro de la empresa.

Figura 7. Headform usado en la empresa

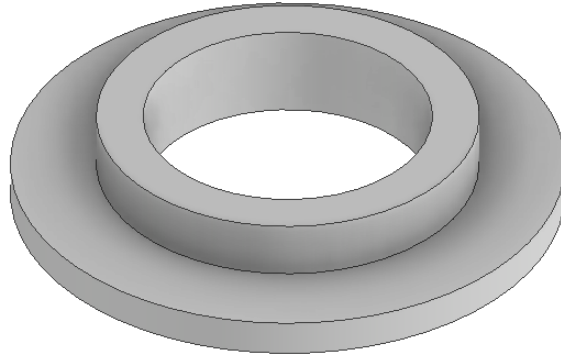


Nota. Elaboración propia

7.2.1. Primeros prototipos

El primer prototipo elaborado tenía como objetivo probar el ajuste dentro del headform disponible en la empresa para una placa de acople superior, este fue generado en *Autodesk Inventor*. Las dimensiones fueron tomadas del diámetro interior del Headform, de forma que este pudiera tener 2 puntos de contacto: en el diámetro interior y en la base. Este fue impreso en PLA, para su prototipado rápido.

Figura 8. Primer prototipo de placa de acople superior



Nota. Elaboración propia utilizando Autodesk Inventor.

El siguiente prototipo compartía las mismas dimensiones con el anterior, pero se le añadieron 2 barras verticales de 12.6x6 milímetros, que coinciden en dimensiones con las ranuras que tiene el headform en su parte inferior.

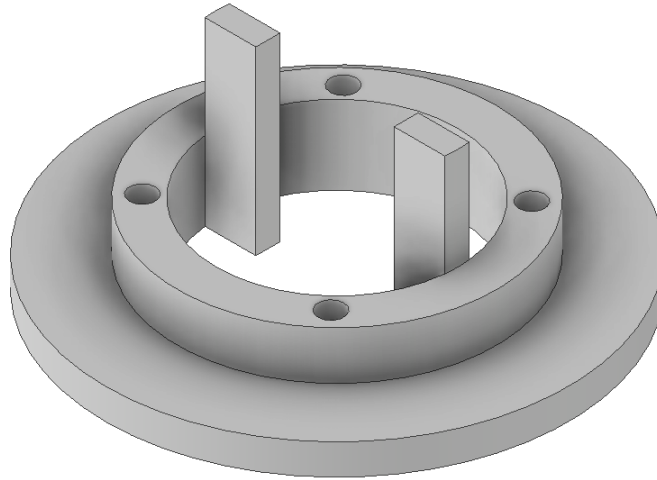
Figura 9. Parte inferior del headform



Nota. Elaboración propia

Esto se hizo con el objetivo de mantener el cuello alineado en todo momento, este fue impreso en PLA.

Figura 10. Prototipo para alineamiento



Nota. Elaboración propia utilizando Autodesk Inventor.

En futuras iteraciones, se eligió no utilizar este diseño, ya que las ranuras del headform se hacen mucho más pequeñas al añadir el acelerómetro, lo que significa un concentrador de esfuerzos muy grande. Por lo que contrario a volver a diseñar una placa nueva, se eligió diseñar un headform que tenga dimensiones parecidas al del Hybrid III. Con esta consideración se pueden utilizar uniones no permanentes, en vez de tener que utilizar ajuste por interferencia para sujetar el cuello.

7.3. Cálculos preliminares

7.3.1. Cálculo teórico

Para los primeros cálculos se usaron las siguientes condiciones:

Cuadro 7. Parámetros de la persona promedio

Magnitud	Variable	Valor
Altura de la persona promedio	H (mts)	1.80
Peso del headform	m_1 (kg)	4.5
Peso del resto del cuerpo	m_2 (kg)	82

Nota. Elaboración propia

Estos valores fueron proporcionados por el Bureau of Labor Statistics (BLS), 2023, buscando la edad promedio de la mayoría de personas que trabajan en manufactura y cons-

trucción en los Estados Unidos, y luego comparando con los datos del *CDC* para encontrar altura y peso promedio. (Centers for Disease Control and Prevention (CDC), 2022)

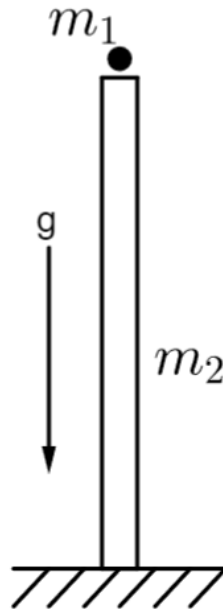
Para los cálculos de las velocidades de impacto, se utilizó un balance de energías. Representando el sistema como un péndulo invertido, con una barra con carga distribuida sujeta en su extremo representado el cuerpo y una masa puntual en la parte superior representando al Headform.

Cuadro 8. Tabla de Parámetros del Modelo

Magnitud	Variable
Energía cinética barra sujeta en su extremo	$E_{Cm2} = \frac{1}{2}I\omega^2$
Energía cinética masa puntual en el extremo	$E_{Cm1} = \frac{1}{2}m_2\omega^2$
Energía potencial barra sujeta en su extremo	$E_{Pm2} = \frac{H}{2}m_2g$
Energía potencial masa puntual	$E_{Pm1} = m_1gH$

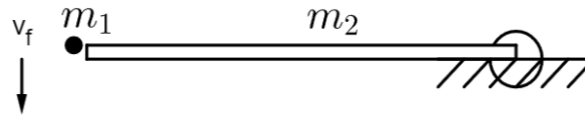
Al tomar estos valores, hacer un balance de energías y despejar la velocidad tangencial, da una velocidad final de 3.94 rad/s . Esta siendo una velocidad tangencial de impacto de 7.1 m/s .

Figura 11. DCL inicial



Nota. Elaboración propia

Figura 12. DCL del impacto



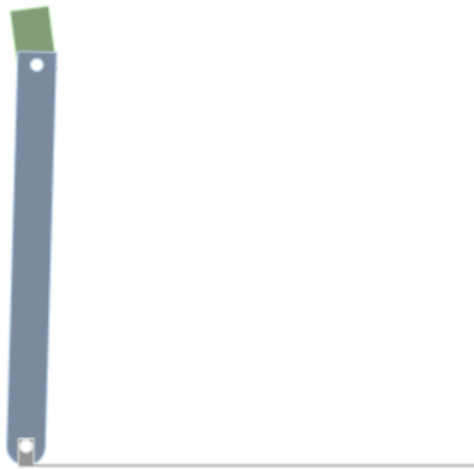
Nota. Elaboración propia

7.3.2. Cálculos con simulación

En conjunto con estos cálculos, también se llevaron a cabo simulaciones de caída en *ANSYS* usando la función de *Rigid body mechanics*, simulando a la persona como barras articuladas. Estos análisis se dividieron en 2 de la siguiente forma.

- El cuerpo entero y la cabeza, formando un sistema de 2 barras

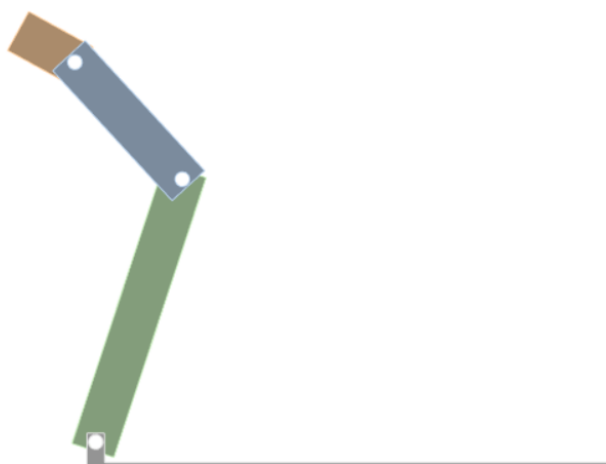
Figura 13. Cuerpo representado por 2 barras



Nota. Adaptada de ANSYS Student 2025. Elaboración propia

- Las piernas, torso y cabeza, formando un sistema de 3 barras

Figura 14. Cuerpo representado por 3 barras



Nota. Adaptada de ANSYS Student 2025. Elaboración propia

Estos 2 sistemas se sometieron a una caída por gravedad, se observaron las velocidades y aceleraciones resultantes y se calcularon los indicadores de riesgo. Esto con el objetivo de observar que configuración muestra el mayor riesgo, para diseñar el sistema alrededor de esta, buscando un enfoque más conservador.

Cuadro 9. Indicadores de riesgo de las simulaciones

Escenario	HIC	BrIC	Concussion Probability	%AIS 2 BrIC
2 barras articuladas	38.89	0.75	100 %	89.49 %
3 barras articuladas	47.2	0.42	0.792 %	33.26 %

Nota. Elaboración propia

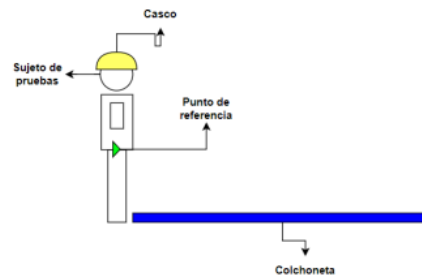
Como muestran estos resultados, se puede observar un mayor riesgo de herida en el primer escenario por movimiento rotacional. Por lo que este va a ser el escenario que se va a buscar replicar.

7.3.3. Pruebas reales

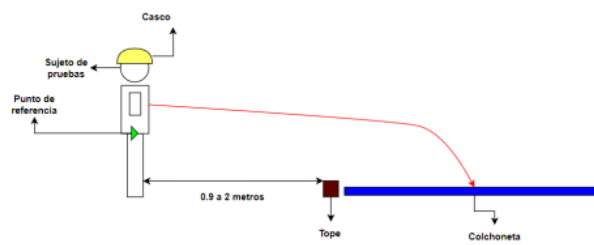
Se desarrolló un protocolo de pruebas diseñado para determinar las velocidades de impacto en tres escenarios distintos. Este procedimiento tuvo como objetivo analizar la respuesta promedio de los usuarios dentro de la empresa al caerse, proporcionando información clave sobre las velocidades esperadas de impacto. Estos datos, en conjunto con los cálculos anteriores, servirán como base para optimizar el diseño de los pernos que sostendrán el cuello al Headform.

Figura 15. Escenarios del protocolo de pruebas

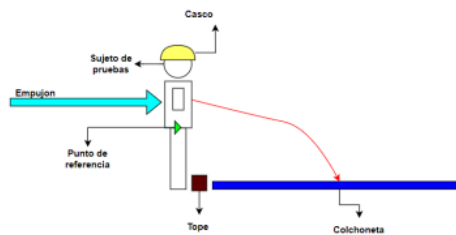
- Caída por el mismo peso de la persona



- Caída hacia atrás por tropiezo al caminar



- Caída hacia atrás por tropiezo y empujón



Nota. Elaboración propia.

Se realizaron las pruebas con 8 voluntarios, todos de diferente altura, peso y composición corporal. Siguiendo el protocolo anteriormente mencionado y el uso de el programa de evaluación *Tracker*, con el objetivo de medir la velocidad máxima de impacto, se obtuvieron los siguientes resultados:

Cuadro 10. Resultados de velocidades de impacto obtenidas en las pruebas físicas

Sujeto	Altura (m)	Velocidad de impacto (caso 1)	Velocidad de impacto (caso 2)	Velocidad de impacto (caso 3)
1	1.70	5.10	5.40	5.37
2	1.76	5.15	5.60	5.90
3	1.66	5.20	5.20	5.61
4	1.71	5.25	5.40	5.72
5	1.75	5.25	5.20	5.34
6	1.70	5.30	5.10	5.53
7	1.72	5.35	5.50	5.42
8	1.76	5.40	5.35	5.72
Promedio	1.72	5.25	5.35	5.60

Nota. Elaboración propia

Cuadro 11. Tabla de resultados finales de pruebas físicas

Magnitud	Variable	Valor
Velocidad promedio de impacto	v_f (m/s)	5.40
Energía de impacto	E_1 (Joules)	65

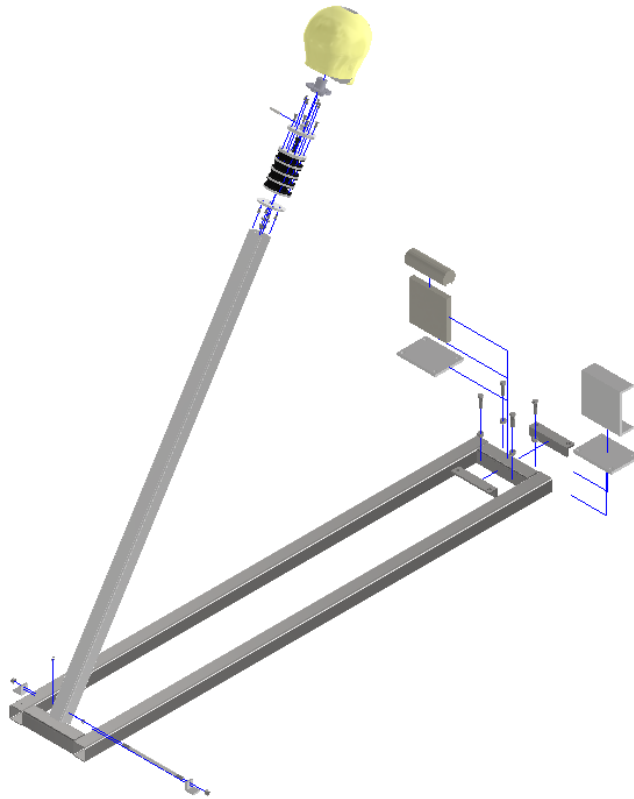
Nota. Elaboración propia

7.4. Diseño a ser fabricado

El diseño se conforma de las siguientes partes.

- Péndulo invertido
- Marco móvil
- Cuello con Biofidelidad
- Sistema de yunques modular
- Headform modificado

Figura 16. Vista explotada, máquina diseñada

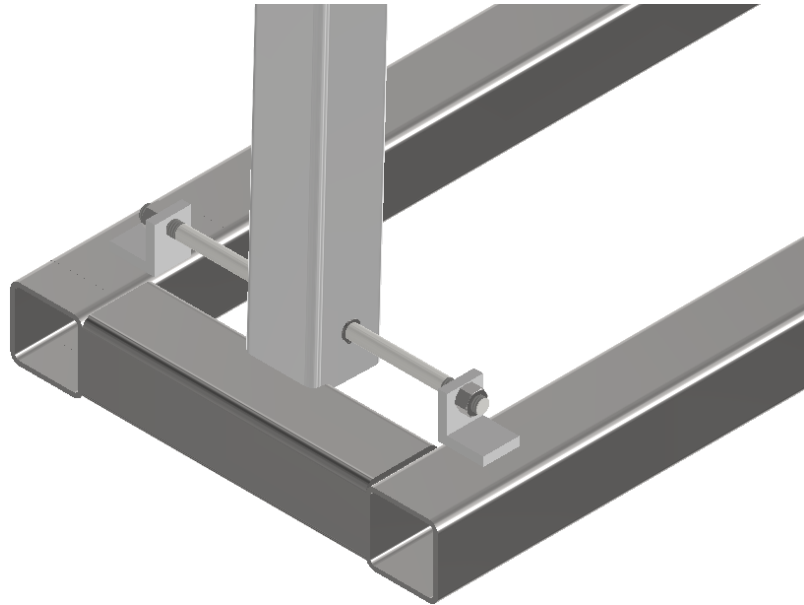


Nota. Elaboración propia utilizando Autodesk Inventor.

7.4.1. Péndulo invertido

Este será elaborado por un eje compuesto de una barra de acero 1018 CD, el cual va a estar sostenido por 2 placas de acero que se encuentran soldadas a un marco móvil. Este será fabricado de acero con bajo contenido de carbono (acero 1018 y A36), ya que estos componentes deben soportar las cargas estáticas del cuello, cabeza y cuerpo simulado.

Figura 17. Péndulo invertido

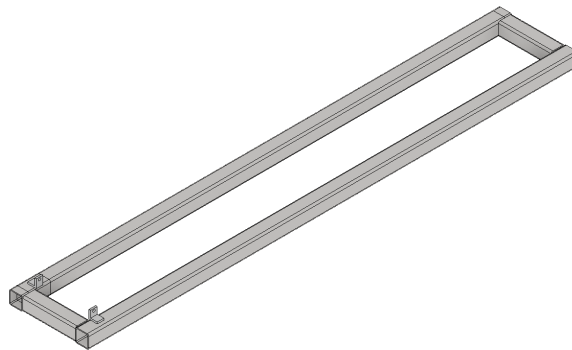


Nota. Elaboración propia utilizando Autodesk Inventor.

7.4.2. Marco móvil

Este marco compuesto con tubos cuadrados de acero estructural HSS (*Hollow Structural steel*) soporta el péndulo invertido y el sistema de yunques modular y permite que pueda moverse según las necesidades de la empresa. Este destaca por ser minimalista en diseño, resultando en un diseño económico que cubre las necesidades de diseño. Se eligió usar tubos cuadrados de acero A36 calibre 14, por su alta obtenibilidad en Guatemala.

Figura 18. Marco móvil con perfiles estructurales

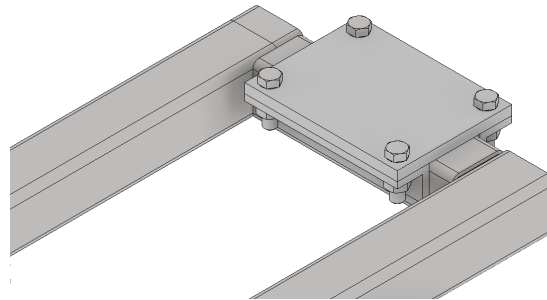


Nota. Elaboración propia utilizando Autodesk Inventor.

7.4.3. Sistema de yunques modular

Este es sistema que permite cambiar yunques lo que asegura que este se encuentre en la posición necesaria para las pruebas. Está compuesto con 2 placas en L de acople de 1-1/4 de largo con 1/4 de grosor y una placa de acero plana de 3/8 de pulgada de grosor que permite la adición de yunques para las pruebas. Cuenta con un largo de 6 pulgadas, con el objetivo de abarcar el diámetro del cráneo promedio. Además, va unido por 4 tornillos de 1/2 de pulgada para asegurar el alineamiento de los yunques, que resulta en resultados consistentes en pruebas repetidas.

Figura 19. Sistema de yunques modular



Nota. Elaboración propia utilizando Autodesk Inventor.

Para este trabajo se eligieron 3 escenarios de caídas y resbalones en el mismo nivel, STFL por sus siglas en inglés (Chang et al., 2016) que podrían presentarse en un entorno industrial:

Figura 20. Escenarios de caída considerados en el estudio.



(a) Caídas al piso

(b) Caídas a un escalón

(c) Caídas a un andamio

Nota. Elaboración propia

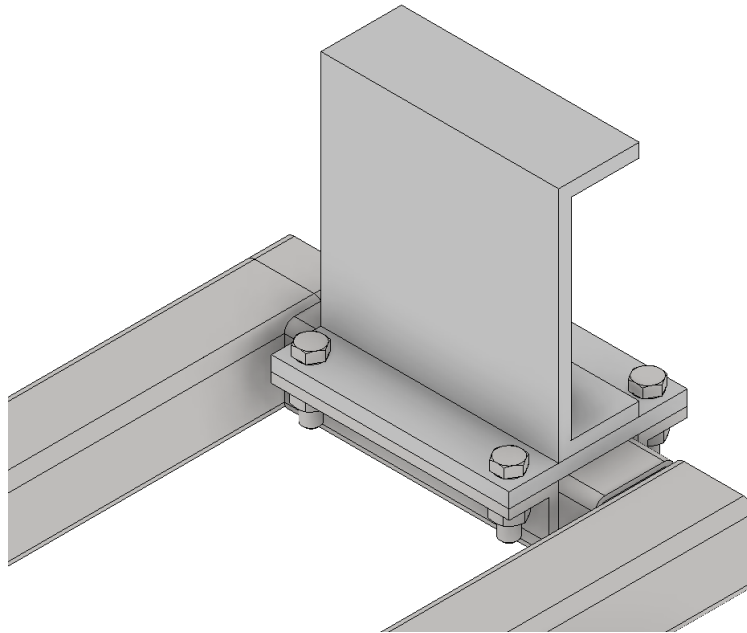
Caídas directas al piso

Para simular este caso, se utilizó el marco móvil en sí, debido a que este se encuentra a la altura del piso en referencia al péndulo invertido.

Caídas a una escalera

Este yunque simula la caída a una primera escalera de un edificio. Las dimensiones fueron tomadas de referencia del código de construcción internacional (IBC por sus siglas en inglés), desarrollado por el consejo de construcción internacional. Este estipula que una escalera estándar de un edificio debe tener una altura entre 10 y 18 centímetros de altura, para asegurar que sea accesible a la mayoría de la población sin mostrar un riesgo de tropiezo o caídas (International Code Council, 2021).

Figura 21. Primer yunque de impacto, escalera

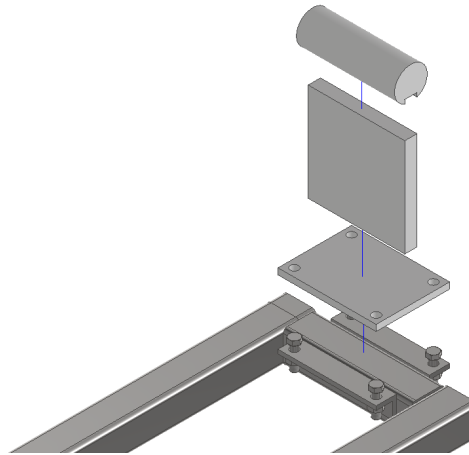


Nota. Elaboración propia utilizando Autodesk Inventor.

Caídas a la base de un andamio

Este yunque simula una caída a las barras inferiores de un andamio. Estos se encuentran normalmente a 20 centímetros de altura y cuentan con un diámetro nominal de 1 de pulgada. Este va a estar compuesto por un tubo de una pulgada, con una ranura de 3/4 de pulgada para llegar a la altura de 20 centímetros.

Figura 22. Segundo yunque de impacto, andamio



Nota. Elaboración propia utilizando Autodesk Inventor.

7.4.4. Cuello con biofidelidad

El cuello estaría conformado por 5 placas intermedias de aluminio 6061, que simulan el cuerpo vertebral. Estos tienen en medio 4 cilindros cortos de poliuretano, que simulan los discos intervertebrales. Estos materiales van a ser sujetados por un cable de acero galvanizado ajustado a un torque de 1.34 N/m. (Según las especificaciones de los planos originales) Este va a contar con placas de acople superior e inferior modificadas para cumplir con los requisitos de diseño.

7.4.5. Headform

Como se menciona anteriormente, no es posible conseguir un alineamiento apropiado con el Headform disponible en la empresa, y hacerle perforaciones no es permitido ya que es un equipo costoso. Por lo que se optó diseñar un headform nuevo para asegurar el alineamiento usando tornillos. Este va a estar hecho con planchas de MDF con resina. Este debe incorporar un agujero para poder acomodar el acelerometro y la placa de acople superior del cuello.

Figura 23. Diseño preliminar de cabeza y cuello



Nota. Elaboración propia utilizando Autodesk Inventor.

7.4.6. Piezas adaptadas del diseño original

Debido a las limitaciones de diseño, se modificaron piezas del cuello *Hybrid* original para adaptarse a los recursos disponibles. Dentro de estos se modificaron:

Placa de acople a la cabeza

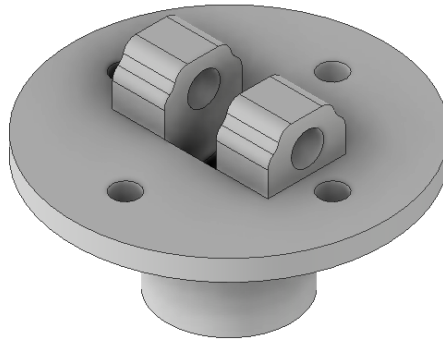
Para asegurar la integración del sistema cuello–cabeza con el nuevo *headform* fabricado en MDF, fue necesario modificar la placa de acople superior del diseño original. El objetivo principal de esta adaptación fue permitir un montaje directo y desmontable, garantizando la alineación precisa del eje del cuello con el centro de masa del *headform*, así como la correcta transmisión de cargas durante los ensayos de impacto.

La nueva placa fue diseñada con un diámetro máximo de 3 pulgadas. En la parte inferior de la placa se añadió un cilindro central de 1.2 pulgadas de diámetro que actúa como elemento de guía y de modo que pueda insertarse completamente dentro del *headform* y quedar alojada en una cavidad cilíndrica mecanizada en el interior del mismo. Para el sistema de sujeción, se emplearán cuatro tornillos de 1/4 de pulgada dispuestos a 90° entre sí. Estos tornillos

atraviesan la base del *headform*, permitiendo un ensamble firme. Esta configuración facilita la sustitución o inspección del componente sin necesidad de herramientas especializadas y mantiene la modularidad del sistema.

La geometría fue optimizada en Autodesk Inventor, considerando las restricciones dimensionales del *headform* y los criterios de resistencia obtenidos en los cálculos analíticos.

Figura 24. Placa de acople de cabeza



Nota. Elaboración propia utilizando Autodesk Inventor.

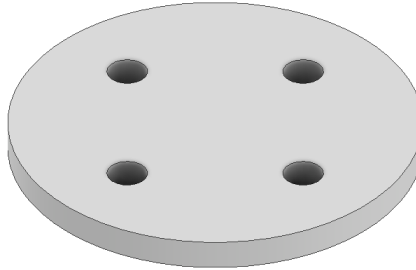
Placa de acople al cuerpo

La placa de acople inferior, encargada de conectar el cuello con la estructura que representa el cuerpo, fue rediseñada siguiendo criterios de simplicidad y reducción de costos de fabricación. El nuevo diseño conserva la funcionalidad mecánica requerida para transmitir las cargas del sistema cabeza–cuello al marco estructural, pero elimina características no esenciales del diseño original del *Hybrid*, priorizando la facilidad de manufactura y el ensamblaje directo.

La geometría de la pieza fue simplificada adoptando un diámetro uniforme de 3.37 pulgadas, con un espesor equivalente al de la placa superior, garantizando así una distribución de esfuerzos simétrica y una respuesta estructural predecible durante los ensayos de impacto. Este redimensionamiento permite mantener la compatibilidad con el cable de acero galvanizado y los elementos de fijación internos del cuello sin requerir mecanizados complejos.

Para su unión al cuerpo, se optó por un montaje permanente mediante soldadura, asegurando una conexión rígida que minimiza holguras o desplazamientos durante los impactos. Esta decisión se tomó considerando que la placa inferior no requiere desmontaje frecuente y que su ubicación dentro del marco principal permite una soldadura accesible y económica.

Figura 25. Placa de acople al cuerpo



Nota. Elaboración propia utilizando Autodesk Inventor.

7.5. Cálculos analíticos y validaciones teóricas

7.5.1. Selección del factor de seguridad

Antes de realizar los cálculos estructurales y el diseño de componentes, se estableció un factor de seguridad de diseño adecuado considerando el nivel de incertidumbre presente en las condiciones de carga, el entorno operativo y la variabilidad del comportamiento de los materiales. Para ello, se recurrió a los criterios clásicos propuestos por Mott y Ullman, ampliamente utilizados en el análisis y diseño mecánico.

Según Mott (Norton, 2013), el factor de seguridad (FS) debe ajustarse dependiendo del tipo de carga (estática, dinámica o de impacto), la confiabilidad del modelo, el nivel de control sobre el entorno y la consecuencia del fallo. Dado que este proyecto involucra impactos de corta duración con cargas dinámicas poco controlables, y considerando que algunos componentes están en contacto con usuarios u operarios, se adoptó un enfoque conservador de 4 o mayor.

Por su parte, Ullman(Norton, 2013) sugiere que el valor del factor de seguridad debe incrementarse en las siguientes condiciones.

- Las consecuencias del fallo son críticas (lesiones humanas, daño de equipo).
- El entorno operativo es variable o incierto.
- El diseño es novedoso o experimental.

Con base en estos lineamientos, se estableció un factor de seguridad mínimo de 5 para todos los componentes diseñados específicamente para este proyecto. Este valor garantiza

una amplia protección frente a errores de modelado, simplificaciones en los cálculos y posibles variaciones en los materiales reales utilizados durante la fabricación.

Este enfoque permite balancear la seguridad con la viabilidad práctica del sistema, asegurando una estructura confiable incluso bajo condiciones de impacto inesperado.

Cuadro 12. Selección del factor de seguridad requerido

Criterio	Valor	Justificación
Referencia general – Mott	4 o más	Diseño mecánico conservador en impactos dinámicos
Referencia general – Ullman	5.1408	Análisis según metodología de selección
Factores que afectan el diseño		
Material	1.4	Fuente poco confiable de propiedades del material
Esfuerzo	1.7	Cálculo de esfuerzos fluctuante o dudoso
Geometría	1.2	Geometría sobredimensionada
Análisis de fallas	1.5	Posibilidad de falla acumulativa
Confiabilidad esperada	1.2	Nivel de confiabilidad promedio

Nota. Adaptado de Norton, 2013

Con el objetivo de estimar de forma preliminar las magnitudes de esfuerzo, energía, aceleración y fuerzas involucradas en los impactos, se realizaron cálculos teóricos. Estos cálculos permitieron establecer condiciones base para la validación de simulaciones por elementos finitos, así como para el dimensionamiento de componentes clave del sistema de pruebas.

Alcance de los cálculos estructurales

En el presente estudio, se llevaron a cabo cálculos de diseño únicamente para los componentes estructurales desarrollados específicamente para este proyecto. Para los elementos restantes, se optó por utilizar componentes con dimensiones y materiales equivalentes a los empleados en el maniquí Hybrid III, reconocido internacionalmente por su uso en pruebas de impacto automovilísticas. Este enfoque se justifica por la amplia validación y documentación existente sobre la capacidad del Hybrid III para soportar impactos de alta energía, lo que proporciona una base sólida para su aplicación en este contexto.

Diversos estudios han demostrado la eficacia del Hybrid III en simular respuestas humanas ante impactos. Por ejemplo, Khalil y Lin (1994) realizaron un análisis por elementos finitos del maniquí, sometiéndolo a impactos torácicos con un proyectil de 23.4 kg a velocidades de 6.71 m/s y 4.3 m/s. Los resultados obtenidos mostraron una buena correlación con datos experimentales, confirmando la biofidelidad del modelo en condiciones de impacto severo (Khalil y Lin, 1994). Asimismo, (Foster et al., 1977) compararon las respuestas

dinámicas del Hybrid III con datos biomecánicos disponibles, concluyendo que el maniquí presenta mejoras significativas en la simulación de impactos frontales en comparación con modelos anteriores .

Estas evidencias respaldan la decisión de emplear componentes basados en el diseño del Hybrid III para las partes no desarrolladas en este proyecto, asegurando así la integridad estructural y la validez de los resultados obtenidos.

Entre los cálculos realizados se encuentran los siguientes.

- Estimación de energía cinética del impacto con base en masa y velocidad de la cabeza.
- Cálculo de fuerzas promedio y pico utilizando el teorema del impulso y duración del impacto.
- Obtención de esfuerzos normales y de flexión en perfiles HSS a partir de carga transversal y momento flector.
- Evaluación del esfuerzo equivalente mediante la teoría de energía de distorsión (von Mises).
- Cálculo del factor de seguridad comparando esfuerzos con el límite elástico del material (A36).

7.5.2. Estimación de energía cinética del impacto con base en masa y velocidad de la cabeza.

Para estimar la energía cinética, se van a utilizar los datos de impacto terminal de las pruebas en voluntarios. Principalmente porque estas caídas presentan una deformación en el cuello como se puede observar en el *Hybrid III*.

7.5.3. Estimación de la fuerza máxima por teorema del impulso

Dado que las simulaciones de impacto dinámico requieren recursos computacionales, este parte del proyecto adopta una estrategia común en el análisis preliminar de estructuras: la conversión del impacto a una carga estática equivalente. Esta aproximación permite evaluar los esfuerzos generados durante un impacto utilizando métodos estáticos tradicionales. Para ello, se calcula una fuerza máxima estimada que produce los mismos efectos que el impacto real, basándose en principios de conservación de cantidad de movimiento.

Para estimar dicha fuerza equivalente, se emplea el teorema del impulso, el cual relaciona el cambio de momento lineal con el área bajo la curva fuerza-tiempo. Este teorema establece que:

$$I = \int_0^{\Delta t} F(t) dt = \Delta p = m \cdot \Delta v \quad (1)$$

Si se asume que el objeto parte con una velocidad v y se detiene completamente tras el impacto, entonces la fuerza promedio se calcula como:

$$F_{\text{prom}} = \frac{m \cdot v}{\Delta t} \quad (2)$$

Sin embargo, esta fuerza representa un valor promedio. Para obtener una estimación de la fuerza máxima, se considera la forma de la curva de fuerza-tiempo. En el caso de un pulso triangular simétrico, el valor pico de la fuerza se relaciona con la fuerza promedio mediante:

$$F_{\text{máx}} = 2 \cdot F_{\text{prom}} = \frac{2 \cdot m \cdot v}{\Delta t} \quad (3)$$

Este enfoque proporciona una estimación conservadora y es comúnmente utilizado en análisis preliminares de impacto para estructuras o componentes biomecánicos. (Carrillo Peralta, 2021, Romero et al., 2014)

Cuadro 13. Parámetros del impacto estimados por impulso

Magnitud	Unidad	Valor
Masa del headform	kg	4.5
Velocidad terminal	m/s	5.4
Tiempo de impacto	ms	15
Fuerza promedio	N	1620
Fuerza máxima	N	3240

Nota. Elaboración propia

7.5.4. Evaluación de componentes estructurales

Sección estructural donde ocurre el impacto

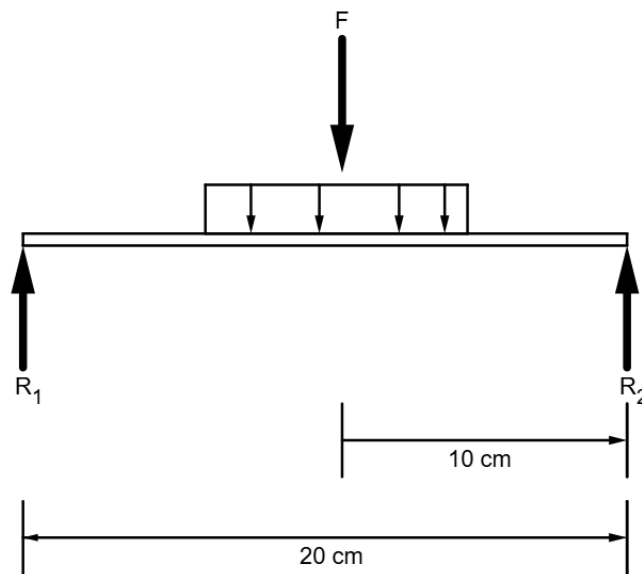
Con el objetivo de verificar la resistencia del sistema de soporte ante impactos, se realizó un análisis estructural de una barra HSS cuadrada de 2×2 pulgadas con espesor de 1/16 de pulgada (0.0015875 m). Esta barra se consideró como una viga simplemente apoyada en sus extremos, sometida a una carga concentrada de 3.24 kN en su centro, correspondiente a la fuerza máxima estimada del impacto, calculada mediante el teorema del impulso y aplicada bajo el principio de superposición.

Figura 26. Impacto en componente estructural



Nota. Elaboración propia utilizando Autodesk Inventor.

Figura 27. Diagrama de cuerpo libre, pieza estructural



Nota. Elaboración propia

El esfuerzo normal de flexión se obtuvo utilizando la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} \quad (4)$$

M es el momento flector máximo ($F \cdot L/4$); c la distancia al eje neutro; e I , el momento de inercia de la sección transversal. Este esfuerzo se comparó con el límite elástico del acero A36 ($\sigma_y = 250$ MPa) para determinar el factor de seguridad a la fluencia:

Cuadro 14. Resumen de esfuerzos y verificación del diseño para acero estructural A36

Magnitud	Unidad	Valor
Material y propiedades mecánicas		
Material	-	Acero estructural A36
Límite elástico	MPa	250.00
Resistencia última a la tracción	MPa	399.91
Parámetros geométricos y de carga		
Espesor	m	$1.58E^{-3}$
Ancho exterior	m	$5.08E^{-2}$
Ancho interior	m	$4.76E^{-2}$
Área	m ²	$3.12E^{-4}$
Longitud	m	0.2
Fuerza aplicada	N	3240
Esfuerzos		
Esfuerzo de flexión	MPa	32.59
Factor de seguridad	-	7.89
Cumple con requerimiento	-	Sí

Nota. Elaboración propia

Adicionalmente, se consideró la fatiga como un posible modo de falla debido a la naturaleza repetitiva de los impactos. Se asumió que los esfuerzos generados se mantienen dentro del régimen elástico, y se utilizó el criterio de Langer como verificación adicional.

Cuadro 15. Ensayo de fatiga para pieza estructural

Magnitud	Unidad	Valor
Parámetros geométricos y carga		
Espesor	m	$1.59E^{-3}$
Ancho exterior	m	0.06
Ancho interior	m	0.05
Área	m ²	$3.12E^{-4}$
Longitud	m	0.2
Fuerza aplicada	N	3240
Propiedades a fatiga		
Límite de fatiga base (S_e)	MPa	199.96
Factor de superficie (k_a)	-	0.9
Factor de tamaño (k_b)	-	0.85
Factor de carga (k_c)	-	1
Factor de confiabilidad (k_d)	-	0.87
Límite de fatiga corregido (S'_e)	MPa	132.77
¿Excede límite a la fatiga?	-	No, vida infinita
Propiedades del material		
Límite elástico A36 (F_y)	MPa	248.22
¿Falla por fluencia?	-	No

Nota. Elaboración propia

Como esta sección estructural va a estar soldada a secciones de las mismas dimensiones, se va a evaluar su factor de seguridad usando un E6013 y experimentando corte.

Cuadro 16. Verificación de soldadura para unión estructural con electrodo E6013

Magnitud	Unidad	Valor
Parámetros de soldadura		
Tamaño de soldadura (a)	m	$4E^{-3}$
Electrodo E6013 – Corte admisible	Pa	$2.48E^8$
Sección de soldadura (perímetro)	m	0.20
Área efectiva de soldadura (A_e)	m ²	$5.75E^{-4}$
Esfuerzos aplicados en la soldadura		
Fuerza en extremos (corte)	N	1620
Esfuerzo cortante aplicado (τ)	Pa	$2.82E^6$
Factor de seguridad por corte	-	88.0
Flexión en la unión soldada		
Momento aplicado (M)	Nm	81
Radio (r)	m	0.036
Módulo de sección polar aprox. (Z)	m ³	$5.83E^{-5}$
Esfuerzo por flexión (σ)	Pa	$1.39E^6$
Factor de seguridad por flexión	-	48.90
Esfuerzo equivalente combinado (σ_{eq})	Pa	$5.07E^6$
¿Cumple con diseño de soldadura?	-	Sí

Nota. Elaboración propia

Cálculo estructural del eje de soporte cabeza-cuerpo

Se realizó un análisis estructural del eje encargado de conectar el sistema de cuello y cabeza con el soporte corporal. Este eje fue modelado como una viga simplemente apoyada de 20 cm de longitud, con sección circular maciza de 3/8 de pulgada de diámetro (9.525 mm), fabricada en acero A36.

Para estimar la carga total que actúa sobre el eje de conexión entre la cabeza y el cuerpo, se consideró la masa de la cabeza y la masa de una porción del cuerpo representada mediante un perfil HSS (Hollow Structural Section) cuadrado de 2×2 pulgadas con un espesor de 1/16 de pulgada y una longitud de 1.5 m.

El peso del tubo HSS se calculó utilizando la densidad del acero ($\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$) y el volumen de material de la sección, resultando en un peso aproximado de 4.82 kg. A este valor se le sumó la masa de la cabeza, estimada en 4.5 kg. De esta manera, la carga total

considerada para el análisis del eje fue de:

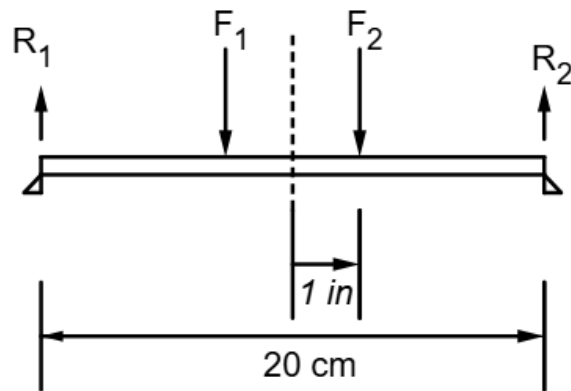
$$m_{\text{total}} = 4.82 \text{ kg} + 4.5 \text{ kg} = 9.32 \text{ kg} \quad (5)$$

Este valor se utilizó para obtener las fuerzas aplicadas en el eje mediante el producto con la aceleración gravitacional ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$), dando una carga estática total de aproximadamente:

$$F_{\text{total}} = m_{\text{total}} \cdot g = 9.32 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \approx 91.43 \text{ N} \quad (6)$$

Esta carga fue distribuida de forma idealizada para representar la acción del peso durante el ensayo estático del eje. No obstante, durante el impacto real, la mayor parte de la energía se transmite directamente a la cabeza y al sistema cuello, presentando una participación mínima del tubo que representa al cuerpo, el cual actúa principalmente como soporte pasivo en la transferencia de carga.

Figura 28. Diagrama de cuerpo libre, eje de soporte



Nota. Elaboración propia

Las condiciones de carga corresponden a dos fuerzas de 45.72 N aplicadas en direcciones opuestas, ubicadas a 1 pulgada (25.4 mm) a cada lado del centro de la viga. Esta configuración simula el momento generado por la masa combinada de la cabeza y el perfil estructural que se usa como cuerpo.

Dado que se trata de una estructura estáticamente determinada y simétrica, se utilizó la teoría de vigas con superposición para determinar el momento flector máximo. El esfuerzo normal fue calculado con la fórmula clásica de flexión:

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} \quad (7)$$

M es el momento máximo, c la distancia del eje neutro a la fibra extrema ($d/2$), e I el momento de inercia para una sección circular maciza:

$$I = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (8)$$

Una vez obtenido el esfuerzo máximo, se evaluó el diseño bajo el criterio de falla por fluencia, comparando el esfuerzo resultante con el límite elástico del acero A36 ($\sigma_y = 250$ MPa).

Cuadro 17. Análisis de eje sometido a cargas puntuales

Magnitud	Unidad	Valor
Geometría del eje		
Diámetro del eje (d)	mm	9.525
Longitud del eje (L)	mm	200
Área de sección transversal (A)	m ²	$7.13E^{-5}$
Módulo resistente a flexión (Z)	m ³	$8.48E^{-8}$
Cargas aplicadas		
Carga 1 (P_1)	N	45.72
Posición carga 1 (x_1)	mm	74.6
Carga 2 (P_2)	N	45.72
Posición carga 2 (x_2)	mm	125.4
Reacción en apoyo A (R_A)	N	45.72
Reacción en apoyo B (R_B)	N	45.72
Resultados del análisis		
Momento máximo (M_{max})	Nm	3.41
Esfuerzo de flexión (σ)	MPa	20.86
Límite elástico del material (σ_y)	MPa	370
Factor de seguridad	-	9.2

Nota. Elaboración propia

El factor de seguridad resultante fue de 9.2, lo cual indica que el eje se encuentra muy por debajo del umbral de falla y tiene un amplio margen de seguridad, incluso ante variaciones en la carga o manufactura.

Análisis estructural del primer yunque de impacto

El primer yunque de impacto se diseñó para representar el escenario de una caída contra el primer peldaño de una escalera, en concordancia con las disposiciones del *International Building Code* (IBC, 2021), el cual establece rangos de altura de peldaños que garantizan accesibilidad y reducen el riesgo de tropiezos.

Con base en ello, y para asegurar compatibilidad con los requisitos de presupuesto del proyecto, el peldaño se idealizó mediante una viga tipo C de acero con altura nominal de 6 pulgadas. Con el fin de simplificar la evaluación de resistencia sin comprometer la validez del análisis, dicha viga tipo C se modeló como una barra maciza de sección cuadrada con dimensiones equivalentes a su área/resistencia efectiva, manteniendo una rigidez geométrica representativa del peldaño metálico.

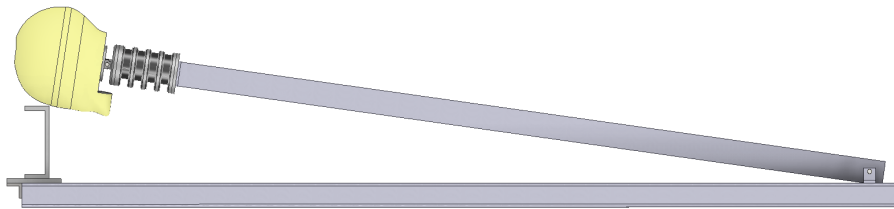
Cuadro 18. Dimensiones del perfil estructural equivalente

Magnitud	Unidad	Valor
Altura del perfil	Pulgadas	6
Largo del perfil	Pulgadas	6
Ancho del perfil	Pulgadas	0.314

Nota. Adaptado de grupo AG

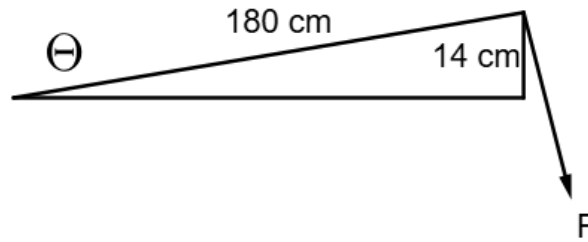
El impacto del sistema cabeza-cuello sobre el yunque ocurre con una ligera inclinación producto de la configuración geométrica del péndulo. A partir de la cinemática del sistema se determinó el ángulo de incidencia respecto a la vertical y, en consecuencia, se procedió a descomponer la fuerza total aplicada en componentes ortogonales para su correcta evaluación estructural, obteniéndose un valor de 4.45° con respecto a la vertical.

Figura 29. Representación de impacto, primer yunque



Nota. Elaboración propia utilizando Autodesk Inventor.

Figura 30. Triangulo del impacto, primer yunque



Nota. Elaboración propia

$$F_x = F \cdot \sin(\theta) \quad ; \quad F_y = F \cdot \cos(\theta) \quad (9)$$

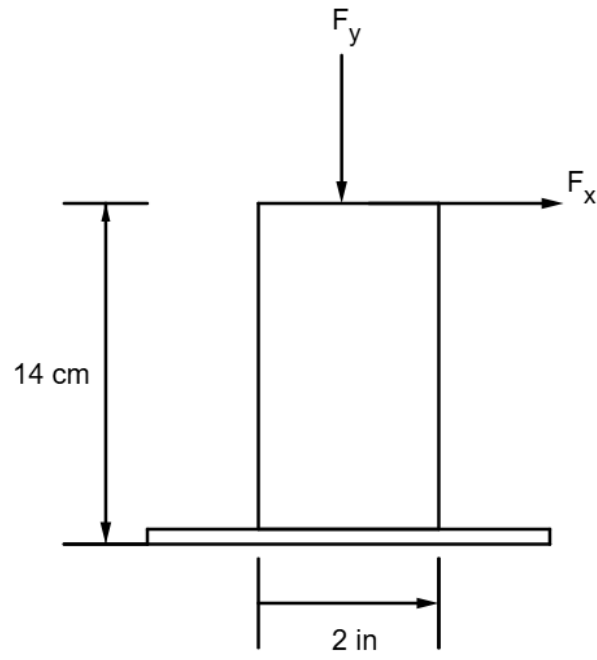
$\theta = 4.45^\circ$ representa el ángulo de inclinación, y F la fuerza total aplicada. Como resultado, se obtuvieron las siguientes componentes:

$$F_x = 230 \text{ N} \quad ; \quad F_y = 3230 \text{ N} \quad (10)$$

Esta descomposición permitió identificar las cargas como una combinación de esfuerzos axiales y transversales sobre el yunque, permitiendo su análisis mediante teoría de vigas.

El yunque se evaluó como voladizo empotrado en un extremo, condición que reproduce el comportamiento de un peldaño fijo sometido a impacto directo. estrictamente elástica bajo las cargas estimadas.

Figura 31. Diagrama de cuerpo libre, primer yunque



Nota. Elaboración propia

Cuadro 19. Análisis de viga en voladizo bajo cargas combinadas

Magnitud	Unidad	Valor
Propiedades del material		
Material	-	Acero A36
Límite elástico (σ_y)	Pa	$3.7E^8$
Geometría de la viga		
Longitud del voladizo (L)	m	0.14
Ancho de la sección (b)	m	0.01
Altura de la sección (h)	m	0.15
Área de la sección (A)	m ²	$1.2E^{-3}$
Momento de inercia (I)	m ⁴	$2.5E^{-6}$
Distancia al eje neutro (c)	m	0.004
Cargas aplicadas		
Carga axial (F_{axial})	N	3230
Carga transversal ($F_{transversal}$)	N	230
Momento flector (M)	Nm	34.5
Resultados del análisis		
Esfuerzo axial (σ_{axial})	Pa	0.08
Esfuerzo por flexión (σ_{flex})	Pa	$6.13E^4$
Esfuerzo total (σ_{total})	Pa	$6.13E^4$
Esfuerzo de Von Mises (σ_{vm})	Pa	$6.13E^4$
Factor de seguridad (FS)	-	6032.6

Nota. Elaboración propia

Este resultado indica que el diseño del yunque se encuentra sobredimensionado respecto a las cargas previstas, lo cual proporciona un amplio margen de seguridad.

Adicionalmente, se realizó una evaluación por fatiga bajo el criterio de Langer, considerando el valor del esfuerzo alternante generado por impactos repetidos. Dado que el esfuerzo máximo calculado representa una fracción muy baja del límite elástico, se concluyó que el yunque no presenta riesgo de falla por fatiga y puede considerarse de vida infinita para las condiciones de uso establecidas en el protocolo de pruebas.

Cuadro 20. Evaluación de fatiga para viga en voladizo

Magnitud	Unidad	Valor
Límite de fluencia (S_y)	Pa	$3.7E^8$
Parámetros de resistencia a la fatiga		
Límite de fatiga base (S'_e)	MPa	220
Factor de superficie (k_a)	-	0.8
Factor de tamaño (k_b)	-	0.85
Factor de carga (k_c)	-	1
Factor de confiabilidad (k_d)	-	1
Factor misceláneo (k_e)	-	0.814
Límite de fatiga ajustado (S_e)	MPa	121.77
Vida a fatiga esperada	-	Infinita

Nota. Elaboración propia

Para la fijación del yunque a la placa de acople se dispusieron cordones de soldadura longitudinales en los lados mayores, empleando electrodo E6013, por su alta resistencia y precio accesible. La unión se modeló como viga empotrada con carga vertical aplicada en el extremo libre, de modo que el momento en el empotramiento es:

$$M = F \cdot L = 449 \text{ N} \times 140 \text{ mm} = 62\,860 \text{ N}\cdot\text{mm} \quad (11)$$

Considerando una longitud total de soldadura $l_{\text{total}} = 152.4 \text{ mm}$ y una garganta efectiva de 6 mm, el esfuerzo cortante máximo resultante en el *patrón resistente* de la soldadura es:

$$\tau_{\text{máx}} = 21.75 \text{ MPa} \quad (12)$$

Mientras que la resistencia permisible en cortante del electrodo, estimada como el 30 % de su resistencia mínima a la tracción, es:

$$\tau_{\text{perm}} \approx 124 \text{ MPa} \quad (13)$$

Con lo anterior, el factor de seguridad para la unión soldada es:

$$FS = \frac{\tau_{\text{perm}}}{\tau_{\text{máx}}} = \frac{124}{21.75} \approx 5.7 \quad (14)$$

Análisis estructural del segundo yunque de impacto

El segundo yunque de impacto fue sometido a un análisis estructural similar al del primer yunque, utilizando el mismo principio de descomposición de fuerzas debido a la inclinación

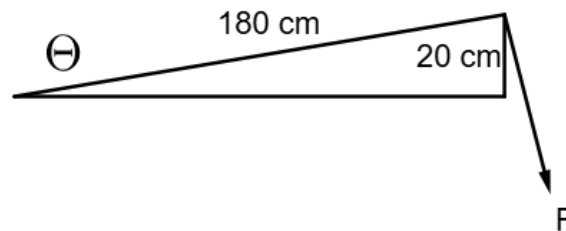
con la que incide el sistema cabeza-cuello durante el impacto. Se calculó un ángulo de impacto de 7.98° respecto a la vertical, producto de la configuración geométrica del sistema de prueba.

Figura 32. Representación de impacto, segundo yunque



Nota. Elaboración propia utilizando Autodesk Inventor.

Figura 33. Triángulo del impacto, segundo yunque



Nota. Elaboración propia

Con este ángulo, se procedió a determinar las componentes horizontal (F_x) y vertical (F_y) de la fuerza aplicada sobre el yunque, utilizando las siguientes expresiones trigonométricas:

$$F_x = F \cdot \sin(\theta) \quad F_y = F \cdot \cos(\theta) \quad (15)$$

$\theta = 7.98^\circ$ y F es la fuerza total aplicada. Como resultado, se obtuvieron las siguientes componentes de carga para el segundo yunque:

$$F_x = 449 \text{ N} \quad F_y = 3240 \text{ N} \quad (16)$$

Cuadro 21. Análisis de esfuerzos en voladizo de acero A36

Magnitud	Unidad	Valor
Material	-	Acero A36
Límite elástico (σ_y)	Pa	$3.7E^8$
Longitud del voladizo (L)	m	0.20
Ancho de la sección (b)	m	0.10
Altura de la sección (h)	m	0.15
Carga axial (F_{axial})	N	3240
Carga transversal ($F_{transversal}$)	N	449
Área (A)	m^2	$1.5E^{-2}$
Inercia (I)	m^4	$2.81E^{-5}$
Momento flector (M)	N·m	89.8
Distancia al eje neutro (c)	m	0.05
Esfuerzo axial (σ_{axial})	Pa	$3.43E^{-3}$
Esfuerzo por flexión (σ_{flex})	Pa	$4.79E^4$
Esfuerzo von Mises (σ_{vm})	Pa	$4.8E^4$
Factor de seguridad	-	7725

Nota. Elaboración propia

Adicionalmente, se realizó una evaluación del comportamiento a fatiga mediante el criterio de Langer. Dado que los esfuerzos inducidos son considerablemente bajos en relación con el límite elástico, se concluyó que el segundo yunque también presenta vida infinita frente a los posibles ciclos de carga derivados de las pruebas experimentales.

Cuadro 22. Ensayo de fatiga para voladizo estructural

Magnitud	Unidad	Valor
Distancia al eje neutro (c)	m	0.05
Esfuerzo axial (σ_a)	Pa	$3.43E^{-3}$
Momento (M)	N·m	89.8
Esfuerzo por flexión (σ_f)	Pa	$4.79E^4$
Esfuerzo total (σ_{total})	Pa	$4.79E^4$
Límite de fluencia (S_y)	Pa	$3.7E^8$
Cumple criterio de Langer	-	Sí
Límite de fatiga corregido (S'_e)	MPa	220
Factor de superficie (k_a)	-	0.8
Factor de tamaño (k_b)	-	0.85
Factor de carga (k_c)	-	1
Factor de confiabilidad (k_d)	-	1
Factor de condiciones (k_e)	-	0.814
Límite de fatiga ajustado (S_e)	MPa	121.77
Vida infinita	-	Sí

Nota. Elaboración propia

Este componente va estar unido la placa de yunques mediante un cordón de soldadura en los lados más largos del yunque, similar al yunque anterior. La pieza va a ser evaluada como una viga empotrada y sometida a una carga vertical de 449 N en su extremo libre, generando un momento flector en el empotramiento de:

$$M = F \cdot L = 449 \text{ N} \times 200 \text{ mm} = 89\,800 \text{ N}\cdot\text{mm}. \quad (17)$$

La unión soldada se resolvió mediante cordones longitudinales en los lados de mayor longitud de la sección, empleando electrodo E6013. Se asumió un filete con garganta efectiva de 6 mm a lo largo de ambos lados, resultando en una longitud total de soldadura igual a:

$$l_{total} = 2 \times 152.4 \text{ mm} = 304.8 \text{ mm}. \quad (18)$$

Para el análisis, se consideró el patrón de soldadura sometido a un momento flector. El módulo resistente de soldadura se calculó como:

$$Z_w = \frac{J_w}{r_{m\acute{a}x}} = \frac{130\,983.7 \text{ mm}^3}{25.4 \text{ mm}} = 5\,157 \text{ mm}^3, \quad (19)$$

obteniéndose un esfuerzo cortante equivalente:

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{M}{Z_w} = \frac{89\,800}{5\,157} = 17.41 \text{ MPa.} \quad (20)$$

El electrodo E6013 cuenta con una resistencia mínima a la tracción de aproximadamente 413 MPa, y la resistencia permisible en cortante se estima como el 30 % de ese valor:

$$\tau_{\text{perm}} \approx 0.30 \times 413 \text{ MPa} = 124 \text{ MPa.} \quad (21)$$

Finalmente, el factor de seguridad calculado es:

$$FS = \frac{\tau_{\text{perm}}}{\tau_{\text{máx}}} = \frac{124}{17.41} \approx 7.12 \quad (22)$$

Dimensionamiento y análisis de tornillos

Los supuestos para el dimensionamiento son los siguientes.

- Cantidad de tornillos: $n = 4$.
- Tornillería: clase 8.8 (ISO). Resistencia última $f_u = 800$ MPa. Resistencia de prueba (proof) $S_p \approx 0.8f_u = 640$ MPa.
- Área resistente a tracción (M12 gruesa, equivalente a lo usado): $A_s = 84.3 \text{ mm}^2$.
- Por Norton (unión con cargas variables): precarga objetivo $F_i = 0.75 S_p A_s$.
- Unión no permanente, modelo por fricción para cortante en el plano junta–junta.
- Factor de rigidez del conjunto (tornillo–juntas) para reparto axial: $\varphi = \frac{k_b}{k_b + k_m} = 0.25$ (valor conservador típico cuando la junta es más rígida que el tornillo).
- Coeficiente de fricción entre superficies de acero (seco/aceptablemente limpio): $\mu = 0.20$.
- Diámetro nominal para par de apriete: $d = 12 \text{ mm}$ (M12).
- Factor de tuerca (nut factor) para par de apriete: $K = 0.20$ (acero, sin lubricación especial).
- Carga cortante externa sobre la unión (antes empleada en diseño): $V = 449 \text{ N}$.

Precarga objetivo por tornillo.

$$F_i = 0.75 S_p A_s = 0.75 (640 \text{ MPa})(84.3 \text{ mm}^2) = 4.0464 \times 10^4 \text{ N} \approx 40.5 \text{ kN}$$

Par de apriete recomendado (método $T = K F d$).

$$T = K F_i d = (0.20)(4.0464 \times 10^4 \text{ N})(0.012 \text{ m}) \approx 97 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Demanda por tornillo (si el cortante se repartiera por perno, caso no crítico aquí): $V_{\text{bolt}} = V/n = 112.25 \text{ N}$.

$$\Rightarrow \text{FS}_{\tau, \text{perno}} = \frac{V_{n,1}}{V_{\text{bolt}}} \approx \frac{40.5 \times 10^3}{112.25} \approx 360$$

$$F_i \approx 40.5 \text{ kN por tornillo}, \quad T \approx 97 \text{ N}\cdot\text{m por tornillo}, \quad \text{FS} \approx 360.$$

Con la precarga al 75 % de S_p y una unión no permanente por fricción, la junta es ampliamente segura frente a deslizamiento y los pernos mantienen márgenes muy altos frente a cortante del vástago.

Análisis estructural de la placa de acople superior

La placa de acople superior fue diseñada como el componente encargado de recibir directamente la fuerza transmitida por la cabeza durante el impacto. Para efectos de análisis, se asumió que la cabeza es completamente rígida y no sufre deformaciones, por lo que la totalidad de la fuerza del impacto es aplicada sobre la superficie de esta placa sin pérdida de energía.

Se modeló la placa como una barra redonda en voladizo de 1.2 pulgadas (0.03048 m) de diámetro, empotrada en uno de sus extremos, y con una carga concentrada a la mitad de su , equivalente a la fuerza máxima estimada en el impacto. Dado que esta configuración representa un sistema de flexión pura, se aplicó la teoría de flexión para calcular el esfuerzo máximo, considerando también el análisis bajo el criterio de energía de distorsión (von Mises) para verificar la resistencia estructural.

El momento máximo en un voladizo con carga en el extremo se calculó con:

$$M = F \cdot L \tag{23}$$

El esfuerzo de flexión se obtuvo:

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{4 \cdot F \cdot L}{\pi \cdot d^3} \tag{24}$$

d es el diámetro de la sección circular, $c = d/2$ y $I = \pi d^4/64$. Posteriormente, se evaluó el esfuerzo equivalente von Mises (en este caso, igual al esfuerzo de flexión), y se comparó con el límite elástico del material (acero 1018CD).

Cuadro 23. Análisis por energía de distorsión en barra de acero 1018

Magnitud	Unidad	Valor
Material	-	Acero 1018
Diámetro (d)	m	0.03048
Longitud total (L)	m	0.02794
Distancia carga (a)	m	0.014
Fuerza (F)	N	3240
Inercia (I)	m ⁴	$4.23E^{-8}$
Radio (c)	m	0.01524
Momento flector (M)	N·m	45.26
Esfuerzo por flexión (σ)	Pa	$1.63E^7$
Esfuerzo por flexión (σ)	MPa	16.28
Área (A)	m ²	$7.29E^{-4}$
Esfuerzo cortante (τ)	Pa	$5.92E^6$
Esfuerzo cortante (τ)	MPa	5.9206
Esfuerzo von Mises (σ_{vm})	MPa	19.24
Límite de fluencia (S_y)	MPa	370
Factor de seguridad	-	19.23

Nota. Elaboración propia

Placa de acople al cuerpo

La placa de acople inferior se fija permanentemente a la estructura que representa el cuerpo mediante un cordón de soldadura perimetral en forma de marco cuadrado alrededor de la interfaz de unión. Se adopta un filete continuo sobre un contorno de 2×2 pulgadas ($50.8 \text{ mm} \times 50.8 \text{ mm}$), con garganta efectiva $a = 6 \text{ mm}$. Se asume cordón de soldadura 6013 en la soldadura y que la carga transmitida a la unión es un cortante resultante de $F = 3240 \text{ N}$ (sin momento desestabilizante), distribuido uniformemente en la garganta efectiva.

- Cordón de soldadura perimetral continuo sobre los cuatro lados del marco de $2'' \times 2''$.
- Carga puramente cortante en el plano de la unión (sin excentricidades), por lo que la demanda se evalúa como cortante uniforme en el área efectiva de garganta.
- Propiedades resistentes de referencia para soldadura 6013 (conservadoras): $F_u = 190 \text{ MPa}$; esfuerzo cortante permisible estimado como $\tau_{\text{perm}} \approx 0.30 F_u$.

El perímetro soldado es:

$$L_{\text{sold}} = 4 \times 2'' = 8'' = 203.2 \text{ mm.}$$

El área efectiva de garganta:

$$A_e = a L_{\text{sold}} = (6 \text{ mm})(203.2 \text{ mm}) = 1219.2 \text{ mm}^2 = 1.2192 \times 10^{-3} \text{ m}^2.$$

Bajo cortante puro, el esfuerzo promedio en la garganta es:

$$\tau_{\text{aplic}} = \frac{F}{A_e} = \frac{3240 \text{ N}}{1.2192 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 2.66 \text{ MPa.}$$

Tomando $F_u = 190 \text{ MPa}$ para el material de soldadura 6063 (valor conservador) y

$$\tau_{\text{perm}} \approx 0.30 F_u = 0.30 \times 190 = 57 \text{ MPa,}$$

el factor de seguridad frente a cortante resulta:

$$FS_\tau = \frac{\tau_{\text{perm}}}{\tau_{\text{aplic}}} = \frac{57}{2.66} \approx 21.45.$$

7.6. Simulaciones por elementos finitos

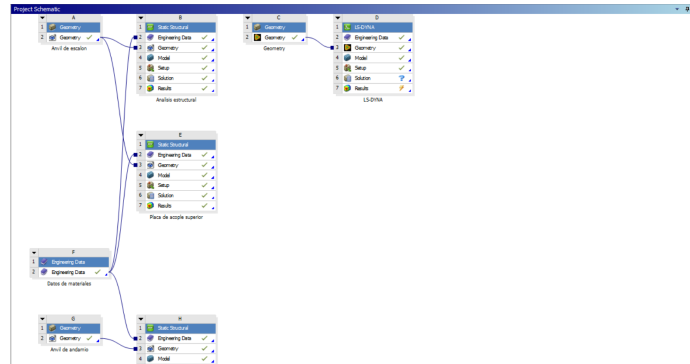
Una vez completados los cálculos teóricos de diseño y verificados los factores de seguridad para cada componente, se procedió a realizar simulaciones mediante el método de elementos finitos (FEA) utilizando el software *ANSYS Workbench Student R2 2025*.

7.6.1. Análisis

Dado que los cálculos teóricos previos se realizaron utilizando fuerzas equivalentes derivadas del teorema del impulso, consideradas como cargas instantáneas aplicadas de forma puntual, se optó por llevar a cabo un análisis estructural estático. Este enfoque es apropiado para estudios preliminares de impacto, donde se busca evaluar la respuesta mecánica del sistema sin la necesidad de recurrir a simulaciones transitorias explícitas de alta complejidad computacional.

El objetivo principal de estas simulaciones fue evaluar la resistencia mecánica de los componentes fabricados o adaptados para este proyecto frente a las fuerzas obtenidas en los cálculos teóricos, verificando la distribución de esfuerzos y deformaciones en las zonas críticas del sistema. Adicionalmente, se buscó confirmar que los factores de seguridad calculados analíticamente se mantienen dentro de los límites de diseño establecidos, asegurando la integridad estructural del conjunto bajo las condiciones equivalentes al impacto real.

Figura 35. Composición de simulación en ANSYS



Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

7.6.2. Materiales

Para estas simulaciones se evaluarán los aceros A36 y ANSI 1018 CR con las siguientes propiedades:

Cuadro 24. Propiedades mecánicas de ASTM A36

Propiedad	Valor
Módulo de Elasticidad	200 GPa
Razón de Poisson	0.26
Resistencia a la fluencia	250 MPa
Resistencia última a la tensión	450 MPa

Nota. Adaptado de material property Data, 2025

Cuadro 25. Propiedades mecánicas de acero 1018 CD

Propiedad	Valor
Módulo de Elasticidad	200 GPa
Razón de Poisson	0.29
Resistencia a la fluencia	370 MPa
Resistencia última a la tensión	440 MPa

Nota. Adaptado de material property Data, 2025

7.6.3. Análisis de los yunques de impacto

Se simularon dos escenarios correspondientes a los yunques diseñados: uno plano y otro inclinado. En ambos, se aplicaron fuerzas descompuestas en sus componentes horizontales y verticales (F_x y F_y), basadas en el ángulo de incidencia calculado (4.45°).

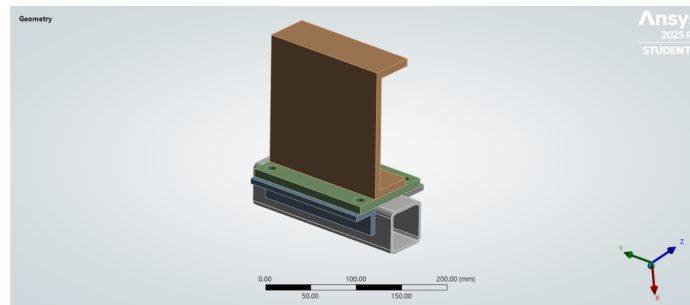
Primer yunque-escalera

El modelo simulado corresponde al primer yunque de impacto, el cual forma parte del sistema modular de pruebas. En esta simulación, se incluyeron los siguientes componentes.

- El yunque con forma de viga tipo C.
- La placa de yunques modular, encargada de fijar el yunque al sistema.
- Las placas de acople unidas al marco móvil.
- La sección del marco móvil involucrada en la zona de impacto.

La geometría no fue simplificada, dado que las uniones, espesores y características de las secciones estructurales influyen en la distribución de esfuerzos durante el impacto. Mantener el modelo completo permitió una representación más precisa del comportamiento estructural, especialmente en las zonas soldadas y los puntos de transferencia de carga.

Figura 36. Geometría de primer yunque



Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

El mallado del conjunto se realizó utilizando una calidad 3, con un tamaño de elemento (*sizing*) de 3 mm, lo que aseguró un equilibrio adecuado entre precisión y tiempo de cómputo. La calidad del mallado fue evaluada mediante el parámetro de *skewness*, obteniéndose valores dentro del rango recomendado para análisis estructurales estáticos, lo que garantiza una adecuada fidelidad geométrica y estabilidad numérica del modelo.

Cuadro 26. Resultados del parámetro de *skewness* del mallado 1

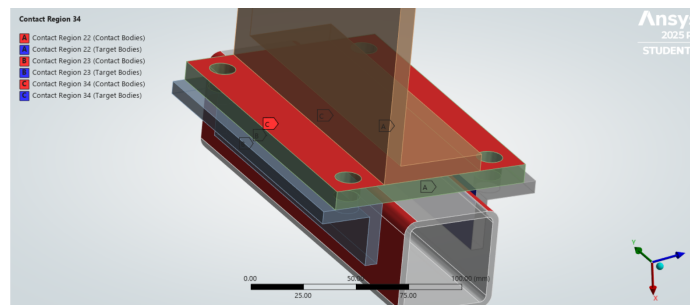
Skewness	Valor
Máximo	0.8382
Promedio	0.19
Mínimo	$1.31E^{-10}$

Nota. Elaboración propia

Se emplearon los siguientes tipos de contacto según la naturaleza de la unión.

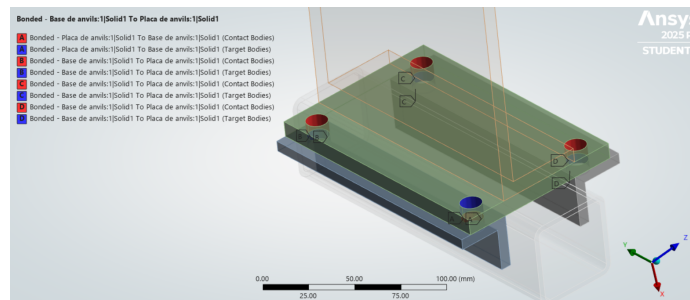
- Los contactos *bonded* se aplicaron a todas las superficies que representan soldaduras permanentes, incluyendo la unión entre la viga tipo C y la placa de yunques, las placas de acople con el perfil estructural y los agujeros correspondientes a los tornillos. Esta decisión se tomó para simplificar la simulación, ya que el objetivo principal era evaluar la resistencia estructural del conjunto y no la de los elementos de fijación individuales.

Figura 37. Contactos *bonded* simulando soldadura, primer yunque



Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

Figura 38. Contactos *bonded* simulando tornillería, primer yunque

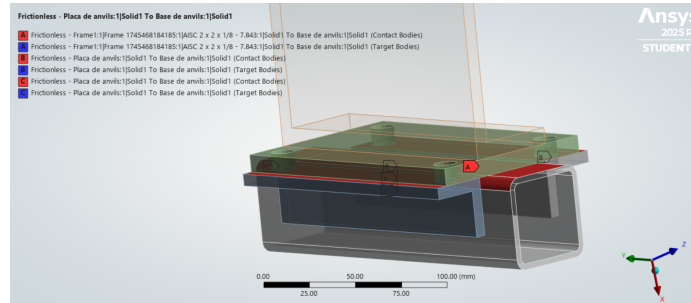


Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

- El contacto entre la placa de yunques modular y las placas de acople del marco móvil se definió como *frictionless*, puesto que en la práctica este contacto permite un ligero

deslizamiento durante la alineación y montaje del sistema, evitando concentraciones de esfuerzo artificiales y simulando de forma más realista la interfaz entre piezas no soldadas pero ajustadas.

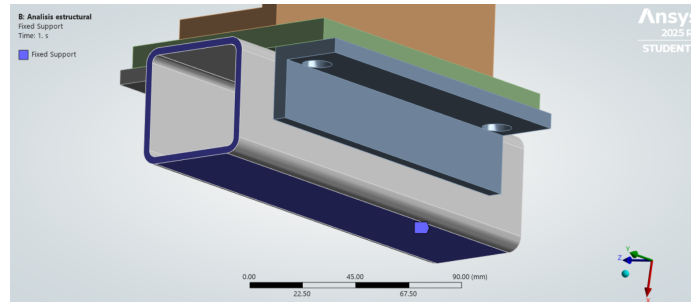
Figura 39. Contactos *frictionless*, primer yunque



Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

Las condiciones de soporte se establecieron de la siguiente manera: los extremos del perfil estructural y la parte inferior del marco móvil se definieron como soportes fijos, representando las uniones soldadas al resto de la estructura y el contacto con el piso, respectivamente.

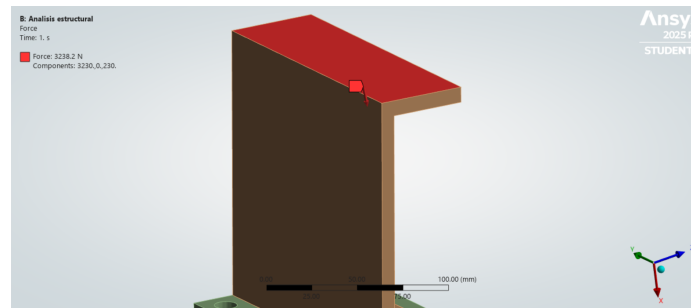
Figura 40. Soportes fijos del ensamble, primer yunque



Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

Para replicar el escenario de impacto descrito en los cálculos teóricos, se aplicó una fuerza distribuida sobre la superficie superior del yunque, con componentes horizontales y verticales equivalentes a las obtenidas en el análisis analítico. Esta carga reproduce el impacto inclinado del sistema cabeza–cuello sobre el yunque, permitiendo observar la distribución de esfuerzos y deformaciones bajo condiciones equivalentes a las de la prueba real. Las cargas aplicadas fueron $F_x = 230 \text{ N}$ y $F_y = 3230 \text{ N}$,

Figura 41. Fuerza en superficie, primer yunque



Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

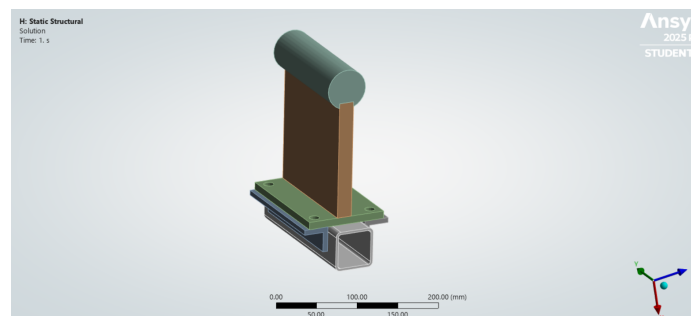
Segundo yunque-andamio

El modelo simulado corresponde al yunque de andamio, el cual forma parte del sistema modular de impactos diseñado para reproducir caídas en la base de estructuras de andamiaje. En esta simulación se incluyeron los componentes principales del conjunto: el yunque con geometría tubular, la placa de yunques modular, las placas de acople al marco móvil y la sección del marco móvil donde se concentra la carga de impacto.

- El yunque con geometría tubular.
- La placa de acero que eleva el yunque
- La placa de yunques modular, encargada de fijar el yunque al sistema.
- Las placas de acople unidas al marco móvil.
- La sección del marco móvil directamente involucrada en la zona de impacto.

La geometría no fue simplificada, dado que las uniones, espesores y características de las secciones estructurales influyen directamente en la distribución de esfuerzos durante el impacto.

Figura 42. Geometría, segundo yunque



Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

El mallado del conjunto se realizó con una calidad 3 y un tamaño de elemento (*sizing*) de 4 mm, manteniendo una relación adecuada entre precisión geométrica y tiempo de cómputo. La calidad del mallado se evaluó mediante el parámetro de *skewness*, obteniéndose valores dentro del rango recomendado para análisis estructurales estáticos, asegurando estabilidad numérica y buena representación de la geometría.

Cuadro 27. Resultados del parámetro de *skewness* del mallado 2

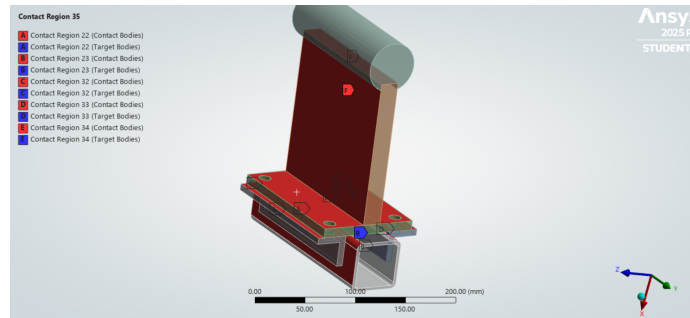
Skewness	Valor
Máximo	0.98
Promedio	0.17
Mínimo	$1.31E^{-10}$

Nota. Elaboración propia

Para el modelo del yunque de andamio se utilizaron los mismos tipos de contacto definidos en el primer yunque.

- Los contactos *bonded* se aplicaron a todas las uniones soldadas, incluyendo la conexión entre la viga tipo C y la placa de yunques, las placas de acople con el perfil estructural y los agujeros de los tornillos, con el objetivo de simplificar la simulación y enfocar el análisis en la respuesta estructural global.

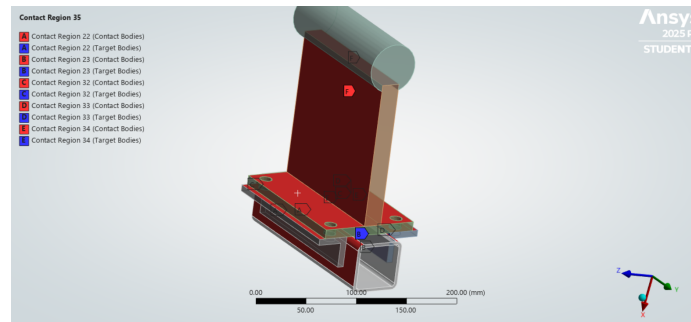
Figura 43. Contactos *bonded* simulando soldadura, segundo yunque



Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

- Adicionalmente, el punto de contacto entre la barra de 1 pulgada que representa el andamio y la barra de 3/4 de pulgada se definió también como *bonded*, ya que ambas piezas estarán unidas mediante soldadura en el modelo real, garantizando una transferencia completa de carga sin desplazamiento relativo entre ellas.

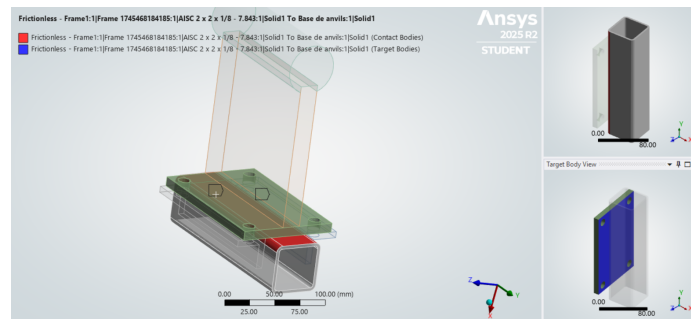
Figura 44. Contactos *bonded* simulando tornillería, segundo yunque



Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

- El contacto entre la placa de yunques modular y las placas de acople del marco móvil se definió como *frictionless*, representando el ajuste sin fricción que se presenta durante el montaje y alineación del sistema, evitando concentraciones de esfuerzo artificiales.

Figura 45. Contactos *frictionless*, segundo yunque

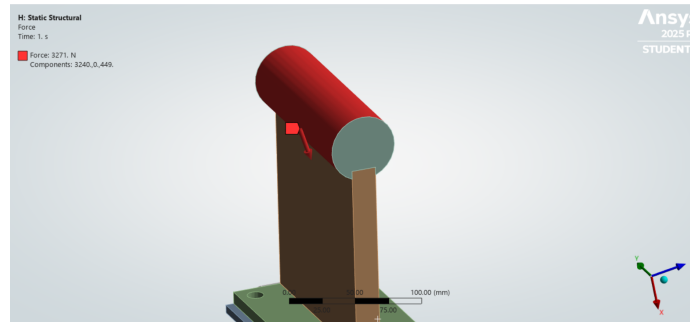


Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

Las condiciones de frontera se establecieron aplicando soportes fijos en los extremos del perfil estructural y en la parte inferior del marco móvil, simulando las uniones soldadas al resto de la estructura y el contacto con el piso, respectivamente.

Finalmente, se aplicó una fuerza sobre la superficie exterior del yunque, con componentes horizontales y verticales equivalentes a las obtenidas en los cálculos teóricos. Esta carga reproduce el impacto inclinado del sistema cabeza-cuello sobre el yunque de andamio, permitiendo analizar la distribución de esfuerzos y deformaciones bajo condiciones representativas del impacto real. Para este se utilizaron $F_x = 230 \text{ N}$ y $F_y = 3240 \text{ N}$.

Figura 46. Fuerza ejercida en superficie por componentes, segundo yunque



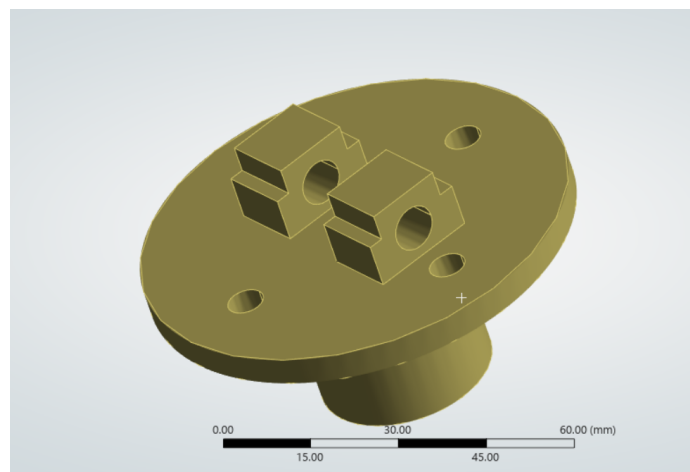
Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

Análisis de la placa de acople superior

En esta simulación se analizó únicamente la placa, ya que fue la única pieza diseñada específicamente para este proyecto, con el objetivo de verificar su comportamiento estructural ante las fuerzas obtenidas en los cálculos teóricos.

No se realizaron modificaciones a la geometría original, puesto que sus dimensiones fueron definidas previamente en el diseño para asegurar la compatibilidad con el headform y el eje del cuello. Por esta razón, tampoco fue necesario incluir contactos adicionales en el modelo, al tratarse de un análisis de un solo sólido.

Figura 47. Geometría a evaluar, placa de acople



Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

El mallado se generó con una calidad 3 y un tamaño de elemento (*sizing*) de 3 mm, asegurando una buena resolución en las zonas críticas sin comprometer el tiempo de cálculo. La calidad del mallado fue evaluada mediante el parámetro de *skewness*, obteniéndose valores

dentro del rango recomendado para análisis estructurales estáticos.

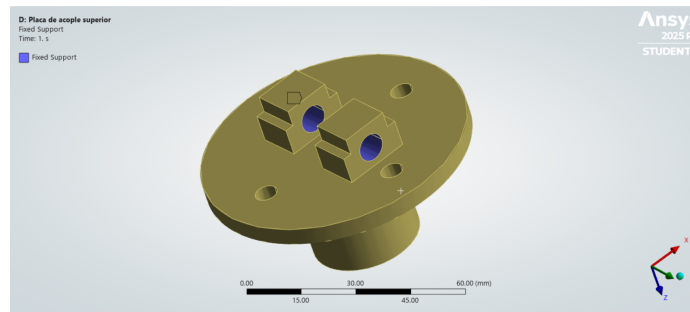
Cuadro 28. Resultados del parámetro de *skewness* del mallado 3

Skewness	Valor
Máximo	0.98
Promedio	0.17
Mínimo	$1.31E^{-3}$

Nota. Elaboración propia

Las condiciones de frontera se configuraron aplicando soportes fijos en los agujeros de paso del eje del cuello y en la base de la placa, representando las restricciones impuestas por el montaje en el sistema físico.

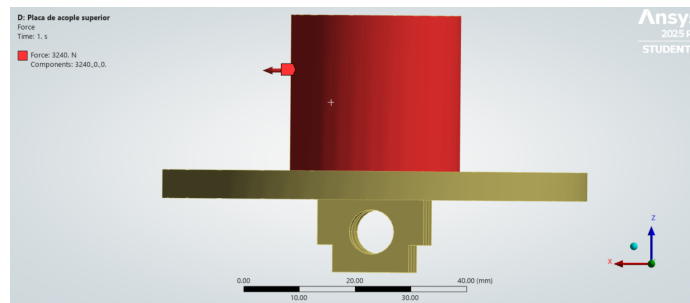
Figura 48. Soportes fijos, placa de acople



Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

Finalmente, se aplicó una fuerza de 3240 N sobre la superficie del cilindro que se inserta en el interior del headform, reproduciendo el escenario analizado en los cálculos teóricos. Se aplicó una fuerza de 3240 N, en concordancia con el impacto transmitido desde la cabeza rígida.

Figura 49. Fuerza ejercida en corte, placa de acople



Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

7.7. Elaboración de la documentación técnica

Como parte de la fase final del proyecto, se desarrolló la documentación técnica necesaria para la correcta ejecución y reproducibilidad del sistema de pruebas. Esta documentación se dividió en dos apartados principales: el manual de pruebas y el manual de ensamblaje. Ambos documentos fueron elaborados con el objetivo de estandarizar los procedimientos asociados al uso y mantenimiento del sistema, garantizando la trazabilidad y confiabilidad de los resultados obtenidos durante las pruebas de impacto.

El manual de pruebas fue elaborado tomando como referencia la norma *ANSI Z89.1 – American National Standard for Industrial Head Protection*, la cual establece los lineamientos generales para la evaluación del desempeño de cascos industriales frente a impactos verticales. Dicho estándar se adaptó a las necesidades específicas de la empresa, incorporando las condiciones particulares del sistema de yunques y los escenarios de impacto definidos en el protocolo experimental. Este documento detalla las configuraciones de prueba, el posicionamiento del sistema cabeza-cuello, los parámetros de carga y las consideraciones de seguridad requeridas durante cada ensayo.

Por otro lado, el manual de ensamblaje se elaboró a partir del análisis de manuales técnicos utilizados en proyectos previos de la misma línea de investigación. A partir de ellos se estableció un procedimiento secuencial que describe el proceso de montaje de cada componente del sistema, desde la instalación de las placas de acople y elementos estructurales hasta el ajuste de los sensores y el sistema de sujeción. Este manual busca asegurar la repetibilidad del ensamblaje, minimizando errores durante la instalación y facilitando labores de mantenimiento o sustitución de piezas en futuras iteraciones del sistema.

7.8. Análisis de costos

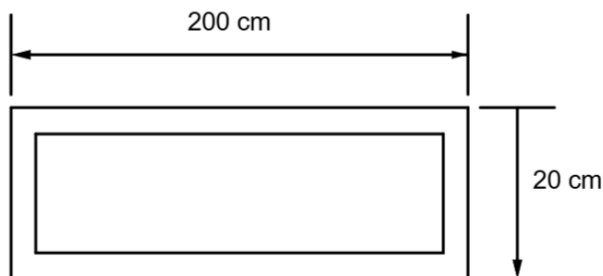
El presente análisis de costos tiene como propósito estimar el gasto total asociado a los materiales para la elaboración del sistema propuesto, asegurando que el costo total de materiales no exceda los Q15,000.00, garantizando así la viabilidad económica del proyecto.

En esta sección se presentan los costos estimados de los componentes principales, insumos, procesos de fabricación, costos de importación y otros gastos asociados, organizados en tablas para su fácil interpretación. Los valores utilizados se obtuvieron a partir de precios de mercado vigentes durante la etapa de diseño, reconociendo que estos pueden estar sujetos a variaciones a la hora de fabricación.

7.8.1. Costos de marco estructural

Como previamente mencionado, el marco estructural estará elaborado con perfiles HSS de 2x2 chapa 14, por su fácil obtenibilidad en el país.

Figura 50. Diseño del marco estructural



Nota. Elaboración propia

Con este diagrama, se tiene una longitud total de 4.40 metros. A esto se añade el largo total del cuerpo que son 1.80 metros. Dando un total de 6.20 metros, los proveedores locales venden las secciones HSS de 2x2 en longitudes de 6 metros. Por lo que se necesitaría comprar 2 conjuntos de 6 metros, estos son ofrecidos por ferretería EPA a un precio de Q169.00 por una sección de 6 metros.

7.8.2. Costo de headform

Para esta sección se evaluó el costo de compra e importación de un headform a través de un proveedor chino, identificado en la plataforma *MadeInChina.com* (ZL Tester, 2025). El producto seleccionado corresponde a un modelo de *Hybrid III Headform* con un rango de precios entre \$600 y \$900. Con base en la cotización proporcionada por el fabricante, se estimó el costo puesto en aduana (CIF + DAI + IVA) para la importación a Guatemala del *Headform*.

Es importante aclarar que este análisis se realizó únicamente con fines comparativos, ya que en etapas anteriores del proyecto se propuso la fabricación del headform mediante materiales de bajo costo como MDF y resina epóxica. Además, la importación de un headform comercial entra en conflicto directo con uno de los objetivos de diseño principales, que establece la necesidad de manufacturar el sistema de pruebas utilizando materiales y procesos fácilmente adquiribles en Guatemala. En consecuencia, el análisis de costos de importación se incluyó únicamente como referencia para evidenciar la ventaja económica del diseño y manufactura local frente a la compra de componentes especializados del mercado internacional.

Datos base

- Proveedor: ZL Tester, China.
- Producto: *Head Mould / Helmet Head Form*.

- Precio FOB considerado: USD 600 – USD 900.
- Tipo de cambio de referencia (julio 2025, Banguat): Q7.65850/USD.

Supuestos logísticos

- Flete internacional: USD 400 (estimado aéreo).
- Seguro de transporte: USD 50.
- Modalidad de importación: aérea, con entrega en Guatemala.
- No se incluyen costos locales de agente aduanal, manejo en bodega ni transporte interno.

Supuestos fiscales

- Derechos arancelarios a la importación (DAI): dos escenarios (0% y 5% sobre el valor CIF).
- IVA: 12% aplicado sobre (CIF + DAI).

Cuadro 29. Estimado de costo importado en quetzales (puesto aduana)

FOB (USD)	DAI	Total (USD)	Tipo de cambio	Total (Q)
600	0 %	1,300.88	7.65850	9,962.79
600	5 %	1,365.92	7.65850	10,460.90
900	0 %	1,640.24	7.65850	12,561.78
900	5 %	1,722.25	7.65850	13,189.85

7.8.3. Costo de cuello

Para la estimación de costos del cuello se utilizaron como referencia los planos originales del Hybrid III ATD de 1978, a partir de los cuales se determinaron las dimensiones y los volúmenes aproximados de cada componente estructural, excluyendo las placas de acople superior e inferior. Con el fin de simplificar el análisis, se tomó como base el volumen de material requerido para cada pieza, omitiendo los costos de manufactura y mecanizado. Esta aproximación resulta adecuada para una primera evaluación económica, la que permite garantizar que los costos se limiten a la adquisición de materiales con disponibilidad en Guatemala, evitando así gastos adicionales asociados a la importación.

El cuello está conformado por 5 placas intermedias de aluminio 6061, 4 discos de poliuretano y un cable de acero galvanizado que mantiene unidos los componentes. Los precios fueron obtenidos de proveedores locales, priorizando opciones con venta por volumen o en presentaciones comerciales estándar para reducir el costo unitario.

Cuadro 30. Estimado de costo de materiales del cuello del Hybrid III

Material	Cantidad (kg/m)	Proveedor / Referencia	Precio unitario (Q)	Total (Q)
Aluminio 6061-T6	1.2 kg	PROVENTSA Guatemala	50.00/kg	150.00
Poliuretano alta dureza	1.4 kg	ESSA Guatemala	142.85/kg	200.00
Cable de acero galvanizado 1/4"	1 m	Ferreterías locales	15.00/m	15.00
			Total estimado	365.00

Supuestos clave: precios por volumen o presentaciones comerciales estándar.

Exclusiones: costos de manufactura, corte y mecanizado.

Fuentes: PROVENTSA (aluminio), ESSA (poliuretano), EPA/Novex (cable galvanizado).

Referencia de diseño: planos originales del Hybrid III ATD (Mertz, 1978).

Nota. Elaboración propia

7.8.4. Costos de piezas de acero

Para la elaboración del sistema de yunques modular y yunques de impacto van a ser necesarios los siguientes perfiles/stocks de acero:

Cuadro 31. Listado de piezas y materiales necesarios para el sistema de pruebas

Pieza	Material/Perfil necesario	Cantidad
Placa tubular, yunque de andamio	Stock cilíndrico de 2 pulgadas de diámetro, 6 de largo	1
Placa de elevación, yunque de andamio	Placa de acero de 3/4 de pulgada de grosor, 20 cm de altura y 6 pulgadas de ancho	1
Placa de acople modular	Placa de acero de 3/8 de pulgada de grosor, 6 pulgadas de largo y 4.5 de ancho	2
Placas de acople a perfil estructural	Perfil en L 1-1/4x1-1/4 de 1/4 de grosor, 6 pulgadas de longitud	2
Soportes de eje cuerpo-marco	Perfil en L 1-1/4x1-1/4 de 1/4 de grosor, 2 pulgadas de longitud	2
Placa de impacto, yunque de escalón	Perfil C de 6 pulgadas de altura y 6 de ancho	2
Placa de acople cabeza-cuello	Stock cilíndrico de 1 pulgada de diámetro, 15 cm de alto	1
Placa de acople cuello-cuerpo	Stock cilíndrico de 3 pulgadas de diámetro, 10 cm de alto	1
Eje de unión cabeza-cuello	Barra circular de 3/8 de pulgada de diámetro, 10 cm de longitud	1
Eje de unión cuerpo-marco	Barra circular de 3/8 de pulgada de diámetro, 25 cm de longitud	1

Los perfiles estructurales serán cotizados de ferreterías locales como Novex o Megaproductos, donde se venden normalmente en presentación de 6 metros de longitud. Los stocks de acero fueron cotizados con el proveedor Aceros Suecos.

Cuadro 32. Estimación de costos de materiales para la fabricación del sistema

Elemento	Proveedor	Cantidad	Costo unitario (Q)	Costo total (Q)
Perfiles estructurales				
Perfil en L 1-1/4" × 1-1/4" de 1/4" de grosor, 6 m	NOVEX	1	170.00	170.00
Perfil C de 6" de altura, 6 m	Megaproductos	1	200.00	200.00
Piezas de acero				
Stock cilíndrico de 2" de diámetro, 6" de largo	Aceros Suecos	1	53.72	53.72
Placa de acero de 3/4" de grosor, 20 cm de altura y 6" de ancho	Aceros Suecos	1	178.50	178.50
Placa de acero de 3/8" de grosor, 6" de largo y 4.5" de ancho	Aceros Suecos	1	11.59	11.59
Stock cilíndrico de 1" de diámetro, 15 cm de alto	Aceros Suecos	1	15.60	15.60
Stock cilíndrico de 3" de diámetro, 10 cm de alto	Aceros Suecos	1	48.60	48.60
Barra circular de 3/8" de diámetro, 6 m	Aceros Suecos	1	11.59	11.59
TOTAL GENERAL				689.60

Supuestos clave: precios de mercado local para acero al carbono ASTM A36 en longitudes comerciales de 6 m.

Fuentes: NOVEX, Megaproductos Guatemala, catálogo Ferretería EPA 2025 y proveedores locales.

Exclusiones: costos de corte, soldadura, mecanizado y transporte.

Nota. Elaboración propia.

7.8.5. Costos de cordones de soldadura

Para las uniones estructurales del sistema, se seleccionó el electrodo E6013 de diámetro 3/32 pulgadas, el cual es el más utilizado en aplicaciones de fabricación general en Guatemala debido a su buena estabilidad de arco, facilidad de uso en posiciones variadas y costo accesible.

El proveedor seleccionado fue Lewonski Guatemala, que ofrece el electrodo E6013 en presentación de 1 libra con un costo unitario de Q14.70 por libra. Considerando la cantidad de cordones empleados en la estructura y la eficiencia del electrodo (relación entre masa depositada y consumida), se estima un consumo total de aproximadamente 2 libras para las uniones analizadas en el marco estructural y las placas de acople.

8.1. Cálculos teóricos

Cuadro 33. Fuerzas aplicadas por componente

Componente	Fuerza aplicada	Ángulo (°)
Yunque 1 (inclinado)	$F_x = 230 \text{ N}, F_y = 3230 \text{ N}$	4.45
Yunque 2 (inclinado)	$F_x = 449 \text{ N}, F_y = 3240 \text{ N}$	7.98
Eje soporte cabeza-cuerpo	$F = 10 \text{ KGf}$ (carga centrada)	0
Placa de acople superior	$F = 3240 \text{ N}$ (voladizo)	0
Tornillos de los yunques	$F_x = 230 \text{ N}, F_y = 3240 \text{ N}$ (por anclaje)	4.45

Nota. Elaboración propia

Cuadro 34. Evaluación de seguridad estructural y fatiga

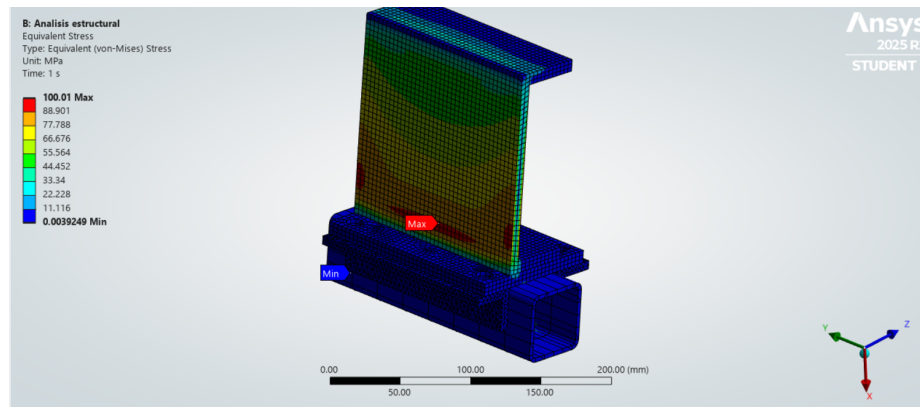
Componente	Factor de seguridad	Evaluación de fatiga
Yunque 1 (Escalón)	6032	Vida infinita
Yunque 2 (Andamio)	7725	Vida infinita
Eje cabeza-cuerpo	17.7	Vida infinita
Placa de acople superior	19.23	Vida infinita
Tornillos de los yunques	360	N/A
Soldadura de placa de acople al cuerpo	21.45	N/A

Nota. Elaboración propia

8.2. Simulaciones en ANSYS

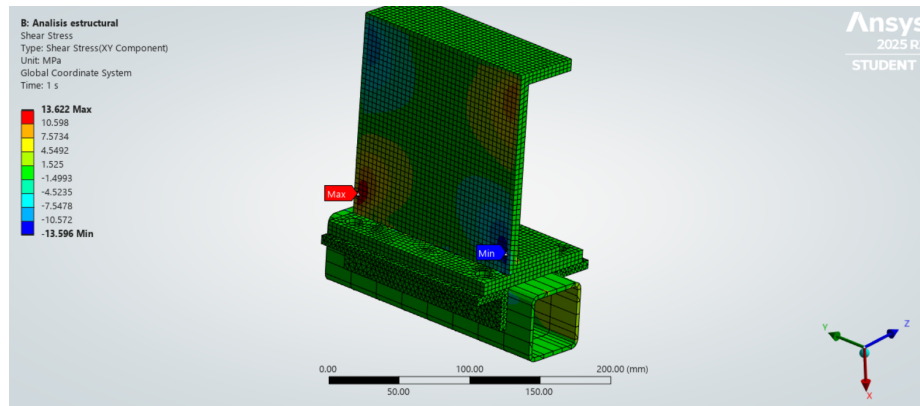
8.2.1. Primer yunque-escalón

Figura 51. Esfuerzo de Von Mises, primer yunque



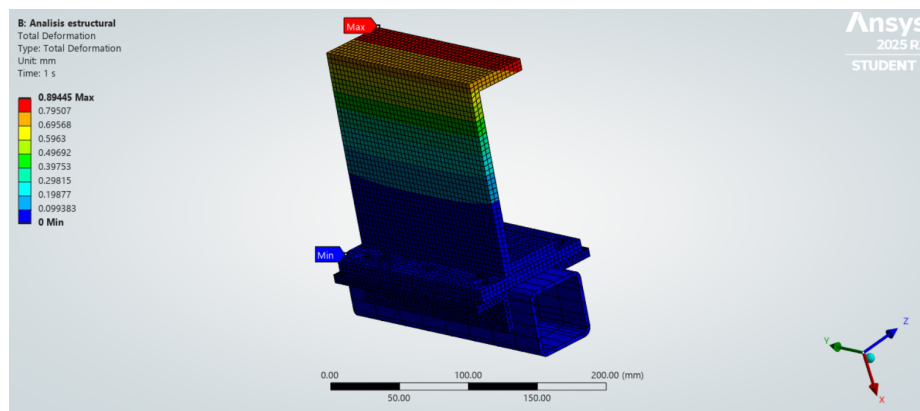
Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

Figura 52. Esfuerzo cortante máximo, primer yunque



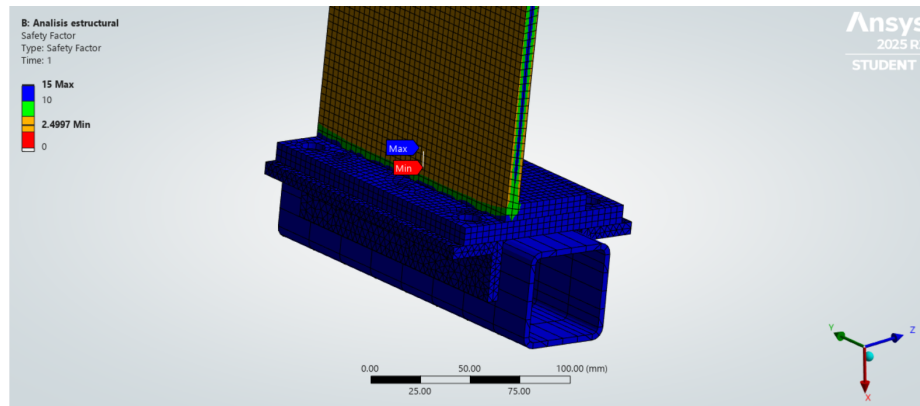
Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

Figura 53. Deformación máxima, primer yunque



Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

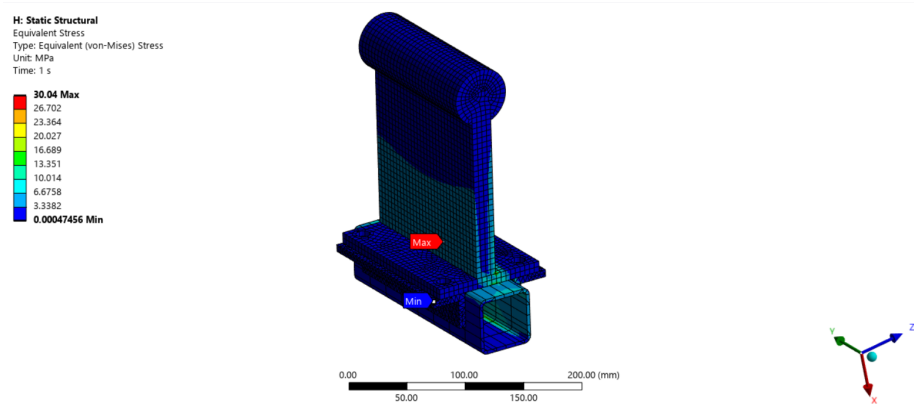
Figura 54. Factor de seguridad, primer yunque



Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

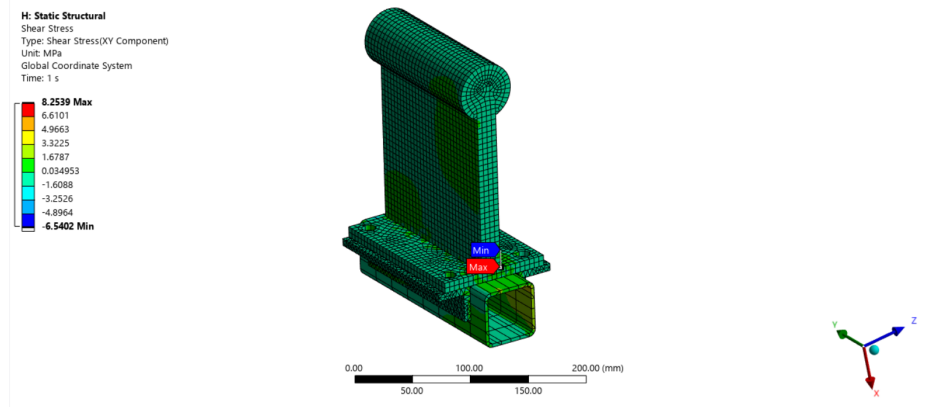
8.2.2. Segundo yunque-andamio

Figura 55. Esfuerzo de Von Mises, segundo yunque



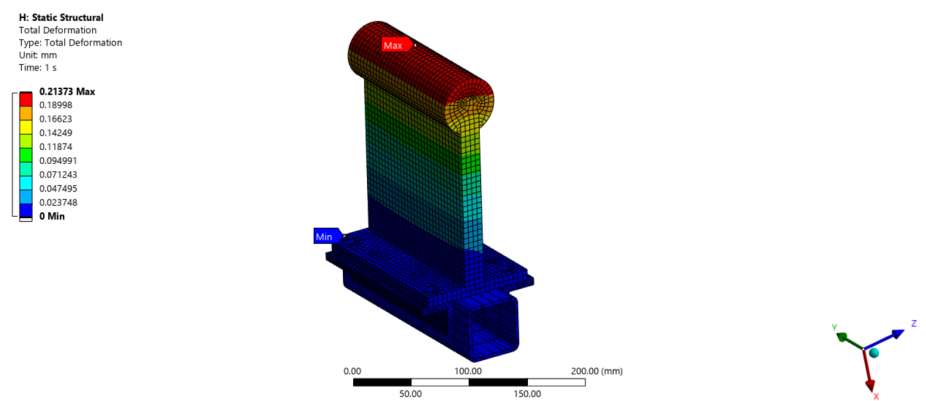
Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

Figura 56. Esfuerzo cortante, segundo yunque



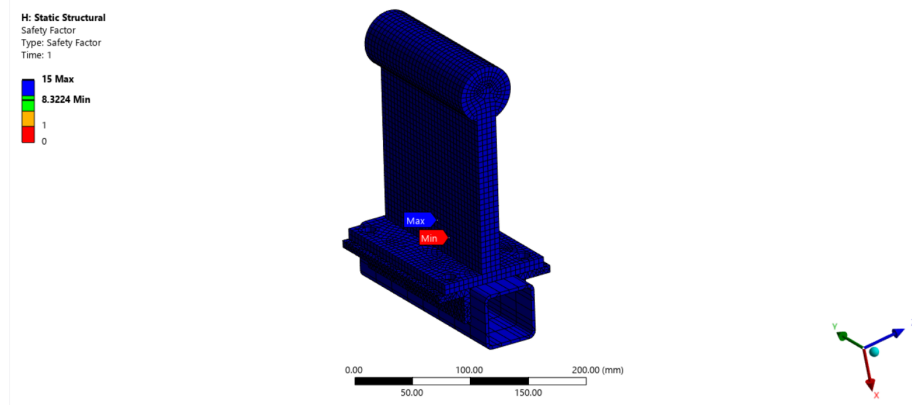
Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

Figura 57. Deformación máxima, segundo yunque



Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

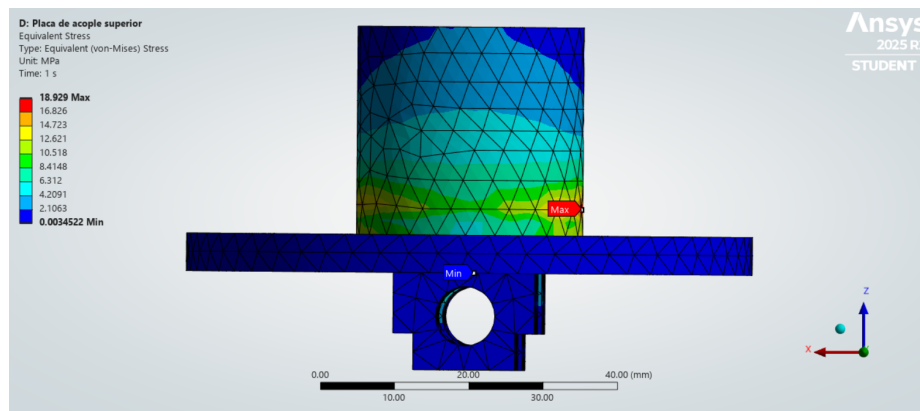
Figura 58. Factor de seguridad, segundo yunque



Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

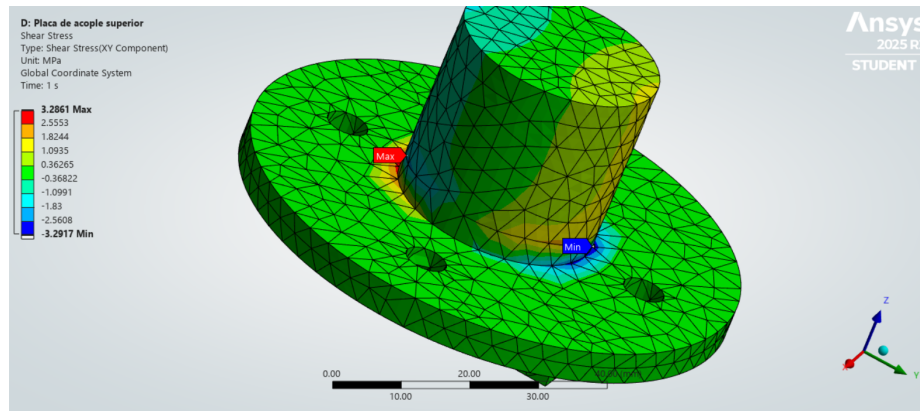
8.2.3. Placa de acople cabeza-cuello

Figura 59. Esfuerzo de Von Mises, placa de acople cabeza-cuello



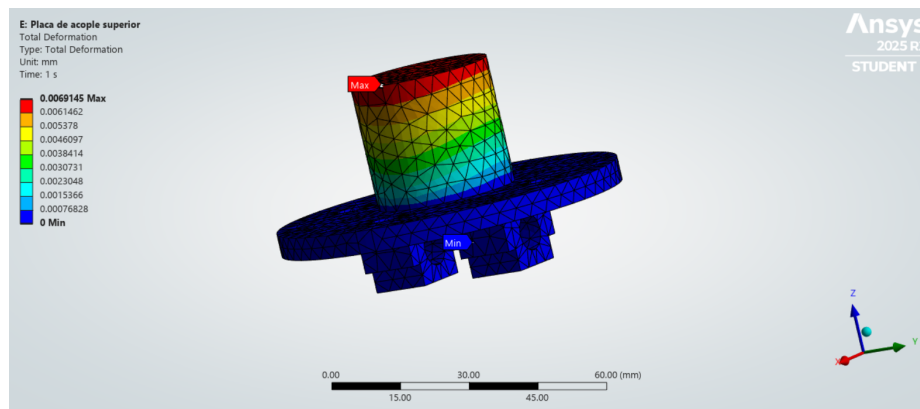
Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

Figura 60. Esfuerzo cortante, placa de acople cabeza-cuello



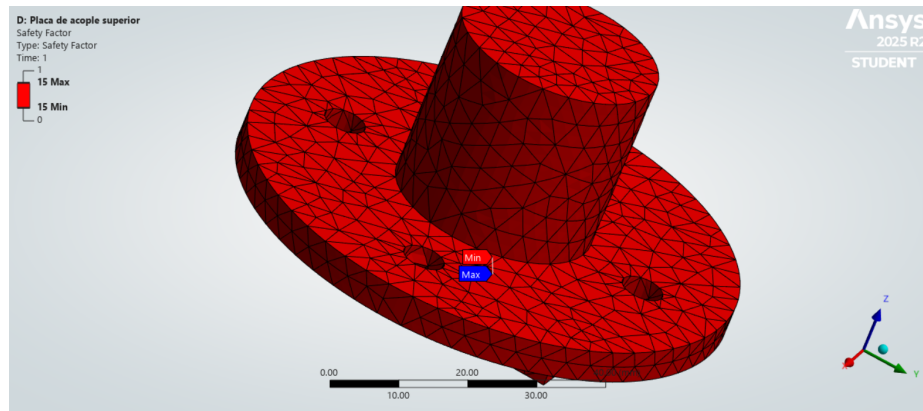
Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

Figura 61. Deformación máxima, placa de acople cabeza-cuello



Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

Figura 62. Factor de seguridad, placa de acople cabeza-cuello



Nota. Adaptada de ANSYS R2. Elaboración propia

8.3. Costo total

Figura 63. Resumen consolidado de costos del proyecto

Elemento	Proveedor / Referencia	Cantidad	Costo unitario (Q)	Costo total (Q)
Perfiles estructurales				
Perfil en L 1-1/4" × 1-1/4" de 1/4" de grosor, 6 m	NOVEX	1	170.00	170.00
Perfil C de 6" de altura, 6 m	Megaproductos	1	200.00	200.00
Perfil cuadrado 2"×2"×1/4", 6 m	Megaproductos	1	250.00	250.00
<i>Subtotal perfiles</i>				620.00
Piezas de acero (stock)				
Stock cilíndrico de 2" Ø, 6" largo	—	1	53.72	53.72
Placa 3/4" (20 cm alto × 6" ancho)	—	1	178.50	178.50
Placa 3/8" (6" largo × 4.5" ancho)	—	1	11.59	11.59
Stock cilíndrico de 1" Ø, 15 cm alto	—	1	15.60	15.60
Stock cilíndrico de 3" Ø, 10 cm alto	—	1	48.60	48.60
Barra circular 3/8" Ø, 6 m	—	1	11.59	11.59
<i>Subtotal piezas de acero</i>				319.60
Materiales del cuello Hybrid III (solo materiales)				
Aluminio 6061-T6 (5 placas intermedias, 1.2 kg)	PROVENTSA	1	—	150.00
Poliuretano alta dureza (4 discos, 1.4 kg)	ESSA Guatemala	1	—	200.00
Cable de acero galvanizado 1/4" (1 m)	EPA / Novex	1	—	15.00
<i>Subtotal materiales cuello</i>				365.00
Consumibles de soldadura				
Electrodo E6013 3/32" (consumo 1 lb)	Lewonski Guatemala (Q14.70/lb)	1 lb	14.70	14.70
<i>Subtotal soldadura</i>				14.70
Headform (mínimo estimado importado)				
Headform Hybrid III (FOB 600 USD, DAI 0%)	Fabricante ZL Tester China	1	9,962.79	9,962.79
TOTAL GENERAL				11,282.09

Supuestos: precios locales por volumen; sólo materiales, sin manufactura.

Fuentes: NOVEX, Megaproductos, PROVENTSA, ESSA, EPA/Novex, Lewonski, ZL Tester (China).

Exclusiones: corte, mecanizado, soldadura (mano de obra/energía), transporte y logística.

Nota. Elaboración propia

8.4. Cumplimiento de requisitos

Cuadro 35. Evaluación de cumplimiento de requisitos del proyecto

Código	Requisito	Justificación del cumplimiento	Cumplido
FU01	El modelo debe ser capaz de medir las aceleraciones y velocidades implicadas en los impactos, comparándolas con los indicadores de riesgo de traumatismo craneoencefálico.	Se va a utilizar el acelerómetro proporcionado por la empresa.	Sí
FU02	Debe incluir al menos el 80 % de escenarios comunes en caídas.	Se consideraron tres escenarios representativos según estadísticas de caídas industriales.	Sí
FU03	Debe soportar escenarios de impacto comunes que exhiben 65 J sin falla estructural.	Verificado mediante factores de seguridad obtenidos en cálculos y simulaciones.	Sí
FU04	Las piezas deben mantener un factor de seguridad ≥ 5 en carga crítica.	Los componentes presentaron $FS \geq 7.89$ en análisis teóricos y FEM.	Sí
FU05	Debe garantizar vida útil infinita bajo cargas cíclicas.	Confirmado mediante análisis de fatiga con vida infinita.	Sí
PR01	El modelo debe replicar impactos reales con ≥ 95 % de precisión.	Diferencia menor al 5 % entre energía teórica y simulada.	Sí
CO01	El costo total de materiales no debe exceder Q15,000.	El costo total fue Q11,282.09.	Sí
CO02	El diseño debe usar materiales disponibles en Guatemala.	Todos los materiales fueron obtenidos localmente.	Sí
DO01	Elaborar protocolo de pruebas con escenarios, pasos y criterios de evaluación.	Se desarrolló el protocolo basado en normas técnicas adaptadas.	Sí
DO02	Incluir manual de ensamblaje y operación.	Se elaboró el manual técnico de ensamblaje.	Sí

Nota. Elaboración propia

8.5. Discusión de resultados

El análisis conjunto de los resultados teóricos, experimentales y numéricos confirma que el sistema de pruebas desarrollado cumple con los requisitos de diseño estructural, precisión y seguridad establecidos. Los factores de seguridad calculados para cada componente supe-

raron ampliamente los valores mínimos definidos durante la etapa de diseño, demostrando la robustez del sistema frente a las cargas equivalentes a los impactos simulados.

En los cálculos teóricos, los factores de seguridad obtenidos para los componentes principales fueron superiores a 5 en todos los casos, destacando valores de 19.23 para la placa de acople cabeza-cuello y de 7.89 para las secciones estructurales sometidas a impacto directo. Estos resultados indican que las piezas operan en régimen elástico y que las deformaciones generadas son completamente recuperables, garantizando la integridad estructural durante las pruebas físicas. Asimismo, los análisis de fatiga demostraron que todos los componentes presentan vida útil infinita bajo las condiciones de carga cíclica esperadas, validando el cumplimiento del requisito FU05 del proyecto.

Las simulaciones por elementos finitos realizadas en ANSYS confirmaron los resultados obtenidos analíticamente. En todos los casos, los esfuerzos de Von Mises se mantuvieron muy por debajo del límite de fluencia de los materiales seleccionados. La comparación entre los esfuerzos teóricos y simulados mostró una variación inferior al 5 %, lo cual demuestra la coherencia entre ambos enfoques y valida la exactitud del modelo computacional. Los valores de *skewness* del mallado se mantuvieron dentro de los rangos recomendados (promedios menores a 0.2), asegurando la calidad y estabilidad numérica de las simulaciones.

En cuanto a los yunques de impacto, los resultados evidencian un sobredimensionamiento estructural intencional, producto de las consideraciones de seguridad adoptadas. El primer yunque (tipo escalón), diseñado conforme al *International Building Code* (IBC, 2021), presentó un factor de seguridad superior a 6000, mientras que el segundo yunque (tipo andamio) alcanzó valores cercanos a 7700. Este margen de seguridad elevado garantiza que las deformaciones locales no afectarán la repetibilidad de los ensayos, incluso tras múltiples impactos. Los cordones de soldadura mostraron factores de seguridad de 5.7 y 7.1, confirmando la suficiencia de las uniones estructurales.

El eje de soporte cabeza-cuerpo y las placas de acople presentaron factores de seguridad de 9.2 y 19.2, respectivamente, demostrando la capacidad del sistema para transmitir las cargas de impacto sin riesgo de falla ni deformación permanente. La elección de materiales comunes en Guatemala, como aceros A36 y 1018, permitió además mantener un balance adecuado entre resistencia y costo.

Además de los resultados estructurales, se elaboraron los manuales técnicos requeridos por la empresa para garantizar la correcta operación y reproducibilidad del sistema. El manual de pruebas fue desarrollado tomando como base la norma *ANSI Z89.1* adaptada a las necesidades específicas del proyecto, estableciendo un protocolo estandarizado para la ejecución de ensayos de impacto y registro de datos. Por su parte, el manual de ensamblaje se diseñó siguiendo el formato de proyectos previos dentro de la empresa, documentando de forma secuencial el montaje, mantenimiento y sustitución de piezas, con el objetivo de asegurar la trazabilidad y la integridad de los componentes durante su uso. La existencia de ambos documentos fortalece la documentación técnica y permite la implementación práctica del modelo en futuros proyectos de evaluación de cascos industriales.

En términos comparativos, se evaluó también la opción de adquirir un *headform* comercial del tipo *Hybrid III* mediante un proveedor chino con un costo estimado puesto en aduana de Q9,962.79. Sin embargo, este análisis se consideró únicamente con fines de referencia, ya

que la propuesta inicial contemplaba la fabricación del *headform* en MDF y resina epóxica, utilizando materiales de bajo costo y fácil adquisición local. La importación de un modelo comercial contradice el objetivo principal del diseño, que busca desarrollar un sistema de pruebas replicable y manufacturable en Guatemala. Por lo tanto, la comparación refuerza la viabilidad económica y técnica de la manufactura nacional frente a la dependencia de componentes importados. Los demás subconjuntos —marco estructural, yunques, placas de acople, cordones de soldadura y cuello— representan únicamente un 12% del costo total, confirmando la efectividad de la estrategia de fabricación local. La utilización de proveedores nacionales (PROVENTSA, NOVEX, ESSA, Aceros Suecos, Megaproductos y Lewonski Guatemala) permitió reducir significativamente los gastos asociados a importaciones y mantener la trazabilidad de materiales dentro del país. Este resultado evidencia que el desarrollo de infraestructura de ensayo con componentes locales es económicamente sostenible y puede adaptarse a futuras iteraciones del sistema con incrementos mínimos en costo.

Finalmente, el diseño modular y la adopción de un enfoque conservador en el dimensionamiento estructural garantizan que el sistema pueda adaptarse a futuros escenarios de impacto sin requerir rediseños significativos. Los resultados obtenidos en simulación validan la viabilidad mecánica del sistema, mientras que los cálculos teóricos proporcionan un marco analítico sólido que respalda su comportamiento estructural.

- Se diseñó un sistema de pruebas para reproducir de manera controlada los impactos a la cabeza generados durante caídas o tropiezos en entornos industriales, con el fin de contribuir al diseño y validación de equipos de protección ocupacional. A través del modelado, análisis estructural y desarrollo documental, se estableció un método de evaluación integral que combina fundamentos biomecánicos, criterios normativos y viabilidad técnica, demostrando que es posible implementar localmente un sistema de ensayo robusto, funcional y adaptable a las necesidades de la industria.
- Se caracterizaron las principales condiciones de riesgo para la cabeza en entornos industriales mediante el análisis de datos de accidentes, estudios biomecánicos recientes y criterios de lesión (HIC, BrIC y CP). Esta caracterización permitió identificar los mecanismos de impacto más frecuentes derivados de resbalones y tropiezos, estableciendo una base sólida para el diseño del protocolo de pruebas.
- Se identificaron las ubicaciones y magnitudes específicas de los impactos más representativos mediante simulaciones cinemáticas y cálculos basados en la masa y la velocidad promedio de una caída industrial. Los resultados indicaron que los impactos con mayor riesgo ocurren en la región occipital y presentan ángulos de incidencia entre 4.5° y 8° , coincidiendo con valores reportados en la literatura.
- Se modeló físicamente el comportamiento del cuerpo y la región cervical de un operario industrial durante caídas y tropiezos. Para ello, se desarrolló un sistema cabeza-cuello inspirado en el diseño del Hybrid III ATD por medio de un péndulo invertido, adaptado con materiales de bajo costo y alta disponibilidad local, manteniendo un comportamiento mecánico equivalente. El diseño final demostró la capacidad de reproducir las condiciones de impacto de manera controlada y repetible.
- A través de la comparación entre los resultados analíticos, experimentales y numéricos, se evaluaron las áreas de mejora en los estándares actuales de seguridad. Se comprobó que las pruebas verticales propuestas por la norma ANSI Z89.1 no contemplan los escenarios oblicuos y laterales característicos de caídas reales en entornos industriales,

lo que evidencia la necesidad de actualizar los métodos de ensayo para una mejor correlación con los mecanismos de lesión identificados.

- Se redactó un protocolo de pruebas estandarizado que integra los hallazgos obtenidos y adapta los lineamientos de la norma ANSI Z89.1 a las condiciones reales de la industria local. Este protocolo permite evaluar cascos industriales bajo escenarios de impacto más representativos, lo que contribuye al fortalecimiento de la capacidad de prueba y desarrollo de la empresa interesada.
- Se elaboraron los manuales técnicos complementarios —de pruebas y de ensamblaje— con el propósito de asegurar la trazabilidad, la repetibilidad y la seguridad del sistema de ensayo. Su implementación garantiza la correcta operación, mantenimiento y reproducción del sistema de pruebas, facilitando su transferencia tecnológica a futuros proyectos.
- Los resultados analíticos y de simulación confirmaron que los componentes diseñados cumplen con los requisitos estructurales y de seguridad establecidos. Los factores de seguridad superaron los valores mínimos definidos (FS mayor a 5). Se verificó una vida útil infinita en régimen de carga cíclica. Además, el costo total de materiales (estimado en Q11,282.09), se mantuvo por debajo del límite presupuestado, validando la viabilidad económica del diseño.
- El sistema de pruebas desarrollado representa una contribución significativa al fortalecimiento de la infraestructura nacional para la evaluación de cascos industriales. Su carácter modular, bajo costo y compatibilidad con materiales locales lo convierten en una herramienta reproducible y escalable para futuras investigaciones sobre seguridad ocupacional a escala mundial.

- Se recomienda continuar la evaluación de materiales alternativos de bajo costo para el cuello y el headform, priorizando aquellos con propiedades mecánicas similares a las del Hybrid III ATD, pero con mayor disponibilidad local. Esto facilitará la fabricación a nivel nacional y reducirá la dependencia de equipos importados.
- Es recomendable que la empresa interesada integre el protocolo de pruebas dentro de su proceso de desarrollo de cascos, de modo que se convierta en una herramienta de validación interna para nuevos diseños. Esto no solo reforzará la calidad de los productos, sino que posicionará a la empresa como pionera en pruebas biomecánicas en la región.
- Finalmente, se aconseja mantener la documentación técnica actualizada, ampliando los manuales de pruebas y ensamblaje conforme se realicen nuevas iteraciones o modificaciones al sistema. La actualización constante de esta documentación asegurará la trazabilidad y reproducibilidad del proceso en futuras investigaciones.

- Bian, K., & Mao, H. (2020). Mechanisms and variances of rotation-induced brain injury: a parametric investigation between head kinematics and brain strain. *Biomech. Model. Mechanobiol.*, 19(6), 2323-2341.
- Biophlox Laboratories. (2025). Helmet Impact Absorption Testing Machine RK00000037. <https://www.biophlox.com/lab-equipment/general-lab-equipment/lab-others/Helmet-Impact-Absorption-Testing-Machine-RK00000037>
- Bottlang, M., DiGiacomo, G., Tsai, S., & Madey, S. (2022). Effect of helmet design on impact performance of industrial safety helmets. *Heliyon*, 8(8).
- Bureau of Labor Statistics (BLS). (2023). Employment status of the civilian noninstitutional population by disability status and selected characteristics, 2022 annual averages. <https://www.bls.gov/cps/cpsaat18b.htm>
- Caccese, V., Ferguson, J. R., & Edgecomb, M. A. (2016). Development of a drop test system for evaluating head impact protection in helmets. *Journal of Testing and Evaluation*, 44(2), 674-686. <https://doi.org/10.1520/JTE20140208>
- Carrillo Peralta, P. A. (2021). *Evaluación de efectos de impactos en llaves de corte de puentes chilenos* [Tesis doctoral, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/183386>
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC). (2022). Body measurements. *National Center for Health Statistics*. <https://www.cdc.gov/nchs/fastats/body-measurements.htm>
- Chan, P., Lu, Z., Rigby, P., Takhounts, E., Zhang, J., Yoganandan, N., & Pintar, F. (2007). Development of generalized linear skull fracture criterion. *20th Int. Tech. Conf. Enhanc. Saf. Veh.*, 1-11.
- Chan, P., Takhounts, E., Yoganandan, N., & Pintar, F. (2007). Development of generalized linear skull fracture criterion. *Proceedings of the 20th International Technical Conference on Enhanced Safety of Vehicles*, 1-11.
- Chang, W.-R., Leclercq, S., Lockhart, T. E., & Haslam, R. (2016). State of science: occupational slips, trips and falls on the same level. *Ergonomics*, 1-23. <https://doi.org/10.1080/00140139.2016.1157214>

- Foster, J. K., Kortge, J. O., & Wolanin, M. J. (1977). *Hybrid III-A Biomechanically-Based Crash Test Dummy* (inf. téc. N.º 770938). SAE International. <https://doi.org/10.4271/770938>
- Goutnik, M., Goeckeritz, J., Sabetta, Z., Curry, T., Willman, M., Willman, J., Currier Thomas, T., & Lucke-Wold, B. (2022). Neurotrauma prevention review: Improving helmet design and implementation. *Biomechanics*, *2*(4), 500-512.
- Hajiaghamemar, M., Ingram, J., & Margulies, S. S. (2015). Head impact kinematics and dynamic response of the head and neck during simulated falls. *Journal of Biomechanical Engineering*, *137*(9), 091005. <https://doi.org/10.1115/1.4030977>
- Henn, H.-W. (1998). Crash tests and the head injury criterion. *Teach. Math. Appl. Int. J. IMA*, *17*(4), 162-170.
- Humanetics Innovative Solutions. (2025). THOR 50th Percentile Male Dummy. <https://www.humaneticsgroup.com/products/anthropomorphic-test-devices/frontal-impact/thor-50m/thor-50m>
- International Code Council. (2021). *International Building Code (IBC) 2021* [Section 1011.5.2].
- Khalil, T. B., & Lin, T. C. (1994). *Simulation of the Hybrid III Dummy Response to Impact by Nonlinear Finite Element Analysis* (inf. téc. N.º 942227). SAE International. <https://doi.org/10.4271/942227>
- Kim, K.-J., & Ashton-Miller, J. A. (2003). Biomechanics of fall arrest using the upper extremity: age differences. *Clinical Biomechanics*, *18*(4), 311-318. [https://doi.org/10.1016/s0268-0033\(03\)00005-6](https://doi.org/10.1016/s0268-0033(03)00005-6)
- Kleiven, S. (2013). Why most traumatic brain injuries are not caused by linear acceleration but skull fractures are. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *1*, 15.
- Mertz, H. J. (1985). Biofidelity of the hybrid III head. *SAE Technical Paper Series*, (851245).
- Mueller, B. A., Rowson, S., & Duma, S. M. (2015). Evaluation of HIC and BrIC as head injury criteria in impact simulations. *Traffic Injury Prevention*, *16*(4), 370-376. <https://doi.org/10.1080/15389588.2014.949347>
- Norton, R. L. (2013). *Diseño de maquinaria: síntesis y análisis de máquinas y mecanismos* (5.ª ed.). McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Paci, M., Infante-Rivard, C., & Marcoux, J. (2017). Traumatic brain injury in the workplace. *Canadian journal of neurological sciences*, *44*(5).
- Pan, C. S., Wimer, B. M., Welcome, D. E., & Wu, J. Z. (2021). An approach to characterize the impact absorption performance of construction helmets in top impact. *Journal of testing and evaluation*, *49*(3), 2162-2174.
- Rapsang, A. G., & Shyam, D. C. (2015). Scoring Systems of Severity in Patients with Multiple Trauma. *Cirugía Española (English Edition)*, *93*(4), 213-221. <https://doi.org/10.1016/j.cireng.2013.12.031>
- Romero, A., Galvín, P., & Domínguez, L. (2014). Fórmulas para el cálculo del factor de impacto de estructuras semienterradas en líneas de ferrocarril de alta velocidad. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, *30*(3), 188-193. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2013.06.008>
- Rowson, S., & Duma, S. M. (2013a). Brain injury prediction: assessing the combined probability of concussion using linear and rotational head acceleration. *Annals of Biomedical Engineering*, *41*(5), 873-882. <https://doi.org/10.1007/s10439-012-0731-0>
- Rowson, S., Campolettano, E. T., Duma, S. M., Stemper, B., Shah, A., Harezlak, J., Riggen, L., Mihalik, J. P., Brooks, A., Cameron, K. L., et al. (2020). Concussion risk between individual football players: survival analysis of recurrent events and non-events. *Annals of biomedical engineering*, *48*, 2626-2638.

- Rowson, S., & Duma, S. M. (2013b). Brain injury prediction: assessing the combined probability of concussion using linear and rotational head acceleration. *Ann. Biomed. Eng.*, *41*(5), 873-882.
- Seidi, M., Hajiaghameh, M., & Margulies, S. S. (2025). Comparison of head impact test methods for evaluating fall-induced head injuries. *Accident Analysis and Prevention*, *195*, 107340. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2025.107340>
- Takhounts, E., et al. (2013). Development of brain injury criteria (BrIC). *SAE Technical Paper*. <https://doi.org/10.4271/2013-22-0010>
- Takhounts, E. G., Craig, M. J., Moorhouse, K., Mcfadden, J., & Hasija, V. (2013). Development of brain injury criteria (BrIC) (No). En *SAE Technical Paper*. NHTSA.
- United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). (2009). Hybrid III 50th Percentile Male Dummy Drawings. https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2009/wp29/HIII_50th_Male_Drawings.pdf
- Virzi Mariotti, G. (2019). Head Injury Criterion: Mini Review. *American Journal of Biomedical Science & Research*, *5*(1). <https://biomedgrid.com/pdf/AJBSR.MS.ID.000957.pdf>
- Wang, C., Li, Y., & Zhang, L. (2025). Dynamic characteristics of head impacts from falls off ladders and platforms. *Safety Science*, *172*, 106258. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2025.106258>
- Yu, X., Baker, C. E., & Ghajari, M. (2024). Head impact location, speed and angle from falls and trips in the workplace. *Annals of Biomedical Engineering*, *52*(10), 2687-2702. <https://doi.org/10.1007/s10439-024-03123-5>
- Yu, X., Baker, C. E., & Ghajari, M. (2023). Head impact location, speed and angle from falls and trips in the workplace. *Ann. Biomed. Eng.*, *52*(10), 2687-2702.
- Zeng, W., McMahon, J., Shedd, D. F., Carpenter, R., & Salzar, R. S. (2023). Biofidelity assessment of the WIAMan thorax by a comparative study with Hybrid III, THOR, and PMHS in frontal sled testing. *J. Biomech. Eng.*, *145*(7), 1-32.
- Zhan, X., Li, Y., Liu, Y., Domel, A. G., Alizadeh, H. V., Raymond, S. J., Ruan, J., Barbat, S., Tiernan, S., Gevaert, O., et al. (2021). The relationship between brain injury criteria and brain strain across different types of head impacts can be different. *Journal of the Royal Society Interface*, *18*(179), 20210260.
- ZL Tester. (2025). Head Mould / Helmet Head Form. <https://zltester.en.made-in-china.com/product/XUJrbKBxsRVm/China-Head-Mould-Helmet-Head-Form.html>

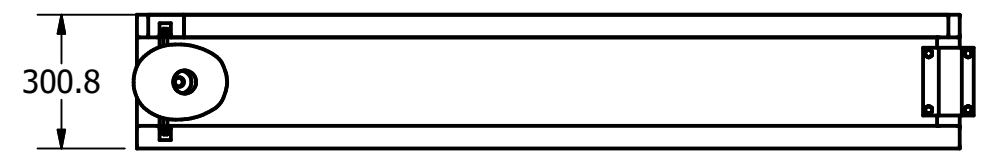
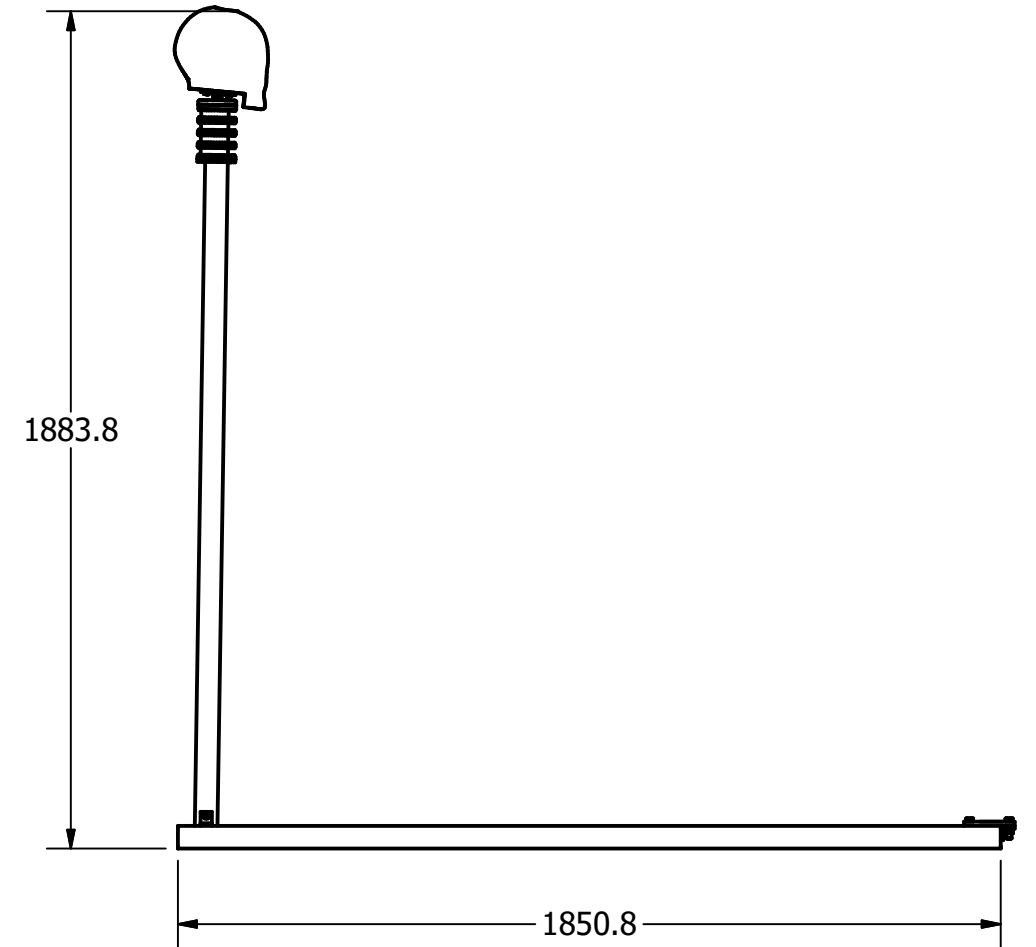
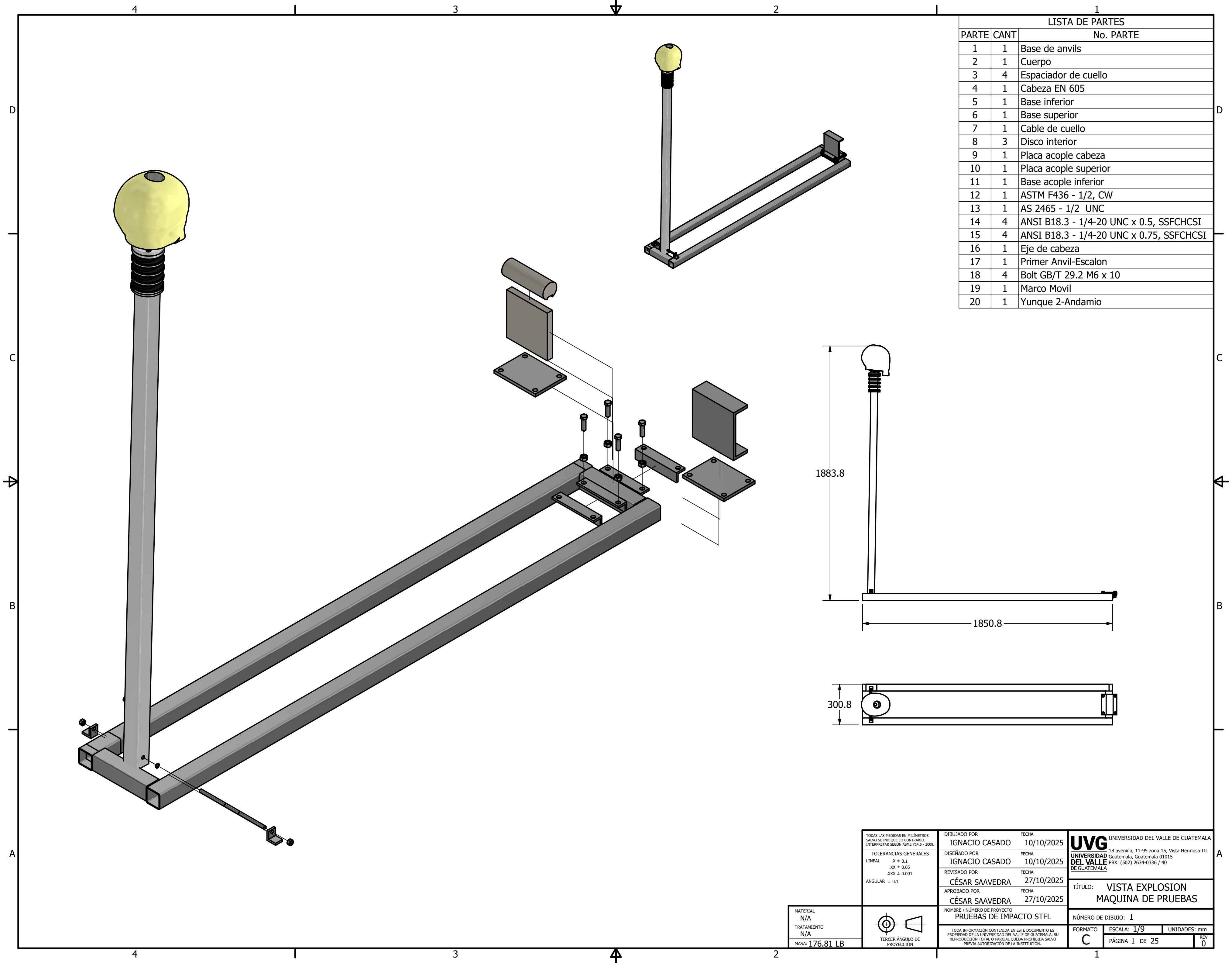
En los anexos, se presentan los planos de construcción correspondientes al diseño desarrollado, incluyendo el ensamble general del sistema, la lista completa de materiales (BOM), las vistas en explosión de los distintos módulos y subensambles. También muestra las dimensiones generales de los elementos estructurales. Esta información permite comprender de forma detallada la configuración del sistema y sirve para su fabricación.

Seguido, se incluye el protocolo de pruebas diseñado para la máquina física, en el cual se establecen los procedimientos, condiciones y parámetros necesarios para la ejecución de ensayos de impacto. Este protocolo está orientado a garantizar que la empresa interesada pueda replicar las pruebas de manera consistente, asegurando la validez, la repetibilidad y la comparabilidad de los resultados obtenidos.

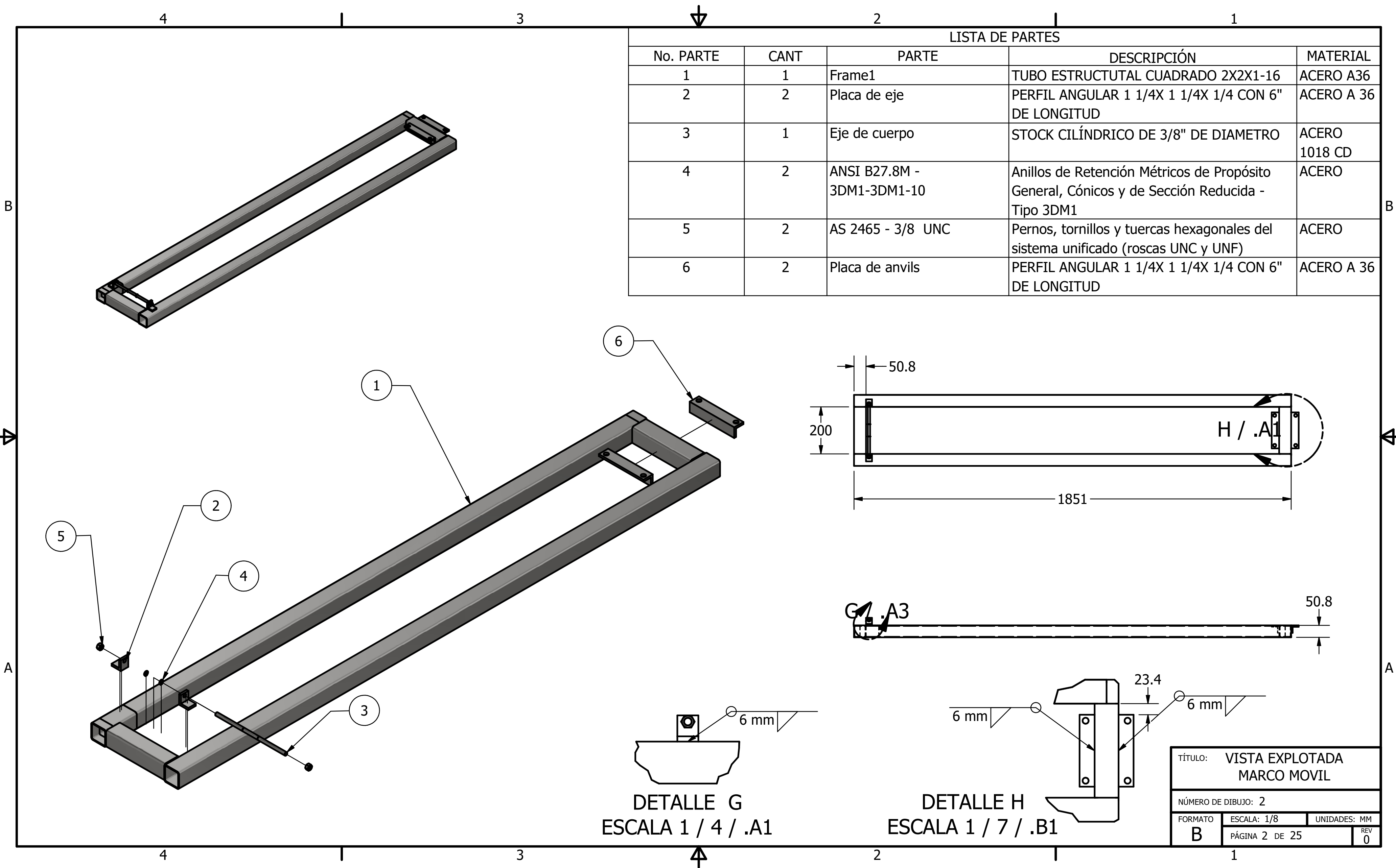
De igual manera, se presenta el manual de ensamble del sistema, con énfasis en el componente del cuello desarrollado en el proyecto. En este se describen los pasos, herramientas y consideraciones necesarias para la correcta construcción e integración de los componentes, facilitando la reproducción física del diseño por parte de terceros sin ambigüedades.

Finalmente, se incorporan las cotizaciones de los materiales utilizados, específicamente de las secciones de acero requeridas para la fabricación del sistema. Estas fueron proporcionadas por el proveedor Aceros Suecos S.A. y permiten estimar de manera clara el costo asociado a la manufactura del diseño propuesto.

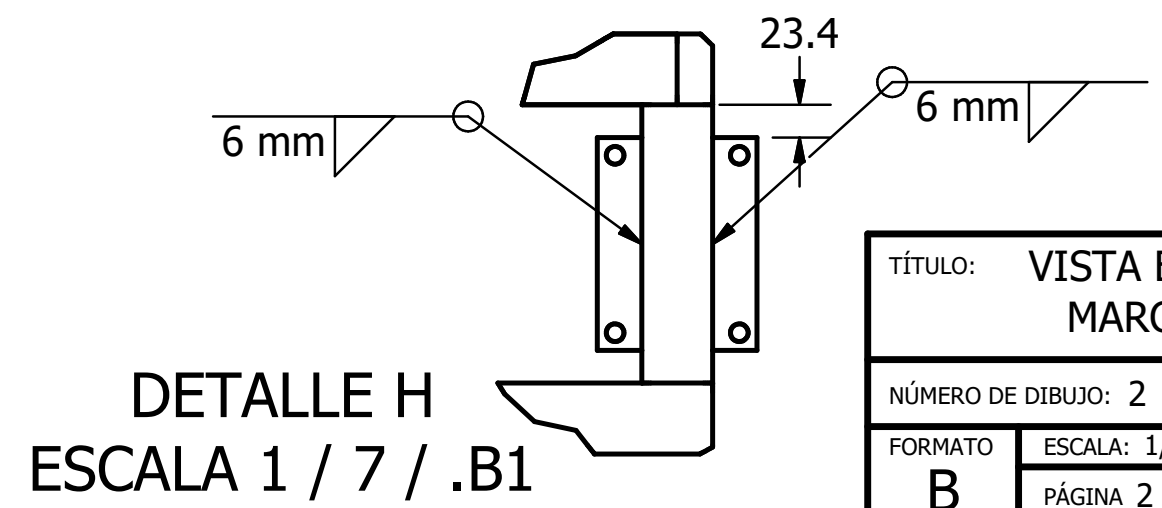
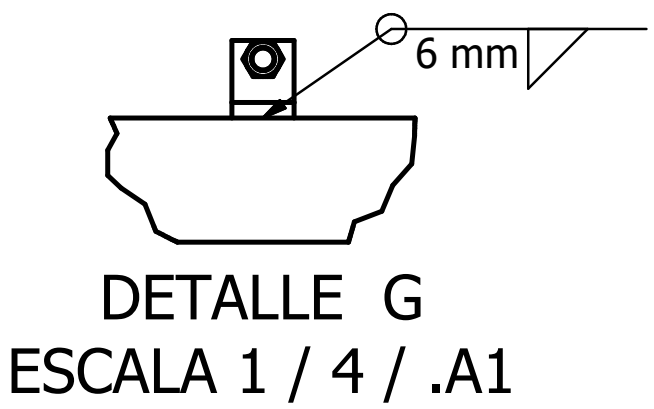
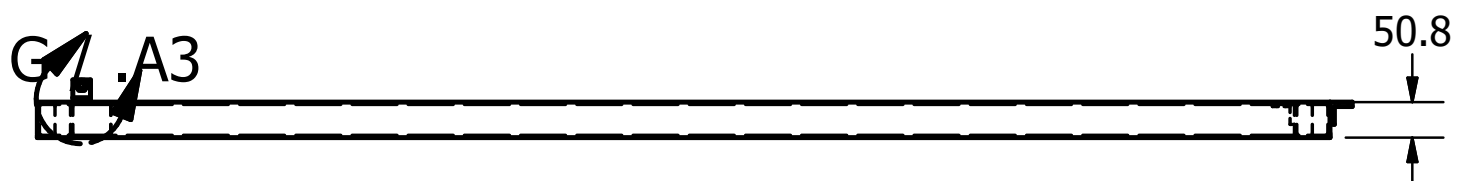
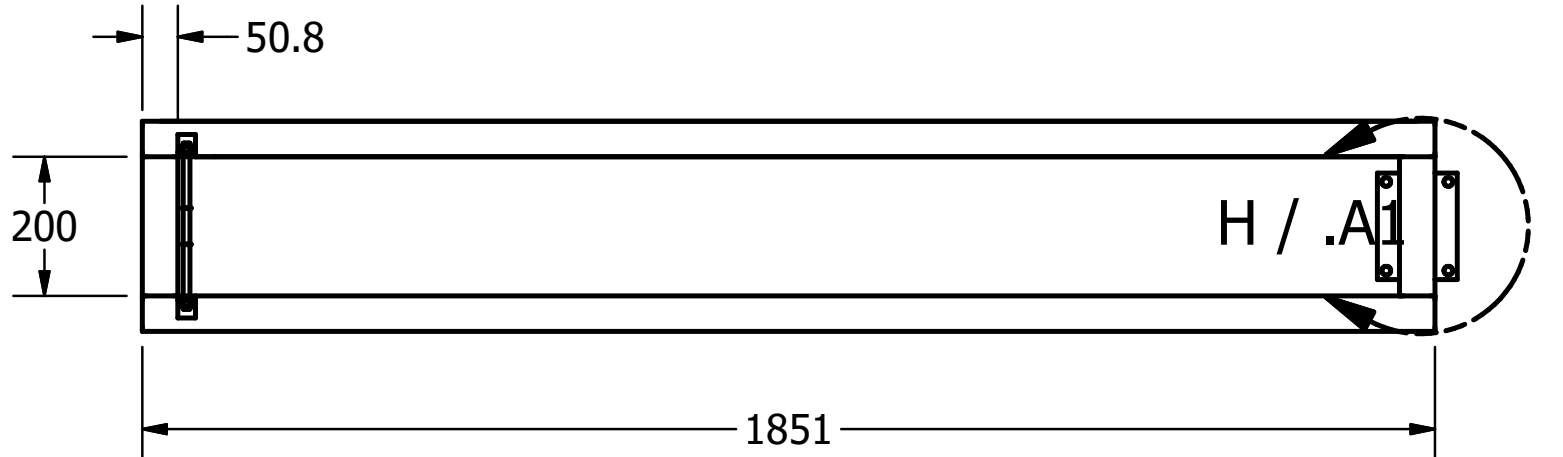
LISTA DE PARTES		
PARTE	CANT	No. PARTE
1	1	Base de anvils
2	1	Cuerpo
3	4	Espaciador de cuello
4	1	Cabeza EN 605
5	1	Base inferior
6	1	Base superior
7	1	Cable de cuello
8	3	Disco interior
9	1	Placa acople cabeza
10	1	Placa acople superior
11	1	Base acople inferior
12	1	ASTM F436 - 1/2, CW
13	1	AS 2465 - 1/2 UNC
14	4	ANSI B18.3 - 1/4-20 UNC x 0.5, SSFCHCSI
15	4	ANSI B18.3 - 1/4-20 UNC x 0.75, SSFCHCSI
16	1	Eje de cabeza
17	1	Primer Anvil-Escalon
18	4	Bolt GB/T 29.2 M6 x 10
19	1	Marco Movil
20	1	Yunque 2-Andamio



TOLERANCIAS GENERALES LINEAL .XX ± 0.1 .XXX ± 0.05 .XXX ± 0.001 ANGULAR ± 0.1	DIBUJADO POR IGNACIO CASADO	FECHA 10/10/2025	UVG UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 DE GUATEMALA PBX: (502) 2634-0336 / 40
	DISEÑADO POR IGNACIO CASADO	FECHA 10/10/2025	
	REVISADO POR CÉSAR SAAVEDRA	FECHA 27/10/2025	
	APROBADO POR CÉSAR SAAVEDRA	FECHA 27/10/2025	
MATERIAL N/A TRATAMIENTO N/A MASA: 176.81 LB	NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO PRUEBAS DE IMPACTO STFL		TÍTULO: VISTA EXPLOSION MAQUINA DE PRUEBAS
	NÚMERO DE DIBUJO: 1		FORMATO: C
TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.			ESCALA: 1/9 UNIDADES: mm PÁGINA 1 DE 25 REV 0



LISTA DE PARTES				
No. PARTE	CANT	PARTE	DESCRIPCIÓN	MATERIAL
1	1	Frame1	TUBO ESTRUCTURAL CUADRADO 2X2X1-16	ACERO A36
2	2	Placa de eje	PERFIL ANGULAR 1 1/4X 1 1/4X 1/4 CON 6" DE LONGITUD	ACERO A 36
3	1	Eje de cuerpo	STOCK CILÍNDRICO DE 3/8" DE DIAMETRO	ACERO 1018 CD
4	2	ANSI B27.8M - 3DM1-3DM1-10	Anillos de Retención Métricos de Propósito General, Cónicos y de Sección Reducida - Tipo 3DM1	ACERO
5	2	AS 2465 - 3/8 UNC	Pernos, tornillos y tuercas hexagonales del sistema unificado (roscas UNC y UNF)	ACERO
6	2	Placa de anvils	PERFIL ANGULAR 1 1/4X 1 1/4X 1/4 CON 6" DE LONGITUD	ACERO A 36



TÍTULO: VISTA EXPLOTADA MARCO MOVIL		
NÚMERO DE DIBUJO: 2		
FORMATO	ESCALA: 1/8	UNIDADES: MM
B	PÁGINA 2 DE 25	REV 0

2



1

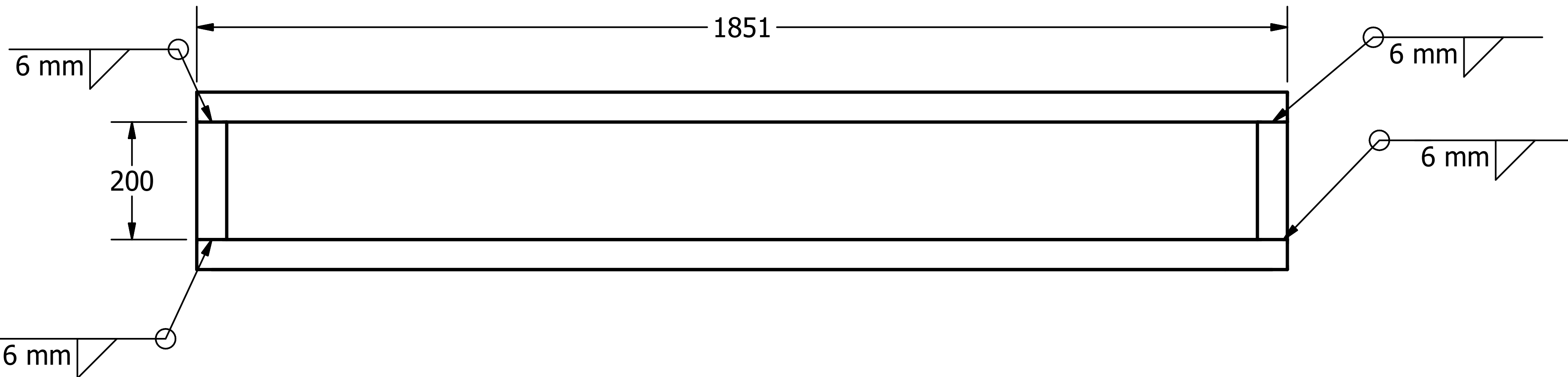
NOTA 1: LOS TUBOS CUADRADOS DEBEN IR SOLDADOS CON UNION A TOPE EN TODO SU PERÍMETRO

NOTA 2: LA SOLDADURA SE DEBE REALIZAR CON ELECTRODO $\frac{3}{32}$ E6013



B

B



A

A

2



1

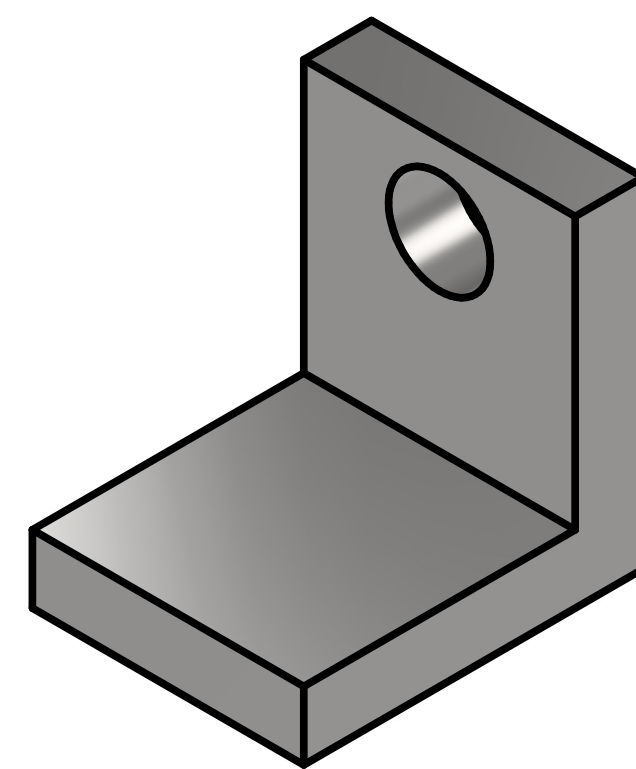
TÍTULO: MARCO MOVIL		
NÚMERO DE DIBUJO: 3		
FORMATO	ESCALA: 1/11	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 3 DE 25	REV 0

2



1

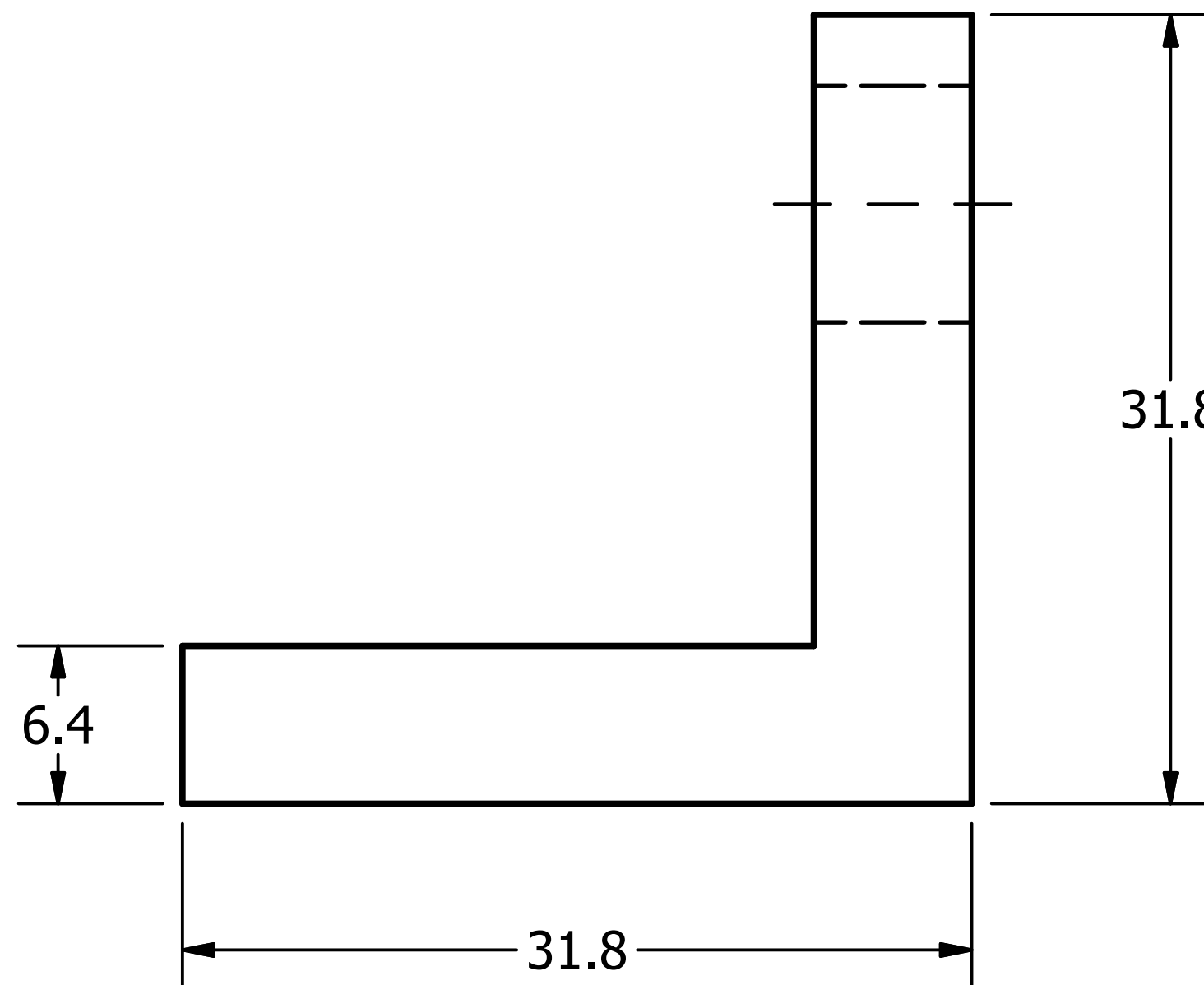
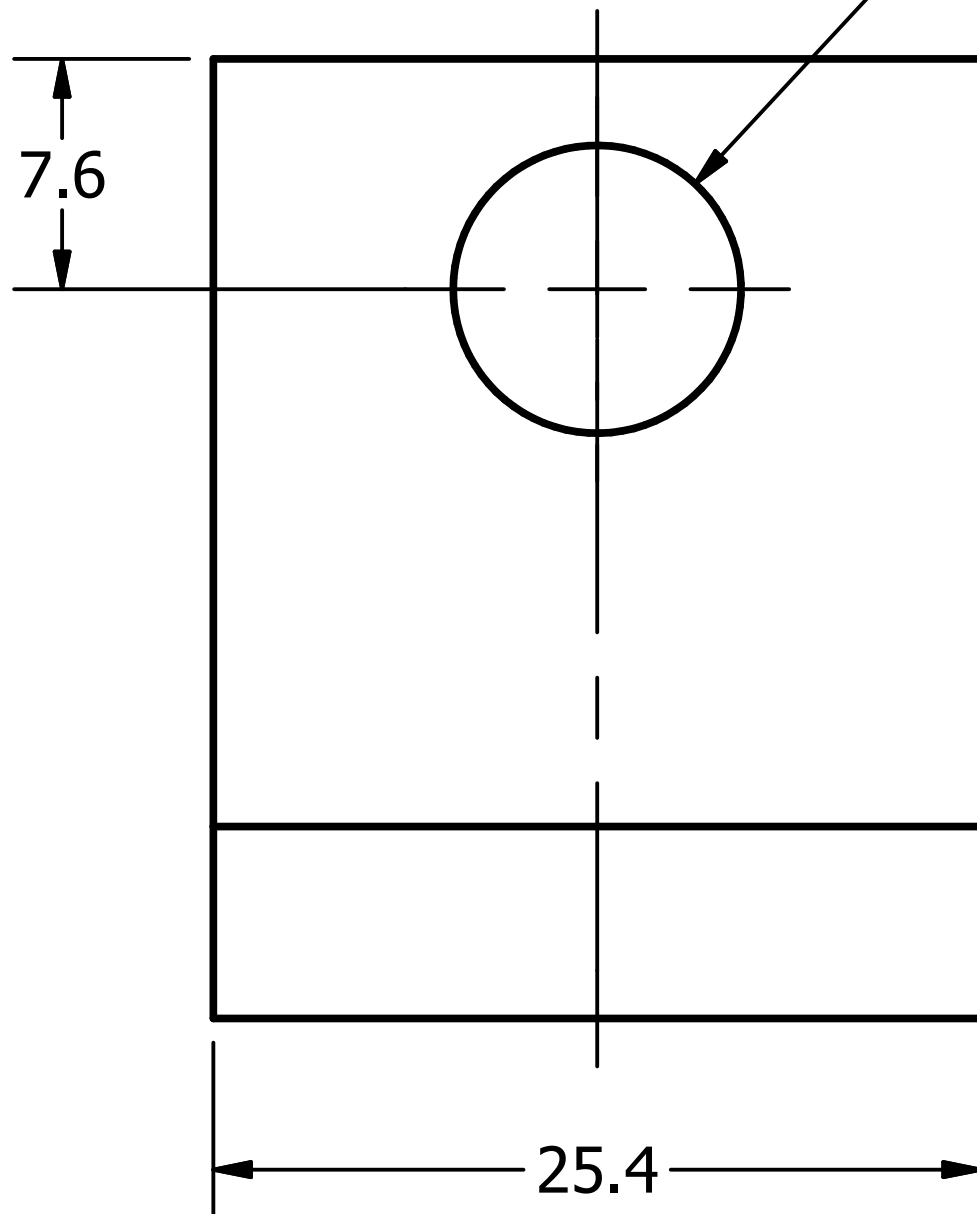
NOTA 1: LA SOLDADURA SE DEBE REALIZAR CON ELECTRODO 3/32 E6013



B

B

Ø9.5 PASANTE



A

A

2



1

TÍTULO:		PLACA DE EJE	
NÚMERO DE DIBUJO: 4			
FORMATO	ESCALA: 2:1	UNIDADES: MM	
A	PÁGINA 4 DE 25	REV 0	

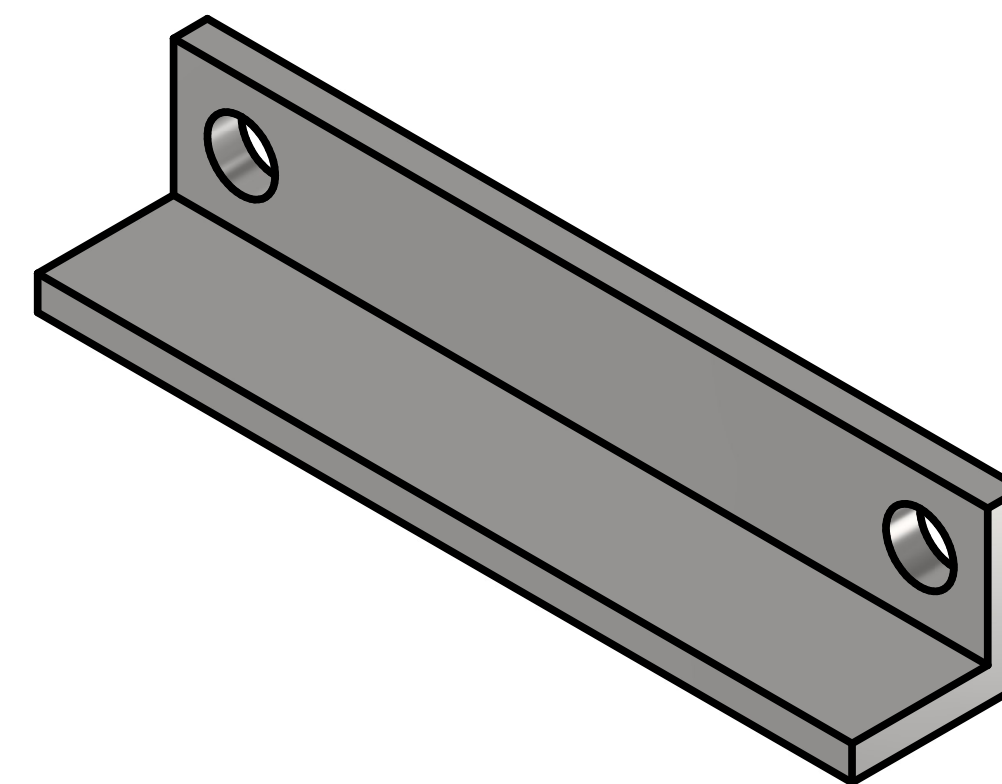
A

A

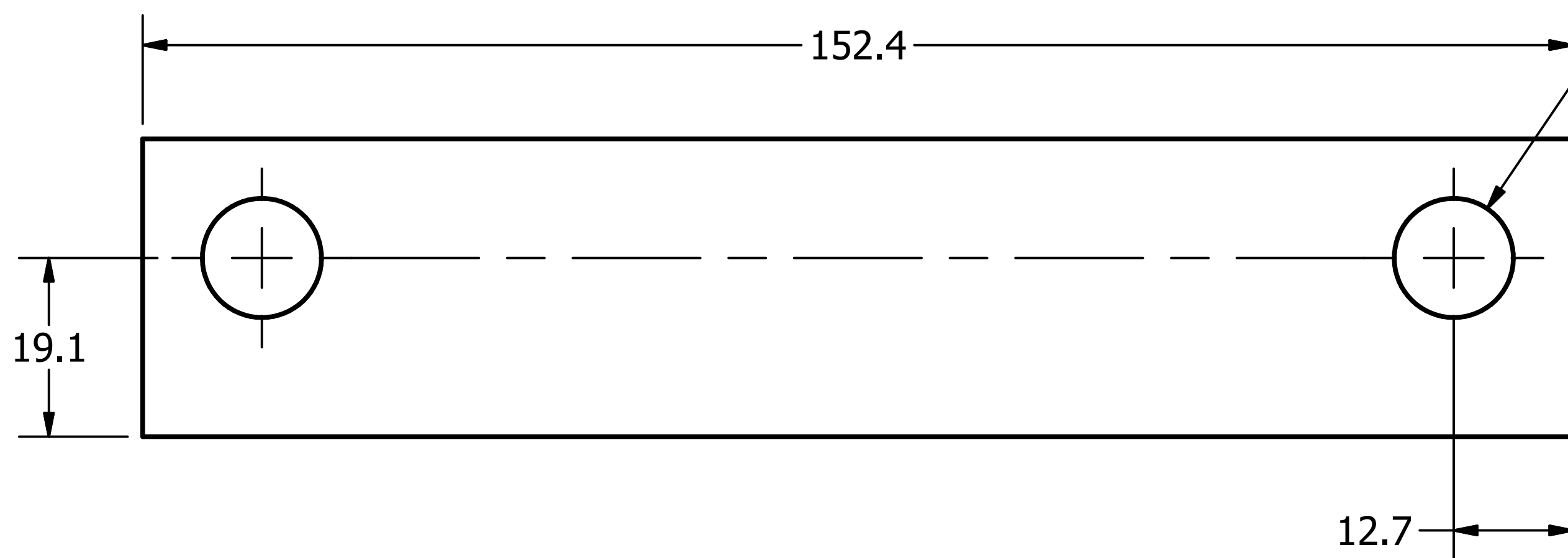
2



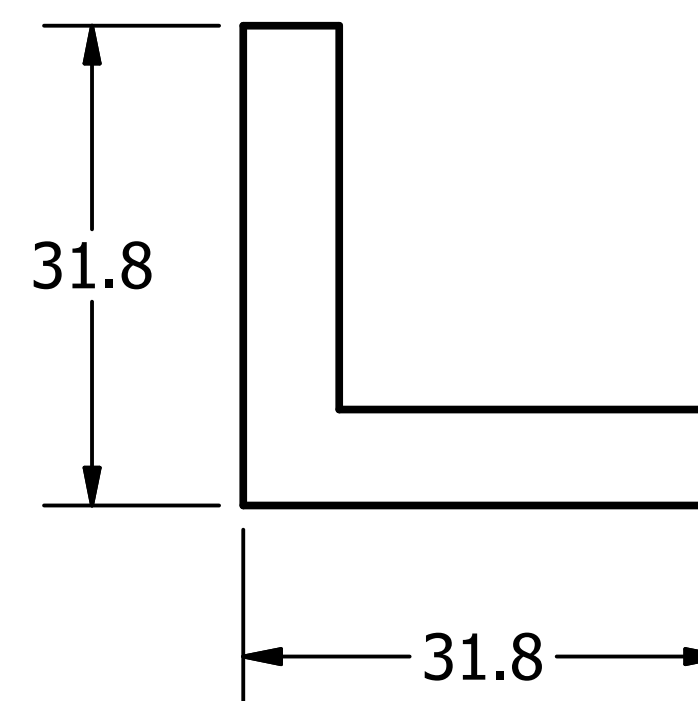
1



NOTA 1: LA SOLDADURA SE DEBE REALIZAR CON ELECTRODO 3/32 E6013



2X Ø12.7 PASANTE



B

B



A

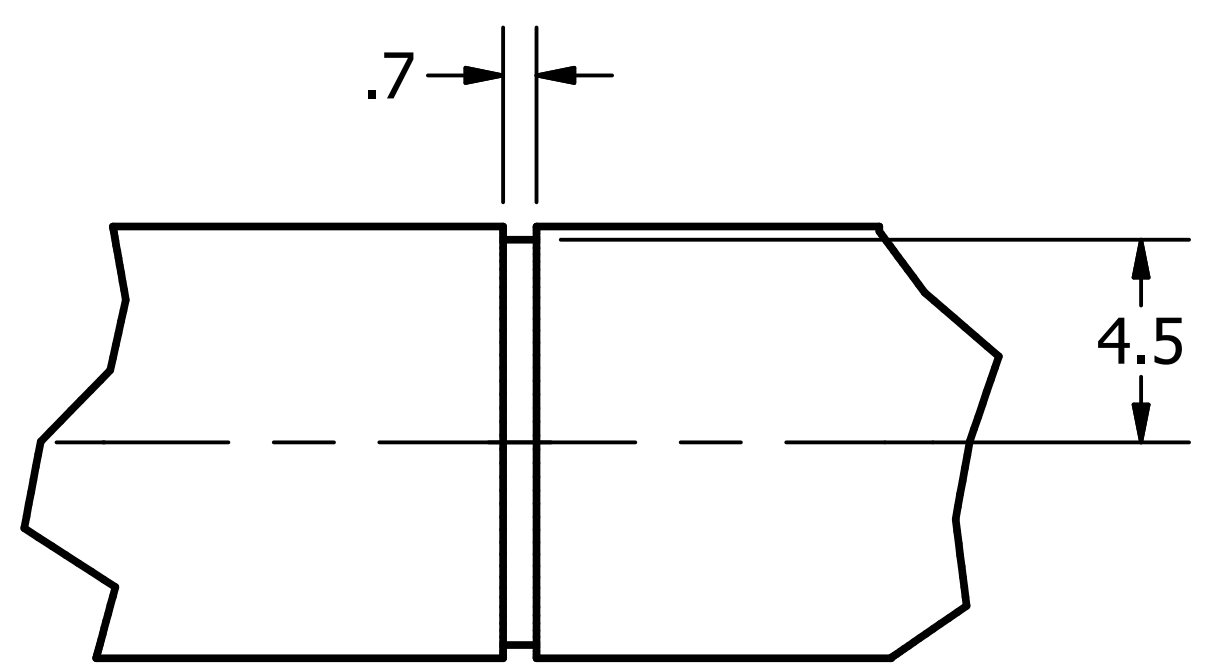
A

2

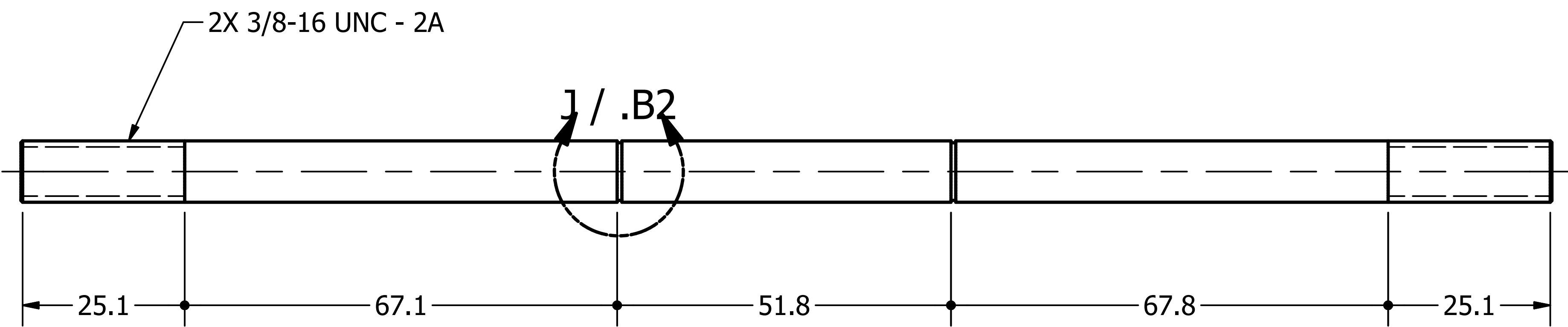
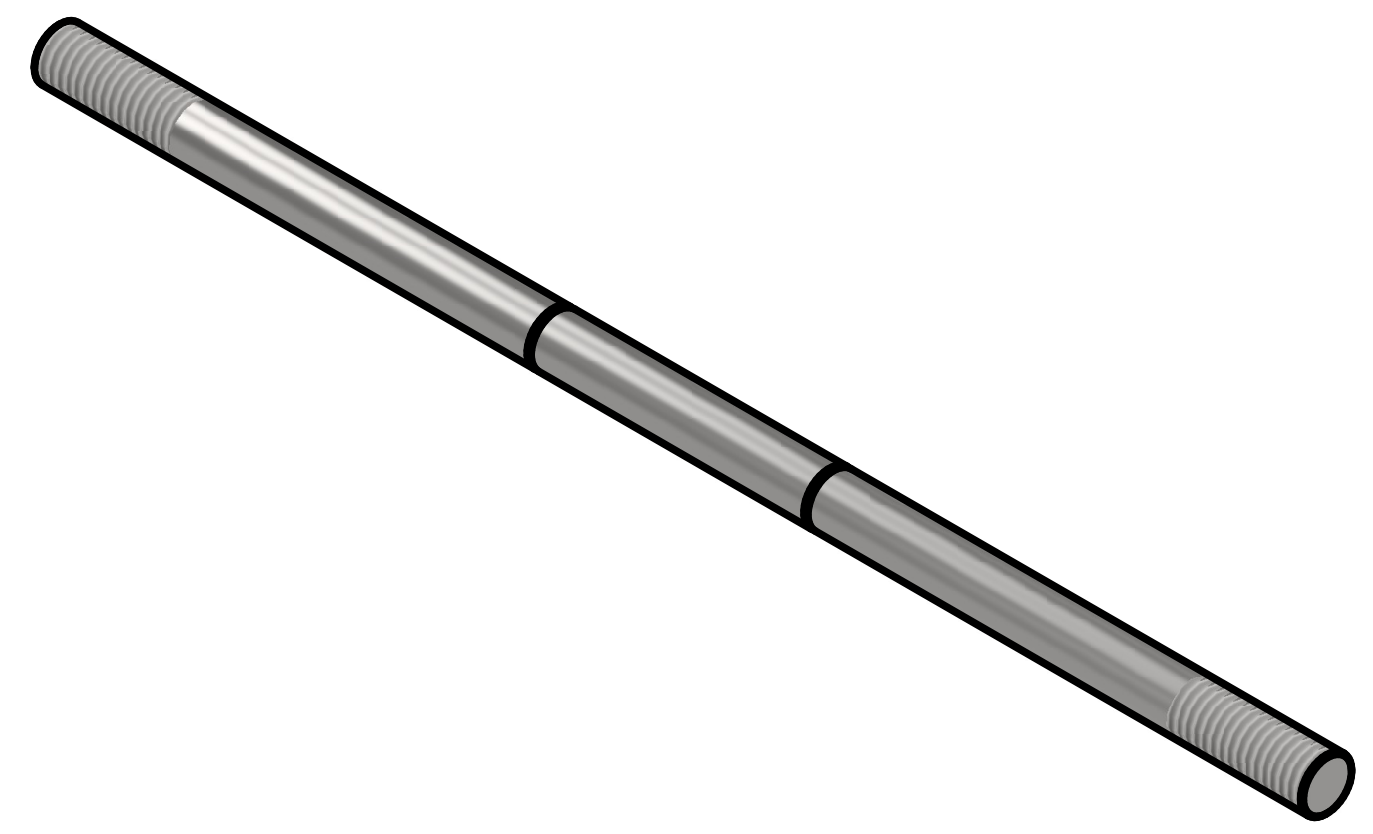


1

TÍTULO: PLACA DE ANVILS		
NÚMERO DE DIBUJO: 5		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: MM
A	PÁGINA 5 DE 25	REV 0

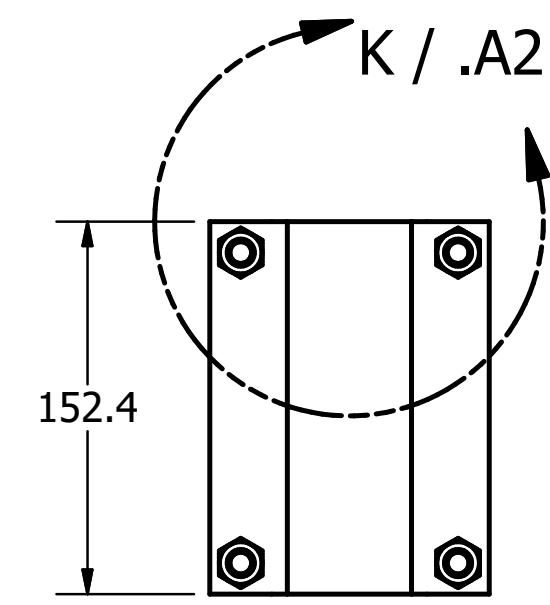
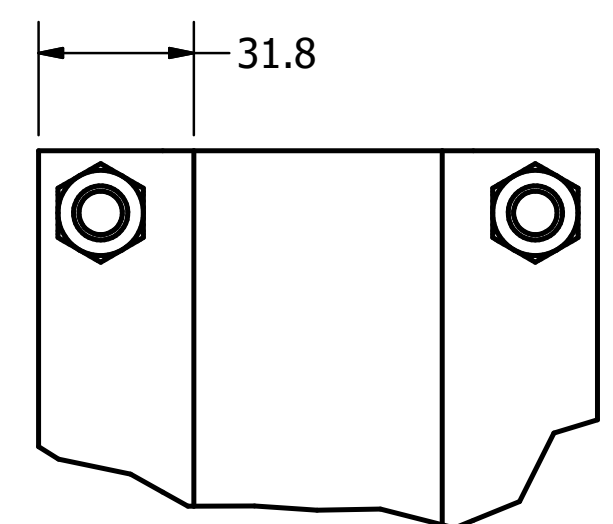
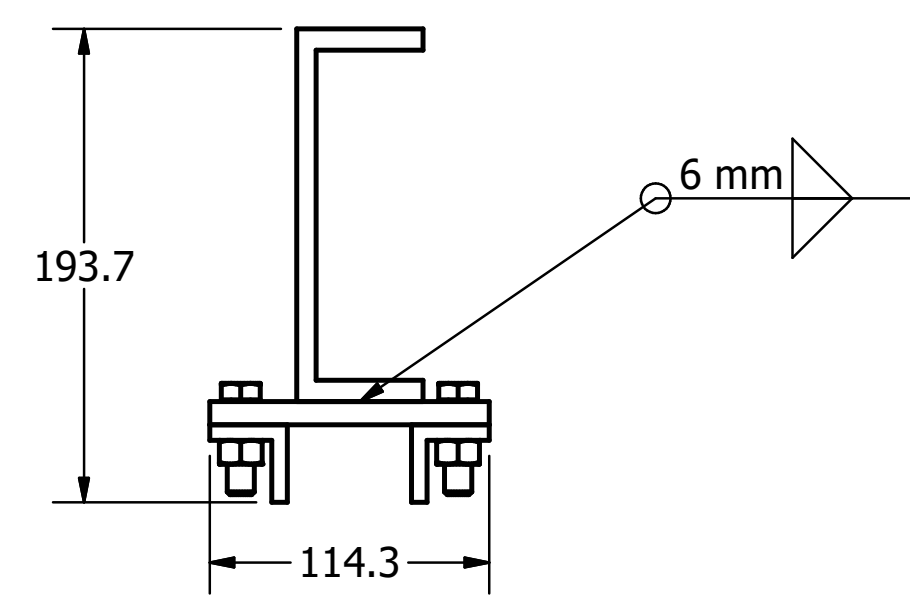
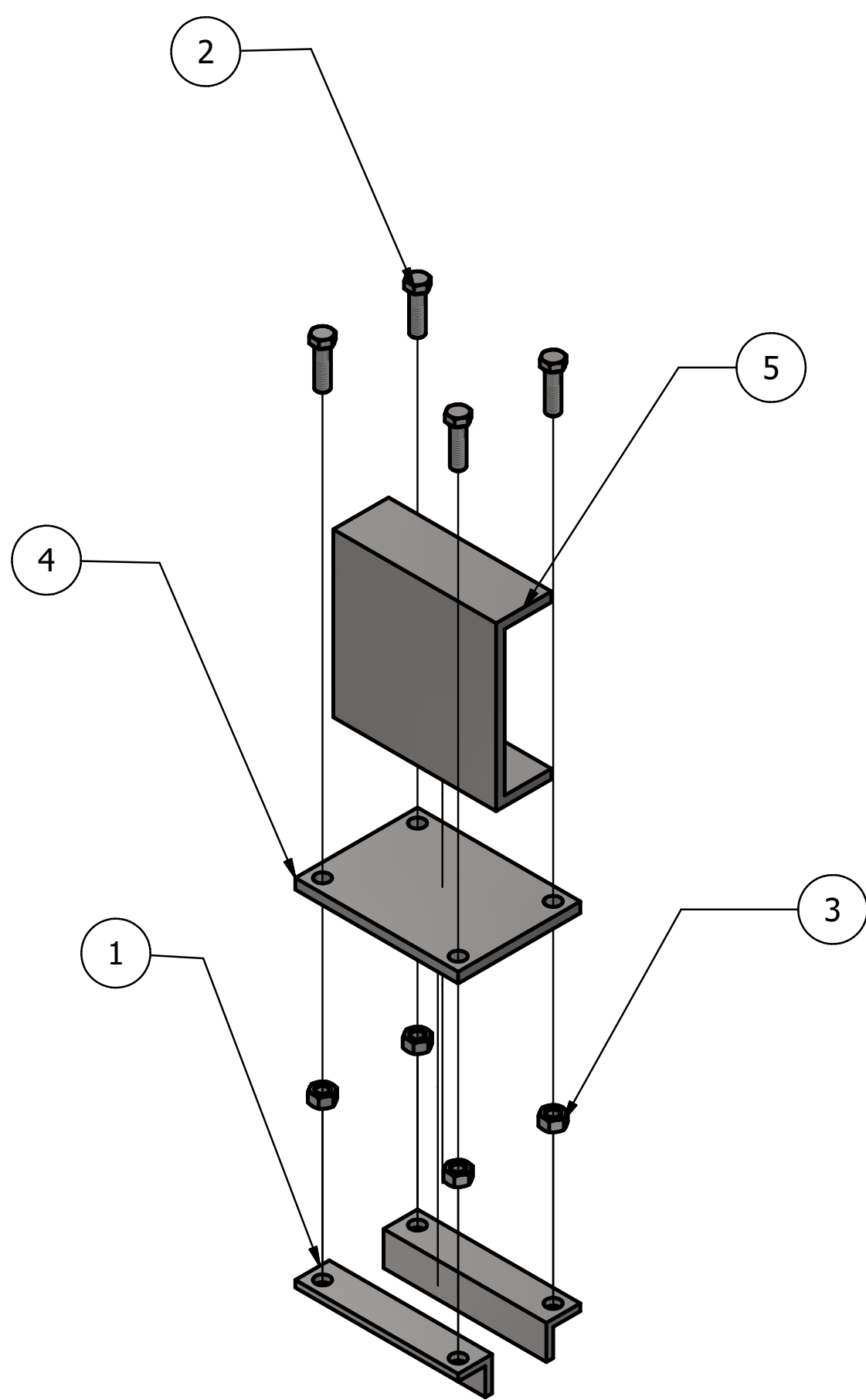
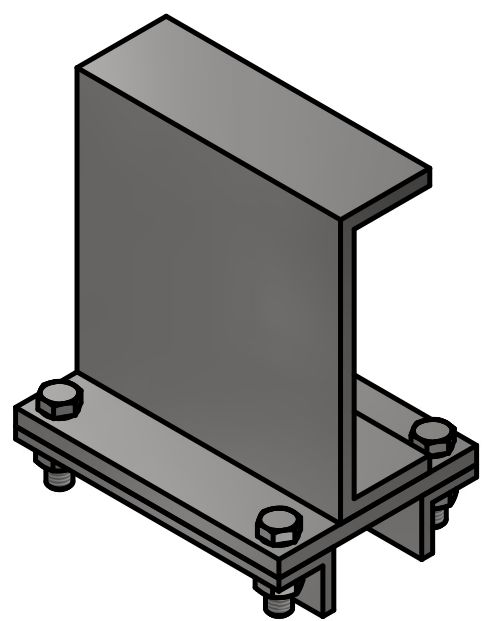


DETALLE J
 ESCALA 3 / .A1



TÍTULO: EJE CONEXION CUERPO-MARCO		
NÚMERO DE DIBUJO: 5		
FORMATO A	ESCALA: 1:1	UNIDADES: MM
	PÁGINA 6 DE 25	REV 0

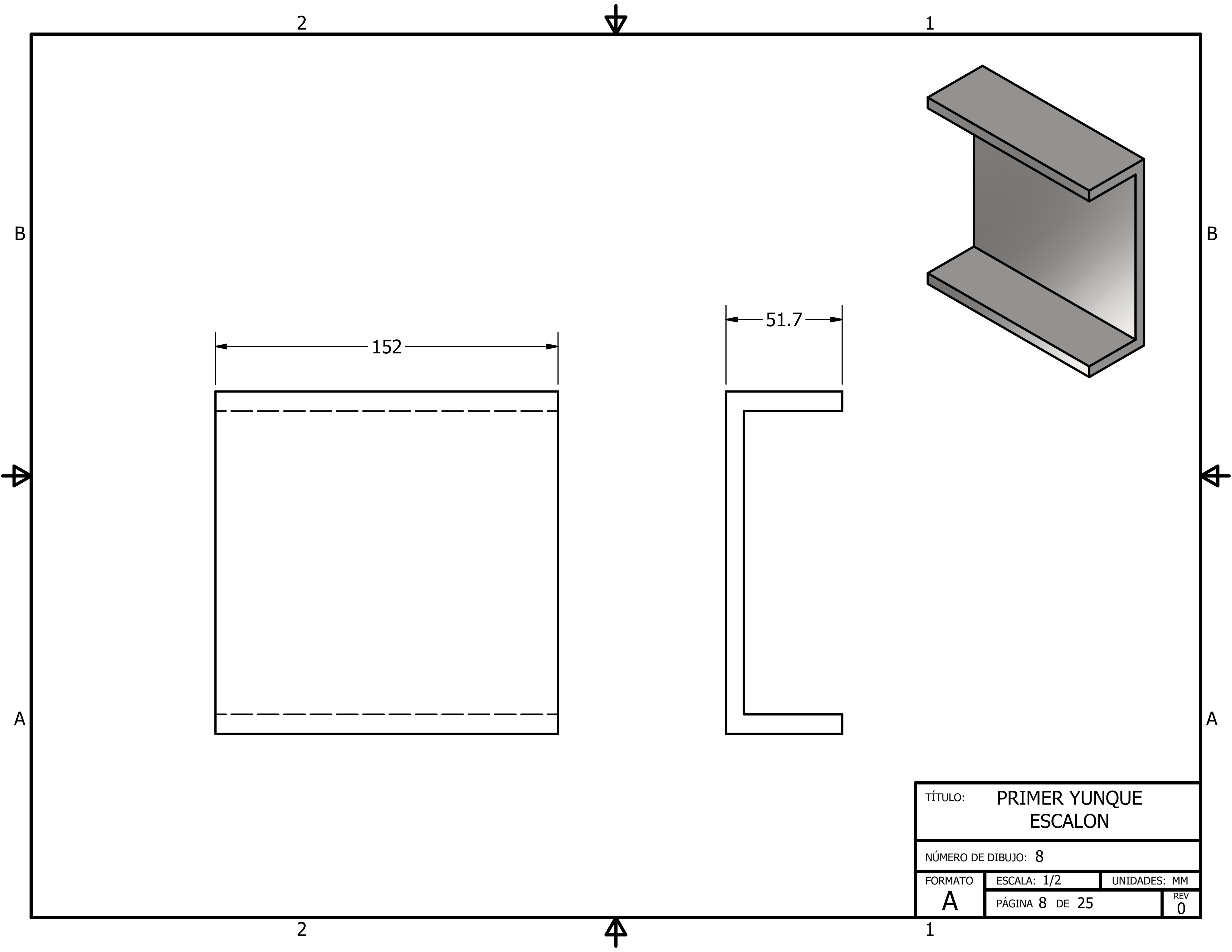
LISTA DE PARTES				
PARTE	CANT	No. PARTE	DESCRIPCIÓN	MATERIAL
1	2	Placa de anvils		ACERO 36
2	4	AS 2465 - 7/16 x 1 1/2 UNC	Pernos, tornillos y tuercas hexagonales del sistema unificado (roscas UNC y UNF)	ACERO
3	4	AS 2465 - 7/16 UNC	Pernos, tornillos y tuercas hexagonales del sistema unificado (roscas UNC y UNF)	ACERO
4	1	Base de anvils	PLACA DE ACERO 1018 CD DE 3/8" DE GROSOR	ACERO A36
5	1	Primer Anvil-Escalon	PERFILE STRUCTURAL C DE 6" DE ALTURA	ACERO A36



NOTA 1: LA SOLDADURA SE DEBE REALIZAR CON ELECTRODO 3/32 E6013

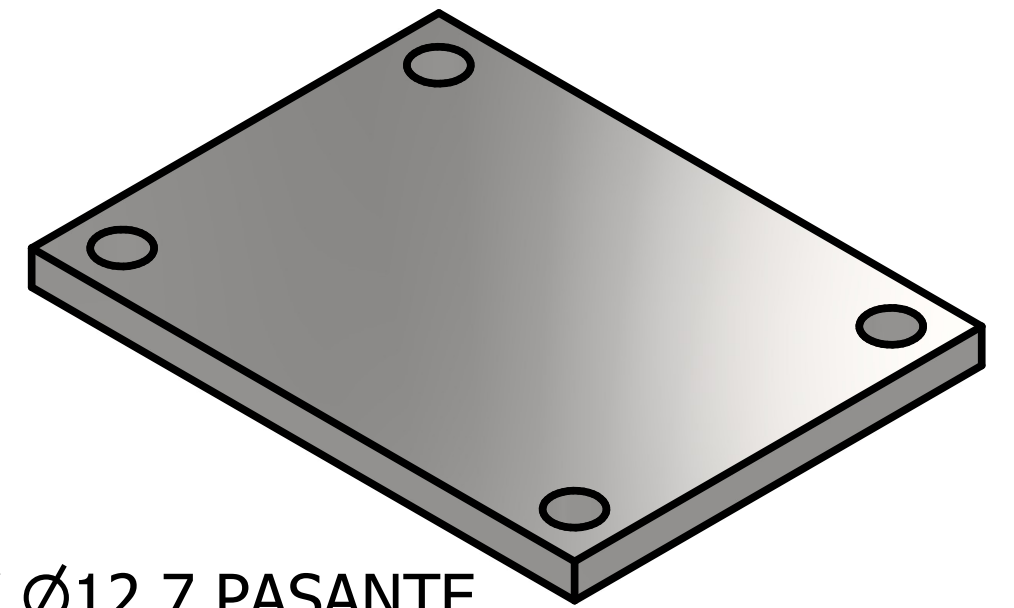
DETALLE K
ESCALA 1 / 2 / .A1

TÍTULO: CONJUNTO 1.ER YUNQUE-ESCALON		
NÚMERO DE DIBUJO: 7		
FORMATO	ESCALA: 1/5	UNIDADES: N/A
B	PÁGINA 7 DE 25	REV 0

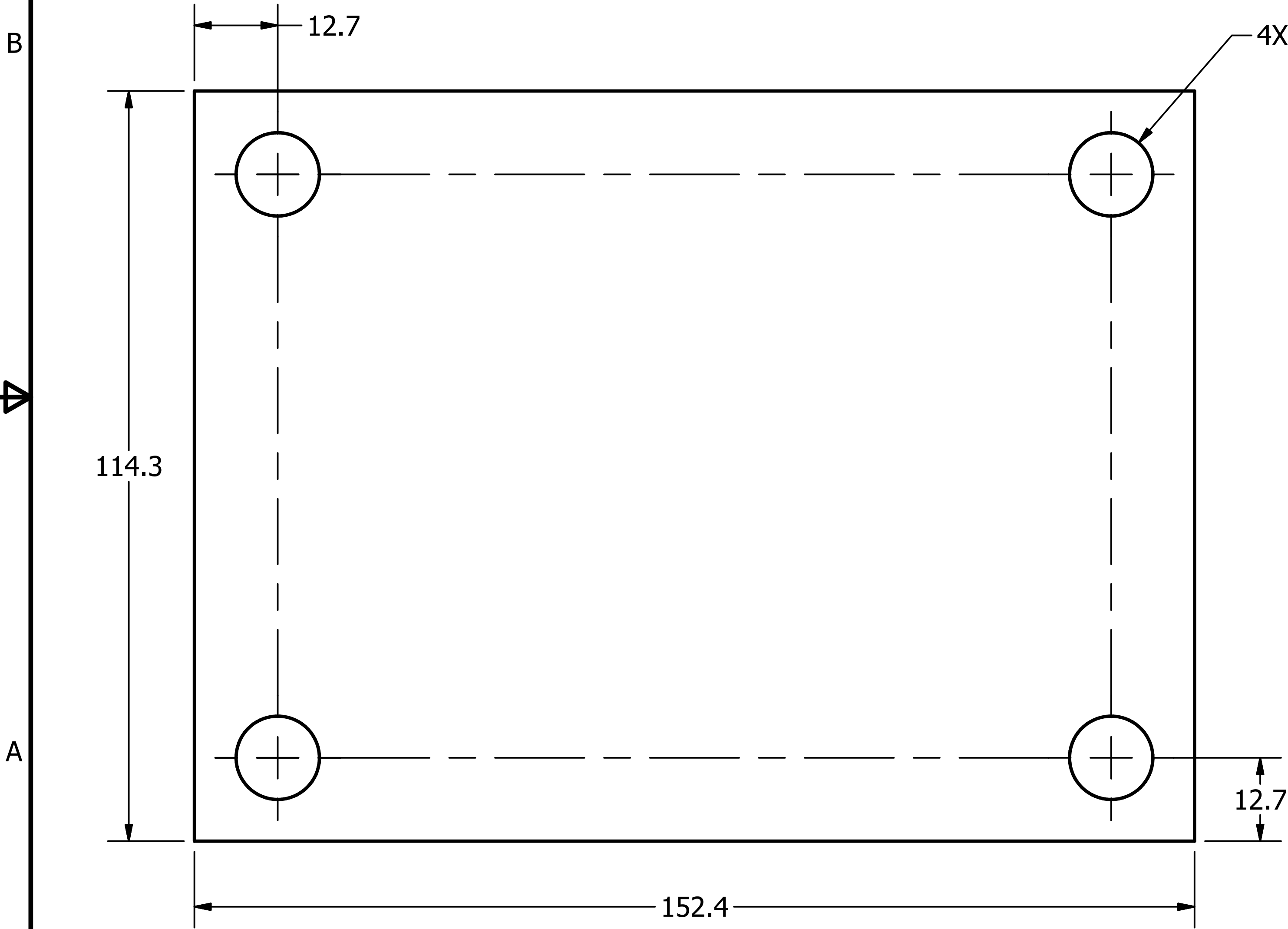


TÍTULO: PRIMER YUNQUE ESCALON		
NÚMERO DE DIBUJO: 8		
FORMATO	ESCALA: 1/2	UNIDADES: MM
A	PÁGINA 8 DE 25	REV 0

NOTA 1: ESTA PLACA ES USADA EN AMBOS YUNQUES, YA QUE ES PARTE DEL SISTEMA MODULAR



4X Ø12.7 PASANTE



TÍTULO: PLACA DE YUNQUES MODULAR		
NÚMERO DE DIBUJO: 9		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: MM
A	PÁGINA 9 DE 25	REV 0

2

1

B

B

A

A

2

1

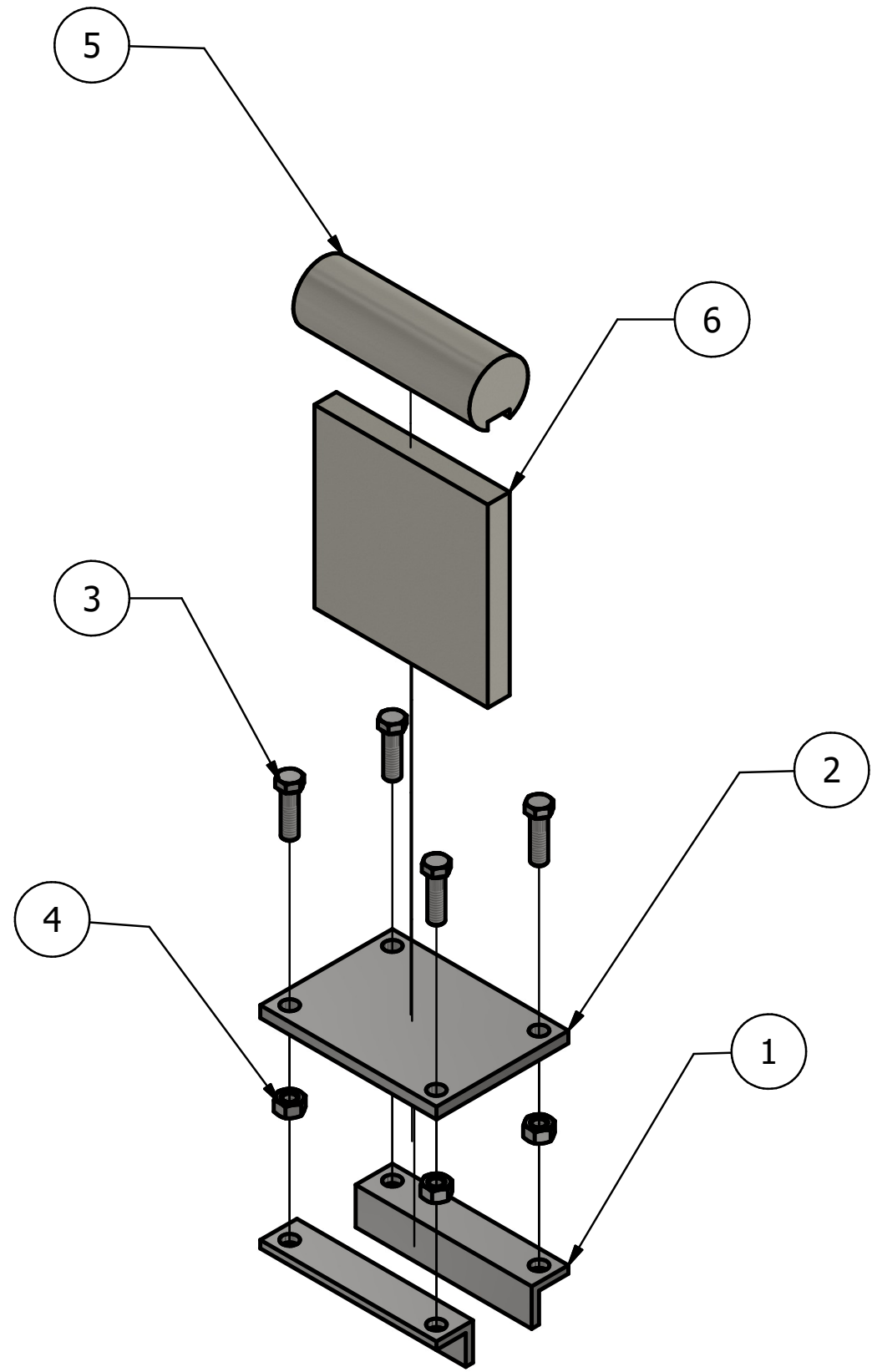
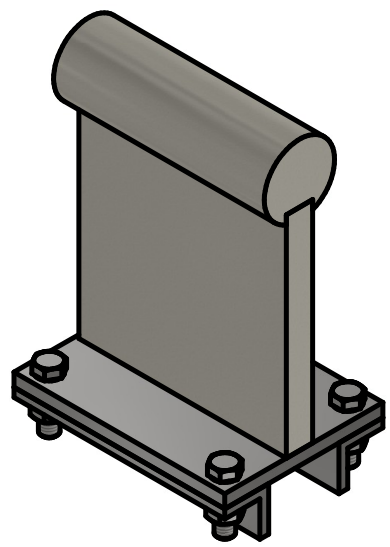


4

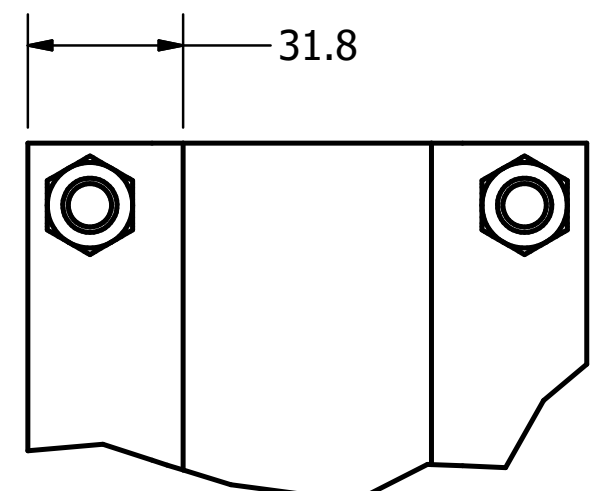
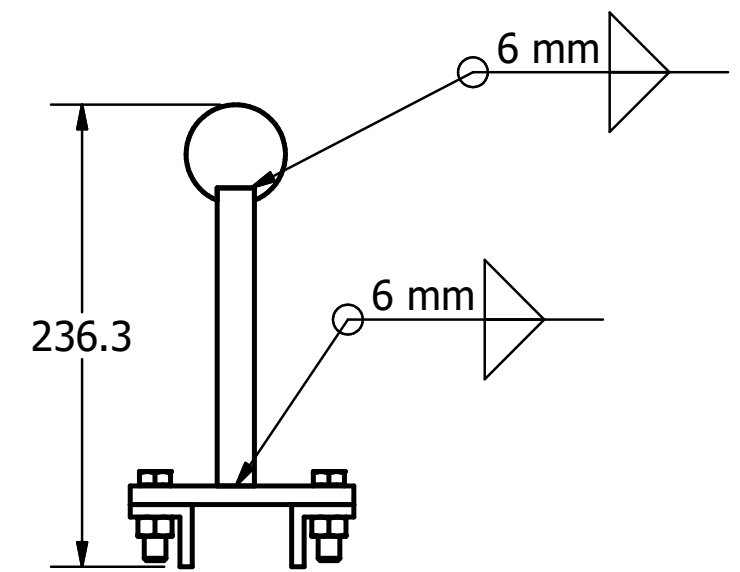
3

2

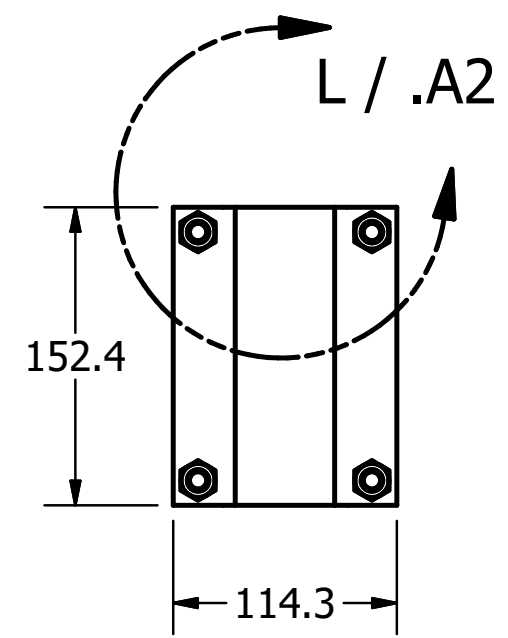
1



LISTA DE PARTES				
PARTE	CANT	No. PARTE	DESCRIPCIÓN	MATERIAL
1	2	Placa de anvils		ACERO A 36
2	1	Base de anvils	PLACA DE ACERO DE 3/8" DE GROSOR	ACERO 1018 CD
3	4	AS 2465 - 7/16 x 1 1/2 UNC	Pernos, tornillos y tuercas hexagonales del sistema unificado (roscas UNC y UNF)	ACERO
4	4	AS 2465 - 7/16 UNC	Pernos, tornillos y tuercas hexagonales del sistema unificado (roscas UNC y UNF)	ACERO
5	1	Segundo Anvil-Andamio superior	STOCK CILINDRICO DE 1" DE DIAMETRO Y 6" DE LONGITUD	ACERO 1018 CD
6	1	Segundo Anvil-Andamio Inferior	PLACA DE ACERO 1018 CD DE 3/4" DE GROSOR	ACERO 1018CD



DETALLE L
ESCALA 1 / 2 / .A1



NOTA 1: LA SOLDADURA SE DEBE REALIZAR CON ELECTRODO 3/32 E6013

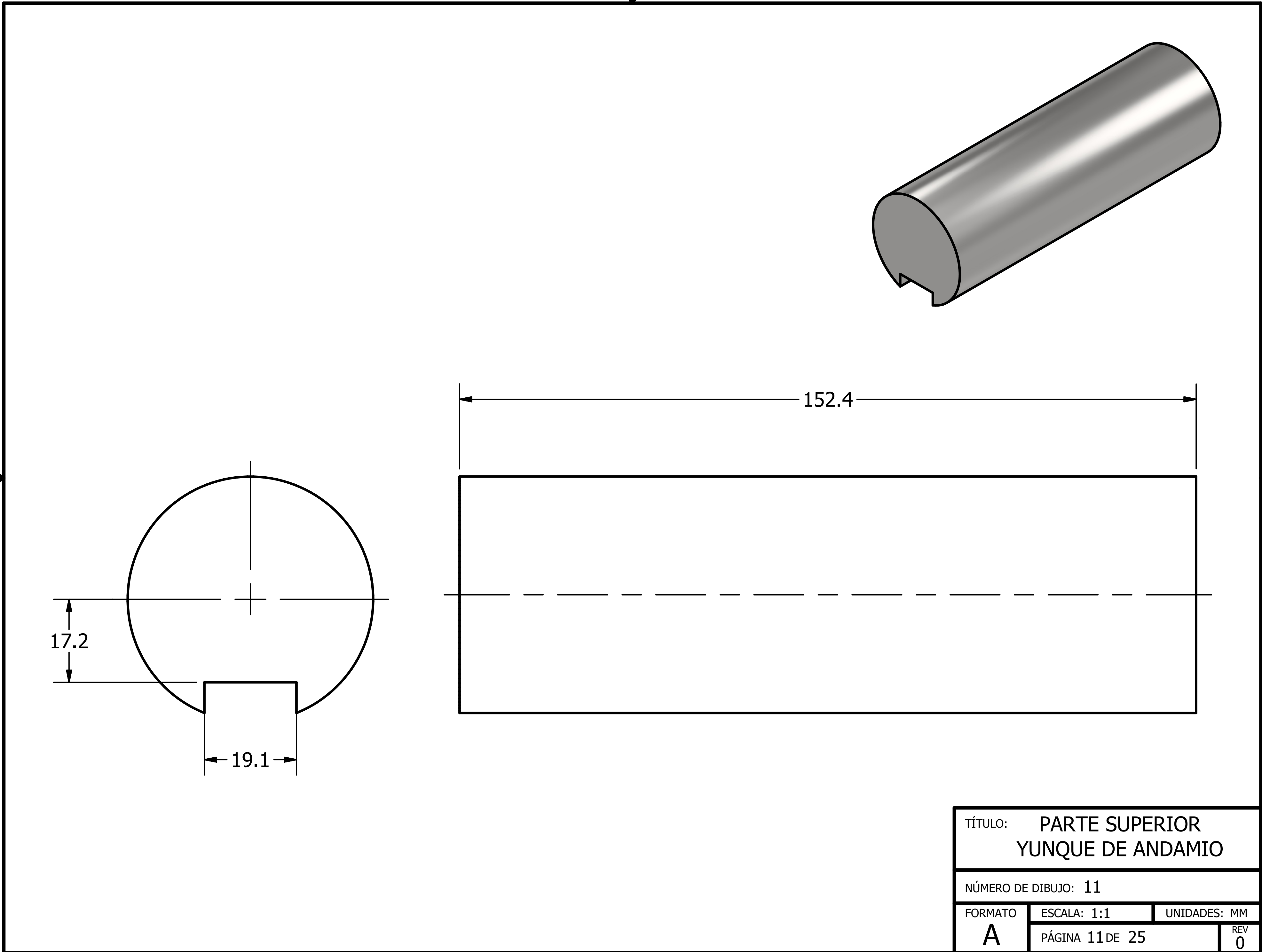
TÍTULO: CONJUNTO 2DO YUNQUE- ANDAMIO		
NÚMERO DE DIBUJO: 10		
FORMATO	ESCALA: 1/5	UNIDADES: N/A
B	PÁGINA 10 DE 25	REV 0

4

3

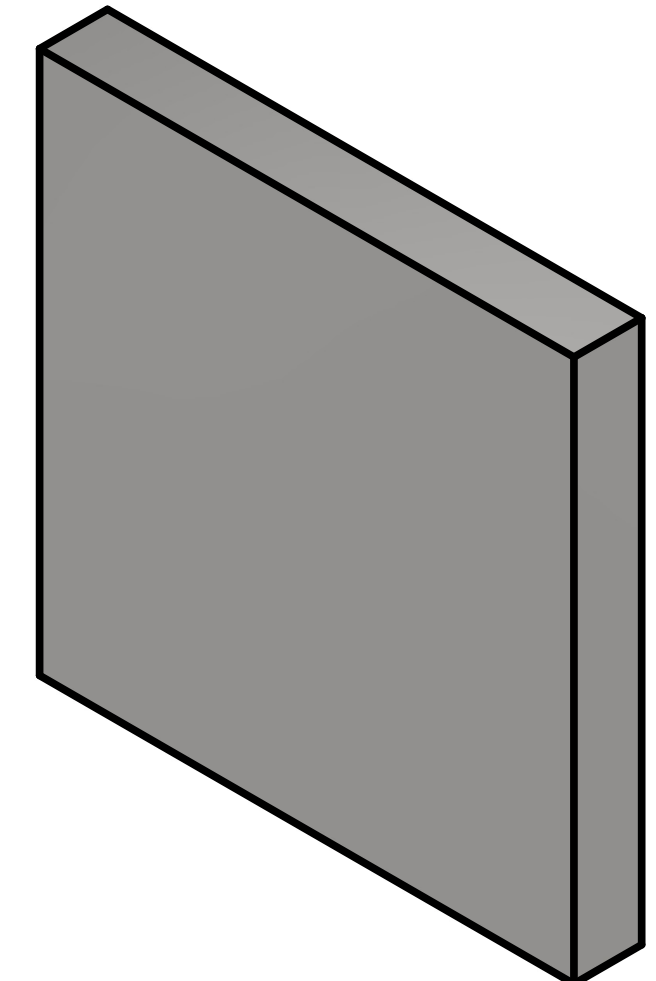
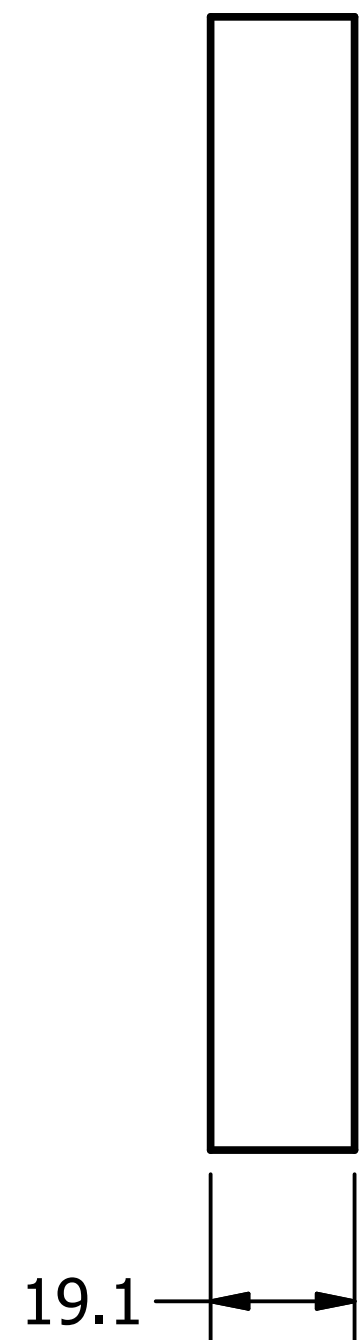
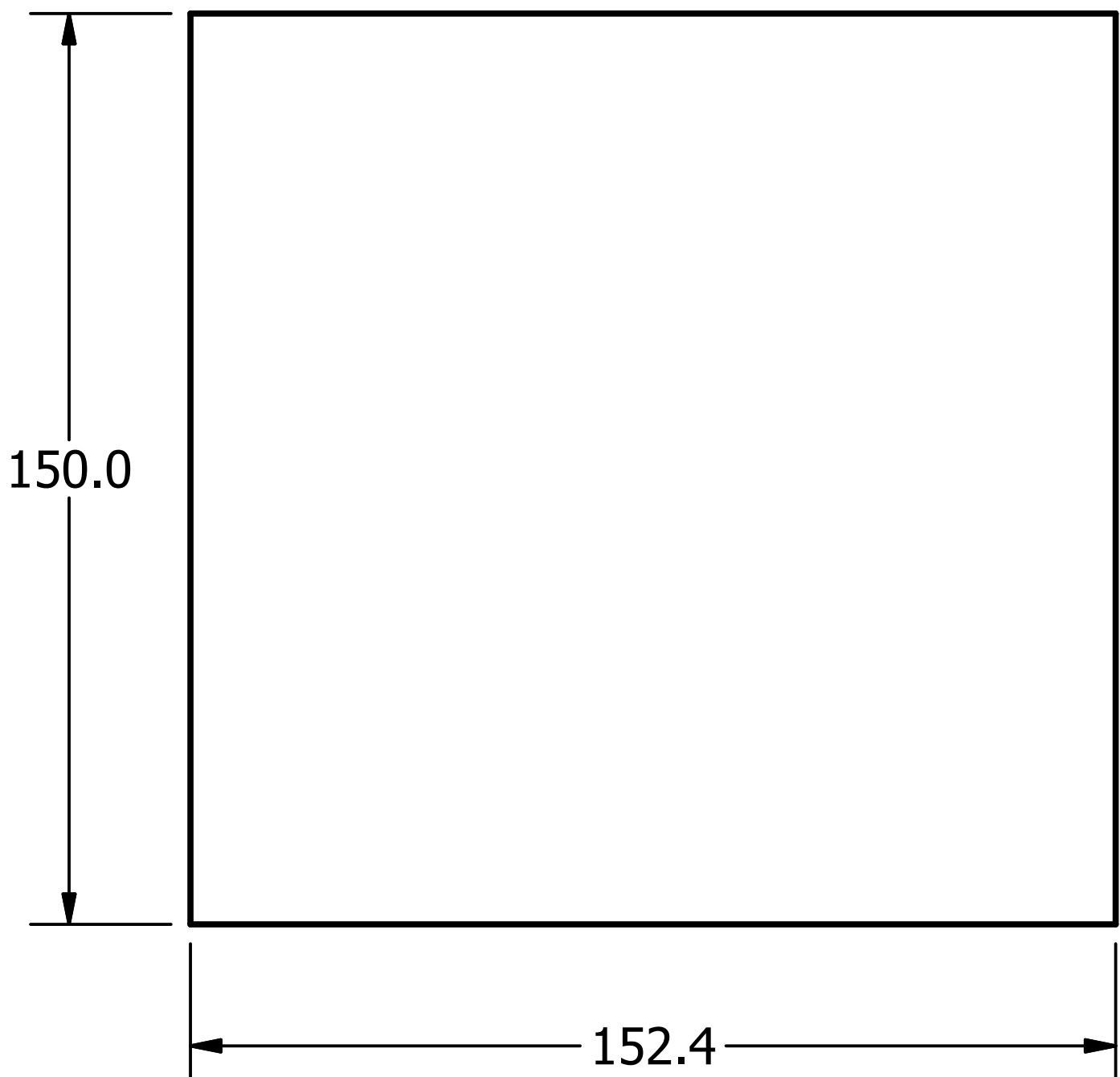
2

1

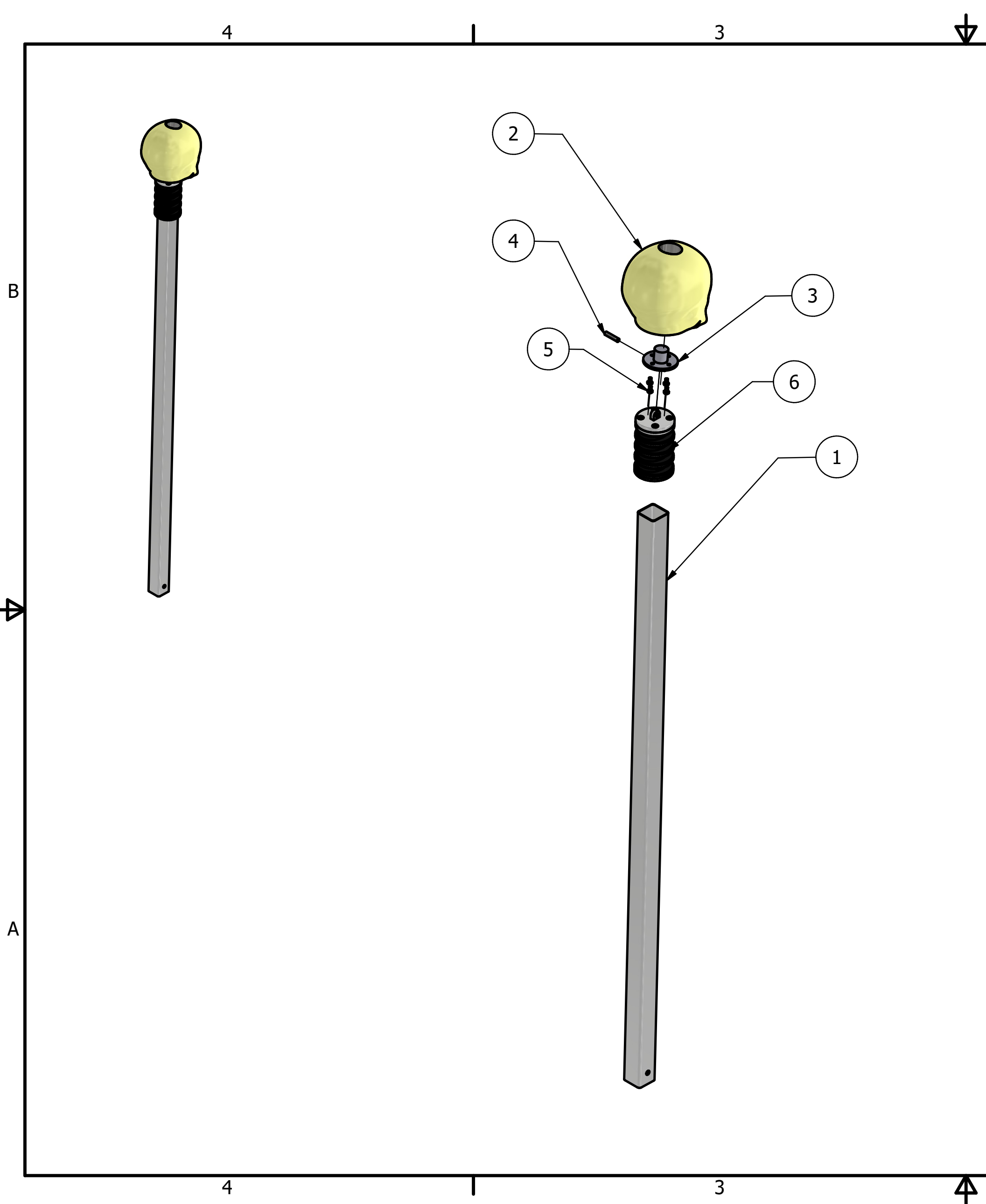


TÍTULO: PARTE SUPERIOR YUNQUE DE ANDAMIO		
NÚMERO DE DIBUJO: 11		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: MM
A	PÁGINA 11 DE 25	REV 0

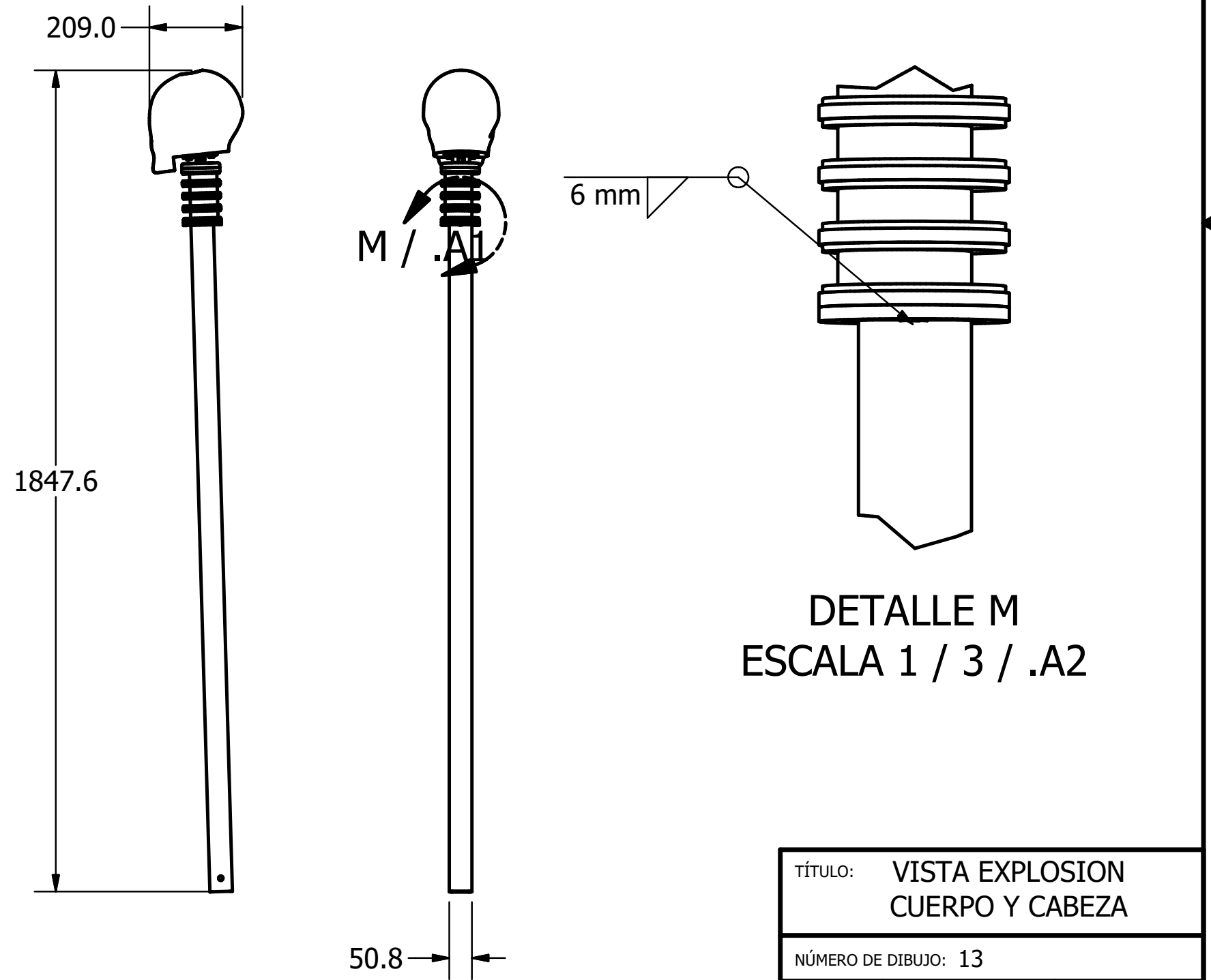
NOTA 1: ESTA PIEZA VA A ESTAR SOLDADA A LA PLACA MODULAR USANDO SOLDADURA A TOPE



TÍTULO: PARTE INFERIO YUNQUE DE ANDAMIO		
NÚMERO DE DIBUJO: 12		
FORMATO A	ESCALA: 1/2	UNIDADES: MM
	PÁGINA 12 DE 25	REV 0



LISTA DE PARTES				
PARTE	CANT	No. PARTE	DESCRIPCIÓN	MATERIAL
1	1	Cuerpo	TUBO CUADRADO DE 2X2X1/6" DE 1.5 M DE ALTURA	ACERO A36
2	1	Pruefkopf 605	USANDO CABEZA ESTANDAR UNE-EN 960:2007 TAMAÑO 605 MM	MDF
3	1	Placa acople cabeza	PLACA DE ACOPLE CABEZA-CUELLO	ACERO 1018
4	1	Eje de cabeza	STOCK CILINDRICO DE 8 MM DE DIAMETRO	ACERO 1018
5	4	Bolt GB/T 29.2 M6 x 10	Pernos hexagonales con ranura en cruz y hendidura.	ACERO
6	1	Cuello Interno	CUELLO HYBRID III	N/A



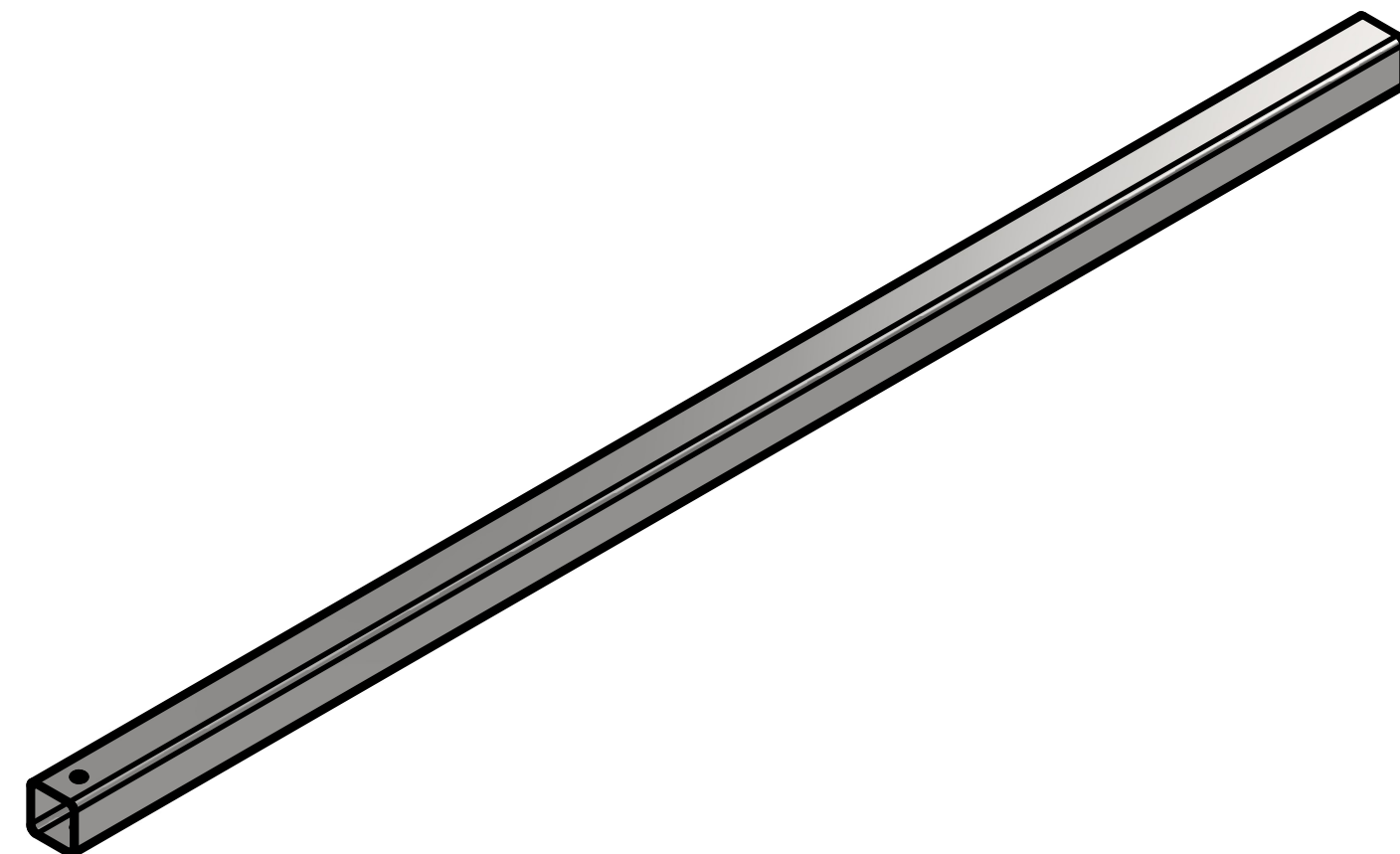
DETALLE M
ESCALA 1 / 3 / .A2

TÍTULO: VISTA EXPLOSION CUERPO Y CABEZA		
NÚMERO DE DIBUJO: 13		
FORMATO	ESCALA: 1/12	UNIDADES: N/A
B	PÁGINA 13 DE 25	REV 0

2

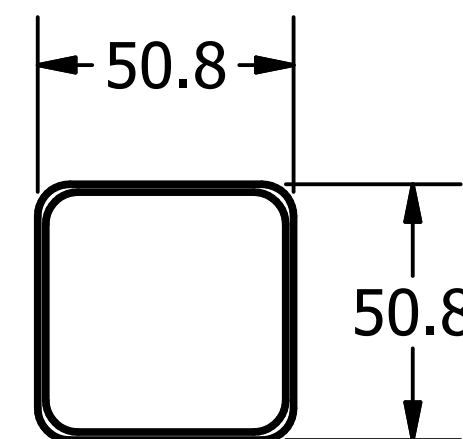
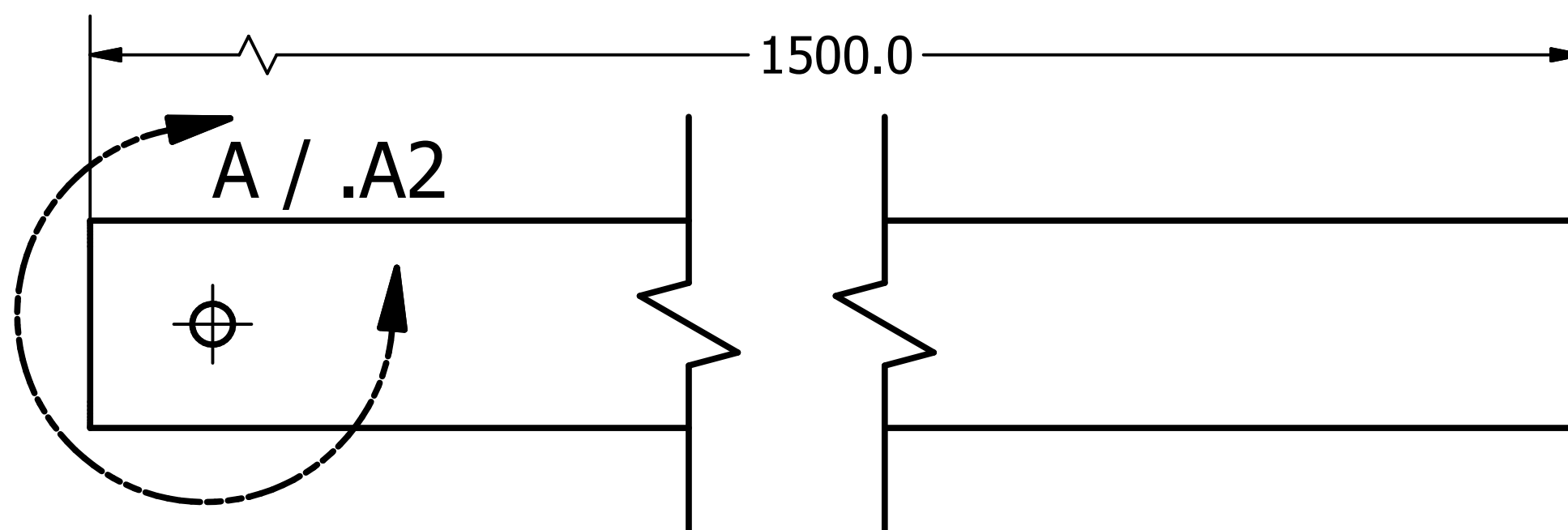


1



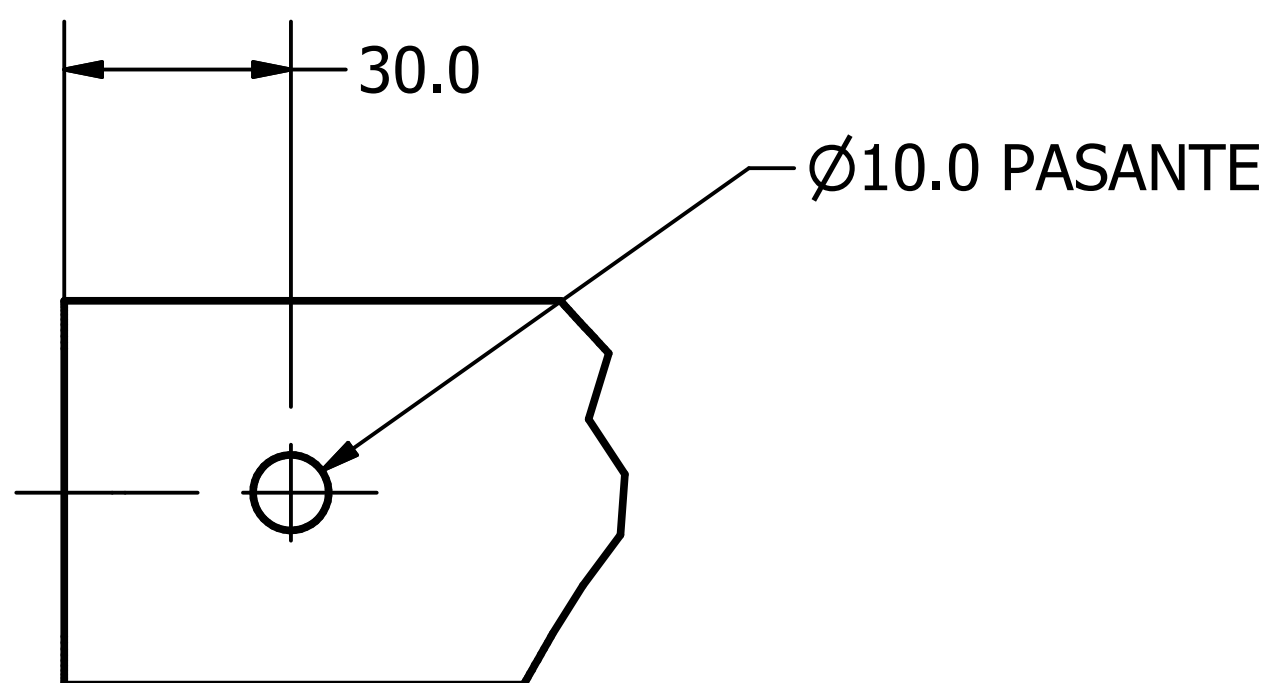
B

B



A

A



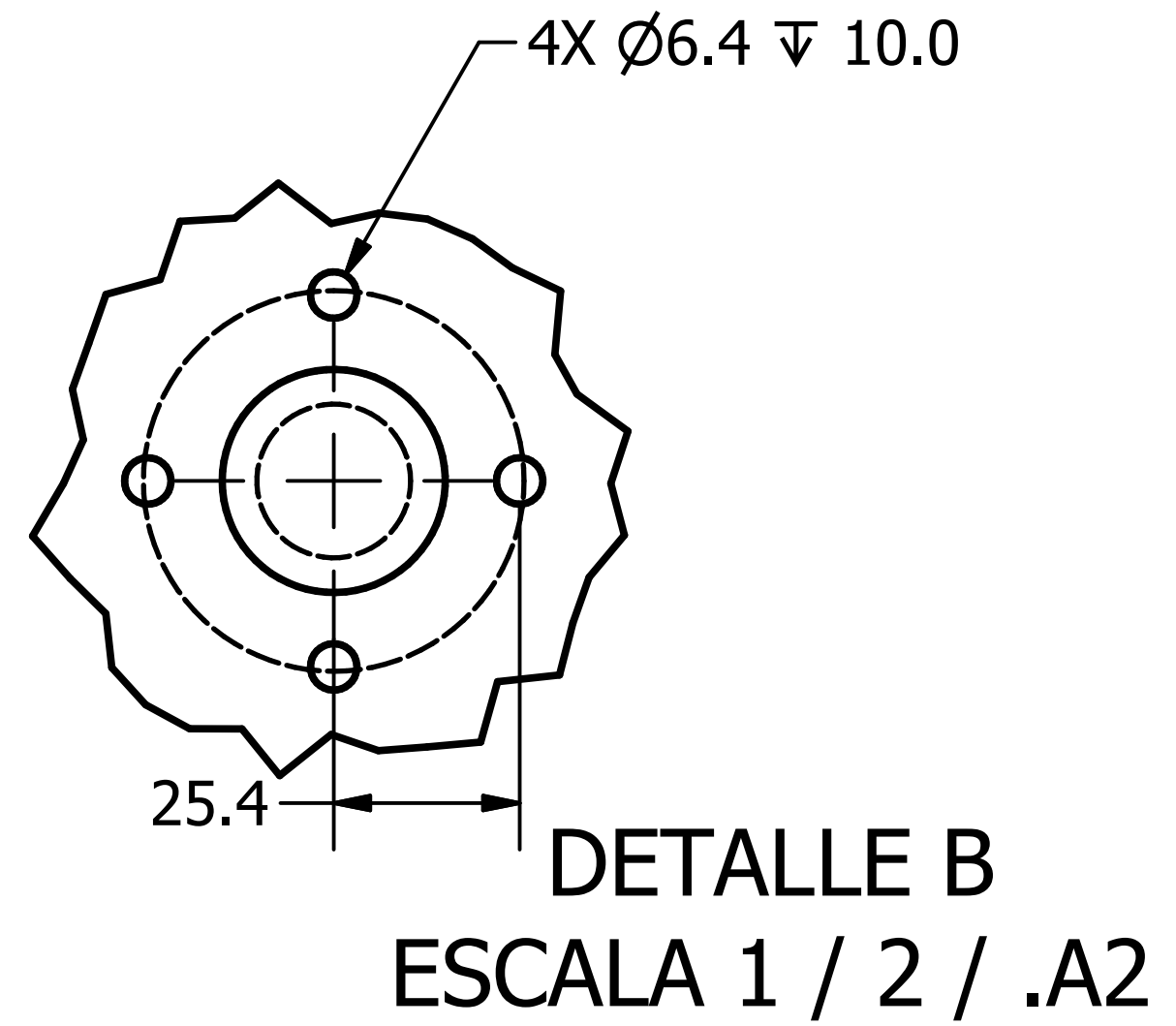
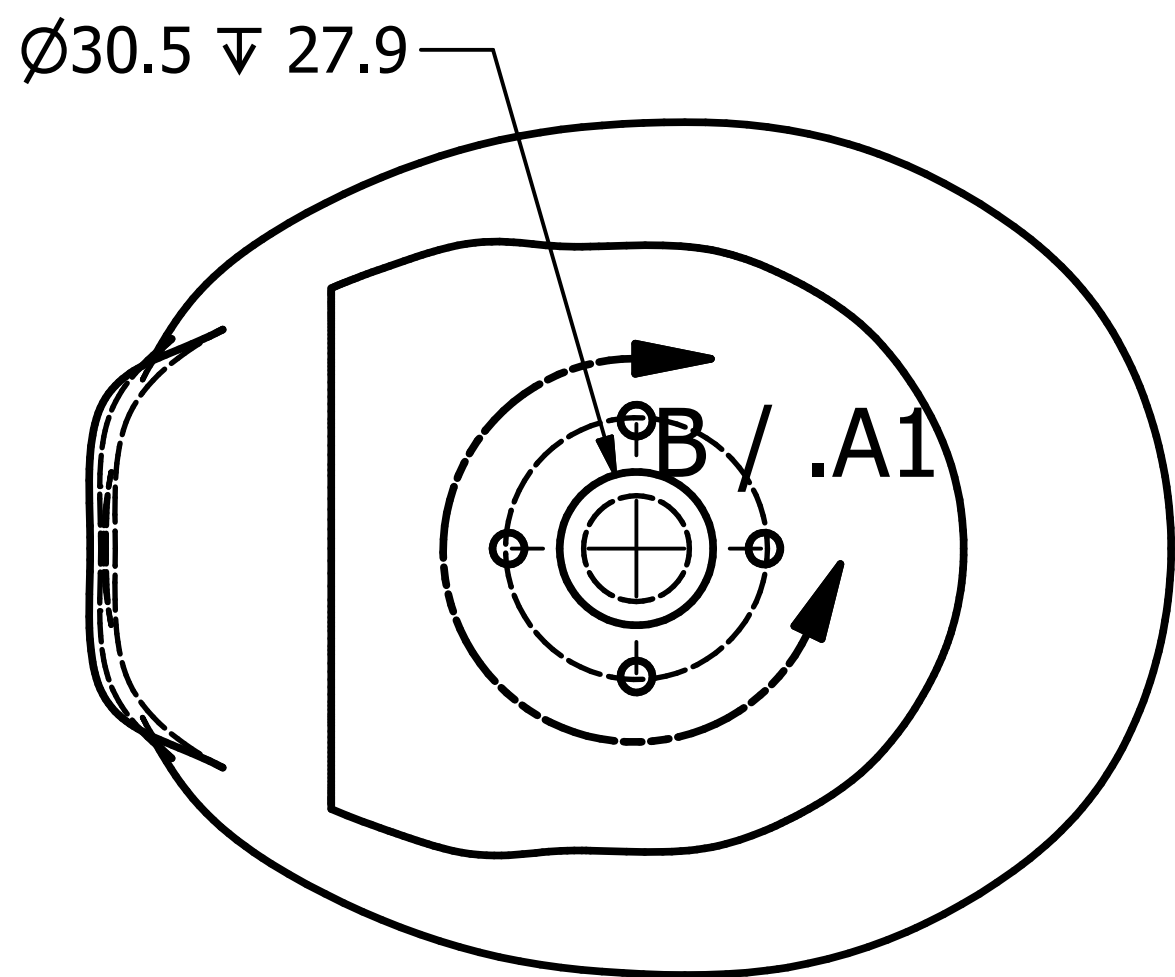
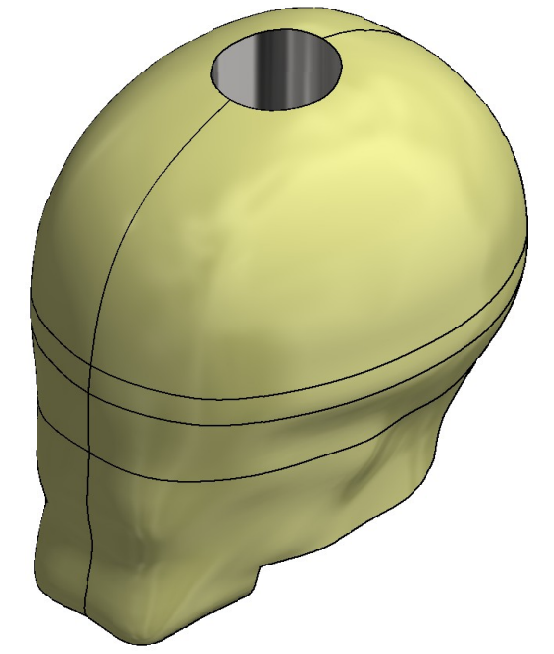
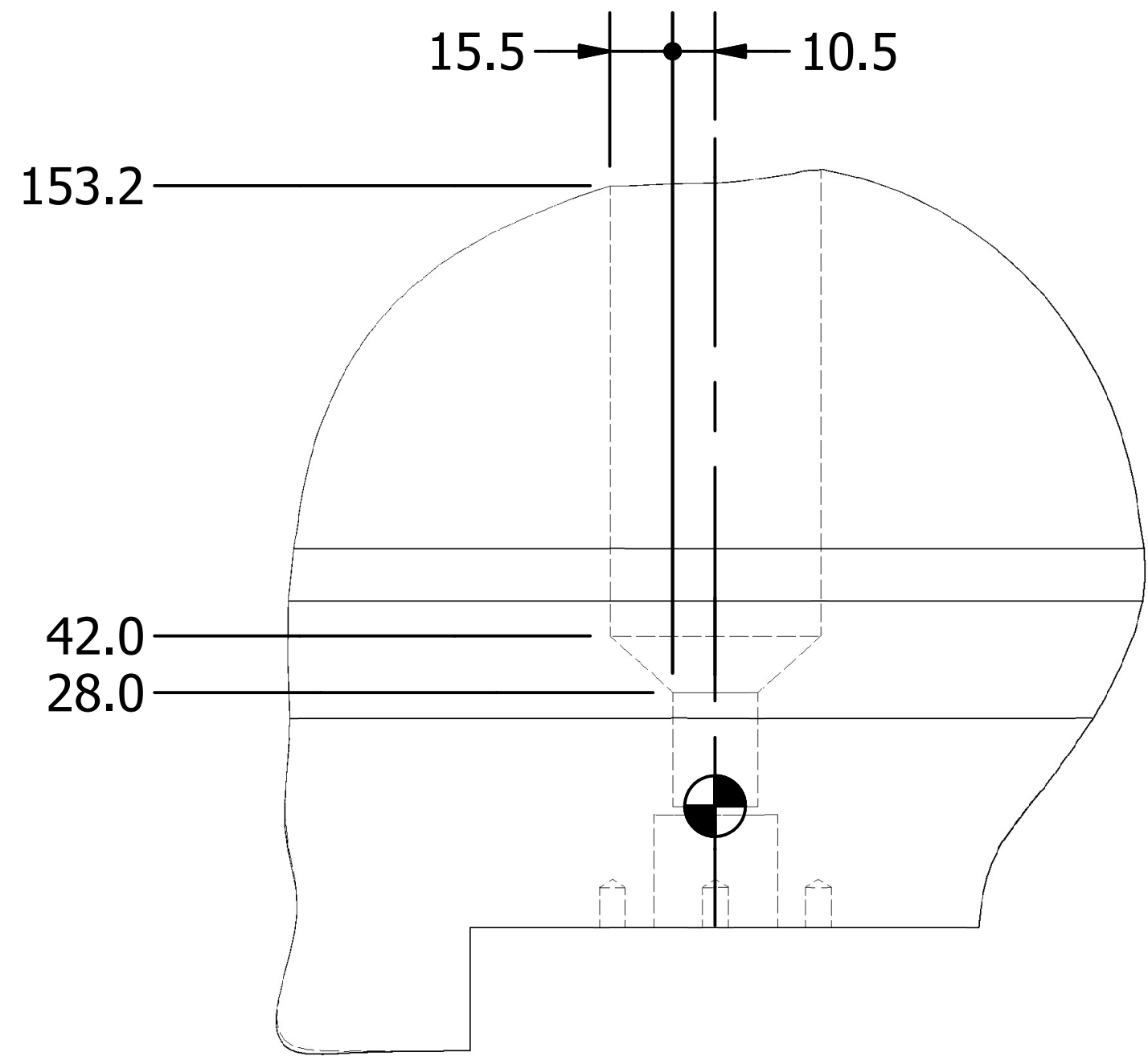
DETAIL A
SCALE 1 / 2 / .B2

TÍTULO:		
CUERPO		
NÚMERO DE DIBUJO: 14		
FORMATO	ESCALA: 1/3	UNIDADES: MM
A	PÁGINA 14 DE 25	REV 0

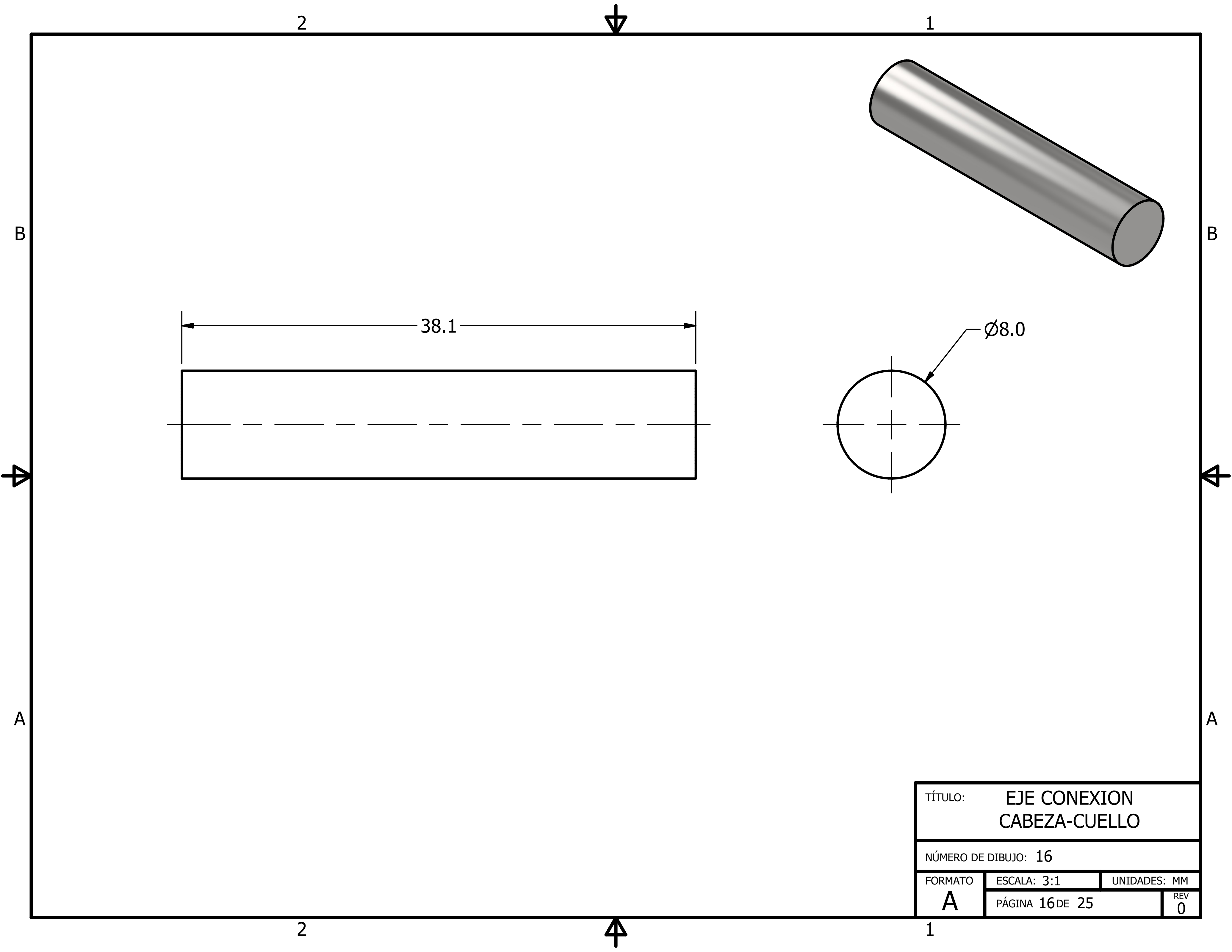
2



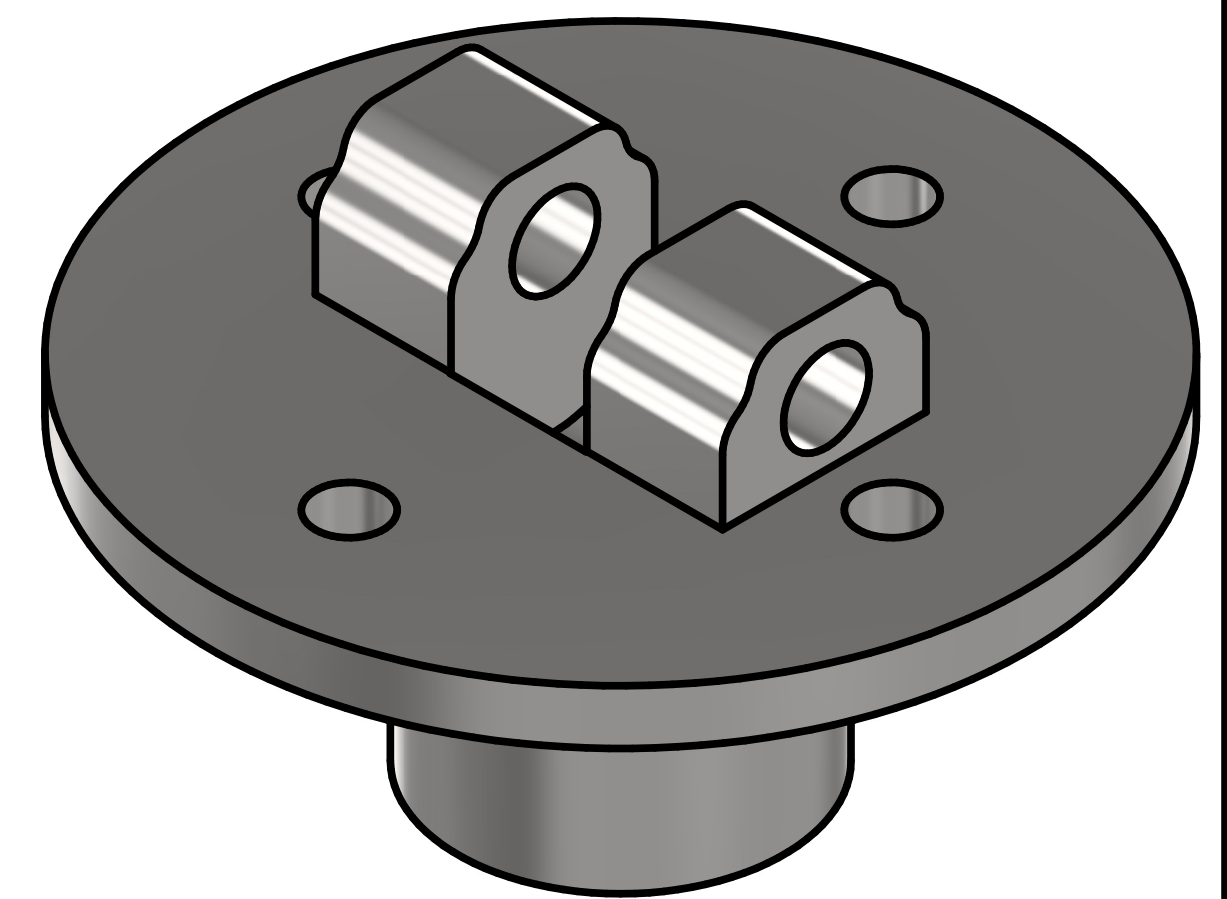
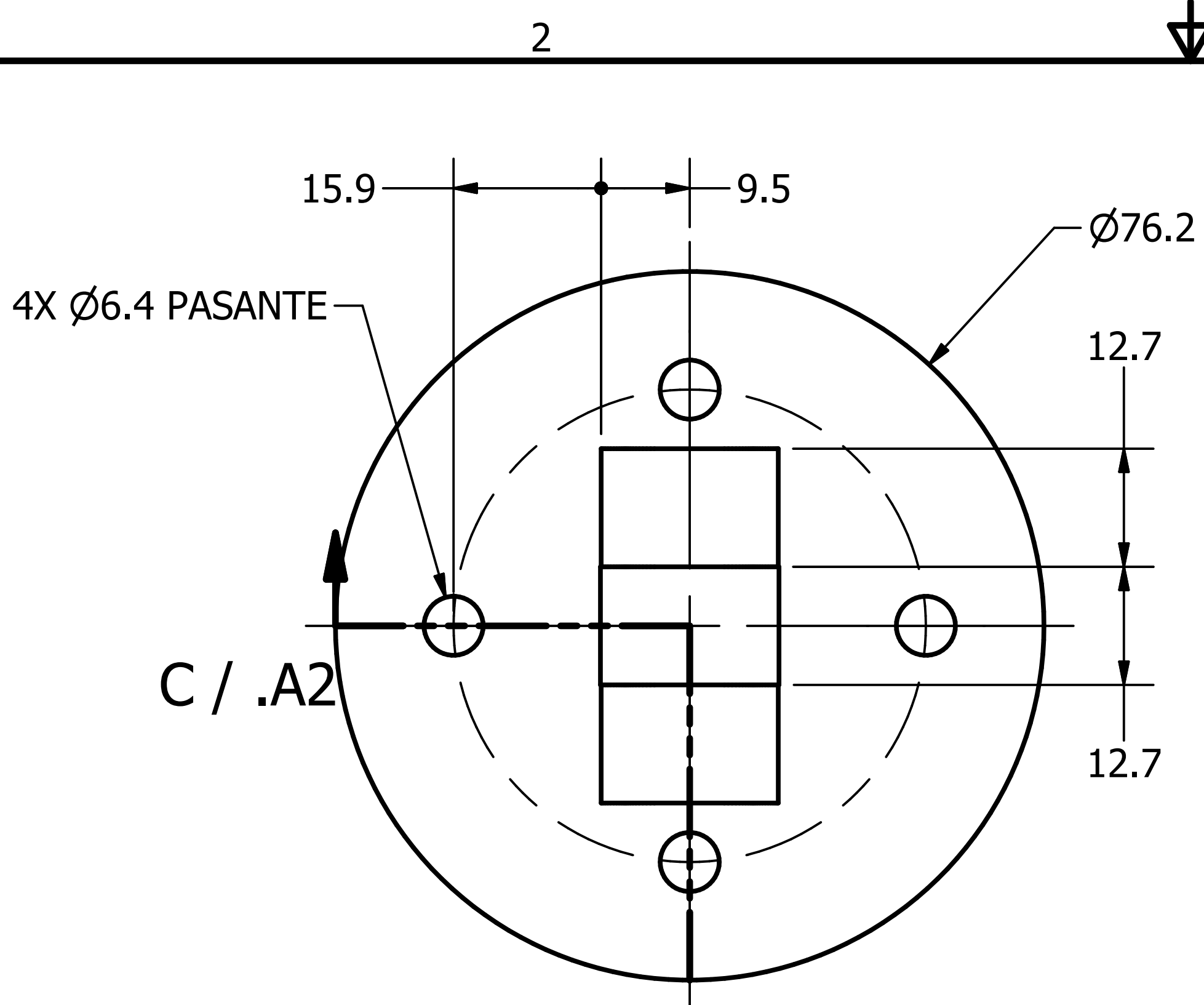
1



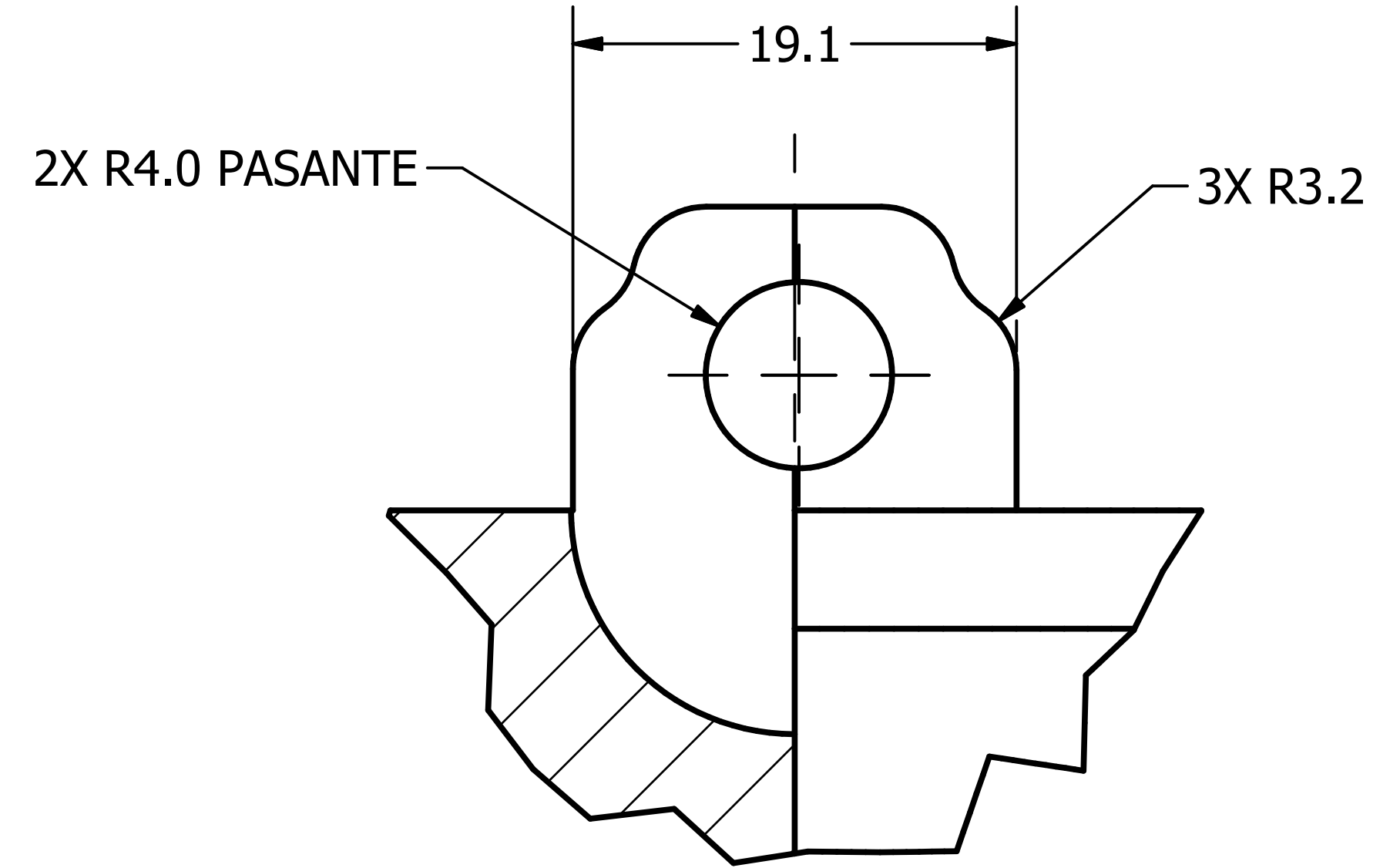
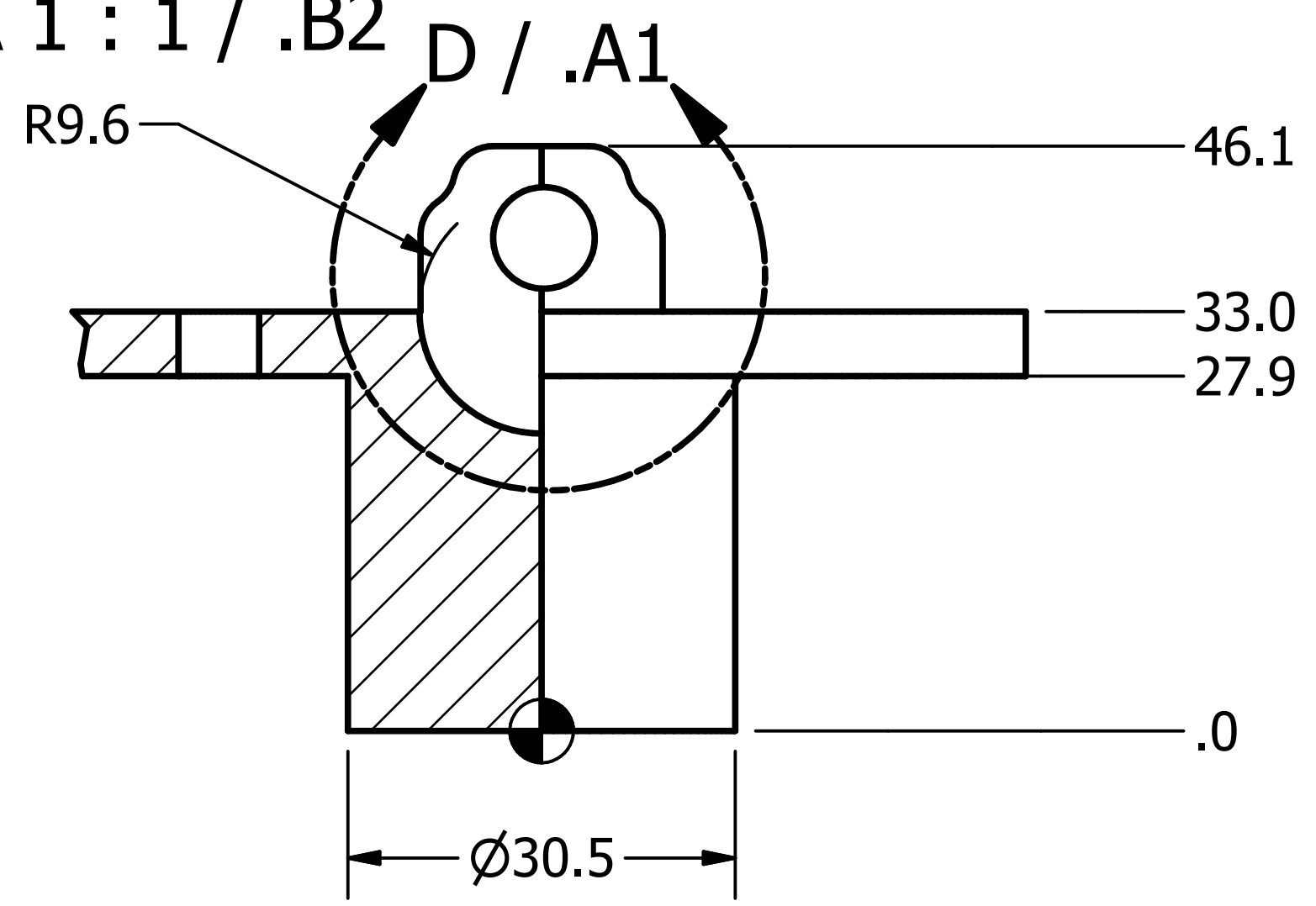
TÍTULO:		CABEZA ESTANDAR	
NÚMERO DE DIBUJO: 15			
FORMATO	ESCALA: 1/3	UNIDADES: MM	
A	PÁGINA 15 DE 25	REV 0	



TÍTULO: EJE CONEXION CABEZA-CUELLO		
NÚMERO DE DIBUJO: 16		
FORMATO	ESCALA: 3:1	UNIDADES: MM
A	PÁGINA 16 DE 25	REV 0

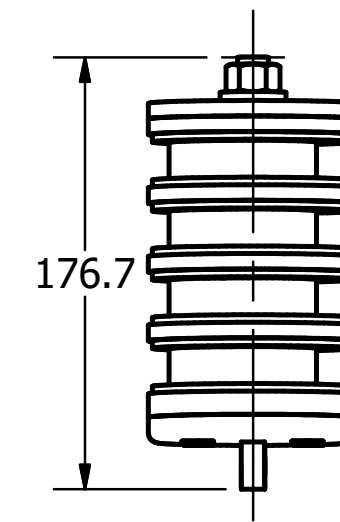
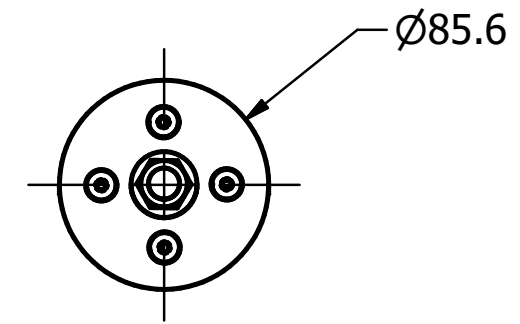
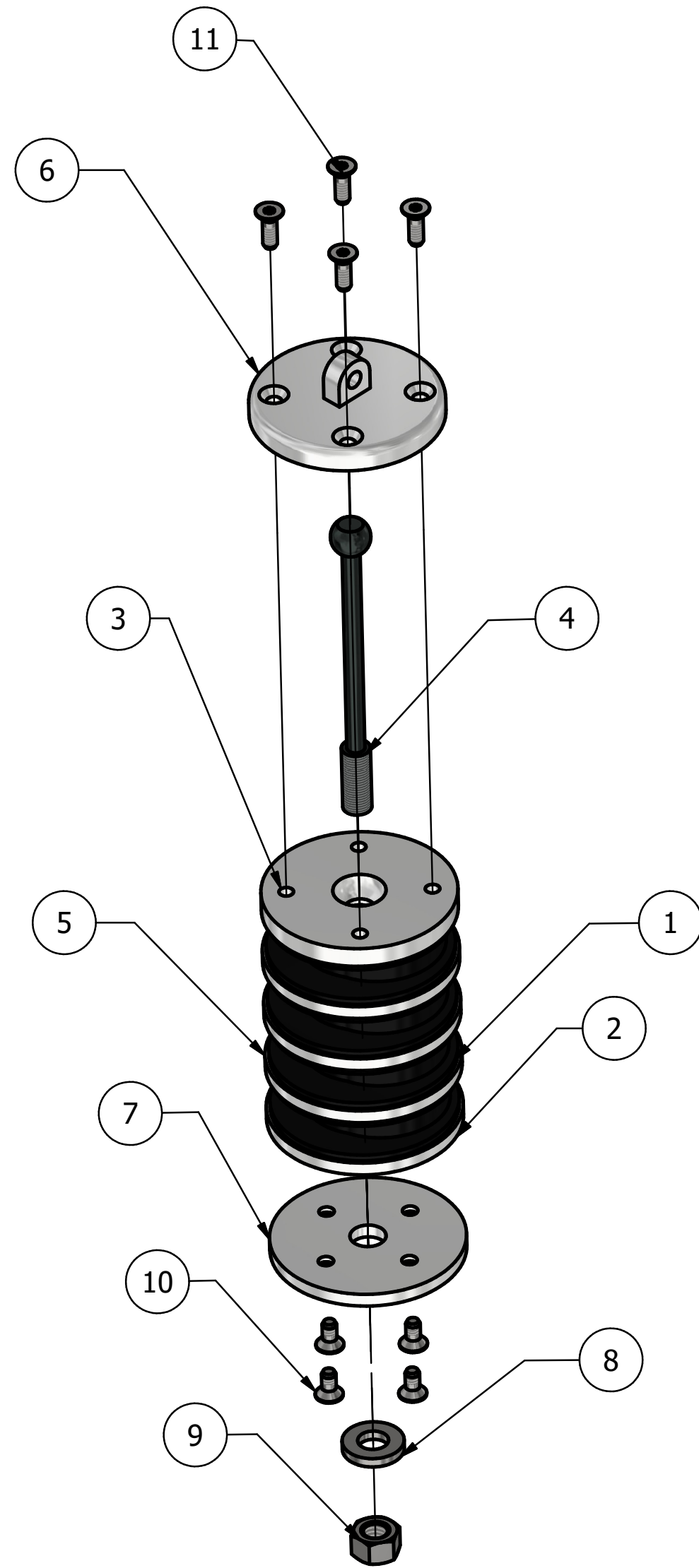


SECCIÓN C-C
ESCALA 1 : 1 / .B2



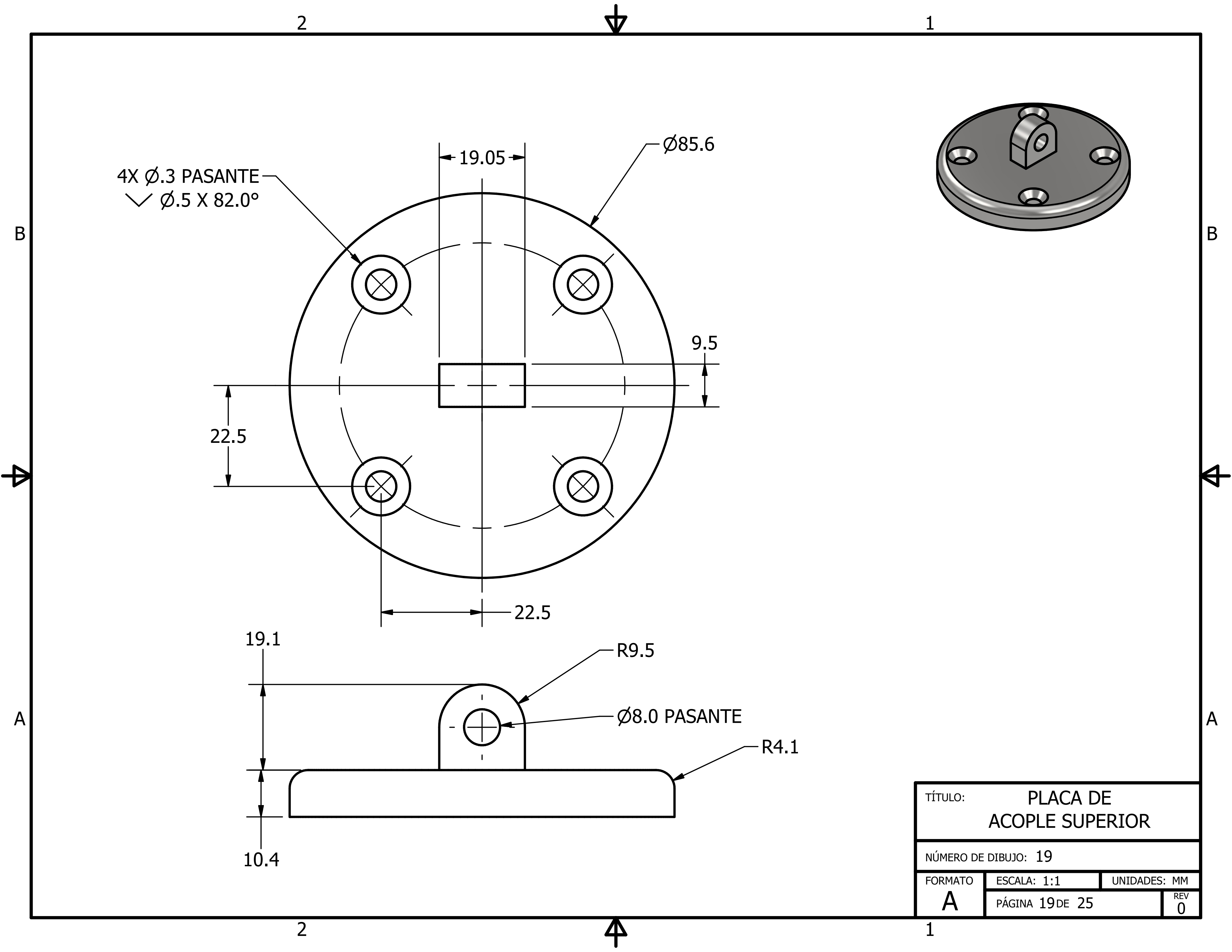
DETALLE D
ESCALA 2 : 1 / .A2

TÍTULO: ACOPLE CABEZA-CUELLO		
NÚMERO DE DIBUJO: 17		
FORMATO A	ESCALA: 1:1	UNIDADES: MM
	PÁGINA 17 DE 25	REV 0



LISTA DE PARTES				
PARTE	CANT	No. PARTE	DESCRIPCIÓN	MATERIAL
1	4	Espaciador de cuello	Espaciador interno	Poliuretano
2	1	Base inferior		Aluminio 6061-T6
3	1	Base superior		Aluminio 6061-T6
4	1	Cable de cuello		Acero
5	3	Disco interior		Aluminio 6061-T6
6	1	Placa acople superior		Aluminio 6061-T6
7	1	Base acople inferior		Aluminio 6061-T6
8	1	ASTM F436 - 1/2, CW	Washer A	Acero
9	1	AS 2465 - 1/2 UNC	Pernos, tornillos y tuercas hexagonales del sistema unificado (roscas UNC y UNF)	Acero
10	4	ANSI B18.3 - 1/4-20 UNC x 0.5, SSFCHCSI	Pernos hexagonales con ranura en cruz y hendidura	Acero
11	4	ANSI B18.3 - 1/4-20 UNC x 0.75, SSFCHCSI	Pernos hexagonales con ranura en cruz y hendidura	Acero

TÍTULO: VISTA EXPLOSION CUELLO HYBRID III		
NÚMERO DE DIBUJO: 18		
FORMATO	ESCALA: 1/4	UNIDADES: N/A
B	PÁGINA 18 DE 25	REV 0



4X Ø.3 PASANTE
 ✓ Ø.5 X 82.0°

Ø85.6

19.05

9.5

22.5

22.5

19.1

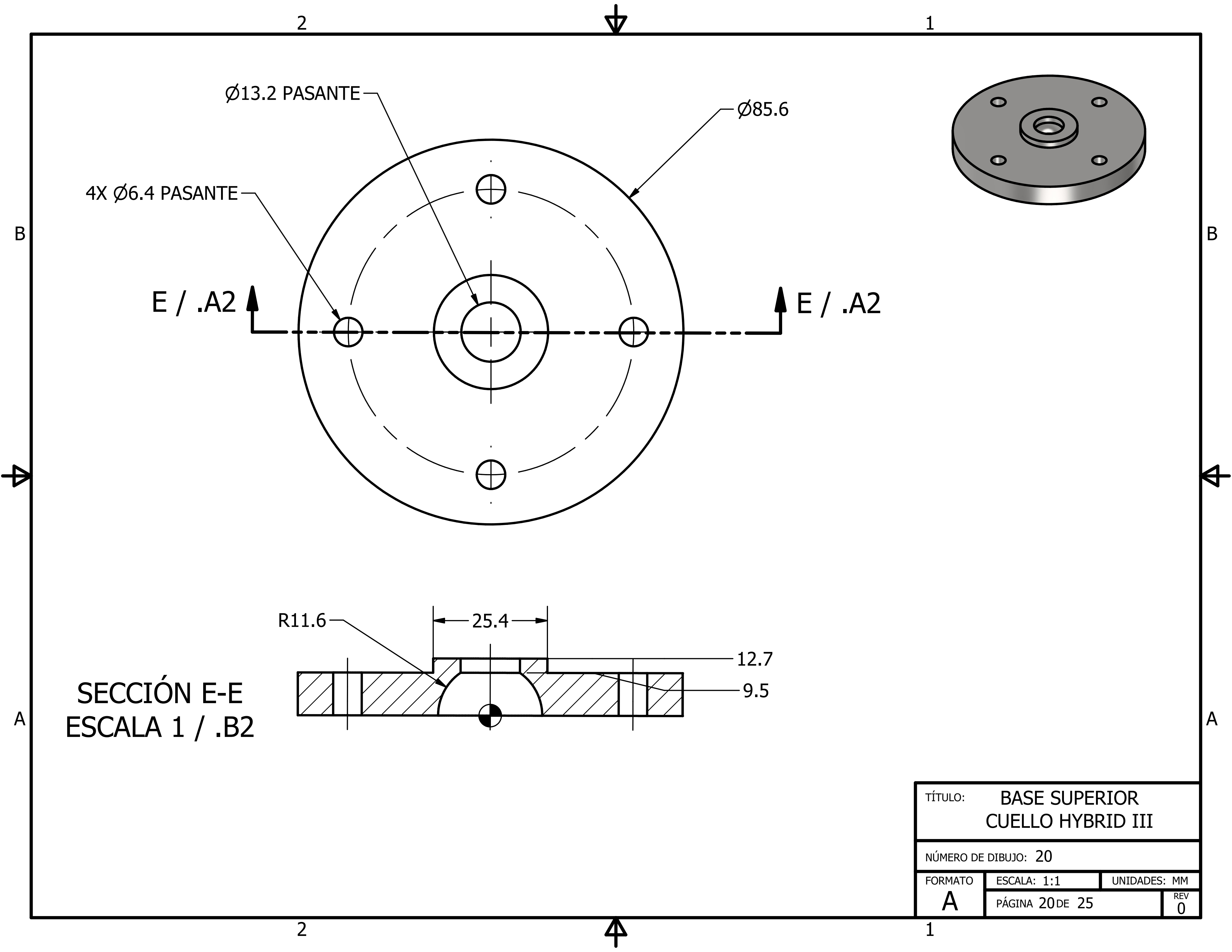
R9.5

Ø8.0 PASANTE

R4.1

10.4

TÍTULO: PLACA DE ACOUPLE SUPERIOR		
NÚMERO DE DIBUJO: 19		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: MM
A	PÁGINA 19 DE 25	REV 0



Ø13.2 PASANTE

Ø85.6

4X Ø6.4 PASANTE

E / .A2

E / .A2

R11.6

25.4

12.7

9.5

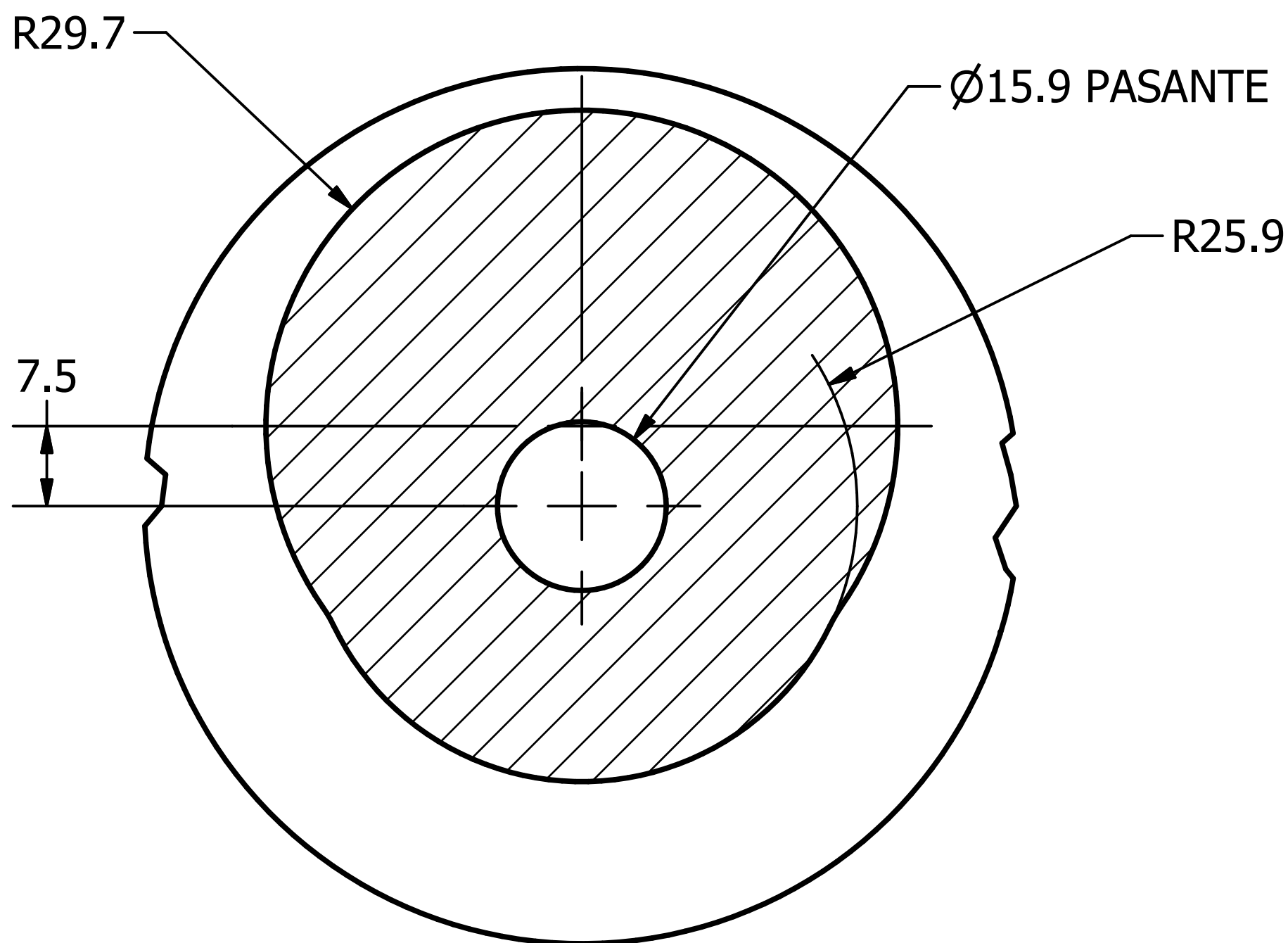
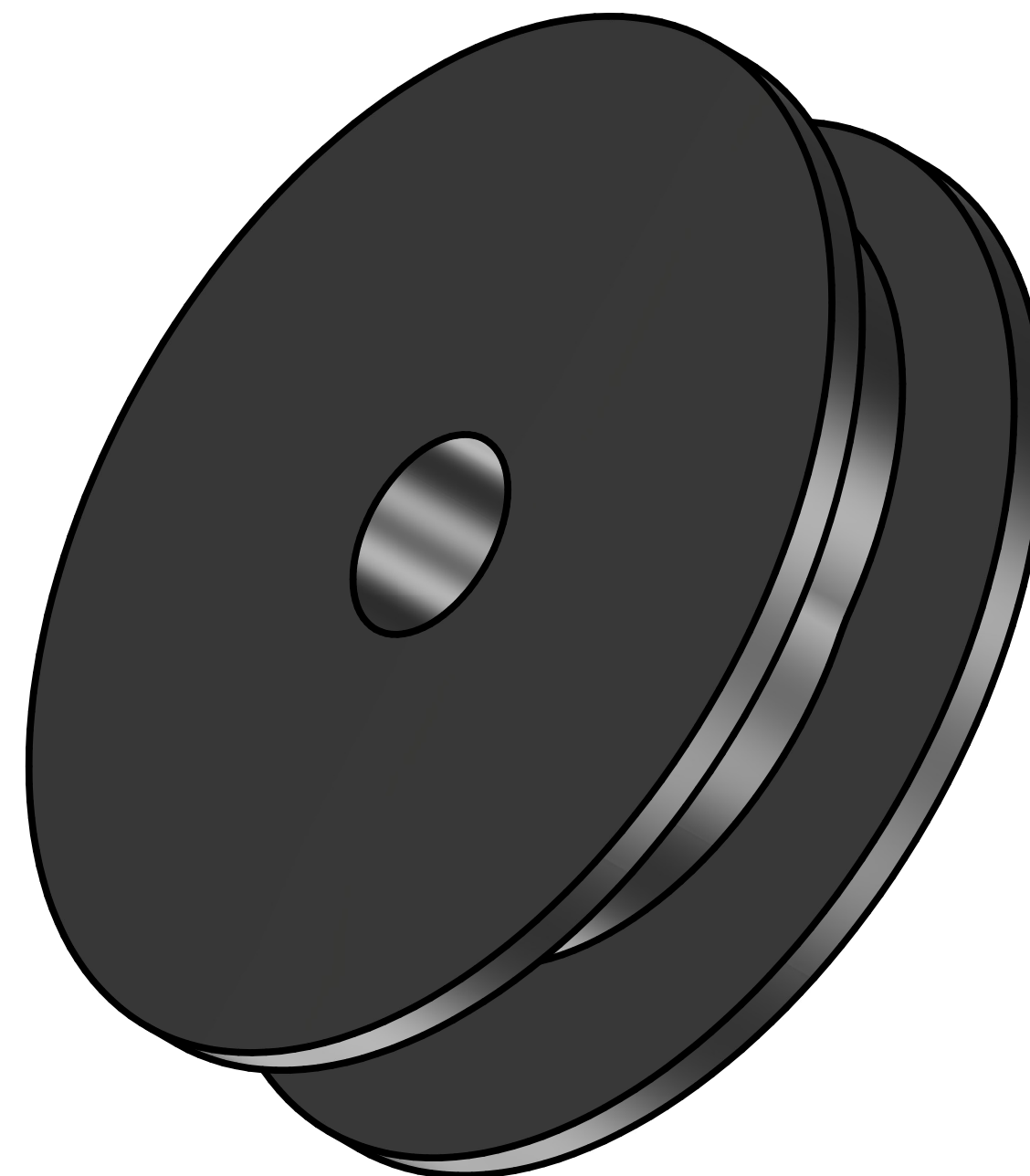
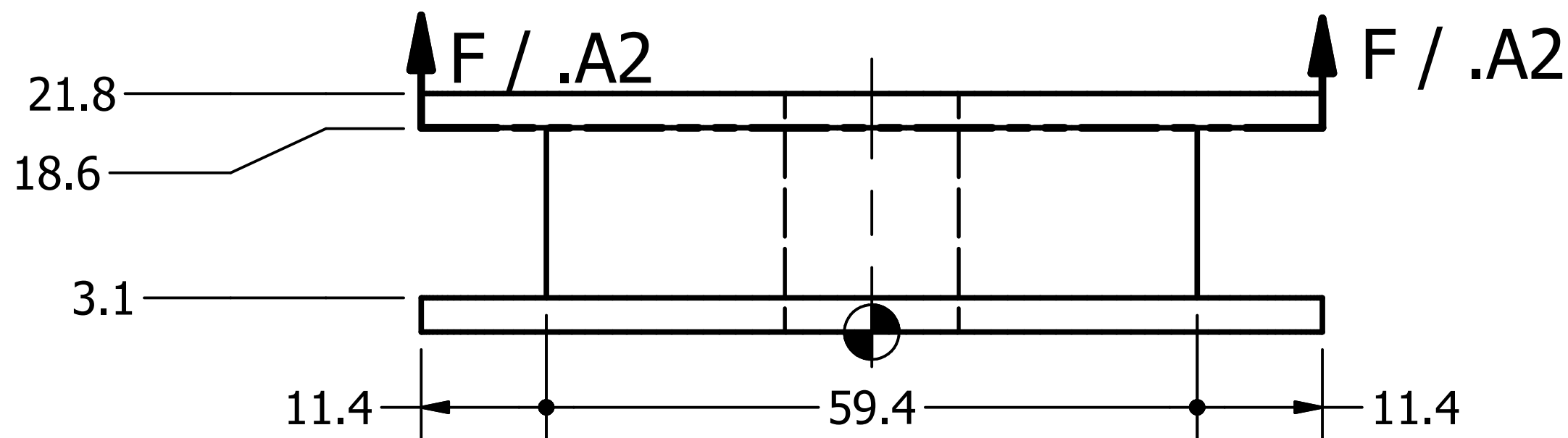
SECCIÓN E-E
ESCALA 1 / .B2

TÍTULO: BASE SUPERIOR CUELLO HYBRID III		
NÚMERO DE DIBUJO: 20		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: MM
A	PÁGINA 20 DE 25	REV 0

2



1



SECCIÓN F-F
 ESCALA 1 : 1 / .B2

TÍTULO:		ESPACIADOR DE CUELLO	
NÚMERO DE DIBUJO: 21			
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: MM	REV
A	PÁGINA 21 DE 25		0

2



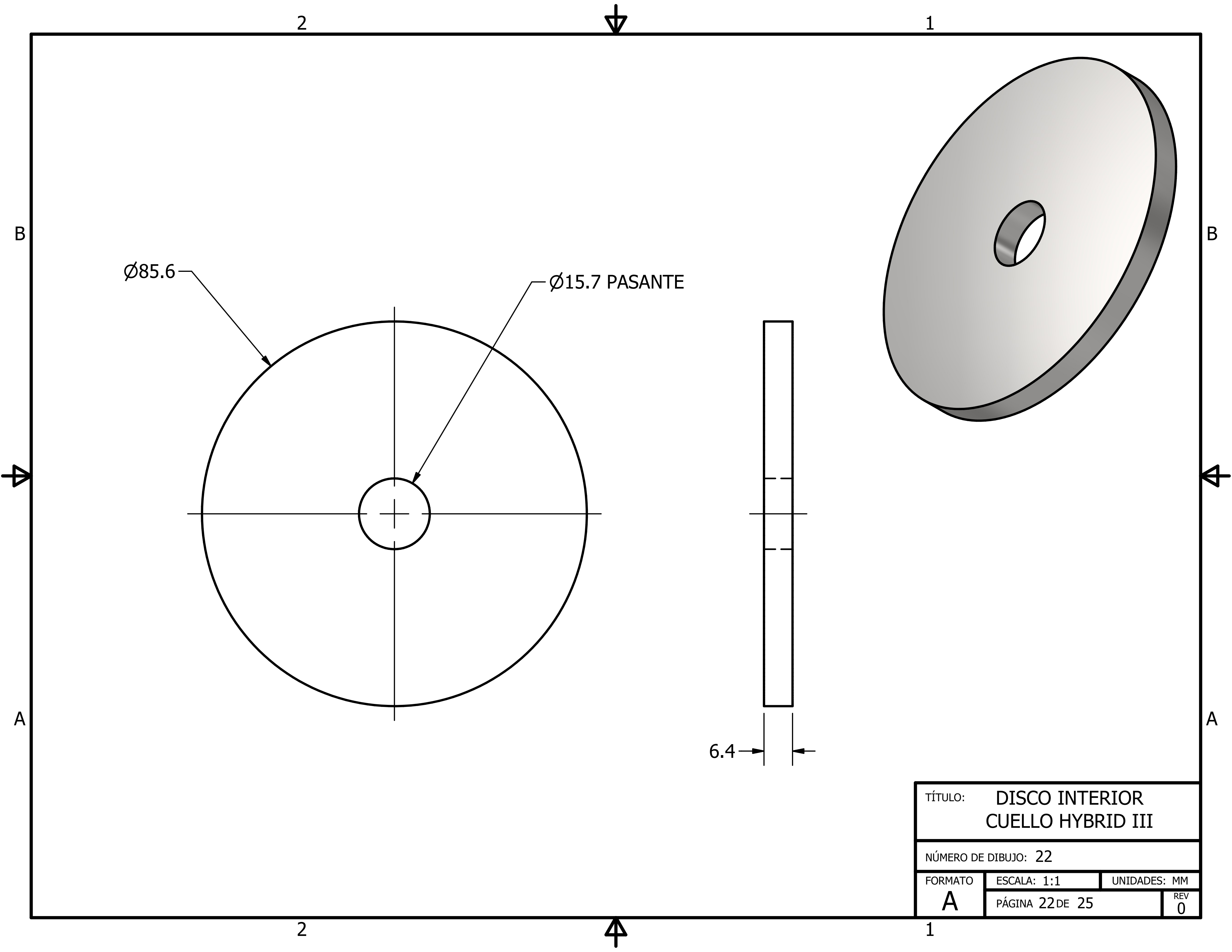
1

B

B

A

A

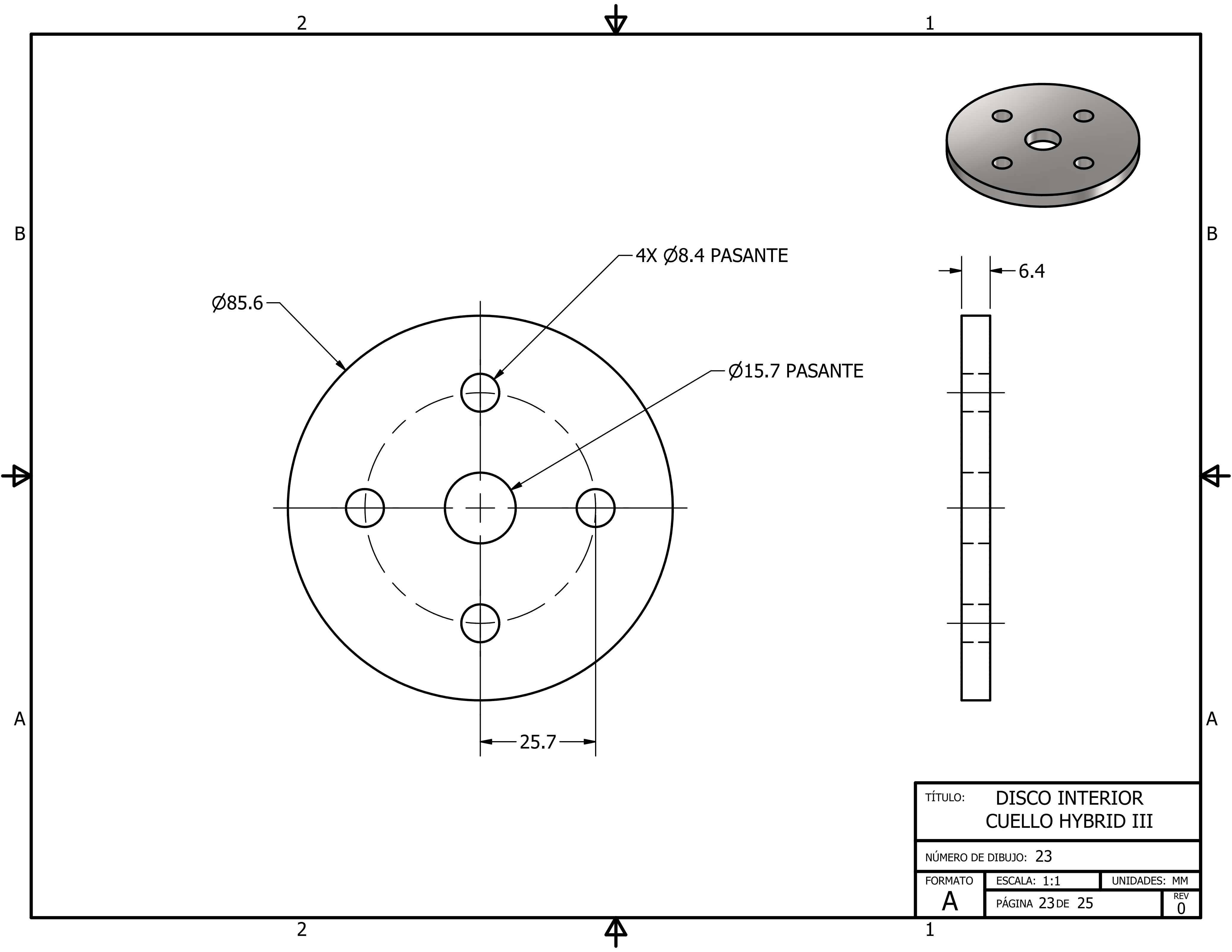


Ø85.6

Ø15.7 PASANTE

6.4

TÍTULO: DISCO INTERIOR CUELLO HYBRID III		
NÚMERO DE DIBUJO: 22		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: MM
A	PÁGINA 22 DE 25	REV 0



Ø85.6

4X Ø8.4 PASANTE

Ø15.7 PASANTE

25.7

6.4

TÍTULO: DISCO INTERIOR CUELLO HYBRID III		
NÚMERO DE DIBUJO: 23		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: MM
A	PÁGINA 23 DE 25	REV 0

NOTA 1: ESTA PLACA DE ACOPLE VA A ESTAR UNIDA AL CUERPO POR MEDIO DE SOLDADURA E6013 $\frac{3}{32}$

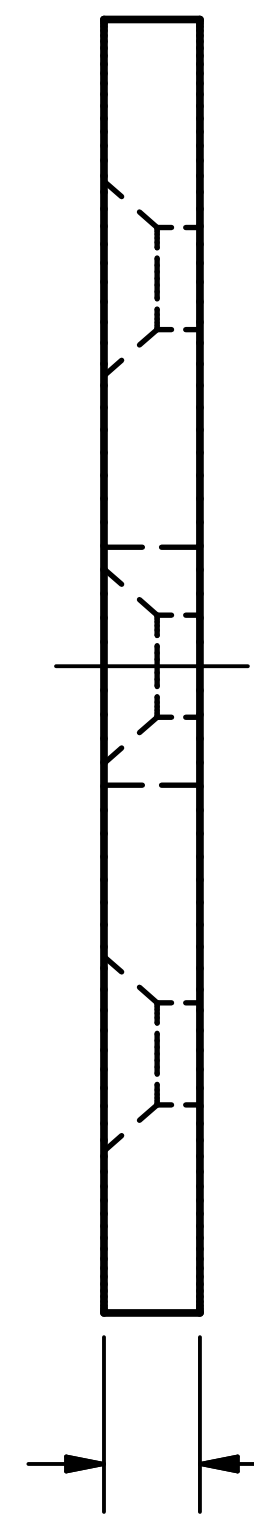
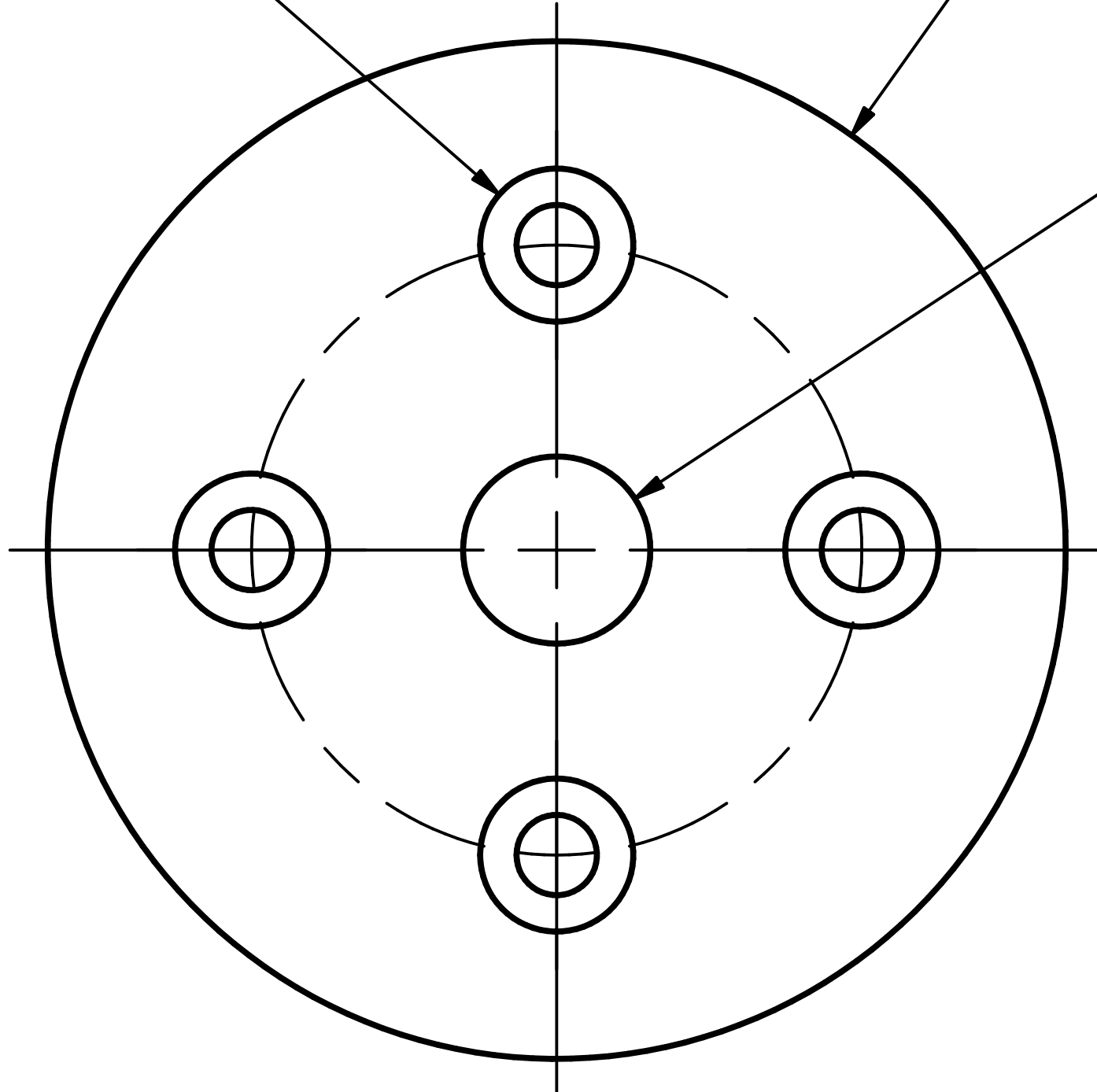
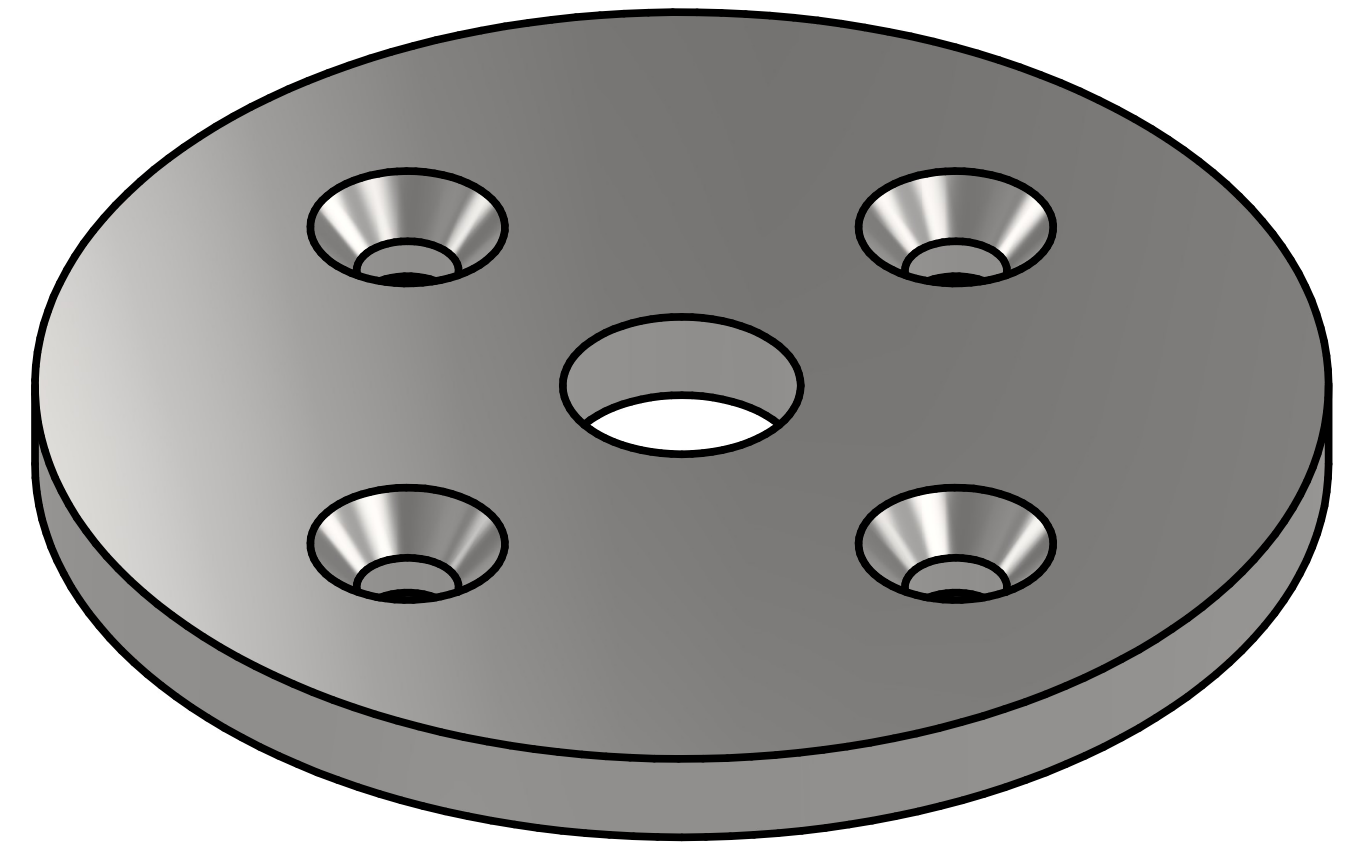
4X Ø.3 PASANTE
 ✓ Ø.5 X 82.0°

Ø85.6

Ø15.7 PASANTE

6.4

TÍTULO: PLACA DE ACOPLE INFERIOR		
NÚMERO DE DIBUJO: 24		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 24 DE 25	REV 0



B

↕

A

2

↕

1

B

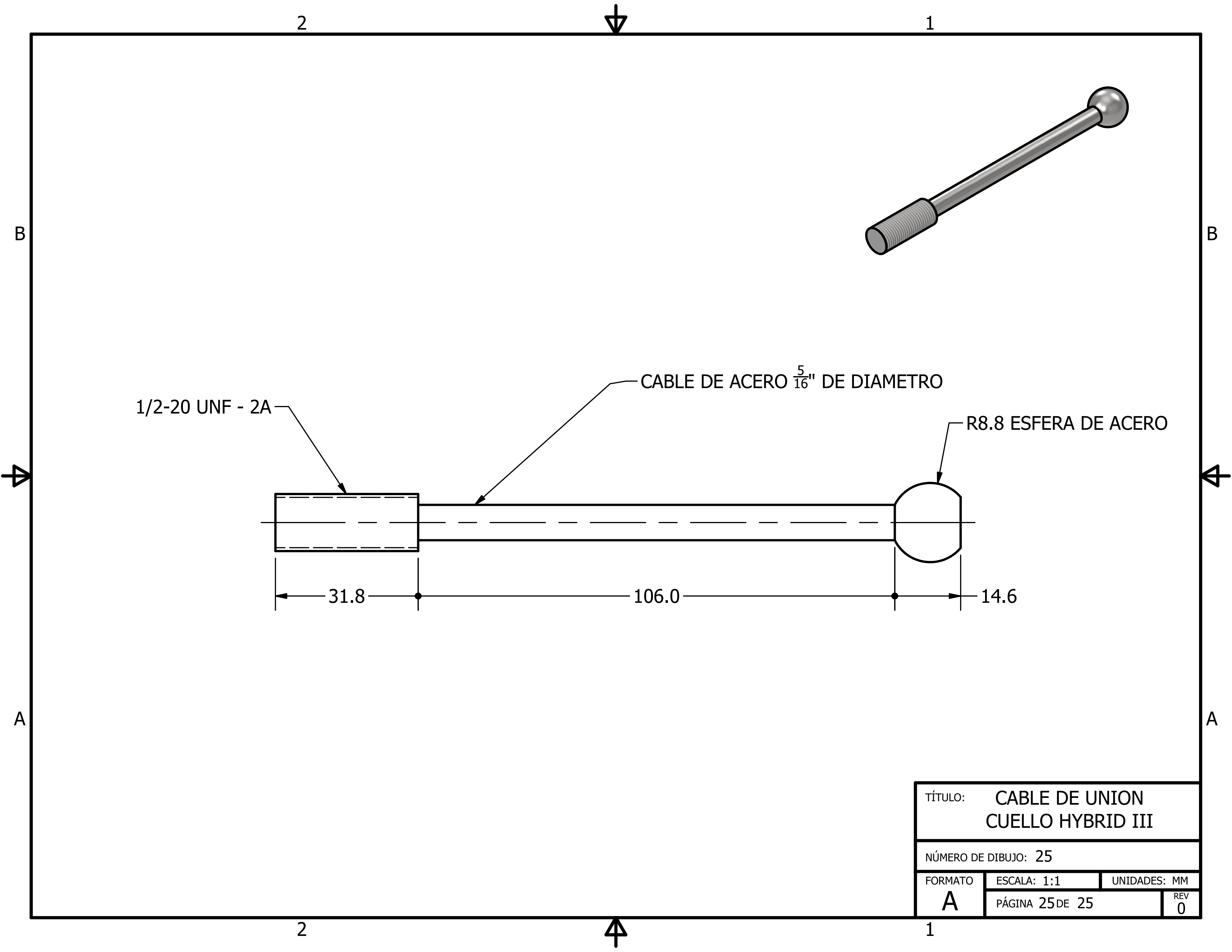
↕

A

2

↕

1



TÍTULO: CABLE DE UNION CUELLO HYBRID III		
NÚMERO DE DIBUJO: 25		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: MM
A	PÁGINA 25 DE 25	REV 0



**Guía de pruebas
Máquina de impactos por
resbalones y tropiezos**

Version 1.4

Octubre 2025

1. Objetivo

Verificar la resistencia y capacidad de absorción de impactos en cascos de seguridad industrial bajo condiciones controladas, simulando caídas, tropiezos y resbalones en el mismo nivel en entornos industriales.

Evaluar el comportamiento de la cabeza en estos escenarios de impacto por medio de indicadores de riesgo craneoencefálico.

2. Alcance

- Producto evaluado: Casco de seguridad ocupacional.
- Tipos de prueba: Impacto en escalón, impacto en base de andamio, impacto contra el piso.
- Valores medidos: Aceleraciones/velocidades lineales y rotacionales, indicadores de riesgo por trauma craneoencefálico.
- Aplicable únicamente a pruebas en laboratorio interno.

3. Equipo y material de ensayo

- Péndulo invertido de caída vertical Hybrid III
- Yunque de escalón
- Yunque de base de andamio
- Acelerómetro de 3 ejes, lineal y rotacional
- Sistema de recolección de datos y calculadora de indicadores de riesgo
- Juego de llaves de ½ pulgada

4. Preparación de espécimen

1. Inspeccionar visualmente el casco en busca de fracturas o deformaciones
2. Montar el casco en el Headform con barbiquejo ajustado

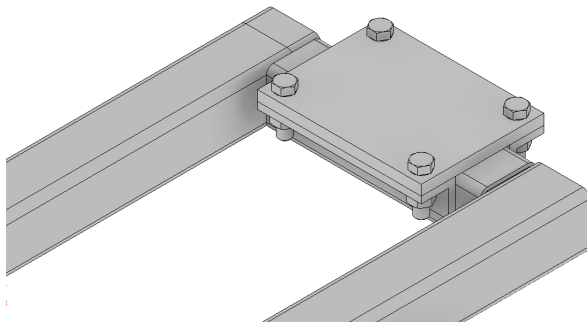
3. Alinear Headform con yunque de impacto
4. Verificar funcionamiento de sensor y sistema de registro

5. Procedimiento para pruebas

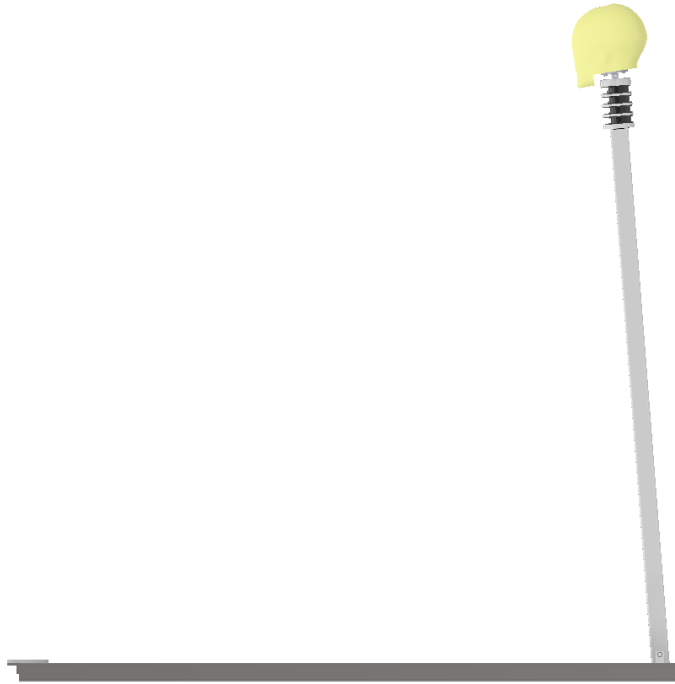
A continuación se describe el procedimiento de pruebas para los 3 escenarios a evaluar

5.1. Escenario 1-Impacto sobre el piso

1. Asegurarse que el área de impacto no contenga un yunque



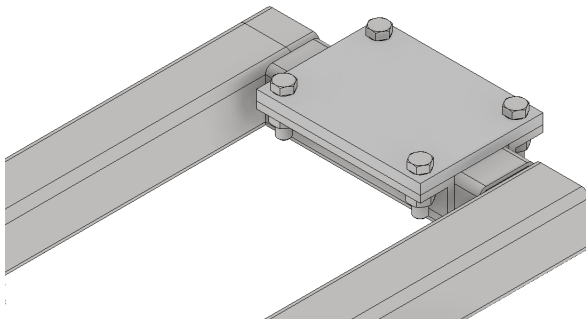
2. Colocar el casco y alinear
3. Elevar el cuerpo hasta una posición vertical



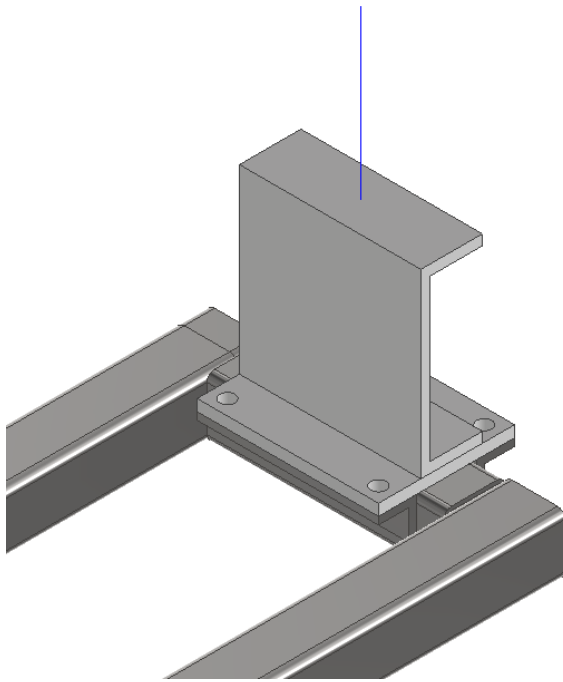
4. Liberar masa en caída libre de forma que impacte con el marco móvil
5. Registrar aceleraciones y velocidades
6. Comparar valores de indicadores de riesgo

5.2. Escenario 2-Impacto en escalón

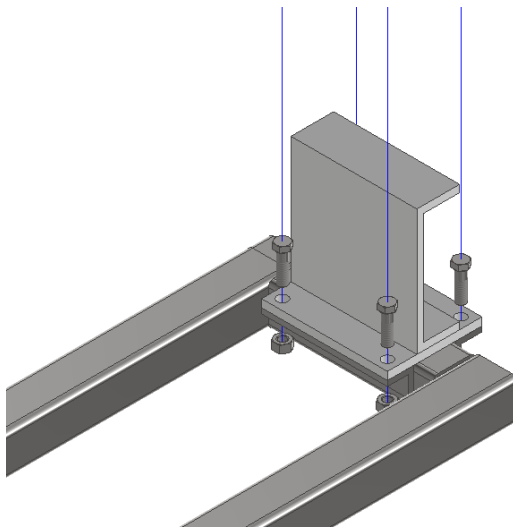
1. Remover cualquier otro yunque de una prueba anterior



2. Alinear yunque con placa de acople

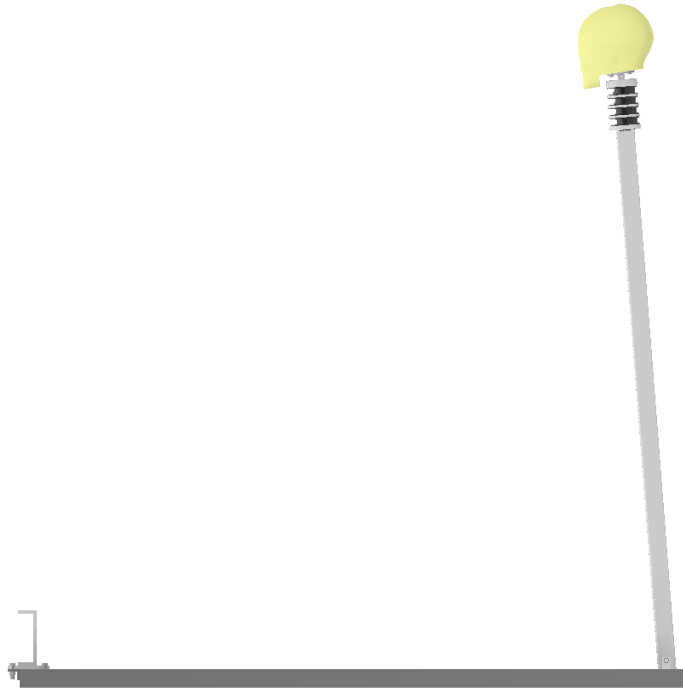


3. Atornillar con precarga de 40.5 Nm



4. Colocar el casco y alinear

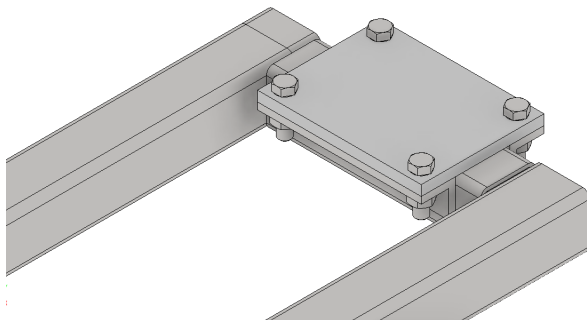
5. Elevar el cuerpo hasta una posición vertical



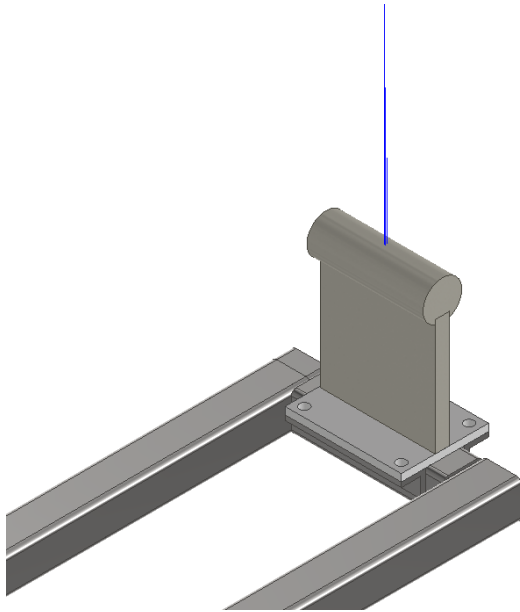
6. Liberar masa en caída libre de forma que impacte con el marco móvil
7. Registrar aceleraciones y velocidades
8. Comparar valores de indicadores de riesgo

5.3. Escenario 3-Impacto en andamio

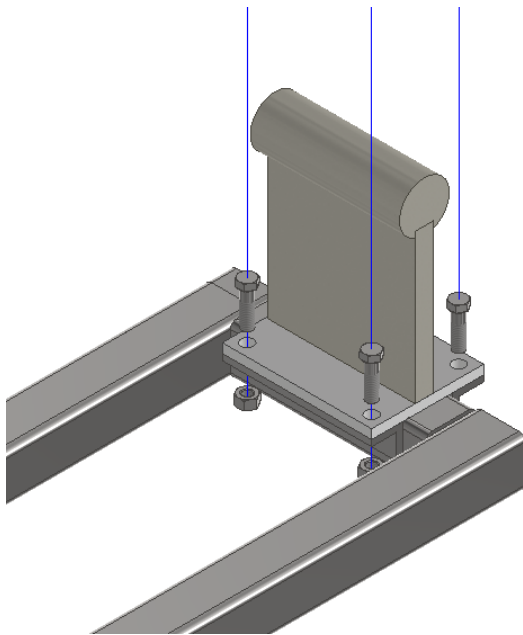
1. Remover cualquier otro yunque de una prueba anterior



2. Alinear yunque con placa de acople

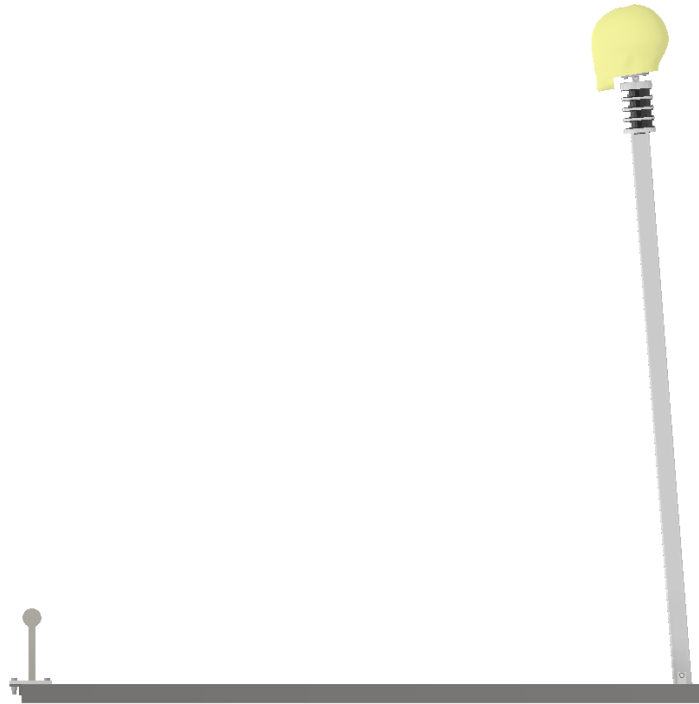


3. Atornillar con precarga de 40.5 Nm



4. Colocar el casco y alinear

5. Elevar el cuerpo hasta una posición vertical



6. Liberar masa en caída libre de forma que impacte con el marco móvil
7. Registrar aceleraciones y velocidades
8. Comparar valores de indicadores de riesgo

6. Pruebas de temperatura

Antes de realizar los ensayos de impacto y penetración, los cascos deben someterse a un proceso de condicionamiento térmico destinado a evaluar su comportamiento bajo condiciones extremas de temperatura. El procedimiento se detalla a continuación:

1. Los cascos se colocan en una cámara térmica y se someten a dos condiciones distintas:
 - Temperatura elevada: el casco se mantiene a una temperatura de $+35 \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante un periodo comprendido entre 4 h y 24 h.
 - Temperatura reducida: el casco se mantiene a una temperatura de $-20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante un periodo comprendido entre 4 h y 24 h.

2. Inmediatamente después del acondicionamiento térmico, y en un tiempo no mayor a 2 minutos tras su extracción de la cámara, los cascos deben someterse a las pruebas mecánicas especificadas en la norma, tales como los ensayos de absorción de impacto y de resistencia a la penetración.
3. Las pruebas deben realizarse bajo las mismas condiciones de orientación y configuración que en los ensayos de referencia a temperatura ambiente.
4. El objetivo del acondicionamiento térmico es verificar que el casco mantiene sus propiedades protectoras y estructurales tras la exposición a condiciones de calor y frío extremos, garantizando un desempeño adecuado en ambientes reales de uso.

Este procedimiento forma parte de los requisitos generales de la norma EN 12492 para cascos de montañismo y alpinismo, y se aplica antes de cualquier ensayo de desempeño mecánico.

7. Impactos rotacionales

El presente procedimiento tiene como objetivo evaluar la respuesta del casco ante impactos no verticales, aplicados en las zonas laterales y posteriores del headform, tomando en cuenta las posibles rotaciones del conjunto cabeza-cuello durante una caída o resbalón. Estos impactos buscan simular condiciones reales en las que el usuario experimenta giros y desplazamientos antes del contacto con la superficie de impacto.

- El conjunto cabeza-cuello (*Hybrid III*) se coloca de manera que el punto de contacto se ubique en la zona lateral derecha, lateral izquierda o posterior del casco, manteniendo la alineación del cuello y asegurando el barbiquejo.
- Se selecciona el yunque deseado (plano, escalera o andamio), ajustando su posición para garantizar que la energía potencial del impacto sea equivalente a la de los ensayos frontales establecidos.
- Elevar el sistema cabeza-cuerpo hasta la altura determinada y liberar en caída libre, permitiendo que el impacto se produzca en la zona seleccionada (lateral o posterior).

- Registrar las aceleraciones lineales en los tres ejes y las velocidades angulares correspondientes durante toda la duración del evento.
- Cada configuración de impacto (lateral derecha, lateral izquierda y posterior) debe repetirse siguiendo el mismo procedimiento descrito en la Sección 5 del presente protocolo, garantizando consistencia en las condiciones de ensayo.

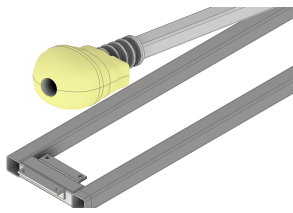


Figura 1: Impacto lateral izquierdo

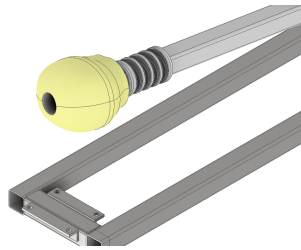


Figura 2: Impacto lateral derecho

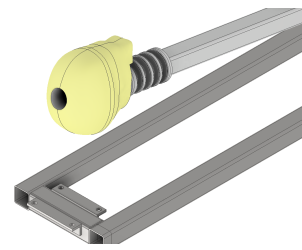


Figura 3: Impacto posterior

8. Análisis de resultados

Introducir los siguientes valores en Excel de indicadores de riesgo para evaluar seguridad:

- Datos de resultante de aceleración lineal de toda la duración del impacto
- Velocidades angulares máximas en ejes x, y, z
- Aceleración lineal y angular máxima de toda la duración
- Valor Δ de velocidad de 15 milisegundos en toda la duración del impacto

9. Criterio de aceptación

Cuadro 1: Indicadores de riesgo y valores máximos permitidos

Indicador	Tipo de impacto	Valor máximo permitido
HIC15	Lineal	700
BrIC	Rotacional	1
SFC	Lineal	120

NOTA: Estos valores son máximos de aceptación en estándares automovilísticos de seguridad, para obtener resultados mas acertados del riesgo de trauma craneoencefálico usar Excel de indicadores o ecuaciones de referencia.

10. Ecuaciones de referencia

El criterio HIC se calcula a partir de la aceleración lineal de la cabeza durante un intervalo de tiempo de 15 milisegundos, según la siguiente expresión:

$$HIC_{15} = \text{máx} \left[\frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2,5} (t_2 - t_1) \quad (1)$$

Donde t_2 y t_1 representan el intervalo temporal del impacto, con una diferencia de 15 ms.

A partir del valor de HIC_{15} , se puede estimar la probabilidad de fractura craneal mediante la relación empírica:

$$\text{Fractura}_{HIC15} = N \left(\frac{\ln(HIC_{15}) - 6,96352}{0,84664} \right) \quad (2)$$

Asimismo, se puede calcular la probabilidad de obtener un puntaje AIS (Abbreviated Injury Scale) 3 o 4 como:

$$AIS_3 = \frac{1}{1 + e^{\left(\frac{4,9+140}{HIC_{15}} - 0,00501 HIC_{15} \right)}} \quad (3)$$

$$AIS_4 = \frac{1}{1 + e^{\left(\frac{3,39+140}{HIC_{15}} - 0,00531 HIC_{15} \right)}} \quad (4)$$

Brain Injury Criterion (BrIC)

El criterio BrIC evalúa el riesgo de lesión cerebral difusa asociada a aceleraciones rotacionales. Se define como:

$$BrIC = \sqrt{\left(\frac{w_x}{66,25} \right)^2 + \left(\frac{w_y}{56,45} \right)^2 + \left(\frac{w_z}{42,87} \right)^2} \quad (5)$$

donde w_x , w_y y w_z representan las velocidades angulares máximas en los ejes X, Y y Z, respectivamente.

Concussion Probability (CP)

Este indicador combina aceleraciones lineales y rotacionales para estimar la probabilidad de sufrir una concusión cerebral, según la ecuación propuesta por Rowson y Duma (2013):

$$CP = \frac{1}{1 + e^{-10,2+0,0433a+0,000873\alpha-0,000000920a\alpha}} \quad (6)$$

donde a es la aceleración lineal máxima y α la aceleración rotacional máxima del impacto.

Skull Fracture Criterion (SFC)

El criterio de fractura craneal se basa en la variación de la velocidad media del impacto durante un intervalo de 15 milisegundos, expresado como:

$$SFC = \frac{\Delta V_{15ms}}{\Delta T_{15ms}} \quad (7)$$

Este valor se correlaciona directamente con la probabilidad de fractura craneal en impactos puramente lineales.



Manual de ensamble Cuello Hybrid III

Version 1.2

Octubre 2025

1. Prefacio

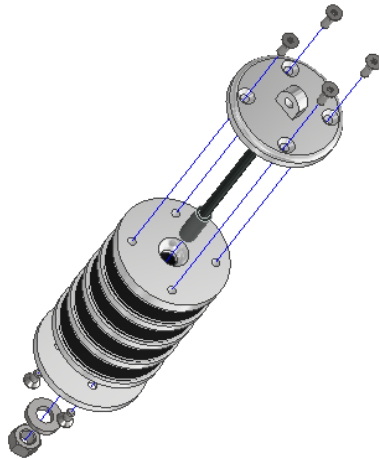
Este manual tiene como propósito asistir en el proceso de ensamblaje y montaje del sistema cabeza–cuello *Hybrid III* modificado, diseñado específicamente para su integración dentro del banco de pruebas de impactos desarrollado en este proyecto. El documento busca guiar al usuario en cada etapa del ensamblaje, asegurando una instalación correcta, segura y que preserve la biofidelidad mecánica del sistema.

El conjunto descrito está compuesto principalmente por el cuello tipo *Hybrid III* modificado, la placa de acople superior diseñada para un *headform* fabricado en MDF y resina, la placa de acople inferior adaptada para soldadura al cuerpo estructural y el eje de conexión cabeza–cuerpo.

En este manual se detalla exclusivamente el proceso de ensamblaje del cuello *Hybrid III* modificado, ya que constituye el elemento biomecánico central del sistema y requiere procedimientos de alineación y sujeción específicos para garantizar el comportamiento adecuado durante los ensayos de impacto. Para información complementaria sobre la instalación del marco estructural, los yunques y otros componentes del sistema de pruebas, se debe consultar la documentación técnica y los planos de construcción correspondientes.

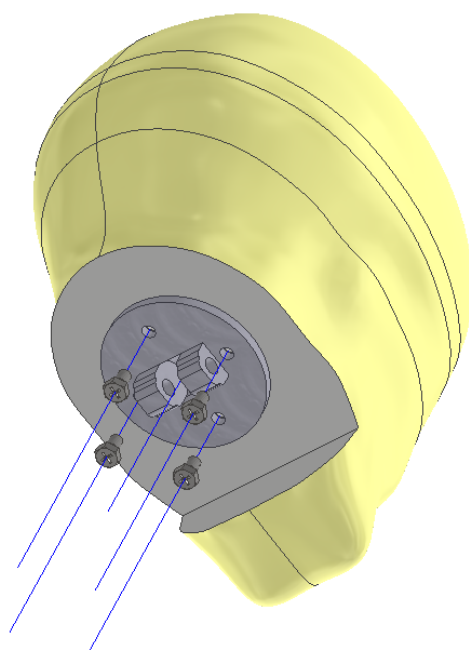
El objetivo principal de este documento es asegurar que el proceso de ensamblaje sea preciso, repetible y seguro, de modo que las pruebas realizadas con el sistema mantengan la coherencia con los parámetros de diseño y con las normativas internacionales utilizadas como referencia en este trabajo.

2. Ensamble



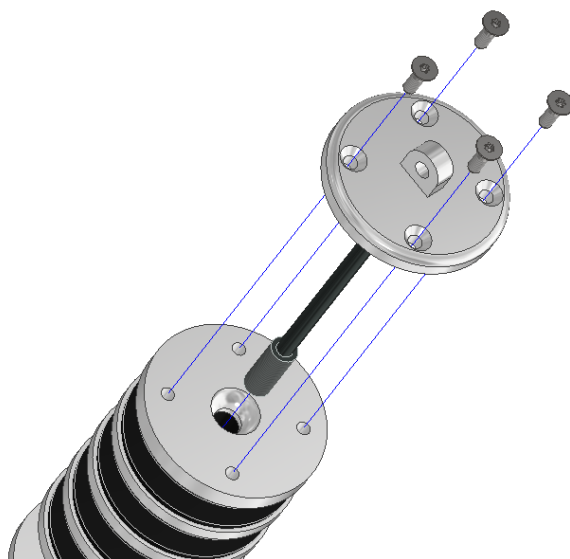
2.1. Placa de acople cabeza

Se debe introducir la placa de acople en el agujero correspondiente del *Head-form*, alinear los agujeros de la placa de acople con los agujeros de la cabeza y atornillar para llegar a una unión.



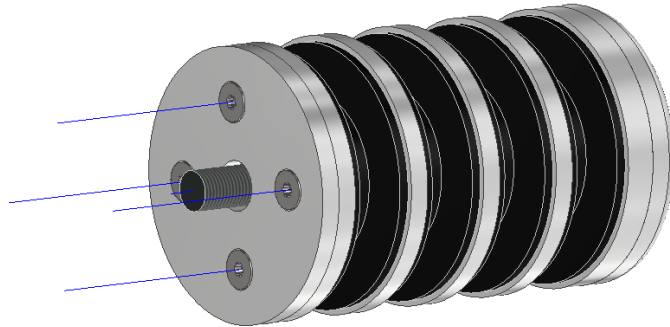
2.2. Placa superior de cuello

Alinear los agujeros y ajustar los tornillos para lograr la unión. Asegurarse de introducir el cable del cuello antes de completar la unión.



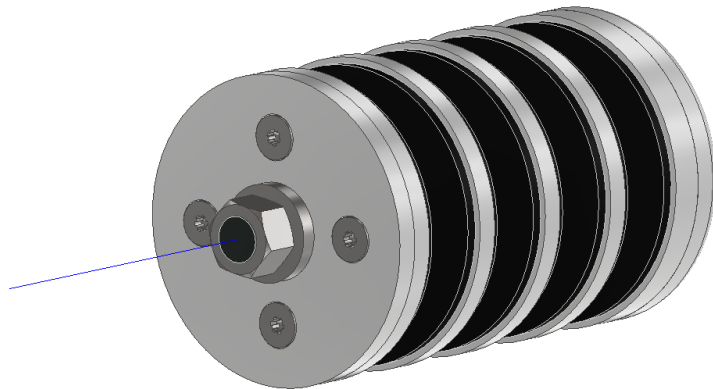
2.3. Placa inferior de cuello

Alinear los agujeros y ajustar los tornillos para lograr la unión. Asegurarse que el cable del cuello sobresalga.



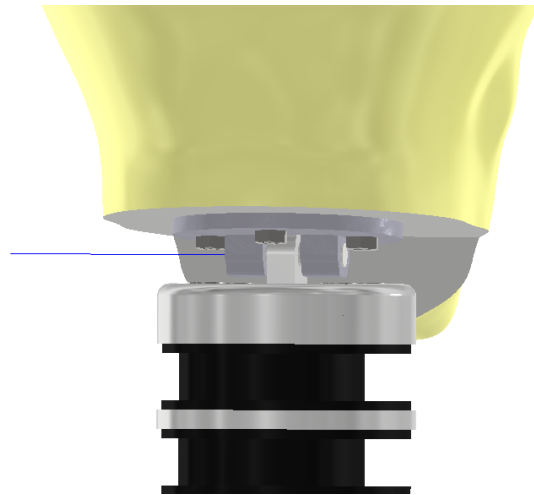
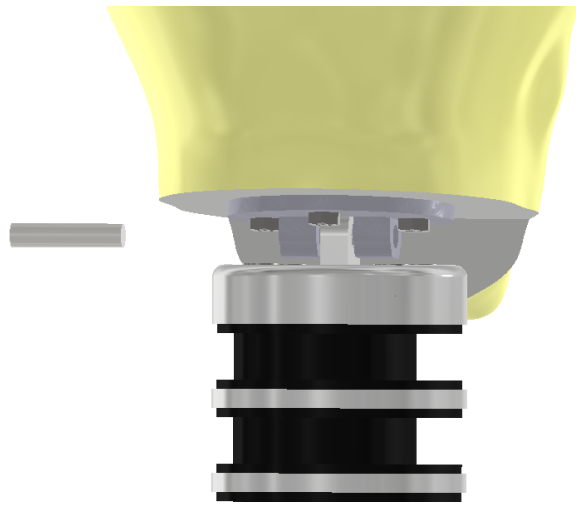
2.4. Cable de cuello Hybrid III

Insertar la roldana y tuerca del cuello, ejercer una precarga de 1.34 nM.



2.5. Eje de conexión cabeza-cuello

Alinear las placas de acople de cabeza y cuello, introducir el eje de conexión cabeza cuello para completar la unión.



ACEROS SUECOS



ACEROS SUECOS, S.A.

Avenida PETAPA 17-78, Zona 12, GUATEMALA, C.A.
TELEFONOS: 2210-2100, FAX: 2473-3764
email: aceros.suecos@nilspira.com



COTIZACION No 485001

PARA: IGNACIO CASADO SCHNEIDER

ATT:

FECHA: 08/09/2025

CANTIDAD PIEZAS	METERIAL Y/O HERRAMIENTA	PRECIO UNITARIO	PRECIO MATERIAL
1	1.00 MST LARGO COLD ROLLD BAR-CUADRADO 4"	3,945.260	Q3,945.26
1	0.50 MST LARGO COLD ROLLD BAR-CUADRADO 4"	1,982.420	Q1,982.42
1	8" LARGO BAR-PLATINA 1/8X2"	11.510	Q11.51
1	8" LARGO BAR-PLATINA 3/8X4"	58.310	Q58.31

**** CINCO MIL NOVECIENTOS NOVENTAY SIETE CON**

TOTAL

Q5,997.50

**"SUJETO A CAMBIO Y VENTA SIN PREVIO AVISO"
ESTA COTIZACION TIENE UNA VIGENCIA DE 03 DIAS**

ELABORADO POR: GABRIELA.CHAVEZ

aceros.suecos@nilspira.com

ACEROS SUECOS



ACEROS SUECOS, S.A.

Avenida PETAPA 17-78, Zona 12, GUATEMALA, C.A.
TELEFONOS: 2210-2100, FAX: 2473-3764
email: aceros.suecos@nilspira.com



COTIZACION No 491883

PARA: IGNACIO CASADO SCHNEIDER

ATT:

FECHA: 15/10/2025

ANTIDAD PIEZAS	METERIAL Y/O HERRAMIENTA		PRECIO UNITARIO	PRECIO MATERIAL
1	7.87	200 BAR-P 3/4X6"	178.500	Q178.50
1	6	152.4 EJE 1018-R 2"	53.720	Q53.72
1	39.37	1000 EJE 1018-R 3/8"	11.590	Q11.59
1	0.59	15 EJE 1018-R 3"	15.600	Q15.60
1	3	76.2 BAR-P 1X3"	48.600	Q48.60

** TRESCIENTOS OCHO CON 01/100 **

TOTAL

Q308.01

"SUJETO A CAMBIO Y VENTA SIN PREVIO AVISO"
ESTA COTIZACION TIENE UNA VIGENCIA DE 03 DIAS

ELABORADO POR: GABRIELA.CHAVEZ

aceros.suecos@nilspira.com

Glasgow Outcome Scale Extended: escala médica usada para la valoración del grado de recuperación de pacientes que sufrieron una lesión cerebral.

Headform: instrumento de medición con forma de una cabeza humana, usado para evaluar equipos de protección personal ante impactos. Este cuenta con medidores de velocidades con 6 grados de libertad.

Biofidelidad: grado de fidelidad con el que un sistema mecánico replica un componente biológico (por ejemplo, el gel balístico replica con fidelidad el comportamiento de la piel humana).