



Desenvolvimento e validação de equipamento automático de acompanhamento de quinagem

MIGUEL SANTOS COSTA OLIVEIRA

outubro de 2025



Desenvolvimento e validação de equipamento automático de acompanhamento de quinagem

Miguel Santos Costa Oliveira

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em
Construções Mecânicas**

Orientador: Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, Doutor, ISEP

Júri:

Presidente:

Armando José Vilaça de Campos, Professor Adjunto, ISEP

Vogais:

Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, Professor Coordenador com Agregação, ISEP

José Duarte Ribeiro Marafona, Professor Auxiliar, FEUP

Porto, setembro 2025

Agradecimentos

A realização desta dissertação foi um caminho desafiante, mas também muito enriquecedor, que só se tornou possível graças ao apoio de várias pessoas a quem quero deixar o meu agradecimento.

Ao Engenheiro Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, meu orientador, pela orientação rigorosa, pela disponibilidade e pelo conhecimento que partilhou comigo em todas as etapas deste trabalho.

Ao Engenheiro Miguel Casemiro Costa, pela atenção, pelos conselhos técnicos e pela colaboração que tanto acrescentaram a este projeto.

Ao João Esteves, pela ajuda incansável e pela dedicação, que foram fundamentais para superar muitos dos desafios que encontrei.

À minha família, pela confiança e pelo apoio constante, por estarem sempre presentes nos momentos bons e nos mais difíceis.

E, de forma muito especial, à minha namorada. Pelo carinho, pela paciência e pelo incentivo em todos os dias. Obrigado por acreditares em mim mesmo quando duvidei, por me dares ânimo quando as forças faltavam e por celebrares comigo cada pequena conquista. Mais do que apoio, foste inspiração.

A todos, deixo a minha sincera gratidão.

Resumo

A indústria metalomecânica assume um papel determinante na economia nacional, destacando-se como um setor impulsionador da inovação e da produtividade industrial. Entre os diversos processos de conformação de metais, a quinagem de chapas metálicas revela-se essencial, pela sua capacidade de produzir dobras com elevada precisão e robustez estrutural. No entanto, a qualidade da quinagem depende não apenas do desempenho da quinadora, mas também da correta estabilização da chapa durante o processo. Neste contexto, os acompanhadores de quinagem surgem como equipamentos auxiliares fundamentais, concebidos para acompanhar o movimento ascendente da chapa, prevenir deformações indesejadas e garantir a precisão do ângulo obtido. A sua aplicação permite uma melhoria significativa na eficiência e na repetibilidade das operações, pelo que este equipamento se torna uma resposta concreta às exigências crescentes de qualidade, segurança e produtividade na indústria. A presente dissertação teve como principal objetivo o desenvolvimento de um novo modelo de acompanhador de quinagem, capaz de substituir o equipamento atualmente utilizado na empresa. Procurou-se conceber uma solução robusta e funcional que acompanhasse de forma precisa o movimento natural da chapa durante a operação de quinagem, o que garante a segurança do operador e a integridade do material. Para tal, integraram-se conceitos de projeto mecânico, ferramentas CAD, metodologias de dimensionamento estrutural e cinemático, bem como a seleção criteriosa de materiais e processos de fabrico. Adicionalmente, procedeu-se à análise do sistema de acionamento, à estimativa de custos e à comparação da solução proposta com equipamentos concorrentes existentes no mercado. Este trabalho pretendeu ainda reforçar o conhecimento técnico na área dos dispositivos auxiliares de quinagem, ao identificar tendências tecnológicas e propor uma solução viável e otimizada. Como resultado, o acompanhador de quinagem desenvolvido cumpre integralmente os requisitos e limitações definidos, e demonstra elevada funcionalidade e desempenho. A solução apresentada revela-se economicamente mais vantajosa do que o equipamento atualmente em uso, sem comprometer a fiabilidade e a precisão do processo. Desta forma, todos os objetivos estabelecidos foram plenamente atingidos, de modo a validar a proposta como uma alternativa eficaz e competitiva para aplicação industrial.

Palavras-chave: Projeto mecânico; Análise cinemática; Quinadora; Matriz de quinagem; Acompanhador de quinagem; Método de elementos finitos.

Abstract

The metalworking industry plays a decisive role in the national economy, standing out as a sector that drives innovation and industrial productivity. Among the various metal forming processes, sheet metal bending is essential due to its ability to produce bends with high precision and structural strength. However, the bending quality depends not only on the performance of the bending machine, but also on the correct stabilisation of the sheet during the process. In this context, sheet followers are essential auxiliary equipment, designed to accompany the upward movement of the sheet, prevent unwanted deformations and ensure the accuracy of the angle obtained. Their application allows for a significant improvement in the efficiency and repeatability of operations, making this equipment a concrete response to the growing demands for quality, safety, and productivity in the industry. The main objective of this dissertation was to develop a new sheet follower model, capable of replacing the equipment currently used in the company. The aim was to design a robust and functional solution that would accurately follow the natural movement of the sheet metal during the bending operation, ensuring operator safety and material integrity. To this end, mechanical design concepts, CAD tools, and structural and kinematic dimensioning methodologies were integrated, as well as the careful selection of materials and manufacturing processes. In addition, the drive system was analysed, costs were estimated, and the proposed solution was compared with competing equipment on the market. This work also aimed to reinforce technical knowledge in the area of auxiliary tilting devices by identifying technological trends and proposing a viable and optimised solution. As a result, the developed bending monitor fully complies with the defined requirements and limitations, and demonstrates high functionality and performance. The solution presented is economically more advantageous than the equipment currently in use, without compromising the reliability and accuracy of the process. Thus, all the established objectives were fully achieved, validating the proposal as an effective and competitive alternative for industrial application.

KEYWORDS: Mechanical design; Kinematic analysis; Press brake machine; Press brake die; Press brake sheet follower; Finite element method.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xvii
Acrónimos e Símbolos	xix
1. Introdução	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Estrutura	2
2. Revisão bibliográfica	3
2.1. Projeto mecânico	3
2.1.1. Contextualização e etapas do projeto	3
2.1.2. Metodologias de <i>Design for X</i>	4
2.1.3. Conceção de equipamentos mecânicos	5
2.1.4. Ferramentas CAD/CAE/CAM	6
2.1.5. Cinemática de mecanismos	7
2.2. Tecnologias de processamento de chapa	8
2.2.1. Processos de fabrico para chapa	8
2.2.2. Fundamentos do processo de quinagem	10
2.2.3. Influência das variáveis de processo	12
2.2.4. Defeitos típicos em quinagem	13
2.2.5. Equipamentos e fabricantes	14
2.2.6. Metodologias de cálculo	15
2.2.7. Estado da arte	16
2.3. Projeto de quinadoras e acompanhadores de quinagem	18
2.3.1. Princípios de funcionamento	18
2.3.2. Sistemas da quinadora e ligações	19
2.3.3. Acompanhadores de quinagem	20
2.3.4. Compatibilização do movimento da chapa	21
2.3.5. Sistemas disponíveis no mercado	23
2.3.6. Estado da arte	25
3. Desenvolvimento	27

3.1. Apresentação da entidade acolhedora	27
3.2. Metodologia a aplicar	28
3.3. Caracterização do processo atual	29
3.4. Identificação de problemas e limitações	33
3.5. Definição de objetivos específicos	38
3.6. Requisitos e limitações.....	39
3.7. Anteprojeto	43
3.7.1. Técnica de seleção de soluções a adotar	43
3.7.2. Estrutura e ligação à quinadora	46
3.7.3. Cadeia cinemática	48
3.7.4. Acionamento.....	52
3.7.5. Definição das soluções a adotar	54
3.8. Projeto.....	57
3.8.1. Apresentação do equipamento final	57
3.8.2. Princípio de funcionamento.....	58
3.8.3. Validação estrutural.....	61
3.8.3.1. Pré-processamento	62
3.8.3.2. Estudo de convergência.....	64
3.8.3.3. Resultados	65
3.8.4. Estrutura e ligação à quinadora	66
3.8.4.1. Descrição do conceito.....	67
3.8.4.2. Dimensionamento de componentes normalizados	72
3.8.5. Cadeia cinemática	74
3.8.5.1. Descrição do conceito.....	75
3.8.5.2. Estudo cinemático	77
3.8.5.3. Dimensionamento de componentes normalizados	87
3.8.6. Acionamento.....	89
3.8.6.1. Descrição do conceito.....	89
3.8.6.2. Dimensionamento de componentes normalizados	92
3.8.7. Materiais e processos de fabrico	102
3.8.8. Automação e controlo	105
3.8.9. Dispositivos de segurança.....	106
3.8.10. Plano de manutenção	108
3.8.11. Análise de custos	109
3.8.12. Comparação com produtos concorrentes.....	110
4. Conclusão.....	111
4.1. Conclusões finais.....	111
4.2. Limitações e trabalhos futuros.....	113
Referências.....	115

Declaração de Integridade	121
Apêndice A	123
Apêndice B	125
Apêndice C	127
Apêndice D	129
Anexo A	209

Lista de Figuras

Figura 1 - (a) Design de retículo tradicional (b) Design de retículo com DfA [3].	5
Figura 2 - Exemplo de sistema CAM [10].	7
Figura 3 - Processos de fabrico de chapa: (a) quinagem [14], (b) corte [14], (c) <i>blanking</i> e <i>piercing</i> [17].	9
Figura 4 - Processo de embutidura [14].	10
Figura 5 - Diferentes tipos de quinagem: (a) quinagem em V [21], (b) quinagem em U [21], (c) quinagem por <i>wiping</i> [22] e (d) quinagem por rolo [23].	11
Figura 6 - Defeitos típicos em quinagem [26].	13
Figura 7 - Diferentes quinadoras: (a) TRUMPF [32], (b) AMADA [33], (c) Bystronic [34], (d) ADIRA [35].	15
Figura 8 - Principais constituintes de uma quinadora [42].	18
Figura 9 - Exemplo de funcionamento ACCURL [47].	20
Figura 10 - Exemplo do movimento de um acompanhador ADIRA (elaboração própria)	22
Figura 11 - Sistemas de curso único: (a) Gasparini [51], (b) SafanDarley [52], (c) Patente Estados Unidos [53].	23
Figura 12 - Sistema de curso duplo da Bystronic [54].	24
Figura 13 - Sistemas de movimento relativo de braços: (a) Triveneta Impianti [55], (b) Patente portuguesa [56].	24
Figura 14 - Sistema de dois acionadores da Boschert Gizelis [57].	25
Figura 15 - (a) Logótipo da empresa, (b) Quinadora PA, (c) Quinadora PH [62].	28
Figura 16 - Etapas da metodologia DSR [80].	29
Figura 17 - Eixos do acompanhador Adira: (a) X e Z, (b) X e Y.	30
Figura 18 - Esquema da estrutura do acompanhador Adira.	30
Figura 19 - Componentes do acompanhador Adira.	31
Figura 20 - (a) Chumaceira num ponto fixo, (b) chaveta no ponto B.	32
Figura 21 - Acompanhador ArgeSystems [64].	33
Figura 22 - Ponto CIR ideal.	34
Figura 23 - Representação do CIR do acompanhador Adira.	34
Figura 24 - Movimento do acompanhador - (a) atrasado, (b) adiantado.	35
Figura 25 - Gráfico de dispersão da distância entre retas do acompanhador Adira.	36
Figura 26 - Gráfico de dispersão da distância entre retas do acompanhador Argesystems F1P.	37
Figura 27 - Comparação do comportamento da distância entre retas do acompanhador Adira e do acompanhador Argesystems F1P.	38
Figura 28 - Objetivos do acompanhador.	39
Figura 29 - Tabela de quinagem do catálogo da Adira [65].	41
Figura 30 - Gráfico de dimensões de chapa de aço carbono a utilizar no acompanhador.	42
Figura 31 - Dimensões de chapa a utilizar no acompanhador: (a) alumínio e (b) aço inoxidável.	43
Figura 32 - Estrutura do acompanhador.	46

Figura 33 - Pontos de contacto da chapa.....	48
Figura 34 - Trajetória da chapa.	49
Figura 35 - Sistemas de acionamento simples: dois acionadores (a), acionador vertical (b), mecanismo dividido (c) e acionador paralelo à mesa (d).	50
Figura 36 - Sistemas de acionamento de interação de braços: (a) e (b).....	51
Figura 37 - Mecanismo de dois losangos: (a) Adira; (b) acompanhador externo.	51
Figura 38 - Projeção de braços para obter o CIR: (a) Adira, (b) acompanhador externo.	52
Figura 39 - CIR da mesa de apoio à chapa.	52
Figura 40 - Tipos de acionamento: (a) cilindro elétrico [73], (b) cilindro pneumático [74], (c) fuso de esferas [75], (d) pinhão cremalheira [76], (e) correia dentada [77], (f) came-seguidor [78].	54
Figura 41 - Apresentação do equipamento final.....	58
Figura 42 - Ângulo de quinagem e ângulo do acompanhador.....	59
Figura 43 - Pontos de contacto entre os braços e a mesa (a), mecanismo <i>fail-safe</i> (b).	60
Figura 44 - Eixos do acompanhador: X e Z (a), Y (b).....	61
Figura 45 - Mudança da geometria do perfil: inicial (a), final (b).....	62
Figura 46 - Diferentes tipos de conexões: ligação tipo pino (a), pontos encastrados (b).....	63
Figura 47 - Forças externas na simulação: força da gravidade (a), força do peso da chapa (b), força de suporte do atuador (c).	63
Figura 48 - Ponto de referência do estudo de convergência.	64
Figura 49 - Simulação do SolidWorks®: Tensão de Von Mises (a), deslocamento (b) e fator de segurança (c).	65
Figura 50 - Pontos críticos de Tensão de Von Mises: veio de aplicação (a), ponto de fixação do mecanismo de braços (b) e ponto de ligação do acompanhador à quinadora.	66
Figura 51 - Ligação do acompanhador à quinadora: sistema de fixação à quinadora (a), movimento do ajuste em Z (b) e avental fixo (c).	67
Figura 52 - Componentes laterais do acompanhador: H-0013 (a) e H-0012 (b).....	68
Figura 53 - Detalhe do componente H-0024 com: H-0013 (a) e H-0012 (b).....	69
Figura 54 - Componentes de fixação da estrutura: pontos de fixação (a) e H-0027, H-0031 (b).	69
Figura 55 - Fixação do sistema de acionamento.	70
Figura 56 - Sistema de ajuste do eixo z: mecanismo da manivela (a) e mecanismo do redutor (b).	71
Figura 57 - Sistema de ajuste no eixo x.....	71
Figura 58 - Sistema de fole.....	71
Figura 59 - Rolamentos do sistema de ajuste: SKF FY 15 M (a), SKF 61802-2RS1 (b), SKF F2BRD 503 (c) e SKF 3204 A-2RS1 (d).	73
Figura 60 - Braços B-0002: detalhe do ponto fixo.....	75
Figura 61 - Sistema de braços do mecanismo.....	76
Figura 62 - Reforços entre os braços: B-0002 (a), B-0004 (b), B-0001 (c) e B-0003 (d).	76
Figura 63 - Componente H-0008.....	77
Figura 64 - Sistema de extensão da mesa.....	77
Figura 65 - Mecanismo do acompanhador de quinagem desenvolvido.....	78

Figura 66 - CIR da barra CDJ.	78
Figura 67 - CIR da barra ADE.	79
Figura 68 - CIR da barra IJ.	79
Figura 69 - CIR da mesa de contacto com a chapa.	80
Figura 70 - Princípio lógico do ensaio.	81
Figura 71 - Matriz utilizada no ensaio [81].	82
Figura 72 - Esquema do ensaio para uma distância de 260 mm.	83
Figura 73 - Esquema do ensaio para uma distância de 280 mm e 300 mm.	84
Figura 74 - Distância entre retas em função do ângulo do acompanhador.	85
Figura 75 - Dispersão: ensaios e teórico.	86
Figura 76 - Possíveis erros no ensaio: (a) zona sem apoio entre o acompanhador e a matriz, (b) falta de apoio da chapa na matriz, (c) erros no posicionamento do paquímetro e (d) flexão das escovas.	87
Figura 77 - Rolamento utilizado nos braços do mecanismo [82].	87
Figura 78 - Forças críticas para dimensionamento de rolamentos.	88
Figura 79 - Diferentes pontos de acionamento: braço AE (a), braço EI (b) e braço CDJ (c).	90
Figura 80 - Decomposição do peso da chapa com o acompanhador a: 0° (a), 45° (b) e 60° (c).	91
Figura 81 - Direção da força de acionamento.	91
Figura 82 - Diagrama de corpo livre do mecanismo do acompanhador.	92
Figura 83 - Catálogo do modelo do cilindro elétrico LEY100 [83].	95
Figura 84 - Esquema da velocidade do acompanhador.	97
Figura 85 - Raio do ponto de contacto do punção com a chapa até ao CIR.	97
Figura 86 - Diferentes tipos de montagem do motor: em linha (a), em paralelo (b) e distância do topo da matriz ao solo (c).	99
Figura 87 - Diferentes tipos de fixação do cilindro: <i>foot bracket</i> (a), <i>double clevis</i> (b).	100
Figura 88 - Especificações da compatibilidade do motor elétrico com o cilindro SMC ([83]).	101
Figura 89 - Diferentes posições do acompanhador: 0° (a), 30° (b) e 60° (c).	101
Figura 90 - <i>Sketch</i> do acompanhador em diferentes ângulos: 0° (a) e 60° (b).	102
Figura 91 - Componentes quinados: suporte da mesa (a) e mesa (b).	103
Figura 92 - Componentes sujeitos a corte: H-0012 (a), H-0027 (b) e H-0008 (c).	104
Figura 93 - Componentes maquinados: H-0020 (a) e H-0016 (b).	104
Figura 94 - Componente torneado.	104
Figura 95 - Componentes soldados.	105
Figura 96 - Dispositivos de segurança.	107
Figura 97 - Acompanhador de quinagem [55]	127
Figura 98 - Sensores de posição [95]	128
Figura 99 - Laser de segurança [96]	128

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Estado da arte das tecnologias de processamento de chapa	16
Tabela 2 - Sistemas que constituem uma quinadora [46].	19
Tabela 3 - Estado da arte de quinadoras e acompanhadores de quinagem.....	25
Tabela 4 - Variação da distância entre retas do acompanhador Adira.....	36
Tabela 5 - Variação da distância entre retas do acompanhador Argesystems F1P.	37
Tabela 6 - Exemplo de matriz da ponderação.....	44
Tabela 7 - Classificação de propriedades.	45
Tabela 8 - Exemplo de matriz de decisão.....	45
Tabela 9 - Matriz de ponderações do acompanhador de quinagem.....	56
Tabela 10 - Matriz de decisão da cadeia cinemática.	56
Tabela 11 - Matriz de decisão do acionamento.	57
Tabela 12 - Estudo de convergência.	64
Tabela 13 - Distância entre retas em função do ângulo da quinadora e da distância do acompanhador ao vértice da matriz.	85
Tabela 14 - Distância entre retas: experimental e analítica.	86
Tabela 15 - Dimensionamento da velocidade do cilindro.....	99
Tabela 16 - Propriedades do aço AISI 1020 [84].	102
Tabela 17 - Plano de manutenção do acompanhador de quinagem.....	108
Tabela 18 - Comparação com produtos concorrentes.....	110
Tabela 19 - Avaliação do cumprimento dos requisitos.....	112

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CE	Conformidade Europeia
CIR	Centro Instantâneo de Rotação
CNC	<i>Computerized Numerical Control</i>
DSR	<i>Design Science Research</i>
EN	<i>European Norm</i>
ISF	<i>Incremental Sheet Forming</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MEF	Método de Elementos Finitos
RB	<i>Roll Bonding</i>
TPIF	<i>Two Point Incremental Forming</i>

Lista de Símbolos

V	abertura da matriz	mm
a	aceleração	m/s ²
α	aceleração angular	rad/s ²
g	aceleração da gravidade	m/s ²
h	altura	mm
ϑ	ângulo	°
β	ângulo da chapa	°
T_1	binário de entrada	N.m
T_2	binário de saída	N.m
C	capacidade dinâmica	kN
C_0	capacidade estática	kN
P_0	carga estática	kN
Ω_i	classificação atributo	-
θ_i	classificação ponderada	-

S_0	coeficiente segurança estática	-
L	comprimento efetivo	m
CL	comprimento longitudinal	m
c	coordenada de interseção no eixo vertical	m
X,Y,Z	coordenadas cartesianas	-
m_d	declive	-
y	distância ao eixo	mm
d	distância entre retas	mm
l	distância entre retas	mm
e	espessura da chapa	mm
X	fator do ângulo de contacto	-
Y	fator do ângulo de contacto	-
F	força aplicada	N
F_a	força axial	kN
N	força do cilindro	N
F_{hum}	força estimada	N
F_r	força radial	kN
w_i	importância relativa do atributo	-
b	largura da chapa	mm
m	massa	kg
ρ	massa volúmica	kg/m ³
M	momento	N.m
I	momento de inércia	mm ⁴
I_{CIR}	momento de inércia no CIR	kg.m ²
p	passo	mm
P	peso	N
V_i	pontos para os atributos	-
PF	profundidade da chapa fora da quinadora	m
i	rácio do redutor	-
r	raio	mm
ri	raio interno	mm
η	rendimento	-
η_s	rendimento rosca	-

n	rotações por minuto	rpm
t	tempo	s
σ	tensão	MPa
V_m	valor medido	mm
ω	velocidade angular	rad/s
ω_0	velocidade angular inicial	rad/s
V_q	velocidade de quinagem	mm/s
V_a	velocidade do acionador	mm/s
V_{aq}	velocidade linear da chapa	mm/s
L_{10}	vida básica	Milhões de ciclos
L_{10h}	vida básica em horas	h
v	volume	m ³

1. Introdução

1.1. Contextualização

A indústria metalomecânica desempenha um papel central na economia portuguesa, sendo um dos principais motores de produção e inovação tecnológica. Ao longo das últimas décadas, este setor tem registado uma evolução significativa, impulsionada pela adaptação às exigências contemporâneas de eficiência e precisão, que são essenciais para manter a competitividade num mercado global. No âmbito da transformação de metais, foram desenvolvidas várias técnicas para moldar e ajustar este tipo de material às solicitações industriais. Entre os processos mais importantes destaca-se a quinagem de chapas metálicas, uma técnica de conformação a frio que permite realizar dobras precisas, aumenta a rigidez estrutural e confere maior resistência às peças. A quinagem é efetuada por um equipamento específico, a quinadora, que ao longo do tempo se diversificou em diferentes tipos de acionamento, mecânico, hidráulico, elétrico e híbrido, no sentido de maximizar a força aplicada e aprimorar a precisão. Atualmente, as quinadoras hidráulicas sobressaem no setor pela elevada capacidade de carga e adaptabilidade, o que as transforma numa opção preferencial em várias aplicações industriais. No entanto, apesar dos avanços das quinadoras, o processo de quinagem apresenta desafios técnicos devido à complexidade dos fatores que influenciam a qualidade da chapa quinada, como a precisão do ângulo de dobra e a integridade da chapa. Para mitigar estes desafios, o desenvolvimento de dispositivos auxiliares à quinagem, como os acompanhadores de quinagem, surge como uma solução promissora. Estes equipamentos têm a função de estabilizar e suportar a chapa durante a dobra, ao acompanhar o movimento da peça para garantir o ângulo de dobra pretendido e minimizar defeitos. O desenvolvimento de um acompanhador de quinagem eficiente representa uma resposta às necessidades atuais de precisão e qualidade, o que possibilita que o setor continue a evoluir tecnologicamente e a manter-se competitivo. Desta forma, este estudo não só contribui para o avanço do conhecimento no campo da conformação metálica, mas também promove o desenvolvimento de soluções práticas que respondam às crescentes exigências da indústria, como a melhoria da precisão, a redução de defeitos e o aumento da eficiência dos processos de quinagem.

1.2. Objetivos

O principal objetivo desta dissertação consiste no desenvolvimento de um novo modelo de acompanhador de quinagem, com vista à substituição do equipamento atualmente utilizado na

empresa. Pretende-se conceber uma solução técnica que assegure o acompanhamento eficiente do movimento natural da chapa durante o processo de quinagem, de modo garantir a segurança do operador e a integridade do material.

Este trabalho visa ainda integrar diversos conceitos de projeto mecânico, recorrendo a ferramentas CAD e aplicando metodologias de dimensionamento estrutural, cinemático e funcional, de forma a validar a solução proposta. A análise estende-se também à seleção criteriosa de materiais e processos de fabrico, bem como ao estudo do sistema de acionamento. Para além do projeto técnico, procura-se assegurar a viabilidade industrial da solução através da estimativa de custos e da comparação com produtos concorrentes disponíveis no mercado.

1.3. Estrutura

A presente dissertação encontra-se estruturada de forma sequencial e lógica. A sua organização visa abordar progressivamente os aspetos teóricos, técnicos e práticos que sustentam o projeto.

O Capítulo 1 apresenta a contextualização do tema, define os objetivos gerais e específicos do trabalho e clarifica a estrutura global da dissertação.

No Capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica detalhada. Esta abrange os fundamentos do projeto mecânico, as metodologias de conceção e normalização, as ferramentas digitais utilizadas, os processos de fabrico de chapa e, por fim, os princípios de funcionamento e os sistemas associados às quinadoras e respetivos acompanhadores. A análise contempla ainda o estado da arte e os sistemas atualmente disponíveis no mercado.

O Capítulo 3 foca-se no desenvolvimento do projeto. Esta começa com a apresentação da entidade acolhedora e segue-se a descrição da metodologia adotada. Caracteriza-se o processo produtivo atual, identificam-se os principais problemas e limitações, e definem-se os requisitos e objetivos técnicos a cumprir. Nos subcapítulos seguintes, descreve-se o anteprojecto, a análise comparativa de soluções, o projeto final e o respetivo dimensionamento estrutural, cinemático e funcional. Este capítulo contempla ainda a seleção de materiais e processos de fabrico, os sistemas de automação e segurança, o plano de manutenção, a análise de custos e a comparação com soluções concorrentes.

O Capítulo 4 encerra a dissertação com as conclusões finais e propõe linhas de investigação e desenvolvimento futuro. Seguem-se as referências bibliográficas, os apêndices e anexos que suportam tecnicamente a informação apresentada.

2. Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica estabelece as bases teóricas e práticas para o desenvolvimento de um acompanhador de quinagem, ao analisar tecnologia, métodos de fabrico e dispositivos auxiliares à quinagem. Explora-se o projeto mecânico, com foco em metodologias de *Design for X*, engenharia inversa e ferramentas como CAD, CAE e CAM, além do método de elementos finitos para avaliar a resistência dos componentes. Discutem-se os processos de fabrico de chapas, especialmente a quinagem, que inclui equipamentos, ferramentas e inovações do setor. Por fim, examinam-se os sistemas de quinadoras e acompanhadores de chapa, com o objetivo de desenvolver uma solução eficiente e de realizar o estado da arte dos mesmos.

2.1. Projeto mecânico

O "Projeto Mecânico" é uma área central na engenharia dedicada ao desenvolvimento de sistemas mecânicos de forma a criar equipamentos eficientes e seguros. Esta área da engenharia utiliza metodologias como *Design for X*, engenharia inversa e ferramentas CAD, CAE e CAM para otimizar o fabrico e montagem, além de reduzir custos. O método de elementos finitos e a análise cinemática também são essenciais, pois asseguram resistência da peça e precisão no movimento dos componentes.

2.1.1. Contextualização e etapas do projeto

O projeto mecânico é uma disciplina fundamental na engenharia, responsável pela conceção, desenvolvimento e otimização de componentes e sistemas mecânicos. Este processo requer uma abordagem estruturada, que combina princípios teóricos e práticos para criar soluções inovadoras e funcionais. A integração de métodos analíticos e computacionais permite garantir a eficácia e a precisão na conceção de mecanismos de modo a assegurar que os requisitos técnicos e funcionais são devidamente cumpridos [1]. No âmbito do desenvolvimento de projetos mecânicos, é essencial definir etapas claras e bem estruturadas que orientem a progressão do trabalho [1]:

- **Identificação dos requisitos do cliente:** Esta fase inicial consiste em compreender as necessidades e expectativas do cliente ou utilizador final. Inclui a análise do contexto de aplicação e a determinação das funções e características desejadas para o produto;
- **Definição das especificações técnicas:** Com base nos requisitos identificados, são estabelecidos os parâmetros técnicos que orientam o design. Estes parâmetros incluem

dimensões, materiais, tolerâncias e outros critérios essenciais para o desempenho e a funcionalidade do produto;

- **Geração e seleção de conceitos:** Esta etapa foca-se na criação de soluções alternativas que satisfaçam os requisitos técnicos e funcionais. Após a geração de várias propostas, são utilizadas ferramentas de análise para selecionar o conceito mais viável;
- **Modelação e Simulação:** O conceito selecionado é desenvolvido detalhadamente através de ferramentas computacionais como CAD e CAE. Estas ferramentas permitem avaliar o desempenho do produto;
- **Validação do Projeto:** A etapa final consiste na construção e teste de protótipos para validar o desempenho do produto. Os ensaios permitem identificar falhas ou limitações no design, o que leva às necessárias correções antes da produção final.

2.1.2. Metodologias de *Design for X*

O *Design for X* (DfX) é uma abordagem que visa otimizar o processo de design para atender a uma série de critérios específicos durante o desenvolvimento de produtos. O "X" em DfX pode representar diferentes objetivos ou aspetos de projeto, tais como montagem, manutenção, produção, segurança, sustentabilidade e outros fatores críticos. O objetivo central do DfX é integrar essas considerações desde as etapas iniciais do design, de modo a obter um produto mais eficiente e eficaz ao longo de todo o seu ciclo de vida. Esta metodologia possibilita uma redução de custos, melhor qualidade e minimização de erros em fases subsequentes de desenvolvimento e fabricação [2]. Ao compreender o conceito do DfX como uma abordagem que integra diferentes critérios desde o início do projeto, é possível perceber como essa metodologia se desdobra em diversas aplicações práticas [3]:

- ***Design for Assembly (DfA)*:** Foca em simplificar o processo de montagem dos produtos e reduzir o número de componentes e etapas necessárias, como se observa na Figura 1. O objetivo do DfA é otimizar o tempo de montagem e reduzir custos relacionados à mão de obra e complexidade da montagem;
- ***Design for Manufacturing (DfM)*:** Facilita a fabricação, o que leva o design a ser mais adequado para os processos de produção. Esta metodologia leva em consideração a escolha de materiais, métodos de produção e a viabilidade económica do produto;
- ***Design for Reliability (DfR)*:** Garante que o produto funcione de forma consistente sob diferentes condições e ao longo do tempo. O DfR também inclui a análise de falhas e a realização de ensaios para prever a durabilidade do produto;
- ***Design for Maintainability (DfM)*:** Foca a facilidade de manutenção e assegura que os produtos possam ser reparados com facilidade. Este conceito implica projetar peças acessíveis e substituíveis para minimizar o tempo de inatividade durante reparações;
- ***Design for Environment (DfE)*:** Incorpora práticas sustentáveis no design. O DfE promove a escolha de materiais recicláveis, a eficiência energética e a minimização do impacto ambiental na produção e ao longo do ciclo de vida do produto;

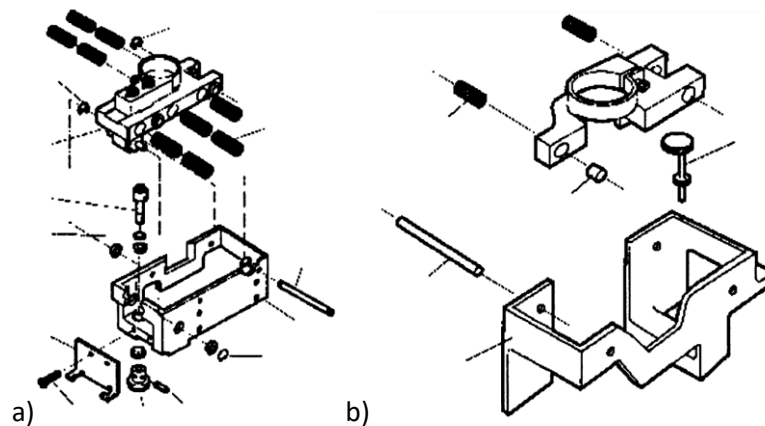


Figura 1 - (a) Design de retículo tradicional (b) Design de retículo com DfA [3].

- **Design for Cost (DfC):** Destaca a minimização de custos sem sacrificar a qualidade ou desempenho. Esta abordagem analisa alternativas de materiais e métodos de produção para encontrar soluções mais económicas;
- **Design for Safety (DfS):** Coloca a segurança dos utilizadores em primeiro lugar e garante que os riscos de uso do produto sejam minimizados ou eliminados. O DfS envolve a implementação de normas de segurança e a realização de testes rigorosos.

2.1.3. Conceção de equipamentos mecânicos

O design em engenharia mecânica pode ser compreendido como um processo sistemático de desenvolvimento de soluções que atendem a requisitos específicos de desempenho e funcionalidade. Este processo é iterativo, centrado na inovação e na resolução de problemas técnicos. Além disso, a conceção de equipamentos não se limita à mera construção física; envolve também a antecipação de desafios relacionados com a fabricação, manutenção e funcionalidade ao longo do ciclo de vida do produto. Deste modo, o design de máquinas é estruturado em diversas fases, cada uma com sua importância específica. Este processo é organizado em etapas que abrangem desde a identificação de uma necessidade até à conclusão do planeamento do produto. As fases envolvidas são as seguintes [4]:

- **Identificação da necessidade:** A primeira fase envolve identificar e definir uma necessidade específica que o equipamento deverá satisfazer;
- **Definição do problema:** Com a necessidade identificada, o próximo passo é definir o problema, incluindo todas as especificações de desempenho, dimensões e restrições;
- **Síntese:** Consiste na criação do conceito ou design inicial, onde são geradas e avaliadas soluções com base nas especificações. Na síntese também se executa uma seleção das soluções mais viáveis conforme as restrições e metas de desempenho do projeto;
- **Análise e otimização:** Uma vez definido o conceito inicial, é necessário analisar as soluções potenciais para verificar sua viabilidade e eficiência. Nesta fase, são realizadas simulações, cálculos e ajustes para garantir que o design atenderá aos requisitos funcionais e de segurança;

- **Avaliação:** Processo de verificação do projeto. Nesta fase são construídos e testados protótipos para garantir o cumprimento dos requisitos e identificar possíveis falhas;
- **Apresentação:** O design é formalmente apresentado, com a documentação completa. Esta fase inclui planos, especificações e manuais de instruções.

O uso de *softwares* de *Computer aided design* (CAD) e *Computer aided engineering* (CAE) não apenas facilita a visualização e a iteração de ideias, mas também potencializa a capacidade de resolver problemas técnicos de forma mais eficiente [4]. Além disso, estas ferramentas oferecem recursos avançados de simulação e análise e permitem a avaliação do comportamento do produto sob diversas condições. Desta forma, é possível identificar e corrigir falhas potenciais de forma antecipada. A escolha de realizar um projeto baseado em engenharia inversa surge da necessidade de melhorar um produto já existente na empresa. Este método permite analisar em profundidade as características do produto original, identificar suas falhas e limitações, e, a partir daí, desenvolver uma versão melhorada. A engenharia inversa contribui significativamente para a compreensão do design e funcionamento de um equipamento e oferece uma abordagem sistemática para replicar e melhorar designs existentes [5]. Ao contrário da engenharia convencional, que parte de conceitos e modelos para gerar peças requeridas, a engenharia inversa transforma componentes físicos em modelos digitais e conceitos de engenharia [5]. A engenharia inversa possui uma vasta gama de aplicações [6]:

- **Recriação de peças comerciais:** Permite a criação de componentes para fins lucrativos;
- **Restauração:** Facilita a restauração de peças antigas que não têm desenhos originais;
- **Produção de peças sobressalentes:** Possibilita a fabricação de componentes quando os desenhos originais não estão disponíveis;
- **Análise e modificação de designs existentes:** Contribui para a melhoria de produtos através da análise de designs já existentes;
- **Investigação de falhas e acidentes:** Ajuda a entender a causa de falhas em produtos, o que é vital para a segurança e confiabilidade;
- **Compreensão da concorrência:** Permite uma análise detalhada da tecnologia utilizada em produtos concorrentes.

A engenharia inversa é uma ferramenta importante para empresas que desejam reduzir o tempo e os custos de desenvolvimento, melhorar a qualidade dos produtos e obter uma vantagem competitiva. Contudo, o processo pode ser complexo pois pode exigir *hardware* e *software* especializados, bem como a experiência de engenheiros qualificados [5]. Para conhecimento das normas aplicáveis a equipamentos mecânicos consultar o Apêndice A.

2.1.4. Ferramentas CAD/CAE/CAM

Este capítulo explora a aplicação integrada das ferramentas CAD, CAE e CAM no desenvolvimento de um projeto mecânico. Estas metodologias, cada vez mais comuns na indústria, permitem otimizar o processo de desenvolvimento de produtos, desde a concepção inicial até à produção final. Através da utilização destas ferramentas, é possível criar modelos

virtuais precisos, simular o comportamento do produto em diversas condições e gerar instruções detalhadas para a fabricação automatizada. A integração destas tecnologias proporciona um fluxo de trabalho contínuo e eficiente e reduz significativamente o tempo de desenvolvimento e os custos de produção [7].

O CAD envolve a criação de representações digitais detalhadas de produtos. Este *software* utiliza-se para desenvolver e modificar modelos em 2D e 3D, de modo que o utilizador visualize, ajuste e documente projetos antes da fase de produção [8]. Essencialmente, o CAD é uma ferramenta fundamental na fase de design, que proporciona uma plataforma interativa para a conceção detalhada de componentes, de modo a otimizar o design e facilitar a comunicação entre os agentes envolvidos no projeto [7]. Este sistema permite que os dados de design sejam transformados em instruções para máquinas de produção, como as CNC.

O CAE auxilia na análise e otimização do produto e proporciona simulações de comportamento e avaliações estruturais antes da produção [9]. Ferramentas de Análise por Elementos Finitos e análise de dinâmica de fluidos são exemplos do que o CAE pode oferecer. O CAE permite testar a resistência e desempenho do acompanhador e ajustar possíveis pontos críticos para maximizar a durabilidade e eficiência do produto final [7].

O CAM controla os processos de fabricação pois assegura a precisão e consistência nos produtos finais. Na aplicação prática, após a criação do modelo CAD do acompanhador, o CAM é utilizado (Figura 2) para converter o design em comandos operacionais para a fabricação automatizada [10]. Esta fase garante que o projeto idealizado no CAD seja replicado durante a produção [7].



Figura 2 - Exemplo de sistema CAM [10].

A aplicação integrada das ferramentas CAD, CAM e CAE traz inúmeros benefícios para a indústria, tais como a redução de custos, a otimização dos processos de produção, a melhoria da qualidade dos produtos e a agilidade na resposta ao mercado. A crescente complexidade dos produtos e a necessidade de personalização dos mesmos impulsionam a adoção destas tecnologias, que permitem a criação de produtos mais inovadores e personalizados. No futuro, a integração destas ferramentas com outras tecnologias emergentes, como a inteligência artificial, deve possibilitar a criação de fábricas automatizadas e aumentar a produção [7].

2.1.5. Cinemática de mecanismos

A cinemática de movimentos concentra-se na análise detalhada dos movimentos que caracterizam os componentes do sistema sem considerar as forças que os causam [11]. Este

estudo é essencial para projetar máquinas capazes de gerar ou transmitir movimento, garantindo que este seja preciso e ocorra com o menor número de erros possível. A análise dos movimentos começa pela definição dos graus de liberdade do sistema. Cada componente deve ser projetado de forma a restringir ou permitir movimentos específicos conforme necessário. A estrutura do sistema pode incluir guias lineares ou rotativas, conforme a necessidade de executar uma trajetória específica, o que assegura um movimento contínuo e preciso [11].

A trajetória de um sistema pode ser descrita por equações de movimento que representam a posição de um ponto específico em função do tempo. Estas equações são derivadas a partir das condições iniciais e das restrições do sistema, o que permite definir a posição, velocidade e aceleração em cada ponto da operação. No caso de movimentos curvilíneos, como em trajetórias de arco ou movimentos angulares, a modelação deve incluir parâmetros como o raio da trajetória e o ângulo de rotação. A precisão do movimento do sistema depende da definição rigorosa destes parâmetros, que devem ser ajustados para minimizar discrepâncias e erros na operação [12]. A modelação cinemática é realizada com o apoio de *software* de simulação, que permite a visualização da trajetória e o ajuste fino dos parâmetros de movimento.

A cinemática do movimento deve ser sincronizada com o sistema de controlo do equipamento que realiza o movimento. Este sincronismo é essencial para que o movimento do sistema descreva a trajetória pretendida. O controlo cinemático deve incluir algoritmos que ajustam dinamicamente a posição com base na velocidade e nas condições iniciais [11]. Desta forma, a análise cinemática é um elemento crucial no projeto mecânico para garantir a precisão e a eficiência na produção.

2.2. Tecnologias de processamento de chapa

As tecnologias de processamento de chapa transformam chapas metálicas em componentes acabados para setores como o automóvel e a construção, através da utilização de métodos como quinagem, corte e puncionamento [13]. Estes processos requerem um controlo rigoroso de variáveis, como velocidade e pressão, para garantir precisão e qualidade. A escolha de equipamentos, como prensas e matrizes, e o uso de metodologias de cálculo estabelecidas asseguram que os parâmetros de quinagem sejam os adequados, o que reduz defeitos. Por outro lado, avanços na automação e monitorização digital têm melhorado a eficiência e a produtividade deste setor [14].

2.2.1. Processos de fabrico para chapa

Os métodos de conformação de chapas metálicas são fundamentais na manufatura de peças metálicas e envolvem uma combinação de técnicas de corte e deformação. Estes processos permitem transformar chapas metálicas em componentes funcionais com precisão e eficiência. Cada método utiliza princípios distintos para moldar, cortar ou perfurar a chapa, de forma a atender às necessidades de diversas indústrias, desde a automóvel até a aeroespacial. Os métodos disponíveis para fabrico da chapa são os seguintes [14]:

- **Quinagem**

A quinagem é um processo de deformação plástica que transforma chapas metálicas planas em formas tridimensionais ao longo de um eixo linear, de modo a obter ângulos e curvas definidas. Durante o processo, o metal na zona externa da dobra é submetido a tensões de tração, enquanto a zona interna sofre compressão. Para realizar a quinagem, são utilizadas ferramentas como punções e matrizes, que determinam o formato da dobra, como está ilustrado na Figura 3 (a). Por exemplo, as matrizes em V são as mais comuns e permitem criar dobras simples ou múltiplas. Já as matrizes em U são utilizadas para obter perfis em forma de U [14]. Este método é amplamente usado na produção de componentes estruturais para automóveis, máquinas e equipamentos industriais [13].

- **Corte**

O corte de chapas metálicas envolve a aplicação de tensões de corte para separar partes do material e é realizado através de diversas técnicas. O corte reto utiliza lâminas retas para cortar chapas em linhas direitas ou ângulos simples, enquanto o corte a laser ou plasma recorre a fontes de energia concentrada para realizar cortes com alta precisão e velocidade, especialmente em materiais mais espessos ou para contornos complexos [15]. A precisão deste processo depende diretamente da configuração das lâminas, assim como do tipo de material e da espessura da chapa [16]. A Figura 3 (b) demonstra o processo de corte.

- **Puncionamento**

O puncionamento consiste em cortar ou perfurar a chapa metálica através do uso de um punção e uma matriz, criando furos ou formas específicas. Entre os seus subtipos, destaca-se o processo de *blanking*, no qual o material cortado constitui a peça final, enquanto o restante é descartado como resíduo; o *piercing*, no qual o material cortado é descartado e a chapa restante torna-se o produto final; e o *shaving*, que realiza o refinamento das bordas para melhorar a precisão e o acabamento. A Figura 3 (c) mostra o *blanking* e o *piercing*. O puncionamento é um processo rápido e eficiente, especialmente adequado para produções em massa. Por este motivo, é amplamente utilizado na produção de componentes com padrões repetitivos, como peças automóveis e painéis metálicos [14].

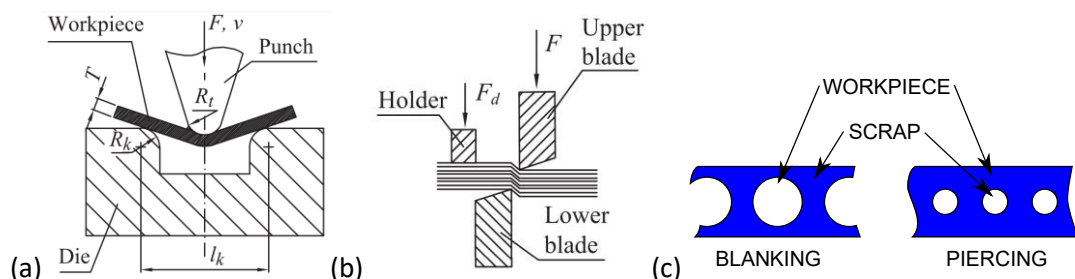


Figura 3 - Processos de fabrico de chapa: (a) quinagem [14], (b) corte [14], (c) *blanking* e *piercing* [17].

- **Embutidura**

A embutidura transforma uma chapa plana em formas tridimensionais, como cilindros ou caixas, através da força de um punção que empurra o material para dentro de uma matriz, como está ilustrado na Figura 4. Durante o processo, o material é deformado plasticamente sem

romper, o que garante a continuidade estrutural [14]. A força exercida durante o processo é responsável pela forma do produto, enquanto operações subsequentes ajustam detalhes ou afinam as superfícies. No entanto, podem surgir defeitos como rachaduras e enrugamentos devido a uma compressão inadequada do material. A lubrificação e o controlo do processo são essenciais para reduzir o atrito e prevenir estes defeitos. A embutidura é amplamente utilizada na fabricação de recipientes, painéis e componentes estruturais de elevada complexidade [18].

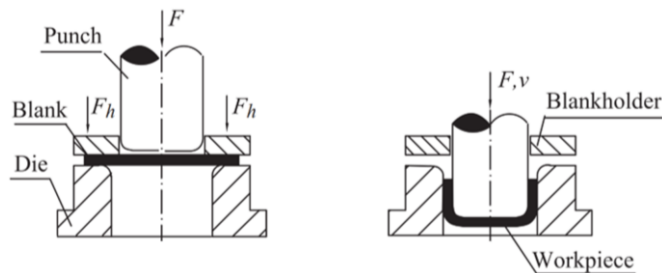


Figura 4 - Processo de embutidura [14].

2.2.2. Fundamentos do processo de quinagem

A quinagem baseia-se na deformação plástica ao longo de um eixo linear, de forma a obter ângulos ou perfis a partir de uma chapa metálica. Este processo envolve o uso de ferramentas específicas — o punção e a matriz — montadas numa prensa. A chapa metálica é posicionada entre essas ferramentas, e o movimento controlado do punção em direção à matriz força o material a deformar-se plasticamente e assim adquirir a forma desejada. Este processo depende de vários fatores. As propriedades mecânicas do material e os parâmetros geométricos da dobra destacam-se como os fatores mais relevantes na quinagem [19].

A capacidade de o material ser dobrado sem apresentar falhas é uma característica essencial para o sucesso da quinagem. Esta propriedade está relacionada com a ductilidade, elasticidade e pureza do metal. Materiais como o aço de baixo carbono são frequentemente utilizados devido à sua elevada maleabilidade, enquanto ligas mais rígidas, como o aço inoxidável, podem requerer maiores cuidados no processo devido à menor capacidade de deformação [19, 20].

Outro aspeto crítico é o raio de curvatura imposto à chapa. Quando o raio é muito pequeno em relação à espessura do material, aumenta o risco de fissuração na superfície externa da curva. Por outro lado, raios maiores minimizam este risco, mas podem comprometer a precisão da forma final [20]. Assim, o design adequado das ferramentas e a seleção correta dos parâmetros de processo são indispensáveis para alcançar os resultados desejados.

Um fenómeno inevitável na quinagem é o *springback*, que ocorre quando a força aplicada é removida e o material tenta recuperar a sua forma original devido à elasticidade residual. Este efeito pode resultar em ângulos de dobra ligeiramente superior ao planeado. Para mitigar este efeito, são frequentemente utilizados métodos como o *overbending* (dobrar mais do que ângulo desejado) ou a aplicação de maior pressão durante o processo [14].

Os métodos de quinagem podem variar com base na complexidade da peça a ser produzida e das especificações de projeto, como observa na Figura 5. Os tipos mais comuns incluem:

- **Quinagem em V:** É a técnica mais usual e consiste na utilização de um punção em forma de cunha que empurra a chapa metálica contra uma matriz em forma de V. Este método permite uma ampla gama de ângulos de dobra e é altamente adaptável. Existem duas variantes principais. A primeira é a *air bending*, na qual o punção não empurra completamente o material até o fundo da matriz. Este método oferece maior flexibilidade ao permitir a formação de ângulos ajustáveis durante o processo. Contudo, este requer compensações precisas devido ao fenómeno de *springback*, que pode afetar a precisão do ângulo obtido [19, 20]. A segunda variante é o *bottoming*, segundo a qual o punção força o material completamente até o fundo da matriz, o que permite criar uma dobra mais precisa e reduz significativamente o efeito do *springback*. No entanto, esta abordagem limita a flexibilidade na variação do ângulo durante o processo e exige um maior controlo no alinhamento das ferramentas [19];
- **Quinagem em U:** Utilizada para formar perfis em forma de U, este método requer matrizes específicas que suportam a chapa em ambos os lados, enquanto o punção aplica a força centralmente. Este tipo de quinagem é frequentemente utilizado na fabricação de canais ou perfis estruturais [20];
- **Quinagem por *wiping* (*flanging*):** Este método utiliza um punção horizontal para empurrar a borda da chapa contra uma matriz fixa. A quinagem por *wiping* é ideal para criar flanges em peças pré-formadas, apesar de exigir um controlo cuidadoso para evitar fissuras nas extremidades devido às tensões concentradas [14, 20];
- **Quinagem por rolo (*roll bending*):** Neste processo, a chapa passa por uma série de rolos que gradualmente criam uma curva contínua. A quinagem por rolo é amplamente utilizado para fabricar tubos, cilindros ou perfis curvos em grandes dimensões [20].

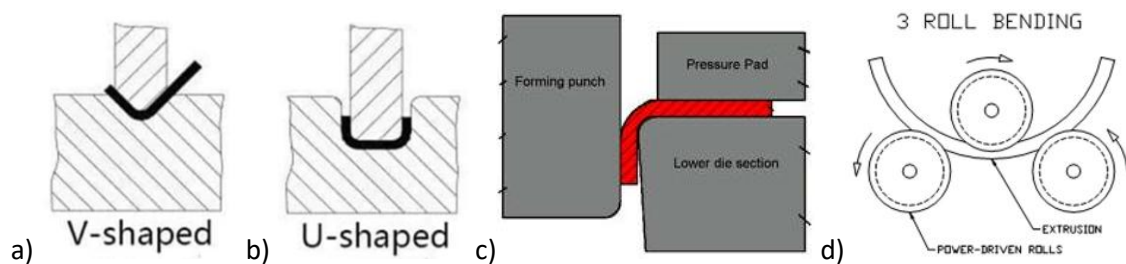


Figura 5 - Diferentes tipos de quinagem: (a) quinagem em V [21], (b) quinagem em U [21], (c) quinagem por *wiping* [22] e (d) quinagem por rolo [23].

Independentemente do tipo de quinagem, alguns fatores são críticos no resultado [19, 20]:

- **Espessura e material da chapa:** Materiais espessos exigem forças de quinagem maiores, enquanto materiais finos são mais suscetíveis a deformações indesejadas;
- **Ângulo e raio de dobra:** São determinados pelo design da ferramenta, pelas propriedades do material e pelas características desejadas para o produto final;
- **Direção de laminagem:** Dobrar uma chapa na direção perpendicular à sua laminação geralmente resulta em menor *springback* e melhor precisão geométrica.

2.2.3. Influência das variáveis de processo

A quinagem de chapas metálicas é um processo de deformação plástica amplamente utilizado na indústria, mas a sua eficiência e precisão dependem de várias variáveis. Este capítulo explora as principais variáveis que influenciam a quinagem. O *springback* refere-se à recuperação elástica do material após a remoção das forças aplicadas durante a quinagem. Este fenómeno ocorre devido à redistribuição das tensões internas, que resulta num ângulo de dobra final superior ao originalmente formado [24]. A magnitude do *springback* é influenciada por:

- **Força aplicada:** aumentar a força aplicada durante o processo de quinagem tende a reduzir o efeito do *springback*. Este fenómeno ocorre porque maior força promove maior deformação plástica no material, o que reduz a quantidade de tensão elástica residual que contribui para a recuperação elástica após a remoção da carga [25];
- **Tensão de cedência do material:** Materiais com maior tensão de cedência superior apresentam maior recuperação elástica [19];
- **Espessura da chapa:** Chapas mais espessas tendem a apresentar menor *springback* devido à sua maior rigidez global [25];
- **Relação raio de dobra/espessura:** Um raio de dobra menor em relação à espessura da chapa reduz o *springback*, como explicado no estudo sobre variáveis do processo [24];
- **Tipo de material da chapa:** As propriedades do material, como ductilidade, tensão de rotura e anisotropia, desempenham um papel crucial no comportamento do mesmo durante a quinagem. O aço ao carbono macio apresenta boa capacidade de dobragem devido à baixa dureza e elevada ductilidade. Os aços inoxidáveis tendem a apresentar maior *springback* devido à elevada tensão de rotura. A direção de laminação da chapa também influencia a quinagem. Realizar a quinagem na direção da laminação resulta em menor *springback* do que em direção transversal [14, 24];
- **Espessura da chapa:** A espessura influencia diretamente a força de quinagem e o comportamento elástico do material. Chapas mais finas são mais propensas ao *springback*, enquanto chapas mais espessas oferecem maior resistência, resultando em deformações mais controladas [25].

Vários aspetos geométricos têm uma influência significativa na quinagem. O ângulo de dobra é um aspeto crucial, pois ângulos mais agudos requerem maior força de dobragem e, em geral, apresentam um *springback* menor, o que pode favorecer a precisão geométrica [25]. O raio de dobra também é determinante: um raio maior reduz a concentração de tensões no material, o que diminui o risco de fissuras e melhora a uniformidade da dobra ao longo da peça [19].

A velocidade do punção, por sua vez, afeta diretamente a energia cinética do processo, na medida em que velocidades mais altas podem intensificar a recuperação elástica devido ao aumento da energia acumulada no material durante a deformação. A lubrificação entre as superfícies de contacto das ferramentas e da chapa reduz o atrito e permite uma deformação mais uniforme e previsível, melhorando assim a qualidade final da peça [24].

2.2.4. Defeitos típicos em quinagem

Na Figura 6 é possível observar os defeitos abordados neste capítulo. O *springback* é um fenómeno inevitável na quinagem e surge como a principal razão para que a chapa metálica não alcance o ângulo pretendido após o processo. Este problema destaca-se como um dos mais frequentes e desafiadores no contexto da quinagem, razão pela qual exige atenção redobrada para a sua mitigação. A amplitude do *springback*, e consequentemente, a gravidade do desvio no ângulo obtido, é determinada por fatores como o ângulo de dobra, a espessura da chapa e o limite elástico do material, conforme discutido no capítulo anterior.

De forma complementar, o fenómeno de enrugamento resulta principalmente da compressão excessiva exercida na superfície da chapa durante a deformação. Este defeito é particularmente prevalente em chapas mais finas, ou quando a matriz não proporciona o suporte adequado ao material durante o processo. A relação entre o raio da matriz e a espessura da chapa revela-se um fator crítico neste contexto. Raios de matriz de elevada dimensão podem facilitar o deslizamento do material, o que aumenta a suscetibilidade ao enrugamento [25].

As ruturas são frequentemente associadas ao uso de materiais com baixa ductilidade ou à aplicação de forças excessivas durante a quinagem. Materiais com menor capacidade de deformação apresentam maior risco de rutura, especialmente quando submetidos a ângulos de dobra reduzidos. Além disso, o atrito elevado entre a chapa e as ferramentas pode concentrar tensões em áreas específicas, o que proporciona o aparecimento de ruturas [24].

As fissuras constituem outro defeito recorrente, que geralmente se manifestam na superfície externa das dobras, onde as tensões de tração atingem os valores mais elevados. Este problema é agravado quando o raio de dobra é demasiado pequeno em comparação com a espessura da chapa, o que conduz à contração de tensões excessivas no material. O uso de punções com pequenos raios de curvatura intensifica este efeito e favorece o surgimento de fissuras. Para mitigar este defeito, é essencial optar por materiais com elevada resistência ao desgaste e controlar cuidadosamente o atrito entre as ferramentas e o material durante o processo [25].

As marcas de impressão surgem devido ao contato inadequado entre o material e as ferramentas de dobra que resulta em imperfeições visíveis na superfície da peça. Já as distorções referem-se a alterações indesejadas na forma do material, como ondulações ou empenamentos, que ocorrem devido à distribuição desigual de tensões durante a dobra [26].

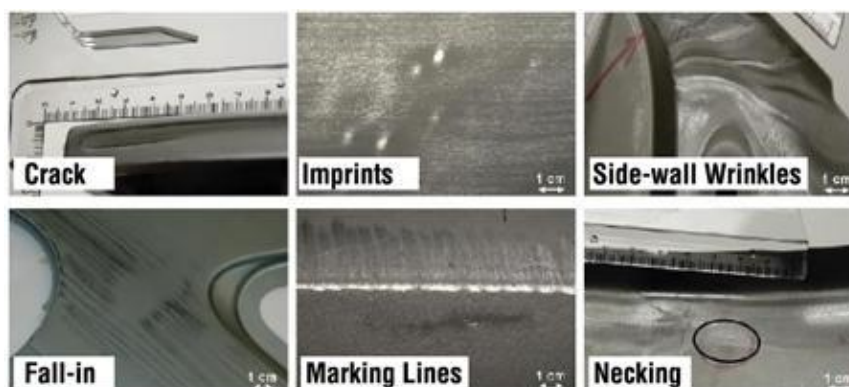


Figura 6 - Defeitos típicos em quinagem [26].

2.2.5. Equipamentos e fabricantes

Um equipamento indispensável às tecnologias de processamento de chapa são as prensas, também conhecidas como quinadoras, que desempenham um papel essencial ao dobrar chapas metálicas em ângulos específicos, o que possibilita a criação de peças com várias geometrias. Existem três tipos de quinadoras: as mecânicas, as hidráulicas e as elétricas, que diferem no seu tipo de acionamento [14].

As guilhotinas são igualmente essenciais no corte reto de chapas metálicas, mas também para cortes longitudinais e transversais. Para aplicações mais específicas, as máquinas de corte por jato de água representam uma alternativa eficiente, especialmente para materiais sensíveis ao calor. Estas utilizam um jato de água de alta pressão, com ou sem abrasivos, para realizar cortes precisos sem alterar as propriedades do material. O corte a laser e a plasma são tecnologias amplamente utilizadas no processamento de chapas metálicas. O corte a laser é ideal para precisão em materiais finos e complexos, enquanto o corte a plasma é mais eficiente para chapas espessas e metais condutores devido à sua alta velocidade e robustez [14].

As puncionadoras são projetadas para criar furos ou cortes em chapas metálicas, o que permite a produção de peças com perfurações diversificadas. O processo de puncionar envolve a aplicação de uma força através de um punção, que pressiona a chapa contra uma matriz, gerando o corte ou a perfuração desejada. Este processo é amplamente utilizado na indústria metalomecânica devido à sua versatilidade.

O mercado de equipamentos para processamento de chapas metálicas conta com diversos fabricantes reconhecidos mundialmente, como demonstrado na Figura 7:

- **TRUMPF:** Oferece uma gama completa de máquinas para o processamento de chapas e tubos, incluindo sistemas de corte e solda a laser, puncionadoras e prensas [27];
- **AMADA:** Uma das líderes globais na produção de equipamentos para processamento de chapas metálicas, destacando-se pelas suas soluções inovadoras em máquinas de corte a laser, quinadoras e puncionadoras, que oferecem alta precisão, confiabilidade e eficiência energética para as mais exigentes aplicações industriais [28];
- **DIMAKIN:** Fornece guilhotinas projetadas para assegurar elevada eficiência nos processos de corte [29];
- **MAPROC:** Especializa-se em soluções avançadas de corte e deformação de chapas [30];
- **Bystronic:** Conhecida por suas soluções de corte a laser e dobragem, fornece equipamentos que combinam alta precisão com eficiência operacional;
- **ESAB:** Líder mundial em equipamentos e consumíveis de soldagem e corte, oferece uma linha completa de soluções de fabricação para diversas aplicações [30];
- **DNE Laser:** Desenvolve equipamentos de corte a laser com alta eficiência de conversão eletro-óptica, qualidade de feixe superior e desempenho estável [30];
- **ADIRA e RICO:** As empresas portuguesas RICO e ADIRA são amplamente reconhecidas pela sua produção de quinadoras de alta precisão [31].



Figura 7 - Diferentes quinadoras: (a) TRUMPF [32], (b) AMADA [33], (c) Bystronic [34], (d) ADIRA [35].

2.2.6. Metodologias de cálculo

As tecnologias de processamento de chapa metálica baseiam-se em metodologias de cálculo que permitem prever forças, tensões e deformações com precisão. Este capítulo explora as principais abordagens globais no cálculo de conformação de chapas metálicas, fundamentadas em modelos teóricos, simulações numéricas e validações experimentais. O *springback* é um fenómeno crítico na conformação de chapas metálicas, relacionado com a recuperação elástica do material após a deformação. O cálculo do *springback* é realizado com base em modelos geométricos e materiais que consideram a tensão interna residual, o módulo de elasticidade e o raio da ferramenta. Estas abordagens ajudam a prever o grau de recuperação elástica e a ajustar os ângulos de dobra [20]. O cálculo de energia necessária para a conformação de chapa é outra metodologia global amplamente utilizada no processamento de chapas metálicas. A conformação, que envolve a deformação da chapa, requer a avaliação de forças e trabalho mecânico para assegurar que o material não falhe durante o processo. Desta forma, o cálculo de energia integra o trabalho plástico realizado, considerando a tensão de cedência e a deformação do material, com base em equações desenvolvidas a partir da teoria da plasticidade [20]. A análise de tensões e momentos é essencial para o controlo de qualidade e segurança na dobragem. O cálculo da tensão máxima permitida na chapa é expresso pela fórmula:

$$\frac{M}{I} = \frac{\sigma}{y} \quad (1)$$

onde σ representa a tensão máxima, M é o momento fletor, I o momento de inércia e y a distância ao eixo da chapa. Os valores de momento de inércia e a distância ao eixo da chapa são calculados através da geometria de cada chapa. Este cálculo permite avaliar o comportamento estrutural da chapa durante a dobra, de forma a assegurar a integridade do material [20].

Os métodos empíricos, baseados em dados experimentais, continuam a ser uma metodologia amplamente utilizada no setor. Estas abordagens permitem a obtenção rápida de resultados confiáveis em processos estabelecidos, como dobragem e estampagem. Os fatores de correção derivados de dados experimentais são aplicados diretamente em tabelas de coeficientes de conformação, de modo a prever casos específicos de chapas a conformar. As tabelas e fórmulas ajustadas com base em ensaios oferecem uma alternativa às simulações computacionais, especialmente em contextos de produção onde a eficiência de tempo é crítica [20].

O MEF é amplamente aplicado na análise de processos de conformação de chapas metálicas pois permite modelar com precisão os comportamentos materiais sob diferentes condições de carga. Este método é uma ferramenta indispensável para prever fenómenos como tensões residuais, deformações plásticas e falhas potenciais. A capacidade do MEF de integrar propriedades não lineares do material torna-o fundamental para a simulação de processos industriais complexos [36].

Além das abordagens tradicionais, a modelação matemática é utilizada para descrever processos avançados, como estampagem e conformação a quente. Estes modelos são baseados em equações que incorporam variáveis térmicas e mecânica, conseguem prever comportamentos como o fluxo de material e a evolução de propriedades durante o processamento. Estas metodologias matemáticas são essenciais para otimizar processos que envolvem ligas metálicas complexas e altas temperaturas [20]. Para informação sobre o método de elementos finitos consultar Apêndice B.

2.2.7. Estado da arte

O processamento de chapas metálicas é uma área de constante inovação tecnológica, com avanços tanto em técnicas tradicionais como no desenvolvimento de novos métodos. A Tabela 1 explora o estado da arte em tecnologias de processamento de chapa.

Tabela 1 - Estado da arte das tecnologias de processamento de chapa

Referências bibliográficas	Trabalho desenvolvido
Emmens et al. [37]	Este trabalho teve como objetivo o estudo da conformação incremental de chapa (<i>Incremental Sheet Forming</i> - ISF) que é um processo baseado na deformação localizada de uma chapa metálica através do movimento de uma ferramenta que permite a criação de peças complexas sem necessidade de matrizes dispendiosas. Este método tem sido alvo de diversos estudos e existem avanços como a conformação incremental de dois pontos (TPIF) e o uso de dispositivos de aquecimento para melhorar a precisão dimensional. Os resultados demonstram vantagens na flexibilidade e na capacidade de trabalhar materiais difíceis de conformar, apesar das limitações na velocidade e precisão. Conclui-se que o ISF é uma tecnologia promissora, com crescente aplicação na produção de protótipos e pequenas séries industriais.

Tabela 1 - Estado da arte das tecnologias de processamento de chapa (continuação)

Khan et al. [38]	O objetivo deste trabalho foi analisar a ligação por enrolamento (<i>roll bonding</i> - RB) que é um processo que permite a união de chapas metálicas por deformação plástica severa, aplicada a frio ou a quente, sem necessidade de fusão. Este método é utilizado para combinar materiais similares ou dissimilares, sendo especialmente útil na produção de compósitos multicamadas. No estudo analisado, foram avaliados parâmetros como a redução de espessura, a velocidade de rotação e o tratamento térmico, de forma a mostrar que a qualidade da ligação depende da preparação das superfícies e do calor aplicado. O processo revelou vantagens na criação de materiais resistentes, embora desafios como a formação de união de chapas frágeis.
T. Trzepieciński [39]	Este trabalho teve como propósito examinar a modelação numérica que é amplamente utilizada na otimização de processos de conformação de chapas pois prevê o comportamento de materiais e antecipa potenciais defeitos, como enrugamentos, fissuras e <i>springback</i> . No artigo analisado, o processo é baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), que foi aplicado em simulações para estudar a interação entre ferramentas e chapas metálicas sob diversas condições. Os resultados destacaram a capacidade das simulações em melhorar a precisão da previsão de deformações e defeitos, o que reduz os custos associados a testes experimentais. Concluiu-se que a modelação numérica continua a ser uma ferramenta indispensável para melhorar a eficiência e a qualidade nos processos de conformação de chapas.
S.-H. Zhang et al. [40]	Os avanços na conformação de metais incluem tecnologias como a conformação eletromagnética e a estampagem a quente. A conformação eletromagnética baseia-se na aplicação de forças eletromagnéticas pulsadas para moldar metais leves com elevada precisão, o que permite reduzir o impacto ambiental do processo. No estudo analisado, foram utilizadas simulações numéricas e experiências práticas para avaliar a eficiência deste processo em diferentes ligas metálicas. Os resultados demonstraram vantagens, como maior precisão dimensional e menor deformação residual, especialmente em materiais difíceis de conformar. Concluiu-se que estas tecnologias são promissoras na produção de peças complexas, com especial aplicação na indústria automóvel e aeroespacial.
L. Zgripcea et al. [41]	Neste trabalho foi analisado o corte com laser de fibra que se baseia na utilização de um feixe laser de alta densidade energética para fundir e vaporizar o material em zonas específicas que permite cortes precisos. No artigo analisado, foram realizados testes com um laser de fibra contínua e diferentes gases de assistência ao corte, como azoto e oxigénio, para avaliar a qualidade do corte em chapas de alumínio e aço carbono finas. Os resultados demonstraram que o azoto proporciona cortes mais limpos e regulares, enquanto o aumento da pressão do gás até um certo limite melhora a qualidade do corte. Foram observados desafios, como o efeito de conicidade em furos pequenos e a formação de resíduos sólidos, que dependem da combinação entre potência do laser e velocidade de corte. Concluiu-se que o corte com laser de fibra é eficiente para chapas finas, especialmente após ajustes dos parâmetros para maximizar a qualidade e minimizar desperdícios.

2.3. Projeto de quinadoras e acompanhadores de quinagem

Este capítulo explora os elementos essenciais do projeto de quinadoras e acompanhadores de quinagem. São abordados os princípios de funcionamento, os principais constituintes da quinadora e a sua estrutura e ligações, tanto internas como aos periféricos. São também analisados os sistemas de acionamento e os sistemas auxiliares, assim como o papel dos acompanhadores de quinagem e as técnicas para a compatibilização do movimento da chapa com o acompanhador. Por fim, este capítulo apresenta os sistemas disponíveis no mercado e uma revisão do estado da arte que destaca as tendências tecnológicas atuais.

2.3.1. Princípios de funcionamento

As quinadoras são máquinas que executam dobras em chapa metálica com elevada precisão e eficiência. A sua operação baseia-se na aplicação de força sob uma matriz que deforma permanentemente o material, resultando em chapas com diferentes formas desejadas. Este capítulo aborda o princípio de funcionamento de uma quinadora e os seus principais componentes (Figura 8), que trabalham em conjunto para assegurar uma dobragem precisa.

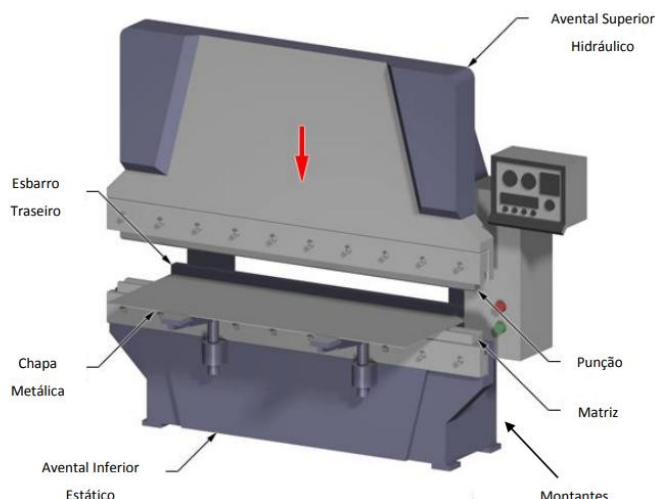


Figura 8 - Principais constituintes de uma quinadora [42].

O funcionamento de uma quinadora baseia-se na aplicação de força, através do movimento sincronizado do avental superior e do avental inferior, para deformar permanentemente a chapa metálica. O punção, montado no avental superior, aplica a força necessária para pressionar a chapa contra a matriz, situada no avental inferior. Esta interação determina o formato final da peça quinada [43]. O esbarro desempenha um papel essencial na precisão, ao posicionar a chapa na posição correta antes do início do processo de dobragem. Este componente é ajustável, de forma a permitir configurações variáveis para diferentes geometrias de dobras [44]. Os cilindros hidráulicos são responsáveis por movimentar o avental superior. Os sistemas hidráulicos proporcionam uma elevada precisão e força. Estes cilindros são monitorizados pelo sistema de controlo elétrico, que regula a pressão e a velocidade de operação [44, 45]. Os montantes fornecem suporte estrutural à máquina e garantem a estabilidade durante o processo, mesmo sob cargas elevadas. A robustez destes componentes

é crucial para minimizar vibrações e preservar a qualidade da dobragem [43]. O sistema de controlo elétrico integra todos os componentes da máquina e utiliza sensores e *software* para ajustar os parâmetros em tempo real. Este sistema assegura que a interação entre punção, matriz e os outros elementos ocorre corretamente e permite a execução de dobras complexas com alta precisão [44].

2.3.2. Sistemas da quinadora e ligações

A estrutura da quinadora é composta por diversos sistemas que garantem o funcionamento correto da mesma durante o processo de quinagem. Estes sistemas podem ser divididos em cinco partes principais, como se observa na Tabela 2 [46].

Tabela 2 - Sistemas que constituem uma quinadora [46].

Sistema	Elementos	Funções
Mecânico	Avental superior	Movimenta-se verticalmente para pressionar a chapa contra a matriz
	Avental inferior	Suporta a matriz e fornece a resistência necessária para a deformação da chapa
	Montantes	Garante a estabilidade estrutural da máquina, distribuindo as forças da quinagem
Hidráulico	Bomba hidráulica	Gera o fluxo de óleo para alimentar os cilindros hidráulicos
	Tanque de óleo	Armazena o fluido hidráulico e assegura um fornecimento constante
	Válvulas hidráulicas	Regulam a pressão e a direção do fluxo de óleo
	Cilindros hidráulicos	Movimentam o avental superior, convertendo a pressão hidráulica em força mecânica
	Sistema de lubrificação e arrefecimento	Reduz o desgaste dos componentes hidráulicos e previne o sobreaquecimento
Elétrico	Sistema de controlo CNC	Permite programar e controlar os parâmetros de quinagem com precisão
	Motores elétricos	Acionam diversos mecanismos da máquina, tais como o sistema hidráulico
	Painéis elétricos	Alojamento dos circuitos e dispositivos elétricos que controlam a quinadora
	Sistemas de segurança	Protegem o operador e garantem a segurança no processo de quinagem
Ferramentas	Punções	Aplicam a força necessária para a dobra da chapa
	Matriz	Suporta a chapa e define a geometria da quinagem
	Ferramentas de alinhamento	Asseguram que os punções e matrizes estão corretamente alinhados
Periféricos	Acompanhadores de quinagem	Suportam a chapa durante a quinagem e previnem deformações
	Lasers de segurança	Criam barreiras de segurança que interrompem a operação em caso de risco
	Réguas lineares	Monitorizam e medem a posição do avental e da chapa para garantir precisão

As ligações primárias na estrutura das quinadoras são na sua maioria soldadas, o que garante elevada resistência mecânica. Estas ligações unem os principais componentes da máquina, como os montantes e os aventais, o que significa que a quinadora consegue suportar elevadas cargas durante o processo de quinagem. A soldadura permite reduzir as vibrações e garantir uma transmissão de força uniforme. Além disso, a precisão da montagem estrutural, aliada a um processo de usinagem pós-soldadura, melhora a durabilidade e a repetibilidade do equipamento [13]. Um exemplo de soldadura na quinadora diz respeito aos montantes laterais, que são soldados à base da máquina e ao avental inferior, que permite formar uma estrutura rígida capaz de suportar a pressão exercida pelos cilindros e pelo peso da quinadora.

As ligações secundárias são utilizadas para conectar componentes ajustáveis e periféricos, como acompanhadores de quinagem, sistemas de segurança e dispositivos de medição. Estes elementos são normalmente fixados através de sistemas aparafusados, guias deslizantes ou cunhas de fixação, o que permite flexibilidade na configuração da máquina. Os acompanhadores de quinagem são frequentemente ligados através de guias deslizantes que se ajustam, ao longo de um eixo, conforme os parâmetros de quinagem cumprir. Já os sistemas de segurança, como lasers de segurança, são instalados com suportes aparafusados, pelo que permitem uma fácil remoção ou substituição. No caso dos punções e matrizes, o sistema de fixação é bastantes vezes realizado através de cunhas, o que garante um encaixe firme e uma troca rápida de ferramentas quando necessário. Estas ligações secundárias são fundamentais para a quinadora e garantem à mesma uma adaptação para diferentes tipos de operações [13]. Para informação relativa a sistemas auxiliares de quinagem consultar Apêndice C.

2.3.3. Acompanhadores de quinagem

O acompanhador de quinagem é um sistema automatizado projetado para garantir o suporte dinâmico da chapa durante o processo de quinagem e previne deformações e vibrações indesejadas. O seu funcionamento baseia-se no acionamento de um motor elétrico que controla o movimento de um conjunto de braços articulados, como se observa na Figura 9. Estes braços ajustam-se de forma dinâmica de modo a alterar a posição e ângulo da placa de contacto para acompanhar a trajetória da chapa ao longo do processo. A placa de contato, posicionada na extremidade dos braços, entra em contacto direto com a chapa, o que garante suporte contínuo e previne flexões fora da matriz. Simultaneamente, o sistema de fixação assegura que o acompanhador permaneça estável e perfeitamente alinhado com a quinadora.

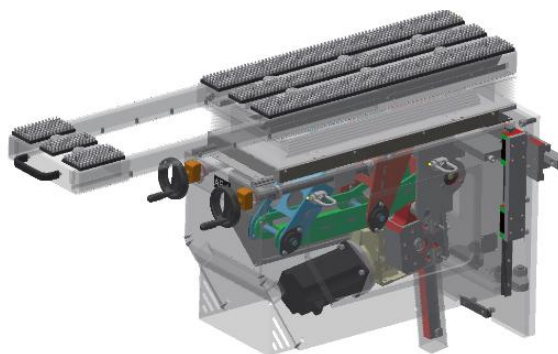


Figura 9 - Exemplo de funcionamento ACCURL [47].

Este conjunto de componentes trabalha de forma sincronizada para proporcionar estabilidade, eliminar falhas no processo e assegurar a qualidade e precisão da quinagem, o que torna o acompanhador indispensável em aplicações industriais exigentes. Deste modo, a ausência de um acompanhador de quinagem pode originar os seguintes problemas [47, 48]:

- **Efeito de contra-dobra (*counterbend*):** Quando a chapa não é suportada adequadamente, ocorrem deformações fora e dentro da matriz e gera-se um momento elevado na matriz, pelo que o *counterbend* compromete a qualidade do produto final;
- **Flexão excessiva da chapa:** Chapas longas tendem a dobrar-se sob o seu próprio peso durante a operação e causar fissuras;
- **Vibrações da chapa:** A falta de suporte aumenta a probabilidade de vibrações e afeta negativamente a precisão do processo;
- **Necessidade de intervenção manual:** Sem acompanhadores os operadores precisam de segurar a chapa, o que aumenta os riscos de segurança, gera maior esforço físico e reduz a eficiência operacional;
- **Chapas de grandes dimensões:** A quinagem de chapas de grandes dimensões torna-se especialmente desafiante sem suporte dinâmico, o que aumenta os tempos de ciclo e a probabilidade de erros.

Os acompanhadores de quinagem foram concebidos para eliminar estas dificuldades e proporcionam várias vantagens [47, 48]:

- **Suporte dinâmico:** Os acompanhadores seguem o movimento da chapa em tempo real, logo previnem contra-dobras e vibrações durante a operação;
- **Capacidade de suporte para chapa:** Os acompanhadores atuais permitem a integração de dois acompanhadores para suportar chapas longas e pesadas;
- **Automação completa:** Completamente automatizados, os acompanhadores eliminam a necessidade de operadores, o que reduz riscos de segurança e aumenta a eficiência do processo. A sua operação sincronizada com a quinadora garante uma execução precisa e repetitiva.

O desempenho ideal de um acompanhador depende da sua capacidade de seguir a trajetória da chapa com exatidão durante a quinagem. O objetivo principal do acompanhador é garantir que a chapa se mova de forma controlada e sem desvios, o que diminui falhas e assegura a qualidade do produto final. A integração de sistemas CNC e sensores avançados permite o ajuste perfeito dos acompanhadores ao movimento da chapa, o que proporciona estabilidade e precisão durante a quinagem [47].

2.3.4. Compatibilização do movimento da chapa

A compatibilização do movimento da chapa é uma etapa crucial no processo de quinagem pois garante que a peça seja posicionada corretamente e movida de forma sincronizada com o acompanhador durante a operação. Esta compatibilização evita tensões desnecessárias,

deformações e ângulos indesejados, pelo que é considerada essencial para alcançar uma dobragem precisa [49]. A trajetória ideal consiste no acompanhador seguir o movimento natural da chapa sem exercer pressão adicional que a empurre, nem ficar atrasado em relação à chapa de forma a não estar em contacto com a mesma.

Existem diferentes métodos para compatibilizar o movimento do acompanhador com o movimento da chapa, que dependem do tipo de operação. O método mais desejado envolve a utilização de acompanhadores que conseguem realizar movimentos baseados num centro instantâneo de rotação (CIR) definido num ponto fixo da matriz, de forma a garantir que a chapa acompanha a trajetória ideal durante a deformação. A Figura 10 demonstra este tipo de movimento. Este método minimiza tensões internas e desvios da posição da chapa na matriz que poderiam comprometer a qualidade da dobragem [43]. Este processo normalmente inclui o uso de dispositivos mecânicos ou sistemas automáticos para ajustar a posição da chapa ao longo de todo o ciclo de quinagem. Estes dispositivos podem incluir guias ajustáveis e sistemas de controlo eletrónico, que sincronizam o movimento da chapa com o da máquina, e assim otimizam a trajetória para evitar erros [49].

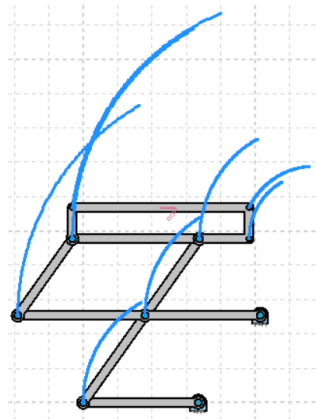


Figura 10 - Exemplo do movimento de um acompanhador ADIRA (elaboração própria)

A escolha da trajetória depende de variáveis como a geometria da peça, a espessura do material e as especificações do processo de quinagem. A aplicação de tecnologias de compatibilização mais avançadas, como sistemas automáticos baseados em sensores, tem demonstrado um aumento significativo na qualidade e na repetibilidade da quinagem [43].

A compatibilização do movimento do acompanhador com a chapa pode ser otimizada através de softwares especializados em análise cinemática e dinâmica de sistemas mecânicos. O GIM que foi desenvolvido pela *University of the Basque Country*, calcula trajetórias e permite ajustar os parâmetros do sistema [50]. Outros softwares, como MSC Adams, Siemens NX Motion, SolidWorks® Motion e Autodesk Inventor Dynamic Simulation, são amplamente utilizados para modelar e simular movimentos mecânicos complexos. Estas ferramentas permitem validar a compatibilidade do acompanhador antes da sua implementação o que garante maior precisão e segurança no processo de quinagem. A compatibilização do movimento do acompanhador com o movimento da chapa é um elemento fundamental e um ponto de partida para o sucesso do processo de quinagem. Desta forma, o estudo da compatibilização de movimentos é essencial para garantir a qualidade nos produtos que utilizam a quinagem.

2.3.5. Sistemas disponíveis no mercado

A evolução dos acompanhadores de quinagem levou ao desenvolvimento de diferentes tipos de sistemas, cada um com características específicas que se adaptam às necessidades dos utilizadores. Neste capítulo, são apresentados os principais sistemas disponíveis no mercado, destacando as suas funcionalidades, vantagens e aplicações. A existência de várias abordagens tecnológicas permite que cada utilizador escolha o sistema mais adequado ao seu processo de produção. Os sistemas disponíveis no mercado são:

- **Curso único**

Os acompanhadores de curso único funcionam ao seguir um curso fixo, pois utilizam um único braço e um sistema de acionamento, geralmente um motor elétrico, que permite a rotação em torno de um centro instantâneo de rotação fixo, idealmente posicionado na matriz. Este sistema garante que a chapa recebe suporte adequado durante a quinagem, minimiza deformações e facilita o processo. O acompanhador da Figura 11 apresenta uma variação, na medida que utiliza um cilindro hidráulico como sistema de acionamento, o que permite um funcionamento igualmente eficiente, mas com um mecanismo diferente. A principal vantagem dos sistemas de curso único reside na sua simplicidade e confiabilidade pois estes apresentam um desempenho consistente sem necessidade de ajustes complexos. Além disso, este sistema reduz a necessidade de manutenção, o que torna os acompanhadores de curso único uma escolha económica para muitos fabricantes [51].

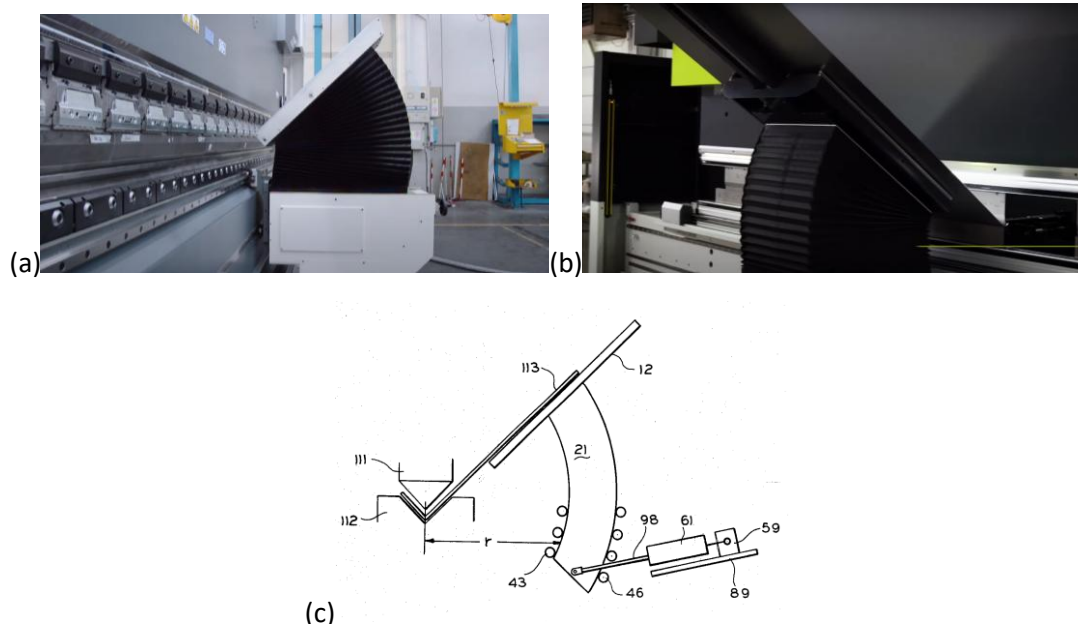


Figura 11 - Sistemas de curso único: (a) Gasparini [51], (b) SafanDarley [52], (c) Patente Estados Unidos [53].

- **Curso duplo**

Os acompanhadores de curso duplo funcionam de forma semelhante aos de curso único, mas integram dois cursos distintos: um na direção vertical e outro em movimento circular, como se pode observar na Figura 12. Esta configuração permite que o sistema tenha uma maior

amplitude de movimento, o que garante a adaptação a chapas de diferentes tamanhos e geometrias complexas. A capacidade de realizar um deslocamento adicional em altura oferece maior versatilidade na quinagem, pelo que estes sistemas são ideais para operações que exigem um maior alcance do acompanhador [54].

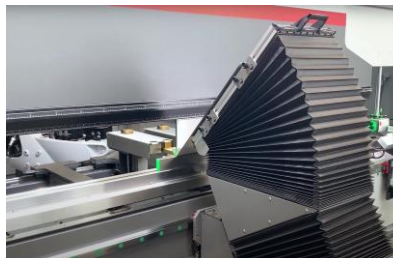


Figura 12 - Sistema de curso duplo da Bystronic [54].

- **Movimento relativo de braços**

A Figura 13 apresenta dois designs diferentes dentro de tipo de sistema. O sistema de movimento relativo de braços utiliza um motor elétrico para controlar um conjunto de braços articulados, que ajustam a posição e o ângulo do acompanhador durante a subida. Este mecanismo permite que o acompanhamento da chapa seja feito de forma progressiva e precisa, e garante um suporte constante sem gerar tensões indesejadas no material. A articulação dos braços assegura que o acompanhador mantém contacto ideal com a chapa ao longo de todo o processo de quinagem. Este tipo de sistema apresenta uma vantagem em relação aos modelos anteriormente mencionados: a redução do esforço aplicado sobre os braços de curso. Ao redistribuir as tensões por múltiplos braços, é possível obter uma estrutura mais leve, ao utilizar menos material ou um material menos exigente, sem comprometer a resistência. Como resultado, este design tende a ser mais económico. Este tipo de sistema é especialmente vantajoso para chapas de grande dimensão, já que pequenas variações na trajetória podem comprometer a qualidade final da peça [55].

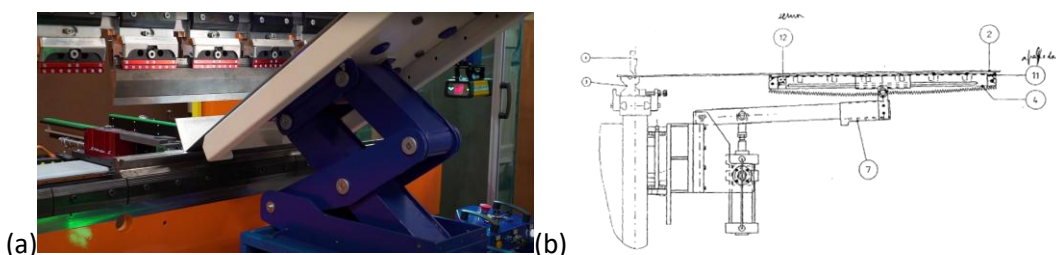


Figura 13 - Sistemas de movimento relativo de braços: (a) Triveneta Impianti [55], (b) Patente portuguesa [56].

- **Dois acionadores**

Os sistemas de dois acionadores utilizam dois braços verticais com ligação rotulada na extremidade. Estes são posicionados entre os braços e o elemento de suporte da chapa de modo acompanhamento preciso (Figura 14). Estes braços são acionados independentemente, o que permite ajustes precisos do ângulo do acompanhador em qualquer fase da sua ascensão. A grande vantagem deste sistema reside na possibilidade de alterar o ângulo do acompanhador

ao longo do movimento, o que garante um suporte adaptável às características da chapa durante o processo de quinagem. Este nível de controlo permite melhorar significativamente a precisão da dobragem, pois evita deformações e garante a repetibilidade do processo. Além disso, a utilização de dois acionadores independentes oferece maior estabilidade. A principal desvantagem deste sistema é o elevado custo, resultante da necessidade de dois acionadores, o que aumenta a complexidade e preço do acompanhador [57].

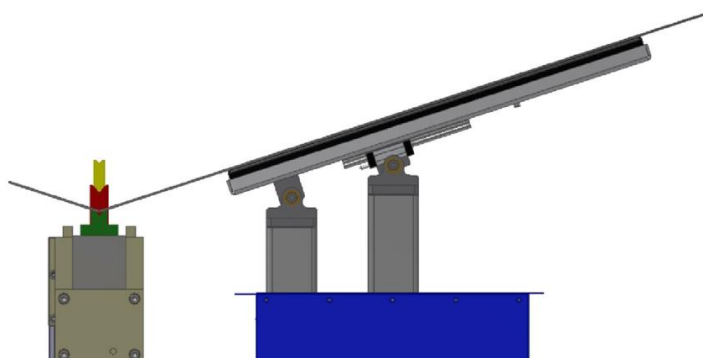


Figura 14 - Sistema de dois acionadores da Boschert Gizelis [57].

2.3.6. Estado da arte

Neste capítulo analisam-se os principais desenvolvimentos no design e produção de quinadoras, bem como as inovações nos acompanhadores de quinagem. O capítulo abrange as tecnologias atuais, os desafios enfrentados, as metodologias utilizadas, os resultados obtidos e as conclusões tiradas, de forma a proporcionar uma visão sobre o estado da arte das quinadoras e acompanhadores de quinagem (Tabela 3).

Tabela 3 - Estado da arte de quinadoras e acompanhadores de quinagem

Referências bibliográficas	Trabalho desenvolvido
Santos et al., 2011 [58]	O artigo analisa a melhoria do desempenho ambiental de quinadoras, comparando sistemas hidráulicos e elétricos em termos de consumo de energia. Utilizou-se um LCA (<i>life-cycle assessment</i>) para avaliar o impacto ambiental de uma prensa hidráulica padrão, complementado com medições de consumo em cinco máquinas. Constatou-se que dentro do ciclo de vida total de uma quinadora a fase de uso domina o impacto ambiental, com o consumo de eletricidade a representar 46% do total. As máquinas elétricas mostraram-se mais eficientes, com reduções de consumo energético de até 90% em cenários de baixa utilização em comparação às quinadoras hidráulicas. O estudo recomenda a substituição de sistemas hidráulicos por elétricos para reduzir o impacto ambiental e custos operacionais apesar das quinadoras hidráulicas terem maior capacidade de carga.

Tabela 3 - Estado da arte de quinadoras e acompanhadores de quinagem (continuação)

Lavanya et al., 2022 [59]	O artigo explora a utilização da emissão acústica para monitorizar o processo de quinagem em chapas de aço inoxidável SS 304L e correlacioná-la com a distribuição de tensões residuais e transformações microestruturais. O estudo utilizou sensores de emissão acústica durante a quinagem a diferentes ângulos e mediu tensões residuais por difração de raios-X. Os resultados mostraram que os parâmetros de emissão acústica aumentam com o ângulo de quinagem até 120°, e que estes podem ser correlacionados com as tensões residuais e a formação de martensite. Concluiu-se que a emissão acústica é uma ferramenta eficaz para prever tensões residuais e otimizar a quinagem.
Kontolatis & Vosniakos, 2012 [45]	O artigo aborda a otimização da quinagem de chapas metálicas, com foco na determinação da sequência ideal de dobras em 3D. O método baseia-se em algoritmos para encontrar sequências de dobras que minimizem o tempo de processamento, custos e interferências, enquanto garantem a precisão dimensional do produto fabricado. A simulação do processo com algoritmos genéticos permitiu identificar colisões e ajustar ferramentas e orientações de peças para evitar problemas durante a quinagem. Os resultados demonstraram que o algoritmo é eficaz em agrupar dobras com orientações comuns e evitar mudanças desnecessárias de ferramentas.
Öziç et al., 2023 [44]	O artigo apresenta um sistema autónomo para carregar matrizes em quinadoras utilizando tecnologia de visão por computador, <i>deep learning</i> e braços robóticos. O método utilizado baseou-se no algoritmo YOLOv4 para deteção de objetos, complementado por técnicas de processamento de imagem para identificar a posição e o tipo de matriz. A configuração experimental incluiu câmaras e sistemas de iluminação montados num braço robótico de seis eixos. Os resultados demonstraram elevada precisão na deteção e posicionamento das matrizes, com uma taxa de sucesso de 98%. Concluiu-se que a integração desta tecnologia transforma prensas convencionais em máquinas autónomas e reduz as operações manuais.
Wang et al., 2021 [60]	O artigo investiga o comportamento do endurecimento superficial a laser em matrizes de quinagem fabricadas em aço 42CrMo, com o objetivo de melhorar a dureza e a resistência ao desgaste. O método envolveu o uso de um laser de diodo, com parâmetros otimizados de tamanho do ponto, movimento do feixe e potência, além de refrigeração auxiliar com água para controlar o processo. Os resultados mostraram que a dureza da zona endurecida foi 1,6 vezes superior à do material base, com uma camada endurecida uniforme de 1,05 mm de espessura. Concluiu-se que o endurecimento a laser é eficaz na melhoria das propriedades das matrizes, apresentando potencial para resolver problemas de insuficiência e distribuição desigual de propriedades nas matrizes de quinagem.

3. Desenvolvimento

Este capítulo apresenta a abordagem adotada na dissertação, começando pela apresentação da entidade acolhedora e pelo enquadramento do seu contexto operacional. De seguida, descreve-se a metodologia aplicada e justifica-se a escolha do método utilizado para conduzir o estudo e desenvolver a solução proposta. Caracteriza-se o processo atual, identificam-se os problemas existentes e definem-se os objetivos do projeto. Estabelecem-se os requisitos e limitações a considerar. No anteprojecto analisam-se as possíveis soluções e define-se a abordagem técnica. Desenvolve-se o projeto detalhado, onde se apresenta o equipamento e se descreve o seu princípio de funcionamento, estrutura e ligação à quinadora, cadeia cinemática, acionamento, automação e controlo, dispositivos de segurança e plano de manutenção. A estrutura, a cadeia cinemática e o acionamento são analisados através da descrição do conceito, modelação CAD, dimensionamento de componentes normalizados, validação estrutural e definição dos materiais e processos de fabrico. O projeto culmina com a definição de um plano de manutenção adequado para preservar a fiabilidade e durabilidade do sistema. Por fim, procede-se à validação da solução através da construção de um protótipo, seguido de uma análise de custos e de uma comparação com produtos concorrentes.

3.1. Apresentação da entidade acolhedora

A Adira é uma empresa fundada em 1956 por António Dias Ramos que no seu começo fabricava tornos, fresadoras e máquinas de aplainar. Nos anos sessenta a empresa inicia a exportação de guilhotinas mecânicas e quinadoras hidráulicas (Figura 15), após ser a primeira empresa a produzir destas máquinas em Portugal. Nas próximas décadas, a Adira aposta no desenvolvimento de soluções inovadoras para os seus produtos, na participação da mesma em feiras e na obtenção de certificações como a certificação de segurança CE. Esta empresa entra no novo milénio com a fabricação de máquinas de corte por laser, robots e novos automatismos. Neste período a Adira é vendida a António Cardoso Pinto. Sob a nova liderança é efetuado o lançamento de novos modelos de máquinas a laser e da *GreenBender*, uma quinadora híbrida. Em 2017 a Adira passa a ser propriedade da SC - SONAE Capital Industriais, SGPS, S.A., que oferece serviços e soluções mais abrangentes, competitivos e vanguardistas. Como resultado desta mudança em 2017, a Adira, em parceria com a MC Machinery Systems, Inc., subsidiária da Mitsubishi Corporation, formaram uma cooperação de vendas e serviços que visam fornecer quinadoras de alta gama a toda a América do Norte. Desde 2019, a empresa tornou-se a representante exclusiva em toda a península ibérica de todo o portfólio Laser Mitsubishi Eletrics [61]. A missão da empresa foca-se no “*Back to basics*”, para criar uma

empresa *Lean*, no desenvolvimento de uma parceria sólida com os seus clientes e no crescimento sustentável. A visão da ADIRA baseia-se em ser um fabricante internacional competitivo e de confiança de soluções de engenharia para conformação de chapa [61].

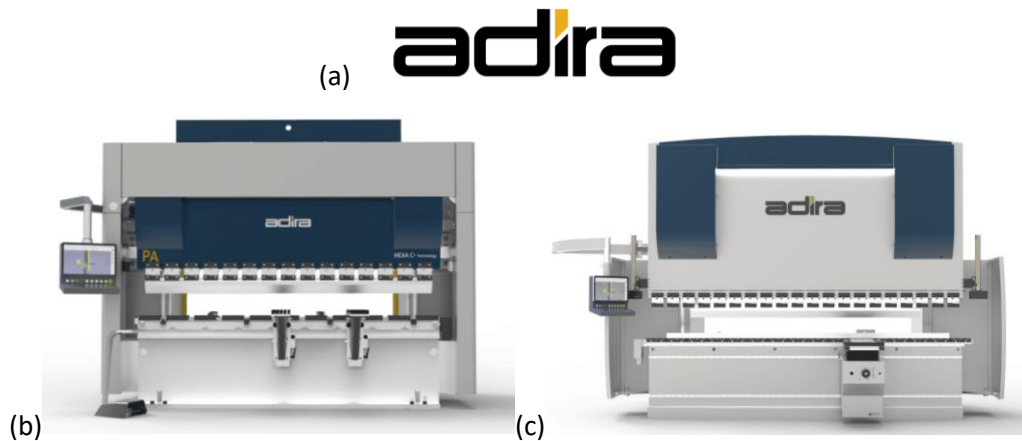


Figura 15 - (a) Logótipo da empresa, (b) Quinadora PA, (c) Quinadora PH [62].

3.2. Metodologia a aplicar

A metodologia utilizada na dissertação baseia-se no *Design Science Research* (DSR), uma abordagem de investigação que visa o desenvolvimento e avaliação de equipamentos projetados com o objetivo de melhorar o seu desempenho funcional. Esta metodologia adapta-se especialmente ao desenho e à melhoria de processos existentes, que permitem otimizar sistemas e criar conceitos com base no conhecimento e na interação com diferentes intervenientes [63]. A DSR segue uma sequência estruturada de etapas para identificar problemas, desenvolver soluções e avaliá-las com base em métricas e análises específicas. De acordo com a abordagem representada na Figura 16, o processo do DSR pode ser descrito pelas seguintes etapas, aplicadas de forma sequencial [63]:

- **Identificação do Problema:** O primeiro passo consiste na análise dos sistemas e equipamentos existentes e na identificação e motivação do problema. Esta fase permite definir claramente os desafios a enfrentar e justifica a relevância do estudo;
- **Definição dos Objetivos:** Com base na identificação do problema, estabelecem-se objetivos para a nova solução. Determinam-se os requisitos e as metas que servirão de base para a fase de desenvolvimento;
- **Design e Desenvolvimento:** Procede-se ao design e fabricação da solução, que pode assumir diversas formas, como um modelo de processo, um algoritmo, uma interface ou um equipamento industrial. A solução define-se com base no conhecimento teórico e prático, nas necessidades identificadas e nos objetivos traçados;
- **Demonstração da Solução:** Uma vez desenvolvida a solução, esta aplica-se num contexto adequado para testar a sua funcionalidade. O objetivo é demonstrar que a solução concebida resolve o problema identificado;

- **Avaliação:** Determina-se a eficiência em relação aos objetivos definidos. Esta fase pode levar a ajustes e melhorias do equipamento, que resulta num processo iterativo entre o design e a avaliação até que a solução atinja o desempenho pretendido;
- **Comunicação:** A última fase corresponde à comunicação dos resultados, que se concretiza com a redação e entrega da dissertação, a apresentação e defesa perante júri, bem como a partilha dos contributos com a entidade de acolhimento.

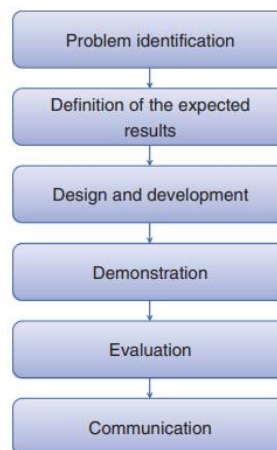


Figura 16 - Etapas da metodologia DSR [80].

A abordagem DSR apresenta diversas vantagens, nomeadamente a possibilidade de melhorar significativamente os processos existentes, pois baseia-se numa abordagem pragmática do conhecimento. Além disso, esta envolve múltiplos intervenientes no processo de desenvolvimento, o que resulta numa solução mais adaptada à realidade. Outro ponto relevante é o seu foco na criação de soluções inovadoras reais, que permite a sua diferenciação das metodologias tradicionais de design. Uma das grandes vantagens da metodologia DSR é a possibilidade de reduzir a lacuna existente entre teoria e prática, uma vez que este método não se foca apenas na resolução de problemas, mas também gera conhecimento que serve como referência para a melhoria das teorias. Contudo, esta abordagem também apresenta algumas limitações. De facto, esta exige uma análise detalhada dos processos iniciais, de modo a necessitar de múltiplas iterações para garantir a solução satisfatória do problema. Isto pode implicar um aumento do tempo e dos recursos necessários para a implementação da solução [63]. A metodologia DSR será abordada ao longo de toda a dissertação. A primeira etapa está detalhada no capítulo 3.4, enquanto a segunda etapa surge nos capítulos 3.5 e 3.6 e mais extensivamente no anteprojeto. A terceira etapa da metodologia DSR, design e desenvolvimento, está presente ao longo do capítulo 3.8. A quarta etapa surge na secção 3.8.1, seguida da quinta etapa, que ocorre no final do capítulo do projeto. Por fim, a última etapa é realizada na fase de conclusão da dissertação.

3.3. Caracterização do processo atual

Atualmente, a Adira fabrica acompanhadores para auxiliar o processo de quinagem. Estes equipamentos têm a função de apoiar a chapa durante o processo e garantir um movimento

controlado, conforme ilustrado na Figura 10. O acompanhador de quinagem movimenta-se através de um sistema de barras interligadas, acionadas por um motor. Este motor, normalmente acoplado a um redutor, aciona uma ou mais barras, que transmitem o movimento ao restante sistema. Com todas as barras a seguir o movimento imposto pela geometria da estrutura, a mesa de apoio do acompanhador roda, de forma a auxiliar a chapa ao longo do processo. Como principais elementos responsáveis pela transmissão do movimento no mecanismo do acompanhador, as barras devem manter a sua rigidez e resistência, de modo a evitar deformações ou roturas, mesmo nas condições mais exigentes. Dado o seu papel estrutural fundamental, as barras são componentes críticos, que exigem um dimensionamento rigoroso para assegurar o desempenho adequado do mecanismo. Em termos de ajuste, o acompanhador deve se ajustar em três eixos diferentes, o eixo X, Y e Z, como se observa Figura 17. O comprimento do acompanhador segue ao longo do eixo X, o eixo Y corresponde ao eixo da largura do acompanhador e a cota Z corresponde à altura do mesmo.

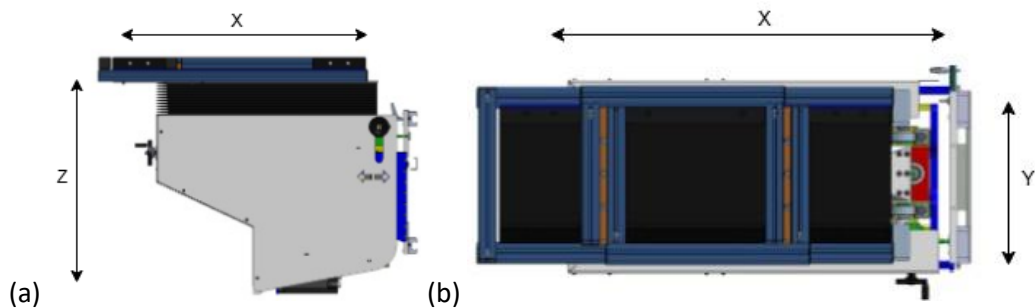


Figura 17 - Eixos do acompanhador Adira: (a) X e Z, (b) X e Y.

Os acompanhadores da Adira possuem a estrutura representada na Figura 18 e Figura 19. Nesta estrutura, identificam-se dois pontos fixos, B e C, ligados às peças que se conectam à quinadora, mantendo-se, assim, imobilizados. O sistema de fixação do acompanhador assegura a sua estabilidade e alinhamento preciso com a quinadora e previne desvios que poderiam comprometer a exatidão do ângulo de quinagem. O sistema FGHI corresponde à mesa que suporta a chapa, sendo GH o ponto de contacto entre o acompanhador e a chapa. Este sistema é responsável por acompanhar a chapa ao longo de todo o seu movimento, pelo que assume um papel crítico na precisão do processo.

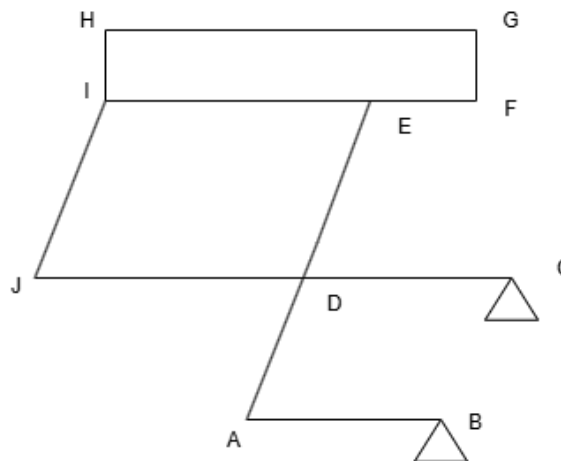


Figura 18 - Esquema da estrutura do acompanhador Adira.

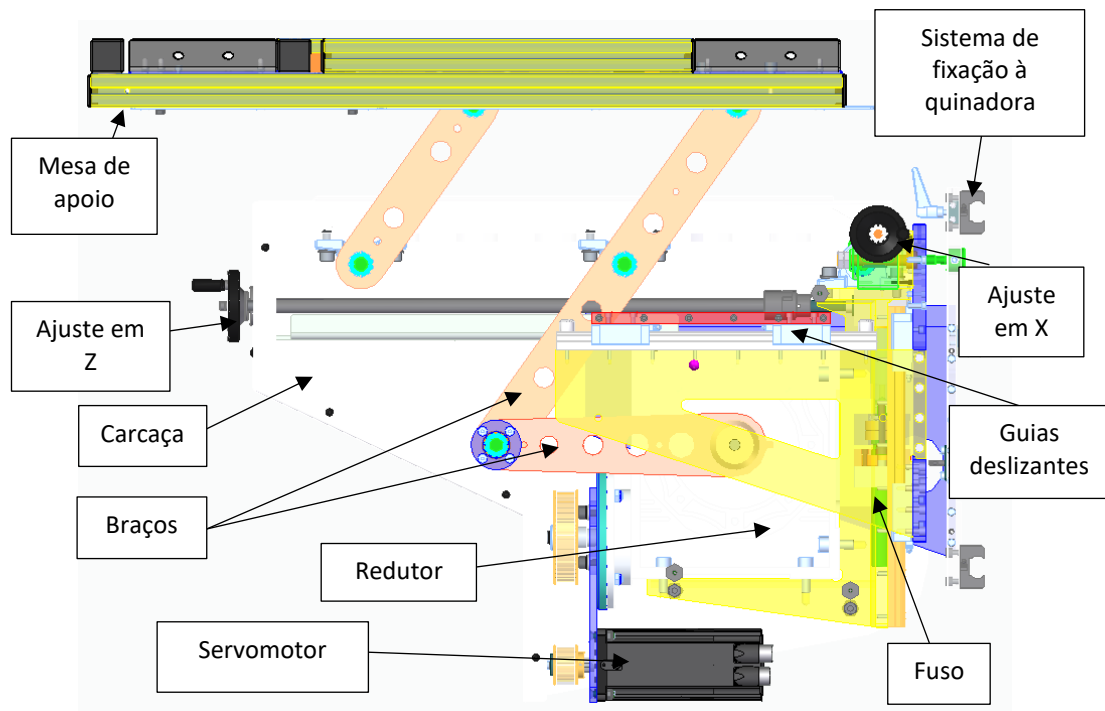


Figura 19 - Componentes do acompanhador Adira.

O raio de rotação do acompanhador é definido pelos elementos AB e DC, que determinam o trajeto do sistema e apresentam as mesmas medidas. O binário é aplicado no ponto B, que atua sobre AB, e que, por sua vez, transmite o momento a AD. O elemento AD transmite o momento a DC que conseqüentemente causa o movimento no resto da estrutura. A peça CDJ une os três pontos mencionados e garante que todos estes mantêm a cota vertical. Os elementos DE e JI, de comprimento igual, ligam os braços que geram o movimento da estrutura à mesa de apoio da chapa, logo asseguram a coerência do deslocamento. Esta máquina é projetada para executar uma rotação de 60° , que permite um acompanhamento contínuo da chapa. Na Figura 19 é possível observar os componentes do mecanismo do acompanhador da Adira. Todos os braços são fabricados do mesmo material, aço de construção corrente, apesar de formatos e espessuras diferentes. Muitos dos braços possuem entalhes para redução do seu peso e auxílio na montagem de todo o sistema. Nos pontos fixos encontram-se chumaceiras para que os braços ligados aos pontos consigam rodar. Para permitir a rotação da estrutura, o elemento AB possui uma chaveta no ponto B (Figura 20), onde se encontra a ligação com o redutor, que permite o redutor transmitir o momento para o acompanhador. Entre as ligações dos elementos também estão presentes rolamentos que permitem o movimento relativo entre os diversos elementos da estrutura.

A mesa tem escovas e pequenas esferas rolantes na sua superfície de modo a permitir à chapa, aquando da sua colocação no acompanhador feita pelo operador ou *gripper*, deslizar na superfície, sem haver necessidade de esforços excessivos. Estes mecanismos ajudam a manobrar a chapa quando esta está suportada no acompanhador e reduzem riscos associados a colisões com o acompanhador. Já o sistema de fixação da estrutura do acompanhador garante a robustez necessária para cumprir a sua função principal: a ligação do acompanhador à

quinadora. Este componente é colocado sob guias presentes no avental fixo. Além deste componente, que permite o ajuste no eixo Y, também existe ajuste nos eixos X e Z. O ajuste no eixo X integra entalhes projetados para encaixar em guias deslizantes, que permitem o ajuste preciso da aproximação do acompanhador à quinadora. Já o ajuste em Z faz-se através da subida e descida de um fuso, auxiliada por uma caixa angular.

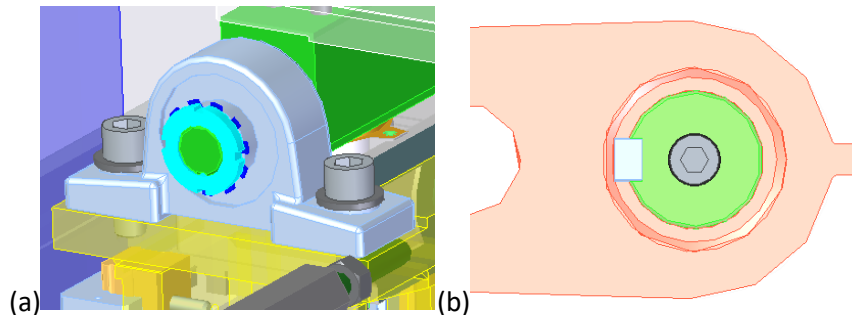


Figura 20 - (a) Chumaceira num ponto fixo, (b) chaveta no ponto B.

Apesar da sua funcionalidade aprovada, os acompanhadores internos (acompanhadores fabricados na Adira) ainda apresentam limitações no seu desempenho, mesmo após ajustes nos parâmetros operacionais. Os parâmetros que afetam atualmente o comportamento dos acompanhadores incluem:

- A distância do acompanhador à quinadora;
- A altura do acompanhador relativamente à matriz;
- A velocidade de rotação do acompanhador;
- O ângulo de quinagem e, consequentemente, o grau de rotação do acompanhador;
- O binário do acompanhador;
- O sincronismo entre o acompanhador e a quinadora.

Apesar da possibilidade de ajuste destes parâmetros, os acompanhadores fabricados internamente não conseguem garantir um acompanhamento eficiente da chapa. Como consequência, a chapa pode deslocar-se de forma irregular durante o movimento da mesma, o que compromete a precisão dos ângulos de quinagem e a aumenta a possibilidade de defeitos. Devido às limitações dos acompanhadores internos, a empresa recorre à compra de acompanhadores de um fornecedor externo. Estes equipamentos demonstram um desempenho significativamente superior pois proporcionam um acompanhamento mais preciso da chapa durante a quinagem. A chapa é acompanhada de forma mais precisa, uma vez que o acompanhador mantém um elevado paralelismo com a superfície da mesma durante o movimento, de modo a proporcionar uma maior precisão nos ângulos obtidos da chapa quinada e uma redução dos defeitos associados ao processo de quinagem. Um exemplo de um acompanhador externo encontra-se na Figura 21. A adoção de acompanhadores externos permite alcançar uma qualidade superior no produto final, mas representa um custo adicional para a empresa. A dependência destes equipamentos externos reforça a necessidade de aperfeiçoar os acompanhadores internos, de forma a reduzir falhas e melhorar o desempenho do processo produtivo.



Figura 21 - Acompanhador ArgeSystems [64].

3.4. Identificação de problemas e limitações

A função de um acompanhador consiste em apoiar chapas de grandes dimensões ao longo de todo o seu movimento, auxiliar o operador da máquina devido ao peso e tamanho da chapa, e garantir uma maior precisão na quinagem executada. Como abordado no capítulo anterior, o acompanhador da Adira não executa um acompanhamento satisfatório, o que origina várias consequências indesejadas. Assim sendo, a empresa vê-se obrigada a recorrer a acompanhadores externos, que apresentam maior precisão e melhor acompanhamento da chapa, que resulta numa quinagem mais eficiente e com menos defeitos. Esta situação evidencia a necessidade de desenvolver melhorias nos acompanhadores Adira, de forma a otimizar o processo de quinagem e a reduzir a dependência de equipamentos externos. Os principais problemas do acompanhador ADIRA incluem:

- Má precisão do ângulo de quinagem;
- Necessidade de um ajuste aprofundado do acompanhador devido à fraca precisão do acompanhador;
- Dependência de um operador para garantir o movimento adequado da chapa no acompanhador;
- Possibilidade de danos na chapa devido a embates e deslizamentos entre o acompanhador e a chapa;
- Potencial dano na superfície da chapa por falta de suporte adequado na matriz;
- Colisões frequentes entre a chapa e o acompanhador, resultantes de falta de paralelismo em relação à chapa;
- Presença de ruído ao longo do movimento do acompanhador devido às colisões frequentes;
- Instabilidade da chapa durante o processo de quinagem, o que compromete a conformidade do ângulo ao longo do comprimento da dobra.

Alguns destes defeitos são demonstrados na Figura 6. A análise destes problemas evidencia a influência direta do funcionamento do acompanhador na qualidade do produto final. Deste modo, garantir o bom funcionamento do acompanhador é essencial para a qualidade no produto final e para a segurança durante todo o processo.

Grande parte destas limitações resulta da cinemática do acompanhador ADIRA, como é visível na Figura 23. Qualquer corpo com movimento rotacional apresenta um centro fixo de rotação, quando o ponto de rotação é fixo, ou um centro instantâneo de rotação (CIR), quando o ponto de rotação altera as suas coordenadas ao longo do movimento. Neste estudo, a análise incide maioritariamente sobre o CIR, por ser o conceito que melhor reflete a realidade do processo. Idealmente, o CIR corresponde ao primeiro ponto de contacto da chapa com a matriz, localizado no vértice da matriz, onde a chapa inicia a rotação (Figura 22). Sendo este o ponto de partida da dobra, o CIR deveria manter-se o mais fixo possível, de forma a evitar variações excessivas ao longo do movimento da chapa e assim se sobrepôs ao vértice fixo da matriz. Quanto maior a estabilidade do CIR, melhor será o desempenho do acompanhador.

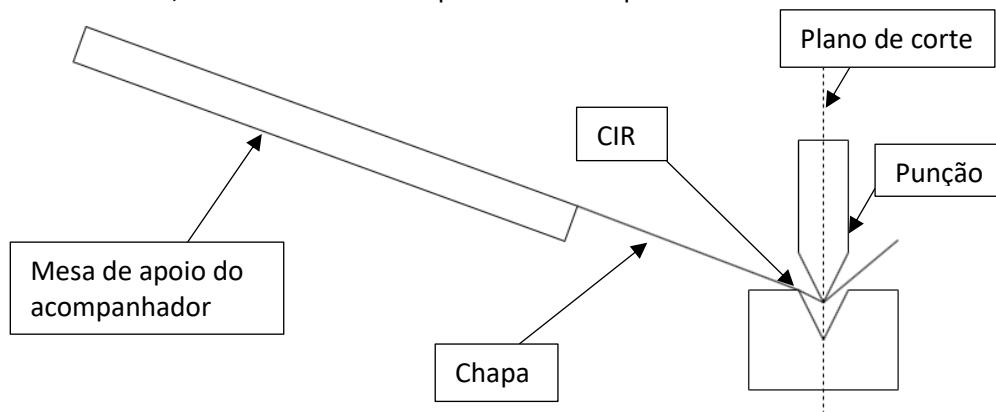


Figura 22 - Ponto CIR ideal.

Existe atualmente a necessidade de o CIR se encontrar à altura do acompanhador no início da rotação. Como o CIR representa o vértice da matriz, tanto este como a superfície da mesa do acompanhador devem ter a mesma cota vertical, de modo a permitir que, no início do movimento, a chapa permaneça perfeitamente horizontal antes de começar a rodar. Apesar de o CIR do acompanhador da Adira manter alguma estabilidade ao longo do tempo, este encontra-se significativamente abaixo do plano da chapa (Figura 23), o que prejudica significativamente o desempenho do acompanhamento em comparação com os acompanhadores externos. O CIR apresentado na Figura 23 é obtido através da utilização do software GIM, abordado brevemente no capítulo 2.3.4.

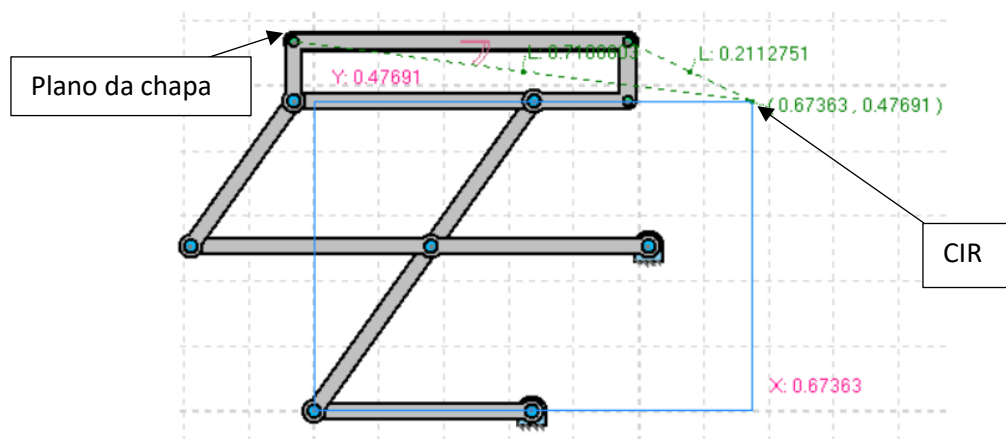


Figura 23 - Representação do CIR do acompanhador Adira.

A distância do acompanhador à matriz constitui outro fator determinante na cinemática do processo, já que esta influencia diretamente a precisão da quinagem. Quando esta distância não se encontra devidamente calculada e especificada, aumenta a probabilidade de um acompanhamento impreciso e bastante defeituoso, como também se verifica no caso do acompanhador Adira. O posicionamento incorreto do CIR, aliado a um cálculo inadequado da distância entre o acompanhador e a matriz, impede que o acompanhador Adira mantenha paralelismo com o movimento natural da chapa. Este desalinhamento pode resultar num movimento do acompanhador adiantado ou atrasado em relação à chapa, como se observa na Figura 24. Se o acompanhador estiver atrasado, a chapa seguirá o seu movimento natural sem ser devidamente acompanhada durante grande parte do percurso. Por outro lado, se o acompanhador estiver adiantado, exercerá uma força excessiva sobre a chapa, que causa deformações e ângulos de quinagem indesejados.

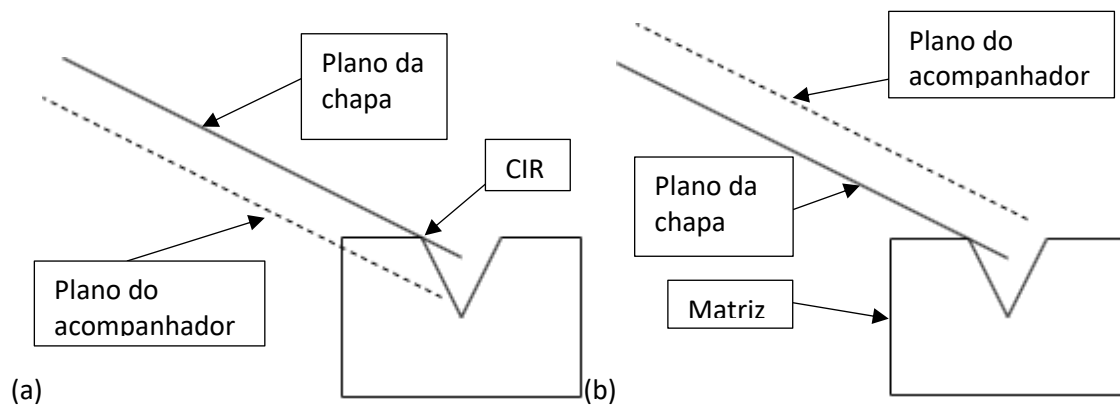


Figura 24 - Movimento do acompanhador - (a) atrasado, (b) adiantado.

Através da análise cinemática do movimento natural da chapa e do movimento do acompanhador, é possível determinar a distância entre os respectivos planos. Se for considerado um CIR ideal, conforme ilustrado na Figura 22, a chapa irá girar em torno deste ponto ao longo do seu movimento. Assim, ao assumir o mesmo declive para o plano da chapa e para o plano do acompanhador, torna-se possível calcular a distância entre estas duas retas paralelas. Desta forma, as equações da reta são:

$$y = m_d \times x + c \quad (2)$$

Com: y - coordenada vertical, m_d - declive da reta, x - coordenada horizontal e c - coordenada vertical para a interseção da reta com o eixo vertical. O declive de ambas as retas pode ser calculado através do ângulo das mesmas em qualquer momento do seu movimento:

$$m_d = \tan(\theta) \quad (3)$$

Com: m_d - declive da reta e θ - ângulo da chapa e do acompanhador. Com os dados obtidos no software GIM, registados a cada meio ângulo, é possível determinar c , para o caso do acompanhador, pois são conhecidas as coordenadas de um ponto e o declive. Com c e o declive determinados, é possível definir a equação da reta do acompanhador. Para a equação da reta da chapa, considera-se o ponto de contacto com a matriz, que corresponde ao vértice, e o declive, obtido através do respetivo ângulo. De modo a calcular a distância entre retas deve-se colocar a equação das retas na sua forma geral:

$$m_d \times x + b \times y + c_1 = 0 \quad (4.1)$$

$$m_d \times x + b \times y + c_2 = 0 \quad (4.2)$$

Com: m_d - declive da reta, x - coordenada horizontal, b - constante associada à coordenada y , y - coordenada vertical, c_1 - coordenada vertical para a interseção da reta com o eixo vertical do acompanhador e c_2 - coordenada vertical para a interseção da reta com o eixo vertical da chapa. Deste modo, a distância entre retas é expressa como:

$$d = \frac{c_2 - c_1}{\sqrt{m_d^2 + b^2}} \quad (5)$$

Com: d - distância entre retas, m_d - declive da reta, b - constante associada à coordenada y , c_1 - coordenada vertical para a interseção da reta com o eixo vertical do acompanhador e c_2 - coordenada vertical para a interseção da reta com o eixo vertical da chapa. Com a distância entre retas calculada é possível observar o comportamento do acompanhador Adira face à chapa:

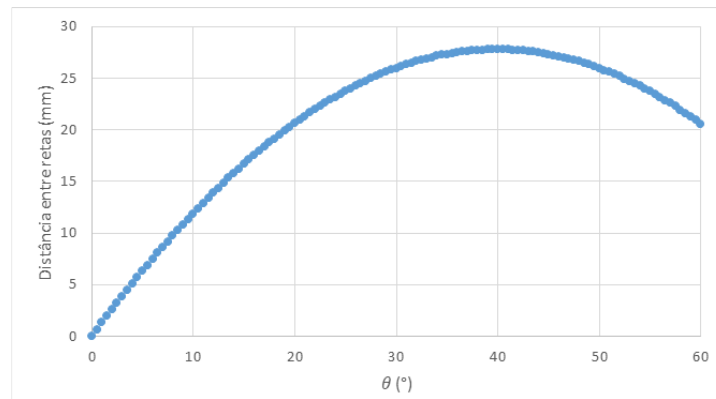


Figura 25 - Gráfico de dispersão da distância entre retas do acompanhador Adira.

Tabela 4 - Variação da distância entre retas do acompanhador Adira.

θ (°)	Declive	Distância entre retas (mm)
0	0,0	0,0
10	0,2	11,9
20	0,4	20,6
30	0,6	26,0
40	0,8	27,8
50	1,2	26,0
60	1,7	20,6

A análise da Figura 25 e da Tabela 4 revela que o acompanhador Adira apresenta um erro significativo em relação à chapa. Como a variável (distância entre retas) é positiva, conclui-se que o acompanhador se encontra atrasado em relação ao movimento da chapa, e atinge a maior discrepância para $\theta = 40^\circ$. Neste ponto, a distância máxima entre as retas é de 27,8 mm. Este desvio justifica o desempenho reduzido do acompanhador interno da Adira, que compromete a sua eficácia no processo de quinagem. Deste modo, é possível observar o problema mais relevante do acompanhador da Adira, que é o responsável por maior parte dos problemas mencionados no início deste capítulo.

Embora na realidade do processo de quinagem possam ocorrer deslizamentos da chapa tanto no acompanhador como na matriz, bem como deformações, que variam a sua intensidade conforme o material, um comportamento teórico mais estável, ou seja, com o CIR estável ao longo do movimento do acompanhador e cota vertical do CIR igual à da matriz no início do movimento, conduz inevitavelmente a um melhor desempenho prático. A experiência industrial demonstra que, quanto mais próximo o comportamento real estiver do comportamento ideal, melhor será o resultado obtido, como se verifica no caso dos acompanhadores externos. Se for realizado o mesmo estudo para os acompanhadores externos, observa-se um comportamento próximo do ideal, ou seja, a distância entre as retas é praticamente nula. Ao assumir as características atuais do acompanhador externo e uma distância mínima entre este e a quinadora, obtêm-se os resultados presentes na Figura 26 e na Tabela 5.

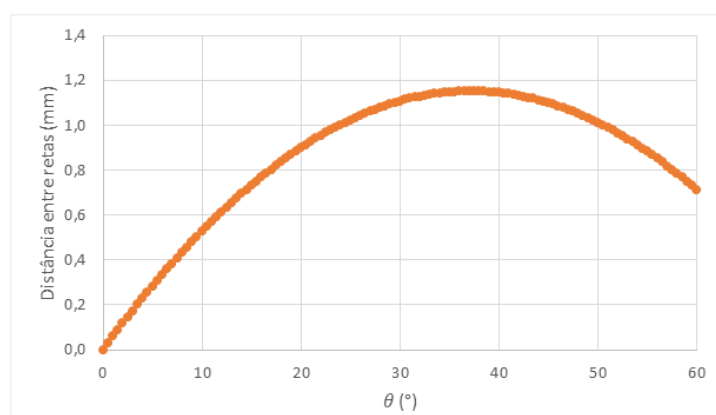


Figura 26 - Gráfico de dispersão da distância entre retas do acompanhador Argesystems F1P.

Tabela 5 - Variação da distância entre retas do acompanhador Argesystems F1P.

θ (°)	Declive	Distância entre retas (mm)
0	0,0	0,0
10	-0,2	0,5
20	-0,4	0,9
30	-0,6	1,1
40	-0,8	1,1
50	-1,2	1,0
60	-1,7	0,7

Como se pode observar na análise da Tabela 5, a distância máxima entre retas para o acompanhador externo é de 1,1 mm, um valor muito próximo de zero. Na Figura 26 é possível avaliar o comportamento do acompanhador externo, cuja curva se assemelha a uma pequena parábola, praticamente com uma distância nula entre retas. Também é relevante destacar que todos os valores desta curva são positivos o que, no pior dos cenários, resulta num atraso insignificante do acompanhador em relação à chapa. Caso os valores fossem negativos e de elevado valor, o acompanhador poderia exercer força sobre a chapa, o que representaria a situação mais crítica e indesejada no processo. Deste modo, a Figura 27 apresenta a comparação da distância entre retas dos dois tipos de acompanhadores estudados.

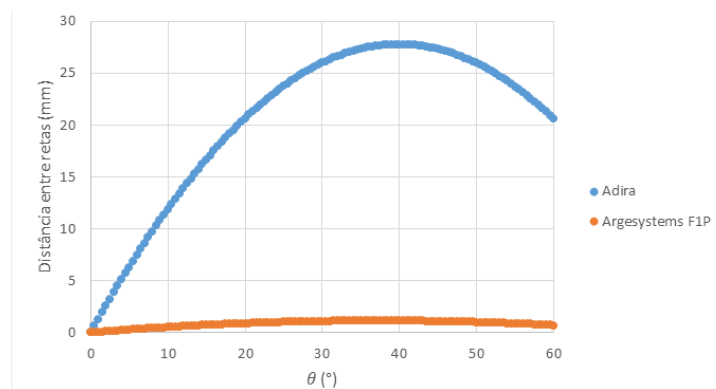


Figura 27 - Comparação do comportamento da distância entre retas do acompanhador Adira e do acompanhador Argesystems F1P.

Outro problema identificado na utilização de ambos os acompanhadores é a dificuldade no manuseamento dos volantes de ajuste da altura e da distância em relação à quinadora. Para manusear corretamente estes volantes é necessário uma força excessiva, o que dificulta a utilização dos mesmos. Esta limitação complica a operação da máquina e torna todo o processo de quinagem mais demorado. Além disso, a dificuldade que o operador tem ao manusear os volantes aumenta a probabilidade de erros associados ao acompanhador. Na Figura 21 estão representados exemplos destes volantes.

3.5. Definição de objetivos específicos

A definição de objetivos específicos é um passo fundamental no desenvolvimento de qualquer equipamento mecânico, pois serve como referência para garantir o desempenho e a eficiência da máquina. Após a identificação dos problemas existentes, torna-se essencial estabelecer requisitos concretos que o equipamento deve cumprir durante o seu funcionamento. Estes objetivos abrangem tanto aspectos funcionais como preferências do utilizador, que asseguram que a máquina responde de forma adequada às necessidades operacionais:

- **Qualidade do acompanhamento:** Este fator determina se o acompanhador contribui para uma quinagem de elevada precisão. Assim, torna-se essencial realizar um levantamento do conhecimento já adquirido, e aprofundamento da compreensão sobre a funcionalidade do acompanhador. Deve ser desenvolvido um modelo teórico que cumpra os requisitos necessários ao seu funcionamento, que assegure um acompanhamento satisfatório da chapa durante o processo de quinagem;
- **Redução de custos do equipamento:** Para além de cumprir todas as funcionalidades exigidas pelo projeto, o acompanhador deve ser concebido de forma a minimizar os custos tanto ao nível dos materiais utilizados como dos processos de fabrico. Paralelamente, a empresa valoriza um sistema com um design exclusivo, que permita destacar-se da concorrência. A criação de um modelo distinto pode, assim, oferecer uma vantagem competitiva no mercado dos acompanhadores e quinadoras;
- **Otimização dos sistemas de acompanhamento:** Estes sistemas incluem o acionamento, a estrutura, o ajuste de parâmetros de quinagem e o contacto com a

chapa. Melhorias nestes aspetos permitirão desenvolver um acompanhador superior aos concorrentes, em termos de funcionalidades e qualidade do acompanhamento;

- **Dimensionamento:** Pretende-se garantir que as peças do acompanhador suportam todas as cargas a que o equipamento está sujeito. Este objetivo inclui também a seleção criteriosa de componentes normalizados, como rolamentos e parafusos, e assegura a resistência necessária para suportar as solicitações mecânicas envolvidas;
- **Processo de fabrico:** A facilidade de montagem torna o processo mais eficiente em comparação com as soluções utilizadas. Melhorias neste sentido contribuirão para uma montagem mais rápida e eficaz, o que permitirá reduzir tempos de produção e custos operacionais. Na Figura 28 é apresentado um sumário sobre todos estes objetivos.

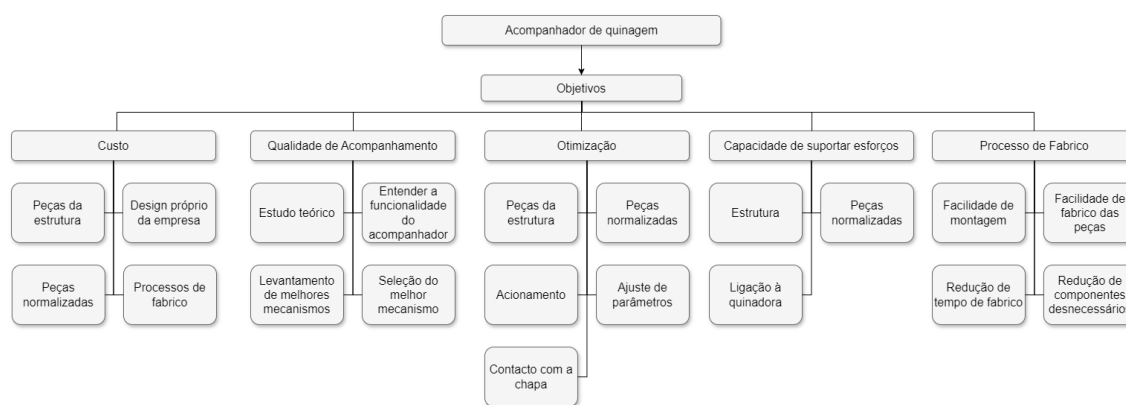


Figura 28 - Objetivos do acompanhador.

3.6. Requisitos e limitações

A definição de requisitos e limitações é essencial para o desenvolvimento estruturado de qualquer projeto mecânico. Estes parâmetros estabelecem diretrizes a seguir durante a conceção do equipamento e garantem que o resultado cumpre as necessidades funcionais, económicas e de fabrico. Os requisitos refletem as características indispensáveis para o correto funcionamento do equipamento, que asseguram que este atinge os objetivos previamente definidos. Sem uma definição rigorosa de requisitos, o projeto pode apresentar falhas que comprometam a sua eficiência e fiabilidade. Neste sentido, os requisitos aplicados ao acompanhador de quinagem são:

- O equipamento deve reproduzir o movimento natural da chapa durante a quinagem;
- A operação do equipamento não deve provocar qualquer tipo de dano ou marca visível na superfície da chapa;
- O funcionamento do acompanhador deve ocorrer de forma totalmente automática, sem necessidade de intervenção do operador durante o seu ciclo ativo;
- O acionamento deve ser realizado através do painel de controlo da quinadora, o que assegura total integração com o sistema principal;

Desenvolvimento

- A interface de utilização deve ser simples, intuitiva e acessível ao operador, de modo a promover facilidade de operação;
- A superfície da mesa do acompanhador deve permitir o deslizamento da chapa com baixo atrito e deve facilitar o seu correto posicionamento antes da quinagem;
- Todos os componentes sujeitos a manutenção periódica devem apresentar acessibilidade adequada, de modo a permitir intervenções rápidas e eficazes;
- O equipamento deve contemplar ajustes dimensionais que possibilitem a adaptação a chapas com diferentes geometrias;
- Os mecanismos de ajuste em X, Y e Z devem ser de operação simples, robustos e fiáveis.

As limitações, por outro lado, correspondem às restrições técnicas, financeiras e operacionais que devem ser consideradas ao longo do desenvolvimento. Fatores como restrições de espaço, custos de produção, disponibilidade de materiais e tecnologias de fabrico impõem barreiras que influenciam diretamente as decisões de projeto. O conhecimento detalhado destas limitações permite otimizar as soluções, que evita desperdícios de recursos e minimiza riscos associados a escolhas inadequadas. As limitações do acompanhador de quinagem são:

- Desfasamento máximo permitido entre a chapa e o acompanhador: 2 mm;
- Dimensão máxima da chapa de aço inoxidável a quinar: 1 m × 2 m × 6 mm;
- Tempo máximo de subida da mesa do acompanhador: 5 s;
- Altura máxima do topo do acompanhador ao solo: 979 mm;
- Distância mínima entre as garras do acompanhador e o plano de quinagem: 60 mm.

Dentro das limitações aplicadas ao acompanhador também é necessário estabelecer um critério para definir os limites de tamanho e peso das chapas a utilizar. No entanto, esta tarefa é bastante complexa, uma vez que uma chapa com elevado peso pode apresentar um comprimento e largura reduzidos, caso possua uma espessura elevada. Inversamente, uma chapa com grande comprimento e largura apresenta um peso relativamente baixo se a sua espessura for reduzida. Esta variabilidade dificulta a definição direta de um valor absoluto para comprimento, largura ou peso como parâmetro exclusivo de limitação. Assim, o acompanhador foi dimensionado com base nas características das quinadoras com as quais irá operar, nomeadamente os modelos PA da Adira. Estas máquinas apresentam capacidades que variam entre 135 e 220 t/m. A versão com capacidade mínima de 135 t/m está apta a realizar quinagens até um comprimento máximo de 3 m. Já a versão com capacidade máxima de 220 t/m permite quinagens até 4 m. Com base nestes dados, e dividindo a capacidade nominal de cada modelo pelo respetivo comprimento de quinagem, obtêm-se os valores aproximados de força total aplicada: 45 toneladas para a máquina de menor capacidade e 55 toneladas para a de maior capacidade, com uma média situada nas 50 toneladas. Esta média foi adotada como referência para o dimensionamento estrutural do acompanhador. Para reforçar esta análise, recorreu-se ao catálogo técnico da Adira, no qual se encontra disponível a tabela de quinagem (Figura 29) que apoia a definição destes limites operacionais.

v	6	8	10	12	16	20	22	25	32	40	50	63	80	90	100	110	125	140	160	200	250	320	400	500		
b	4	5,5	7	8,5	11	14	15,5	17,5	22	28	35	44	56	63	70	78	88	98	112	140	175	224	280	350		
ri	1	1,3	1,6	2	2,5	3,5	3,5	4	5	6,5	8	10	13	14	16	17	20	22	25	31	35	50	63	78		
e	0,8	8	6	4																						
1,0	14	9	7	5																						
1,25		19	12	9	6																					
1,5			18	14	10	7																				
2,0				28	19	14	12	11																		
2,5					32	23	21	18	13																	
3,0						36	32	27	19	15																
4,0								52	38	28	21															
5,0									63	47	35	26														
6,0										72	53	39	29													
6,5										84	62	46	34													
7,0										104	76	56	41	36												
8,0											105	77	56	48	42											
10												130	94	80	70	62	53	46								
12														123	107	94	80	69	59							
14																134	114	98	83	63						
16																	155	133	112	84						
18																		175	147	107	83					
20																			188	140	106	78				
25																					234	175	128	98		
30																							266	193	146	112

Figura 29 - Tabela de quinagem do catálogo da Adira [65].

A tabela de quinagem apresenta-se com três parâmetros interligados no eixo das abcissas: a abertura da matriz (V), a largura mínima admissível da chapa para a realização da quinagem (b) e o raio interno da quinagem (ri), este último igualmente condicionado pela abertura da matriz. No eixo das ordenadas encontra-se representada a espessura da chapa a quinar (e). Estabelecendo a correspondência entre as dimensões do gráfico, obtém-se a força necessária para realizar a quinagem de forma segura, tendo em consideração a espessura da chapa e os restantes parâmetros geométricos. As células destacadas a laranja intenso identificam a tonelagem ideal para cada combinação de parâmetros, enquanto as restantes células, com tonalidade menos intensa, indicam valores nos quais a quinagem continua tecnicamente possível, embora menos recomendada. A realização do processo nesses intervalos pode conduzir à ocorrência de defeitos ou à diminuição da qualidade da peça final.

Com base na análise da tabela, identificaram-se dois valores próximos da média anteriormente definida (50 t): 47 t e 53 t. Ambos os valores se encontram dentro dos limites operacionais do modelo PA da Adira. Foi adotado o valor de 53 t por representar o cenário mais exigente, de modo a assegurar assim um dimensionamento robusto. Para este valor de carga, a tabela indica uma espessura de chapa de 6 mm e um V de 50 mm, que representa as condições ideais para uma quinagem com estas características. A partir destes dados, obtém-se a espessura de chapa de referência para o dimensionamento. Considerando que o comprimento máximo de quinagem de uma quinadora PA é de 4 m e que a operação recorre a dois acompanhadores, o comprimento máximo de chapa associado a cada acompanhador é de 2 m. Assim, estão definidas duas das três dimensões da chapa: 2 m de comprimento longitudinal (CL) e 6 mm de e . Para a dimensão perpendicular ao comprimento de quinagem (profundidade fora da máquina), foi adotado o valor de 1 metro, com base na análise do alcance dos acompanhadores

da Adira. Esta dimensão de profundidade da chapa para fora da máquina (*PF*) também satisfaz as quinagens mais comuns realizadas nas quinadoras PA.

Estas três dimensões definem a chapa de referência utilizada para os cálculos. No entanto, tal não impede a utilização de outras geometria de chapa. A redução de uma das dimensões pode permitir o aumento de outras, desde que se respeite a capacidade total de carga. Com os três valores definidos e com a massa volúmica do material conhecida, torna-se possível determinar a massa da chapa através de $m = \rho v$, com: m - massa; ρ - massa volúmica e v - volume. Com os valores de m , ρ e v é possível estabelecer uma relação entre e , CL e o PF . Deste modo, a partir da variação dos valores de e de PF é possível calcular o CL respetivo. Desta forma, é possível estabelecer a relação entre CL e PF para um determinado e (Figura 30).

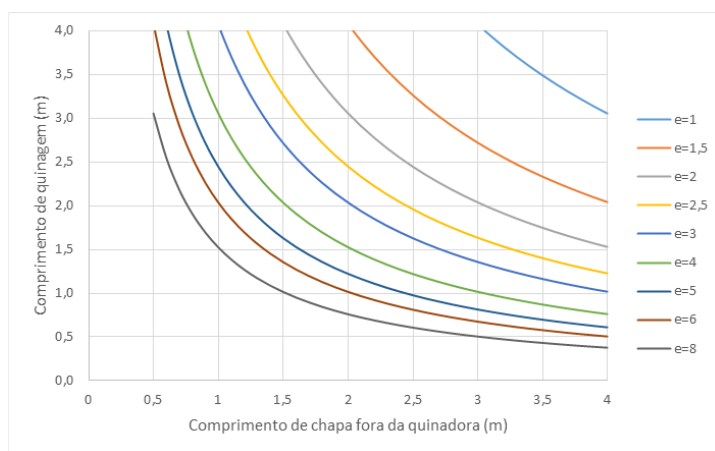


Figura 30 - Gráfico de dimensões de chapa de aço carbono a utilizar no acompanhador.

O gráfico apresentado permite analisar diversas curvas, representadas por diferentes cores, correspondentes a espessuras distintas de chapa. Verifica-se uma relação inversa entre o CL e o PF : quando uma destas dimensões aumenta, a outra deve diminuir para que a operação se mantenha viável. Para cada espessura, a região do gráfico situada acima da respetiva curva representa uma configuração de chapa que excede os limites admissíveis. Deste modo, quinagens com chapas com geometria acima da linha da espessura não são possíveis de realizar com segurança. A Figura 31 apresenta os gráficos correspondentes às chapas em aço inoxidável e alumínio, o que permite a comparação das limitações impostas por diferentes materiais. Como é possível observar, o aço inoxidável apresenta maiores restrições em comparação com o alumínio, devido à sua superior massa volúmica. Entre os três materiais analisados, o aço inoxidável é o mais limitativo, seguido pelo aço ao carbono (Figura 30) e por último o alumínio, que impõe menos restrições operacionais. Esta diferença é claramente visível na Figura 31 a), onde se observa que, para espessuras de 1 mm, o acompanhador permite quinagens em chapas de alumínio com dimensões até 10 m × 3,5 m. Em contraste, para o mesmo valor de espessura, o aço inoxidável (Figura 31 b)) apenas possibilita quinagens até aproximadamente 3,5 m × 3 m. Neste contexto, estas tabelas assumem particular relevância e devem ser consultadas previamente à realização do processo de quinagem, sobretudo quando se trata de chapas com espessura elevada ou materiais com maior massa volúmica, como os aços.

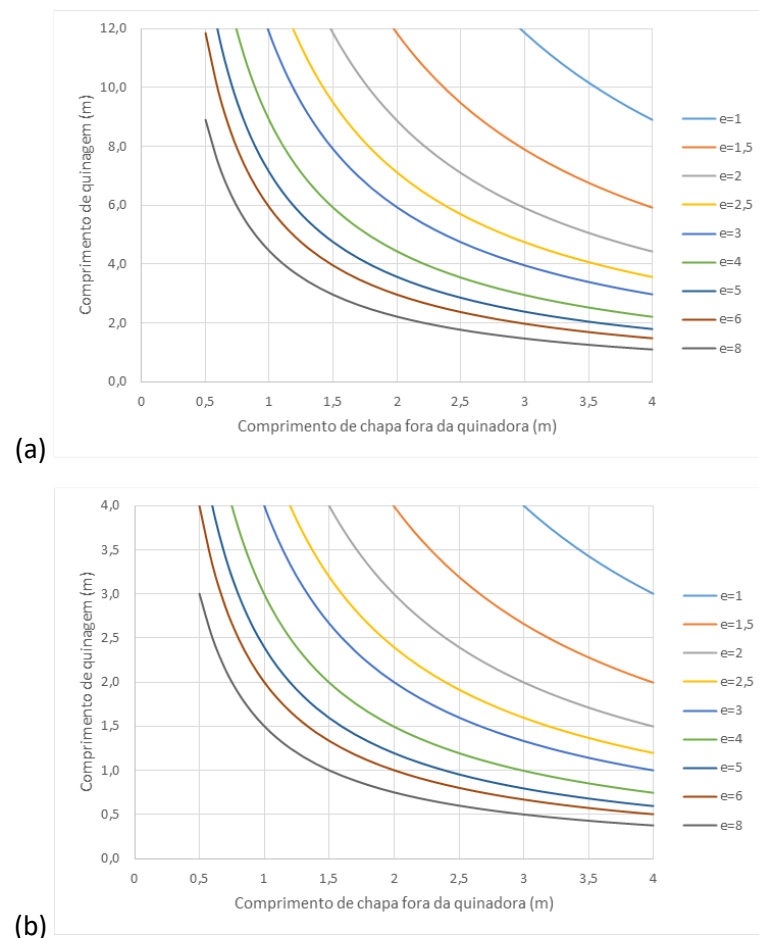


Figura 31 - Dimensões de chapa a utilizar no acompanhador: (a) alumínio e (b) aço inoxidável.

3.7. Anteprojeto

O anteprojeto representa uma fase crucial no desenvolvimento de sistemas mecânicos, já que assume um papel determinante na definição das características iniciais do equipamento. Nesta etapa do projeto, procede-se à síntese de conceitos, bem como propostas, análise e avaliação de diferentes sistemas com base em métricas previamente definidas. Estas métricas permitem a comparação e a análise dos sistemas disponíveis no mercado atual, o que facilita a escolha da solução mais adequada [4]. Além disso, são detalhados vários aspetos do acompanhador, que incluem a sua estrutura, a cadeia cinemática e o sistema de acionamento.

3.7.1. Técnica de seleção de soluções a adotar

O método da matriz de decisão ou método de Ashby é um processo desenvolvido para a seleção de alternativas de conceito. Esta abordagem permite aos decisores identificar e analisar, de forma sistemática, a força das relações entre diferentes conjuntos de informação [66]. A matriz de decisão é particularmente útil quando existe um grande número de fatores a considerar, que possibilita a avaliação da importância relativa de cada um. Esta metodologia baseia-se numa matriz de pontuação e é amplamente utilizada no planeamento de atividades e na

seleção de características e objetivos de produtos ou serviços [66]. O processo de aplicação da matriz de decisão inicia-se com a criação de uma equipa de avaliação. Em primeiro lugar, a equipa seleciona um conjunto de critérios ponderados (atributos) e avalia cada alternativa com base nestes critérios. Esta seleção pode ser realizada através de diferentes técnicas ou da combinação de várias abordagens, como reuniões de discussão e sessões de *brainstorming*. Após a definição dos critérios, procede-se à atribuição de um peso relativo a cada um. Geralmente, são distribuídos dez pontos entre os critérios previamente estabelecidos. Posteriormente, os valores atribuídos a cada critério são somados para obter um peso composto que reflita a importância relativa de cada fator na tomada de decisão, o que permite escolher melhor a solução [67]. Neste contexto, torna-se lógico recorrer à matriz de decisão para selecionar entre os diferentes tipos de acompanhadores disponíveis no mercado. O primeiro passo na construção desta matriz consiste na definição de um conjunto de atributos, que permite a elaboração da matriz de ponderações. A matriz de ponderações baseia-se na comparação entre os atributos selecionados e segue os seguintes passos:

1. Escolha de um atributo de comparação, que servirá como base de comparação;
2. Atribuição de valores ponderados a cada atributo relativamente ao atributo de comparação, numa escala de 0 a 100;
3. Cálculo da importância relativa de cada atributo, através da divisão do valor da sua ponderação pelo valor da ponderação do atributo de comparação;
4. Somatório das importâncias relativas obtidas;
5. Cálculo do peso percentual de cada atributo, através da divisão da sua importância relativa pelo somatório total.

Este processo permite determinar o grau de importância de cada atributo em percentagem, que fornece uma base objetiva para a tomada de decisão. Na Tabela 6 está representado um exemplo de uma matriz de ponderação com valores arbitrados para as ponderações.

Tabela 6 - Exemplo de matriz da ponderação.

Atributo	Ponderações				Importância relativa ao comparador	Importância relativa ao atributo (w_i)	Grau de importância do atributo (%)
	1/2	1/3	1/4	1/5			
1	60	80	90	90	1,00	0,47	47%
2	40				0,67	0,31	31%
3		20			0,25	0,12	12%
4			10		0,11	0,05	5%
5				10	0,11	0,05	5%
				Σ	2,14	1,00	100%

Com a matriz de ponderações definida, procede-se à atribuição de pontos a cada atributo, numa escala de 1 a 5 (V_i), para cada acompanhador em análise. Após esta distribuição, constrói-se a matriz de decisão, que permite estimar o índice de desempenho de cada acompanhador. Este índice resulta dos seguintes passos:

1. Cálculo da classificação ponderada de cada atributo (β_i) através da seguinte equação:

$$\beta_i = \frac{V_i}{MV_i} \times 100 \quad (6)$$

Com: V_i - pontos atribuídos a cada atributo e MV_i - maior valor de V_i entre todos os acompanhadores avaliados.

2. Determinação da classificação final do acompanhador para cada atributo (Ω) - Obtém-se através da multiplicação da importância relativa ao atributo calculada na Tabela 6 (w_i) e pelo valor da classificação ponderada (β_i):

$$\Omega_i = w_i \times \beta_i \quad (7)$$

Com: w_i - importância relativa ao atributo e β_i - classificação ponderada.

3. Cálculo do índice de desempenho de cada acompanhador (γ) - Dado por:

$$\gamma = \Sigma \Omega_i \quad (8)$$

Com: Ω_i - classificação final de cada acompanhador para cada atributo.

Desta forma, é necessário criar uma tabela de classificação das propriedades:

Tabela 7 - Classificação de propriedades.

Classificação	Escala
Menor	1
Baixo	2
Médio	3
Alto	4
Maior	5

Na Tabela 8 encontra-se um exemplo de uma matriz de decisão, com valores arbitrados.

Tabela 8 -Exemplo de matriz de decisão.

Hipótese	1		2		3		4		5		Índice desempenho (γ)
	w_1		w_2		w_3		w_4		w_5		
A	5	0,094	2	0,1247	5	0,1169	5	0,0519	2	0,021	0,408
	0,2		0,4		1		1		0,4		
B	4	0,117	5	0,3117	5	0,1169	5	0,0519	4	0,042	0,639
	0,25		1		1		1		0,8		
C	3	0,156	3	0,1870	3	0,0701	2	0,0208	3	0,031	0,465
	0,333333		0,6		0,6		0,4		0,6		
D	5	0,094	2	0,1247	5	0,1169	2	0,0208	3	0,031	0,387
	0,2		0,4		1		0,4		0,6		
E	3	0,156	5	0,3117	5	0,1169	1	0,0104	5	0,052	0,647
	0,333333		1		1		0,2		1		
F	1	0,468	4	0,2494	3	0,0701	5	0,0519	5	0,052	0,891
	1		0,8		0,6		1		1		

3.7.2. Estrutura e ligação à quinadora

A estrutura do acompanhador constitui a base física e funcional que permite executar o acompanhamento da chapa durante a quinagem. Este capítulo tem como objetivo apresentar os diversos sistemas que compõem esta estrutura, através da análise dos elementos que a integram e o seu papel no funcionamento global do equipamento. A análise da estrutura é essencial, pois a sua rigidez e a estabilidade influenciam diretamente a precisão do movimento, a repetibilidade do processo e a durabilidade do conjunto. Para além disso, a correta integração mecânica com a quinadora garante que o acompanhador se encontra alinhado, a realizar o movimento de acompanhamento pretendido.

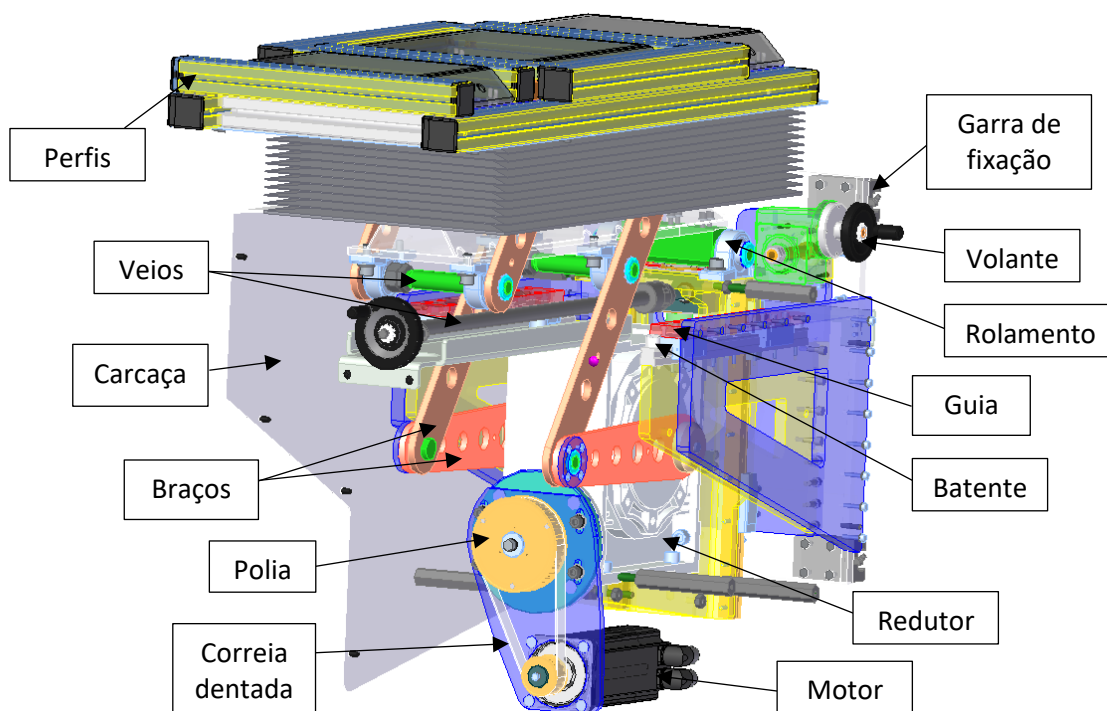


Figura 32 - Estrutura do acompanhador.

A observação da Figura 32 permite compreender a complexidade estrutural e a diversidade de componentes que integram um acompanhador. Desta forma, os componentes estruturais de um acompanhador são:

- **Braços** - Os braços da estrutura estabelecem a ligação entre o sistema de acionamento e a mesa de apoio da chapa. Estes elementos são responsáveis pela transmissão do movimento e pelo suporte das cargas aplicadas. A sua forma geométrica, o comprimento e a orientação determinam a trajetória percorrida pela mesa. Os braços podem apresentar configuração reta ou curvada, e podem incluir entalhes ou furos. Em geral, o material utilizado é um aço de construção, comum à maioria dos acompanhadores, independentemente da sua tipologia.
- **Guias e batentes** - As guias deslizantes têm como função orientar os elementos móveis da estrutura, de modo a restringir o seu movimento a uma trajetória específica. Os batentes atuam como elemento de limitação de curso, que impede que o movimento ultrapasse determinado ponto. Em alternativa às guias, podem ser utilizadas calhas lineares, que desempenham a

mesma função de orientação. Para aplicações com menores exigências de força e maior necessidade de controlo, recorre-se a rolamentos lineares. Em substituição ou complemento ao batente, podem ser integrados amortecedores, com o objetivo de controlar o movimento no final do curso.

- **Volantes** - Os volantes permitem, de forma manual, a realização de ajustes posicionais no acompanhador, através da conversão do movimento rotativo em movimento linear. Esta operação pode ser executada no sentido de avanço ou recuo. Em soluções mais atuais, os volantes podem ser substituídos por motores elétricos, que eliminam a necessidade de intervenção direta do operador. Contudo, esta substituição representa um acréscimo de custo. Tanto os volantes como os motores requerem o apoio de elementos mecânicos auxiliares, como veios, parafusos sem fim, fusos de esferas ou rolamentos.

- **Rolamento** - Os rolamentos têm como principal função a redução do atrito entre componentes móveis com movimento relativo, especialmente em rotações. As chumaceiras fixas à estrutura desempenham uma função semelhante. O fuso de esferas permite transformar movimento rotativo em movimento linear com elevada precisão e pode ser aplicado tanto no acionamento como nos sistemas de regulação do acompanhador. O parafuso sem fim permite a transmissão de rotação entre eixos dispostos perpendicularmente.

- **Garras de fixação** - Estes elementos asseguram a ligação mecânica do acompanhador à estrutura da quinadora. Devido à função que desempenham, estes exigem elevada resistência mecânica, sobretudo à flexão, pois suportam o peso do acompanhador e da chapa. As garras são geralmente fixadas a uma guia existente no avental inferior, o que permite o deslizamento ao longo do seu comprimento. Para acompanhadores de maiores dimensões ou com maiores exigências de carga, podem ser utilizadas chapas de união ou fixação, aparafusadas ao avental inferior por meio de parafusos, porcas e anilhas. Este método, embora mais robusto, reduz a flexibilidade de posicionamento do acompanhador na máquina.

- **Veios** - Os veios transmitem força ou momento entre componentes e são essenciais em sistemas rotativos como os braços. Estes elementos estão normalmente apoiados em rolamentos ou chumaceiras que lhes permitem girar livremente. Nos sistemas de regulação de posição, os veios são frequentemente acoplados a volantes ou a motores elétricos. A sua fixação a outros elementos pode ser feita com casquilhos, retentores, pinos ou cavilhas.

- **Carcaça** - A carcaça assegura a proteção global do equipamento, que garante simultaneamente a segurança do operador e a integridade dos componentes internos. Esta atua como barreira contra impactos e contaminações externas, como poeiras ou partículas.

- **Sistema de acionamento** - Na Figura 32 encontram-se representados os principais componentes do sistema de acionamento: motor, redutor, correia dentada e polia. Estes elementos constituem a fonte de energia e os meios de transmissão do movimento para o restante mecanismo do acompanhador. Os diferentes tipos de acionamento serão abordados em maior detalhe no capítulo 3.7.4.

- **Sistemas de fixação** - Incluem parafusos, porcas, anilhas, chapas de união ou reforço, placas de base, soldaduras, retentores, casquilhos, alavancas, manípulos, cavilhas, pinos, calços e

molas. Estes elementos asseguram a ligação entre componentes, a estabilidade estrutural do conjunto e a possibilidade de montagem e desmontagem com facilidade. Os parafusos, porcas e anilhas são usados em uniões desmontáveis; as chapas de união ou reforço conferem maior rigidez; as placas de base funcionam como suporte estrutural; as soldaduras garantem ligações permanentes; os retentores e casquilhos mantêm peças móveis na posição correta; as alavancas e manípulos facilitam ajustes manuais; as cavilhas e pinos asseguram o alinhamento e bloqueio; os calços permitem ajustes finos de folga; e as molas compensam forças ou mantêm componentes na sua posição funcional.

3.7.3. Cadeia cinemática

A cadeia cinemática é um dos aspetos mais importantes na seleção de um sistema que satisfaça os requisitos necessários para o funcionamento do acompanhador. Esta determina o correto desempenho do sistema, que depende do acompanhamento adequado da chapa ao longo de todo o seu movimento ascendente, conforme já abordado em capítulos anteriores. O movimento natural da chapa descreve uma trajetória circular em torno de um ponto fixo, idealmente localizado no vértice da matriz. Durante a quinagem, a chapa estabelece três pontos de contacto com a quinadora, que permitem a realização de uma dobra em três pontos: o primeiro vértice da matriz, o punção no plano de quinagem (responsável por aplicar a força de quinagem) e o segundo vértice da matriz. No processo de quinagem, a chapa é empurrada para dentro da matriz na direção da sua profundidade, o que provoca uma rotação em torno dos dois vértices da matriz, onde a chapa se apoia. Do lado do acompanhador, a chapa roda em torno do primeiro vértice da matriz. Do lado oposto ao acompanhador, a rotação ocorre em torno do segundo ponto de quinagem. O movimento é simétrico entre os dois lados, tendo como eixo o plano de quinagem. Apesar de a chapa se movimentar em ambas as direções, o lado esquerdo (Figura 33) é o mais relevante, uma vez que o lado direito é geralmente mais curto, pelo que não necessita de acompanhamento.

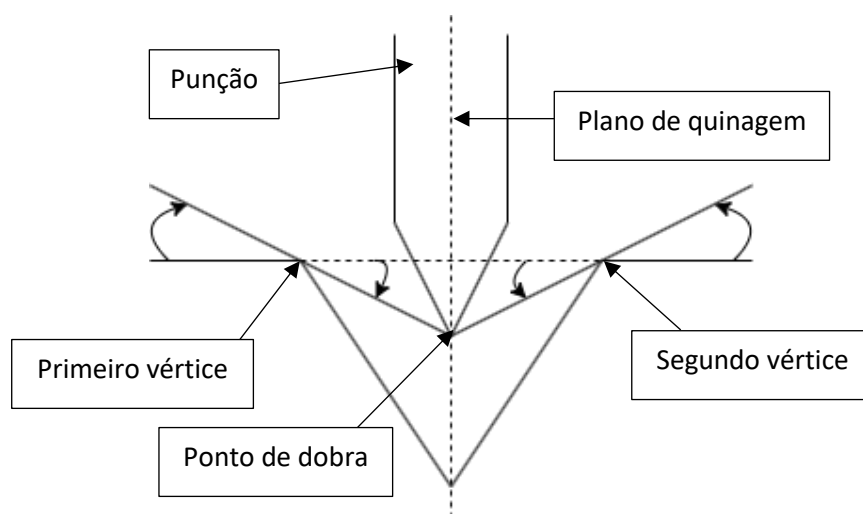


Figura 33 - Pontos de contacto da chapa.

A qualidade do acompanhamento depende bastante de o CIR da chapa coincidir com o vértice da matriz durante a quinagem. Para tal, o acompanhador deve ser projetado de forma a

descrever uma trajetória circular em torno de um centro fixo, idealmente coincidente com o vértice da matriz, que executa assim um arco circular (Figura 34). Para alcançar este objetivo, podem ser adotadas diferentes geometrias. Estas geometrias influenciam diretamente a localização do CIR do acompanhador o que, por sua vez, afeta o comprimento dos braços.

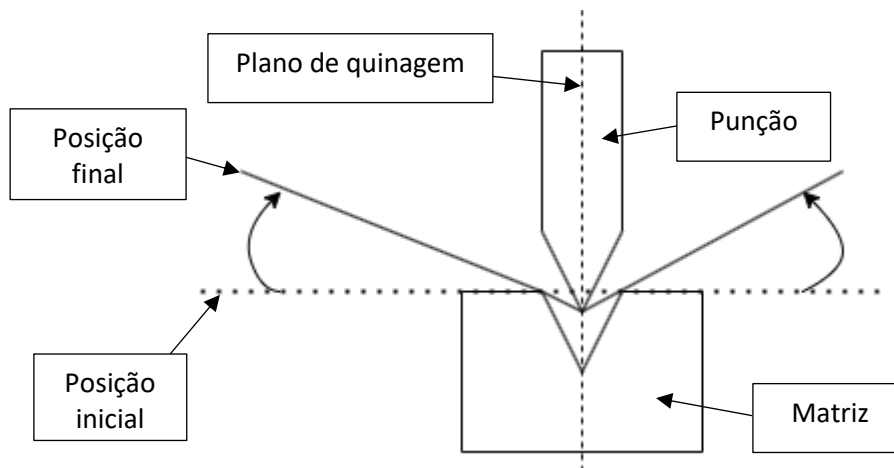


Figura 34 - Trajetória da chapa.

Existem diversos tipos de sistemas de acompanhadores que permitem assegurar o correto acompanhamento da chapa durante o processo de quinagem. A escolha do tipo de sistema é da maior importância, uma vez que define a trajetória que a mesa do acompanhador irá seguir ao longo de todo o movimento. Para além disso, o tipo de sistema condiciona o tipo de acionamento necessário, a estrutura do acompanhador e a forma como este se liga à quinadora.

O sistema analisado na Figura 35 (a) destaca-se pela sua elevada simplicidade, pois é um dos mais diretos em termos de cadeia cinemática entre as soluções disponíveis no mercado. Este sistema é composto por dois braços verticais, acionados e controlados de forma independente. Os braços encontram-se articulados em dois pontos distintos da mesa de contacto do acompanhador com a chapa. Uma das principais vantagens desta configuração reside no controlo total da orientação da mesa do acompanhador em qualquer instante do seu movimento. No entanto, esta mesma característica implica a necessidade de uma afinação rigorosa entre o controlo do acompanhador e o da quinadora, o que pode introduzir complexidade no comando. Adicionalmente, o facto de toda a força ser aplicada diretamente sobre a chapa obriga a que o sistema de acionamento tenha uma elevada capacidade.

O sistema da Figura 35 (b) apresenta também um nível de simplicidade considerável, embora adote um mecanismo distinto. Em vez de dois braços que se deslocam na vertical, este sistema integra um único componente com movimento vertical, ao qual estão ligados dois braços curvados. Os braços encontram-se articulados à mesa de contacto com a chapa, que provocam o movimento rotacional da mesa em torno do CIR, idealmente localizado no vértice da matriz. Apesar de semelhante ao sistema anterior, este apresenta diferenças relevantes. A transmissão da força é realizada por um único componente, o que implica maior exigência do acionamento. No entanto, este sistema dispensa a necessidade de programar dois braços independentes, o que simplifica o controlo. O movimento da mesa depende exclusivamente do deslocamento vertical do braço principal e da geometria dos braços curvados.

O sistema da Figura 35 (c) partilha a lógica de funcionamento do sistema anterior, embora introduza uma alteração na orientação do braço principal, que passa a estar inclinado em vez de vertical. Os dois braços curvados são substituídos por dois braços verticais que transferem a força do braço inferior para a mesa de contacto com a chapa. Esta configuração elimina os esforços de flexão que poderiam surgir nos braços curvados, o que reduz o risco de deformações e aumenta a robustez e fiabilidade do sistema. Todos os braços se encontram alinhados com a direção da força aplicada, o que reforça a integridade mecânica do conjunto.

O sistema da Figura 35 (d) baseia-se na utilização de um cilindro, que se movimenta para avançar ou recuar consoante o movimento requerido pelo acompanhador. O cilindro está acoplado a uma estrutura com de dois braços curvados, os quais reproduzem com precisão a trajetória que a mesa de apoio deve percorrer durante o acompanhamento da chapa. Os pontos de ligação dos braços à mesa necessitam de descrever com exatidão o movimento da chapa em torno do CIR. A principal vantagem deste sistema reside na simplicidade do acionamento, que requer apenas um cilindro. No entanto, a construção dos braços curvados, com a geometria necessária para seguir a trajetória ideal da chapa, representa uma dificuldade significativa. Acresce ainda a limitação da adaptabilidade do sistema a diferentes dimensões de chapa, devido à natureza fixa da sua estrutura.

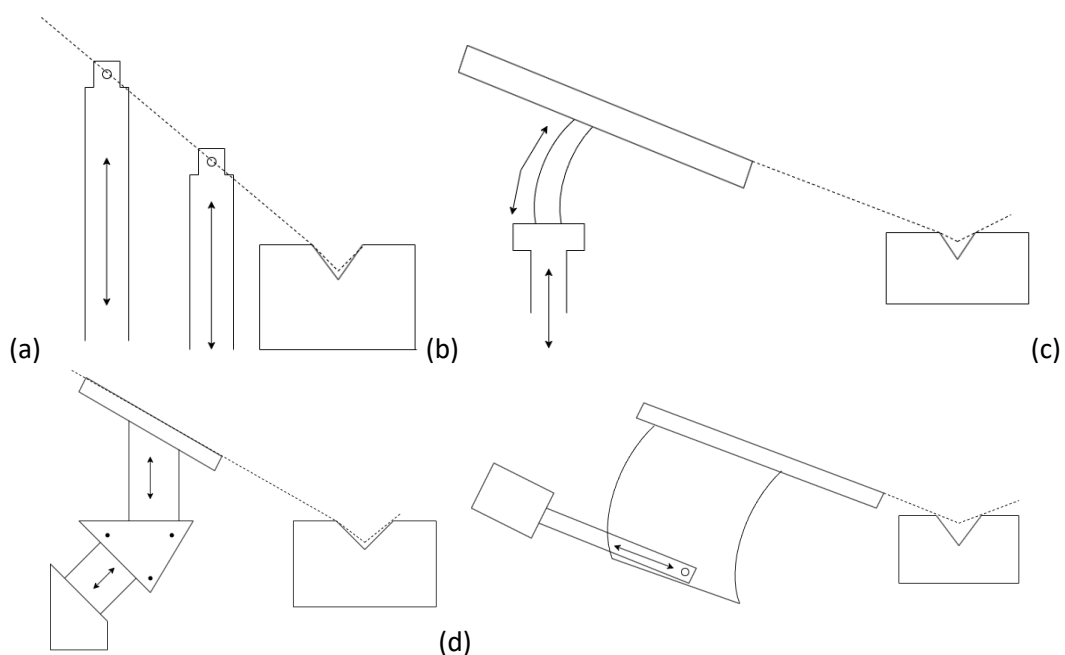


Figura 35 - Sistemas de acionamento simples: dois acionadores (a), acionador vertical (b), mecanismo dividido (c) e acionador paralelo à mesa (d).

Os sistemas seguintes distinguem-se por apresentarem uma maior complexidade estrutural, resultado da interação entre várias barras. Este mecanismo proporciona uma melhor distribuição de esforços, uma maior adaptabilidade a diferentes condições operacionais e um acompanhamento mais preciso do movimento geométrico da chapa. Como o funcionamento destes sistemas depende exclusivamente da relação geométrica e cinemática entre os braços que os constituem, torna-se possível reposicionar ou modificar os seus elementos com facilidade, que permite a adaptação a várias situações.

O sistema da Figura 36 (a) integra dois braços articulados entre si. O primeiro braço é acionado na direção vertical e transmite o movimento ao segundo braço, que gira em torno de um ponto fixo. A rotação deste segundo braço provoca o movimento da mesa de contacto com a chapa em torno do vértice da matriz. Apesar da presença de dois braços e do movimento rotacional envolvido, este sistema mantém uma estrutura relativamente simples. No entanto, a aplicação da força ocorre apenas num ponto da mesa, o que pode resultar numa exigência significativa sobre esse braço e, por consequência, sobre todo o sistema.

O sistema da Figura 36 (b) é constituído por três braços articulados, dois dos quais estão ligados em pontos distintos da mesa do acompanhador. O terceiro braço, não ligado diretamente à mesa, é o elemento recetor da força de acionamento, sendo o responsável por impulsionar todo o sistema. A interação entre os três braços permite uma melhor distribuição dos esforços e assegura um acompanhamento eficaz da chapa ao longo do processo de quinagem. Este tipo de sistema reduz a carga individual sobre cada barra, o que promove maior durabilidade e estabilidade estrutural. No entanto, a sua construção exige a incorporação de vários rolamentos e chumaceiras para permitir o movimento rotacional livre entre os braços.

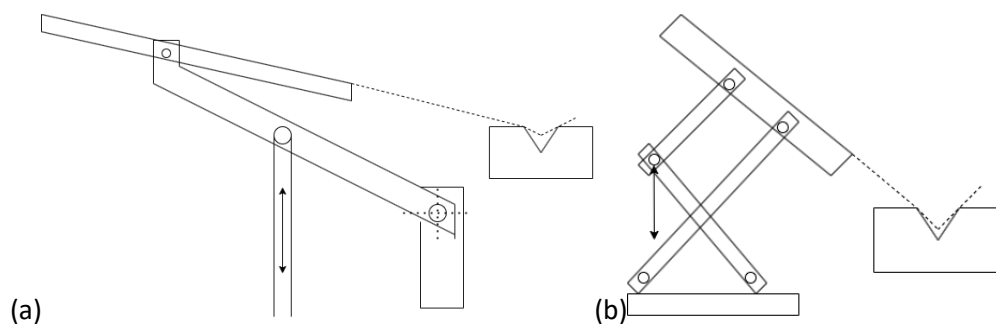


Figura 36 - Sistemas de acionamento de interação de braços: (a) e (b).

De seguida estão apresentados os mecanismos mais utilizados na indústria. Apesar das variações geométricas entre eles, os sistemas seguem sempre a mesma lógica no que respeita ao seu funcionamento e à composição dos seus elementos. O mecanismo assenta em dois pontos de apoio, que estabelecem contacto com a quinadora e asseguram o movimento circular do sistema (Figura 37). O comprimento do braço que liga os pontos de apoio ao restante da estrutura, assim como o seu ângulo, influenciam diretamente a posição do CIR. Estes braços estão interligados de forma a formar um losango com os pontos de fixação. A esta estrutura acoplam-se outros braços que constituem um segundo losango, cuja função é suportar a chapa e definir o alcance que o acompanhador consegue proporcionar.

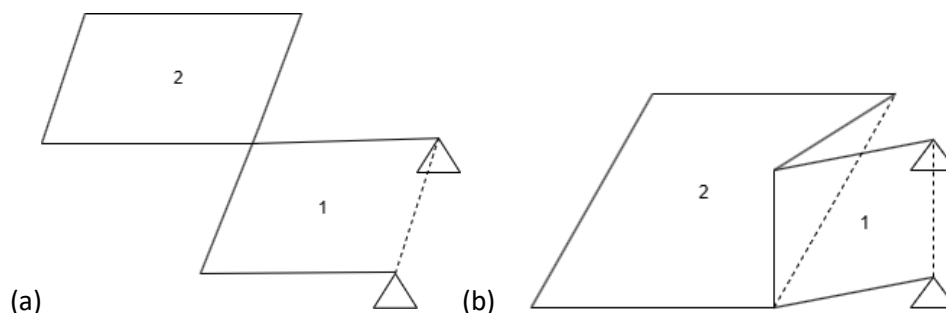


Figura 37 - Mecanismo de dois losangos: (a) Adira; (b) acompanhador externo.

Com base no funcionamento deste tipo de mecanismo, torna-se possível calcular o CIR de forma simples e rápida. A posição do CIR corresponde à projeção dos elementos que se ligam aos apoios fixos, no ponto mais próximo da quinadora do losango 2 (Figura 38).

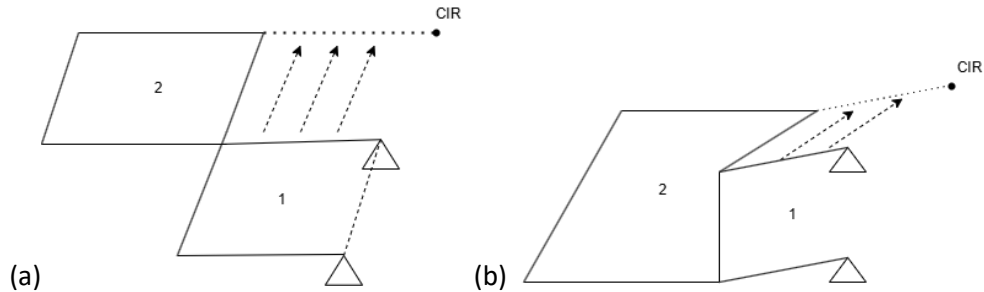


Figura 38 - Projeção de braços para obter o CIR: (a) Adira, (b) acompanhador externo.

Ao adicionar a mesa de apoio da chapa a este mecanismo, que o aproxima da realidade, verifica-se que todos os pontos da mesa descrevem um movimento de rotação em torno do CIR previamente definido (Figura 39). Assim, se a mesa de apoio rodar em torno de um ponto fixo (o CIR), a chapa, por estar apoiada sobre a superfície da mesa, também executará um movimento circular em torno do mesmo ponto. Importa reforçar que o CIR fixo no vértice da matriz é essencial, pois desta forma este coincide com o ponto de rotação da chapa e mantém-se imóvel ao longo de todo o processo de quinagem, o que garante o correto acompanhamento.

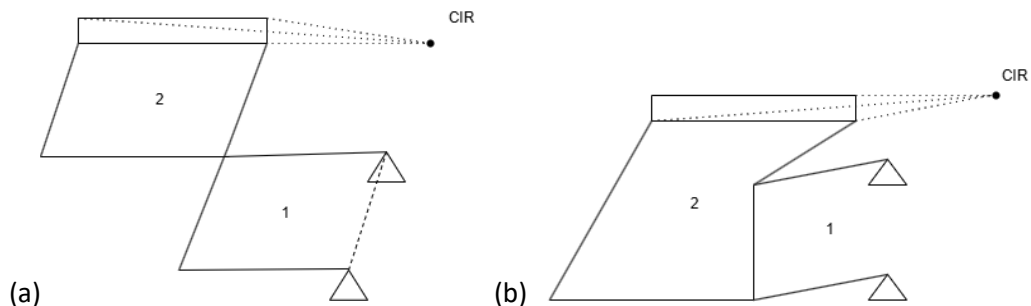


Figura 39 - CIR da mesa de apoio à chapa.

3.7.4. Acionamento

A definição adequada de um sistema de acionamento representa uma decisão crítica em qualquer projeto mecânico, nomeadamente na conceção de um acompanhador de quinagem. O acionamento influencia diretamente a eficiência, fiabilidade, custo e compatibilidade da solução com os restantes componentes. A seleção de um acionamento deve ter em conta fatores como o preço, a energia necessária para operar, a facilidade de integração mecânica, o rendimento e a manutenção exigida. A escolha errada do acionamento pode comprometer o desempenho global do acompanhador, de forma a torná-lo ineficiente ou pouco fiável. Por isso, é fundamental analisar as vantagens e limitações de cada tecnologia de acionamento disponível, com base em dados fiáveis e aplicações reais.

Dentro do tipo de acionamento, existem os mecanismos de transmissão, que têm como função converter e transferir o movimento gerado pela fonte de energia para a estrutura funcional do

acompanhador, de forma controlada e eficaz. A seleção entre mecanismos determina o tipo de movimento obtido, o grau de precisão, a robustez da solução e a sua adequação ao espaço disponível. Uma transmissão bem dimensionada assegura o desempenho estável e repetível do sistema ao longo do tempo. Os mecanismos utilizados nos acompanhadores são (Figura 40):

- **Cilindros elétricos**

Os cilindros elétricos utilizam motores (passo ou servo) acoplados a mecanismos de conversão para gerar movimento linear com precisão. Estes atuadores destacam-se pela elevada precisão, capacidade de controlo de velocidade e posição, elevada repetibilidade e facilidade de integração com sistemas eletrónicos de controlo. A ausência de fluidos pressurizados facilita a manutenção e elimina riscos de contaminação. Em contrapartida, os cilindros elétricos apresentam maior custo e complexidade eletrónica, e exigem fontes de energia estáveis [68].

- **Cilindros pneumáticos**

Os cilindros pneumáticos utilizam ar comprimido para gerar movimento linear. A sua estrutura simples e robusta permite utilizações em maior parte dos ambientes industriais. Os sistemas pneumáticos apresentam diversas vantagens: custo reduzido, baixo peso, elevada relação força/peso, capacidade de operar em ambientes com poeiras ou humidade e boa eficiência mecânica. Apesar disso, estes apresentam limitações significativas no controlo preciso, devido à sua natureza não linear, à fricção interna e à dependência da pressão do ar. Em sistemas que exigem elevada precisão de posicionamento, estes atuadores tornam-se inadequados [69].

- **Fuso de esferas**

O sistema de fuso de esferas consiste num parafuso com ranhuras helicoidais por onde circulam esferas que reduzem o atrito entre a porca e o fuso. Este mecanismo transforma o movimento rotativo do motor num movimento linear preciso. Entre as principais vantagens, destacam-se a elevada precisão, baixo atrito, longa vida útil e elevada eficiência mecânica. Este sistema adapta-se bem a aplicações que exigem controlo fino da posição. Contudo, o fuso de esferas apresenta desvantagens como o custo elevado e a sensibilidade à contaminação por pó e sujidade. A necessidade de lubrificação constante também constitui uma limitação [70].

- **Pinhão-cremalheira**

O sistema de pinhão-cremalheira é composto por um pinhão (roda dentada) que engrena com uma cremalheira (barra dentada), que converte movimento rotativo em movimento linear. Este é amplamente utilizado em máquinas industriais e direções de veículos. Este sistema oferece uma geometria robusta e uma boa transmissão de esforços, que permite trajetórias estáveis com boa resposta dinâmica. O sistema pode ser adaptado a diferentes configurações e comprimentos de atuação sem perder rigidez. As suas vantagens incluem simplicidade de construção, boa relação custo-desempenho e facilidade de manutenção. Contudo, este sistema não é tão preciso quanto o fuso de esferas e pode gerar ruído em altas velocidades [71].

- **Atuadores com correia dentada**

Os atuadores com correia dentada utilizam uma correia em material sintético reforçado, tensionada sobre polias, para transferir movimento rotativo em deslocamento linear. Estes são

sistemas leves, silenciosos e capazes de alcançar altas velocidades. Contudo, estes revelam-se menos robustos e precisos do que os sistemas com engrenagens ou fusos e estão mais sujeitos a perda de tensão e desgaste da correia ao longo do tempo.

- **Cames mecânicas**

As cames mecânicas são elementos rotativos cuja geometria foi desenhada para transmitir um movimento específico ao seguidor. Um sistema came-seguidor constitui um mecanismo com dois graus de liberdade, cuja came (elemento condutor) define, através do seu perfil, a trajetória exata do movimento do seguidor. Estas cames podem gerar movimentos complexos de elevação, paragem e retorno, com elevada repetibilidade e sem necessidade de controlo ativo. Apesar da sua fiabilidade e simplicidade mecânica, as cames apresentam limitações importantes para esta aplicação. O movimento é pré-definido e fixo, o que impede adaptações dinâmicas à posição real da chapa durante o processo. Além disso, a conceção do perfil da came exige uma elevada precisão dimensional para garantir que o movimento é compatível com a cinemática real da chapa [72].

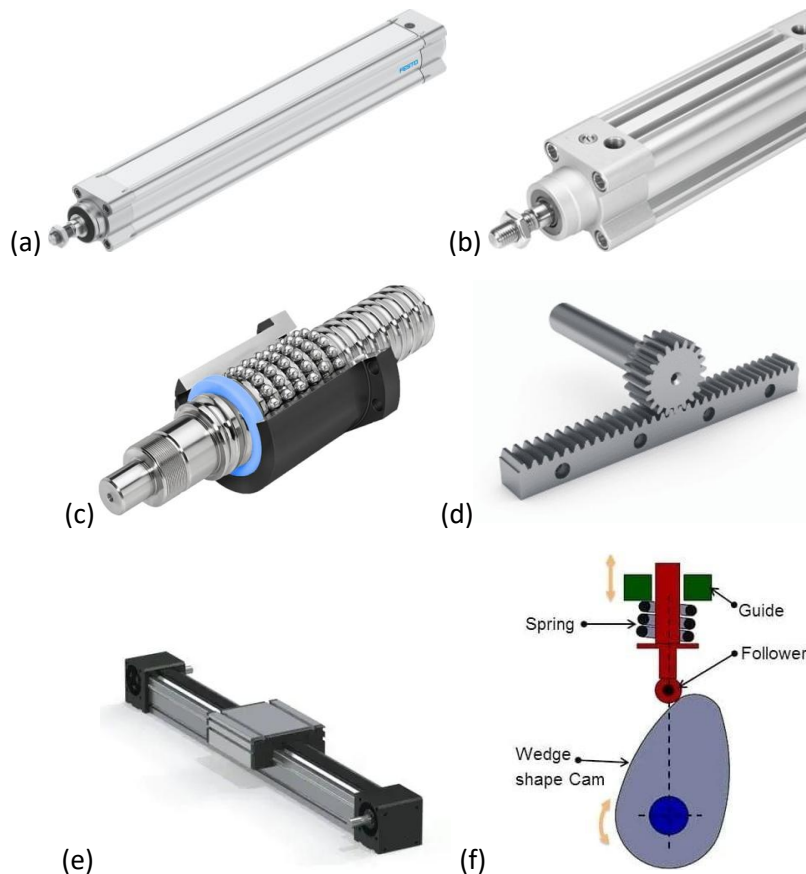


Figura 40 - Tipos de acionamento: (a) cilindro elétrico [73], (b) cilindro pneumático [74], (c) fuso de esferas [75], (d) pinhão cremalheira [76], (e) correia dentada [77], (f) came-seguidor [78].

3.7.5. Definição das soluções a adotar

De acordo com o capítulo 3.7.1, o primeiro passo para a elaboração de uma matriz de decisão, utilizada como método de seleção do acompanhador ideal, consiste na realização de uma

sessão de *brainstorming* com o objetivo de identificar um conjunto de atributos que representem as características mais determinantes na comparação entre as diferentes opções. Neste contexto, foram definidos cinco atributos, organizados por ordem decrescente de importância:

- Custo;
- Qualidade de acompanhamento;
- Facilidade de execução;
- Sistema próprio da empresa;
- Facilidade de montagem.

O custo de produção constitui o atributo mais relevante, uma vez que exerce uma influência direta sobre o preço final do produto e, consequentemente, sobre a viabilidade da sua comercialização junto de potenciais clientes. Desta forma, o custo de produção torna-se uma característica essencial para a execução do acompanhador, uma vez que se trata de um produto destinado à comercialização. Desta forma, quanto menor for o custo de fabrico do acompanhador, mais competitivo este será em termos de preço face aos seus concorrentes no mercado.

A qualidade de acompanhamento surge como o segundo atributo mais importante, pois este atributo determina a capacidade do sistema em cumprir a sua função principal: realizar um acompanhamento eficaz da chapa durante a quinagem. Uma baixa qualidade de acompanhamento pode comprometer a precisão da quinagem, originar deformações indesejadas na chapa e afetar negativamente a qualidade final da peça produzida. Deste modo, a qualidade de acompanhamento assume um papel determinante no desempenho do sistema, que influencia diretamente a fiabilidade do processo e a conformidade das peças finais.

A facilidade de execução assume também um papel significativo, uma vez que está diretamente associada à viabilidade do produto do ponto de vista técnico. Este atributo pode ainda afetar o custo global do acompanhador, bem como o tempo necessário para a sua produção e montagem.

A consideração de um sistema próprio da empresa representa um fator diferenciador face à concorrência, ao materializar o desenvolvimento de um mecanismo exclusivo, isento de restrições associadas a patentes já existentes. Esta exclusividade contribui para a originalidade do design e da solução técnica proposta.

Por fim, a facilidade de montagem, embora classificada como o atributo de menor importância relativa, assume relevância em termos de redução de custos, otimização do tempo de fabrico e simplificação dos processos produtivos. Adicionalmente, este atributo facilita as operações de manutenção e eventuais intervenções técnicas no equipamento.

Assim, apresenta-se a tabela de ponderações obtida na Tabela 9.

Tabela 9 - Matriz de ponderações do acompanhador de quinagem.

		Ponderações					Importância relativa ao atributo (w_i)	Grau de importância do atributo (%)
Atributo		1/2	1/3	1/4	1/5	Importância relativa ao comparador		
1	Custo	60	80	90	90	1,00	0,47	47%
2	Qualidade Acompanhamento	40				0,67	0,31	31%
3	Facilidade execução		20			0,25	0,12	12%
4	Sistema próprio da empresa			10		0,11	0,05	5%
5	Facilidade montagem				10	0,11	0,05	5%
		Σ					2,14	100%

Seguidamente, procede-se à definição das características a comparar na matriz de decisões relativa à cadeia cinemática e ao acionamento. Cada um destes tópicos possui uma matriz de decisão específica. No caso da matriz de decisão da cadeia cinemática, as características a avaliar correspondem aos sistemas representados na Figura 35, Figura 36 e Figura 37. Assim, os sistemas considerados para comparação são:

- Sistema de acionamento simples - Figura 35;
- Sistema de acionamento por interação entre braços - Figura 36 e Figura 37.

Esta matriz de decisão da Tabela 10 tem como objetivo selecionar o mecanismo a adotar.

Tabela 10 - Matriz de decisão da cadeia cinemática.

	1		2		3		4		5		Índice desempenho (γ)
Hipóteses	w_1	0,47	w_2	0,31	w_3	0,12	w_4	0,05	w_5	0,05	
Sist. Simples	2	0,234	3	0,1870	5	0,1169	2	0,0208	5	0,052	0,610
	0,5		0,6		1		0,4		1		
Sist. Braços	2	0,234	5	0,3117	4	0,0935	5	0,0519	4	0,042	0,732
	0,5		1		0,8		1		0,8		

Assim, uma vez que o índice de desempenho apresenta o valor mais elevado, foi selecionado um sistema de braços para a cadeia cinemática do acompanhador. Relativamente ao acionador, foram consideradas todas as hipóteses de acionamento apresentadas no capítulo 3.7.4. Como resultado, obteve-se a Tabela 11.

Tabela 11 - Matriz de decisão do acionamento.

	1		2		3		4		5		Índice desempenho (γ)
Hipóteses	w_1	0,47	w_2	0,31	w_3	0,12	w_4	0,05	w_5	0,05	
Cil.Elétrico	2	0,468	5	0,312	5	0,117	4	0,042	5	0,052	0,990
	1		1		1		0,8		1		
Cil. Pneumático	2	0,468	3	0,187	5	0,117	4	0,042	4	0,042	0,855
	1		0,6		1		0,8		0,8		
Fuso esferas	3	0,312	4	0,249	4	0,094	3	0,031	4	0,042	0,727
	0,666		0,8		0,8		0,6		0,8		
Pinhão- Cremalheira	2	0,468	5	0,312	4	0,094	3	0,031	3	0,031	0,935
	1		1		0,8		0,6		0,6		
Correia dentada	2	0,468	3	0,187	4	0,094	4	0,042	3	0,031	0,821
	1		0,6		0,8		0,8		0,6		
Came mecânica	3	0,312	2	0,125	3	0,070	5	0,052	5	0,052	0,610
	0,666		0,4		0,6		1		1		

Conforme se verifica na Tabela 11, o sistema de acionamento associado ao cilindro elétrico apresenta o maior índice de desempenho. Assim, o acionamento selecionado para o acompanhador corresponde ao cilindro elétrico.

3.8. Projeto

3.8.1. Apresentação do equipamento final

O equipamento desenvolvido no âmbito desta dissertação corresponde a um acompanhador de quinagem, concebido para substituir o sistema atualmente existente na empresa. A sua função consiste em acompanhar o movimento natural da chapa durante o processo de quinagem. Este acompanhamento torna-se necessário porque, ao longo da operação, a chapa sofre uma elevação provocada pela deformação imposta pela matriz de quinagem. Quando o punção, acoplado ao avental móvel da quinadora, desce, deforma a chapa contra a matriz, o que origina a elevação da extremidade oposta da chapa. O acompanhador tem como finalidade seguir essa deslocação ascendente, de forma a garantir um apoio contínuo. A implementação deste sistema visa eliminar a necessidade de intervenção manual durante a elevação da chapa, que promove assim a segurança do operador durante o processo de quinagem.

Simultaneamente, este também contribui para uma melhoria na precisão do processo, especialmente no caso de chapas de grandes dimensões.

O equipamento (Figura 41) foi projetado com capacidade para descrever um movimento de rotação em torno da matriz, em conformidade com o movimento natural da chapa. Para tal, foi desenvolvido um mecanismo articulado composto por um conjunto de braços interligados, que permite a referida rotação. Estes elementos, juntamente com os componentes mecânicos associados, integram o sistema designado por cadeia cinemática. O acionamento da cadeia cinemática é assegurado por um cilindro elétrico, dimensionado para fornecer a força e a velocidade necessárias para vencer o peso da chapa e do próprio sistema, dentro dos tempos de ciclo estipulados. A estrutura do acompanhador suporta todo o mecanismo de rotação e o sistema de acionamento e assegura simultaneamente a ligação entre o equipamento e a quinadora através de componentes devidamente dimensionados. A solução final, resultante da integração destes sistemas, encontra-se representada na Figura 41. Os desenhos técnicos que acompanham a seguinte solução encontram-se no Apêndice D.

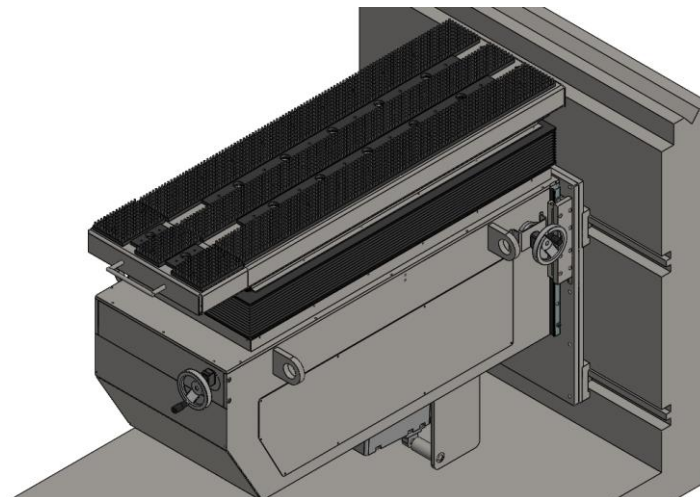


Figura 41 - Apresentação do equipamento final.

3.8.2. Princípio de funcionamento

Este capítulo dedica-se à análise do princípio de funcionamento do acompanhador de quinagem. Ao longo do capítulo são abordadas as formas pelas quais o equipamento cumpre a sua função de forma eficaz, com especial atenção à transmissão de forças e momentos necessários para garantir o movimento exigido à chapa durante o processo. O funcionamento do acompanhador divide-se em três fases principais: o suporte da chapa enquanto esta permanece na posição horizontal e estática; o movimento ascendente, correspondente à rotação que acompanha a subida da chapa; e, por fim, o movimento descendente, que conduz a chapa de volta à sua posição inicial. O sistema foi devidamente dimensionado para responder a estas três fases de funcionamento. A relação entre o ângulo de quinagem e o ângulo do acompanhador é obtida através da expressão apresentada abaixo, deduzida a partir do sistema ilustrado na Figura 42.

$$180^\circ = \text{Ângulo de quinagem} + 2 \times \text{Ângulo do acompanhador}$$

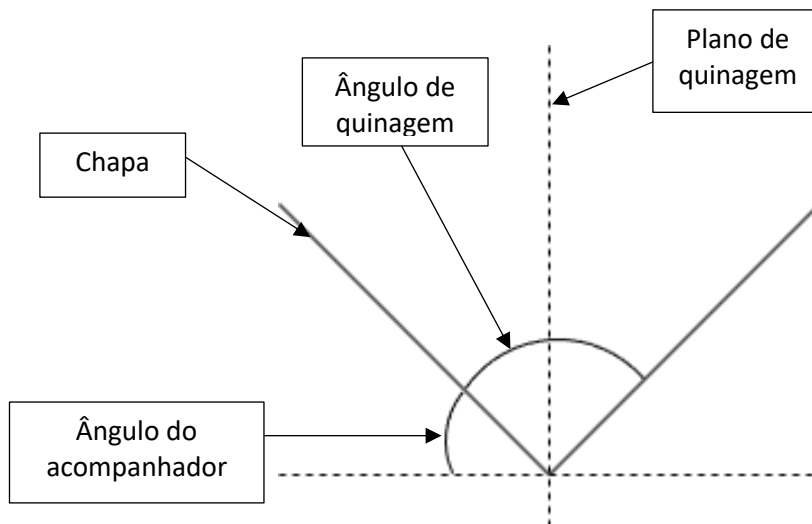


Figura 42 - Ângulo de quinagem e ângulo do acompanhador.

Quinagens com ângulos de quinagem inferiores a 60° não são recomendadas com este sistema, embora continuem tecnicamente possíveis. Nesses casos, o acompanhamento ocorrerá apenas até aos 60° limite do sistema, o que poderá originar defeitos na fase final da quinagem.

O funcionamento do acompanhador assenta na transmissão de forças entre os seus componentes, que asseguram uma distribuição equilibrada do peso da chapa ao longo da estrutura. A mesa de contacto com a chapa constitui o primeiro elemento nesta transmissão. Trata-se de um componente caracterizado por um comprimento e largura significativos e uma espessura relativamente reduzida. O contacto entre a chapa e a mesa é assegurado por escovas e pequenas esferas deslizantes, que facilitam o deslizamento da chapa sobre a superfície do acompanhador. A chapa encontra-se apoiada sobre a estrutura, mas sem ligação fixa ou encastrada, o que lhe confere liberdade de movimento e funcionalidade acrescida. Esta configuração apresenta diversas vantagens, funcionais como:

- Facilita a manobra da chapa sobre o acompanhador, o que permite o seu posicionamento com menor esforço e revela-se particularmente útil no manuseamento de chapas de grandes dimensões e elevado peso;
- Reduz a possibilidade de ocorrência de danos superficiais, como riscos ou marcas, que poderiam resultar do contacto direto entre a chapa e a superfície da mesa;
- Permite acomodar deformações secundárias, como as resultantes do efeito de Poisson ou variações dimensionais associadas à temperatura, que garante liberdade de movimento à chapa durante a deformação;
- Contribui para o amortecimento das vibrações geradas no processo de quinagem, de forma a proteger a integridade da peça.

As escovas e esferas deslizantes encontram-se instaladas sobre a mesa do acompanhador que suporta o peso da chapa. A mesa, por sua vez, está ligada a perfis que a permitem ganhar extensão na direção perpendicular ao comprimento de quinagem. Esta possibilidade de ajuste revela-se fundamental para ampliar o alcance e o contacto efetivo da mesa com a chapa, de

modo a possibilitar a realização de quinagens em chapas com dimensões superiores às da própria mesa do acompanhador.

O funcionamento do acompanhador de quinagem baseia-se na transmissão e distribuição de forças ao longo da sua estrutura. Na posição inicial, correspondente a 0° , ou seja, com a mesa em posição horizontal, o peso da chapa apoia-se sobre a mesa, que por sua vez transmite este peso aos braços do acompanhador. Estes braços, que estão ligados à mesa através de dois pontos de contacto, visíveis na Figura 43 (a), são responsáveis pela transmissão do esforço até aos pontos fixos situados num suporte estrutural. Este suporte, mantido imóvel durante todo o ciclo de funcionamento, garante a estabilidade do sistema, funcionando como ponto de reação às cargas transmitidas. Para além destes dois apoios, o ponto de atuação do cilindro elétrico (na extremidade da haste) também atua como ponto de suporte à estrutura, de modo a receber parte do esforço da mesa e da chapa. Para reforçar a segurança, existe ainda um veio de apoio na parte posterior da mesa, que assenta num suporte auxiliar na posição horizontal. Este veio entra em ação apenas em caso de falha dos apoios principais, pelo que funciona como elemento de *fail-safe* (Figura 43 (b)).

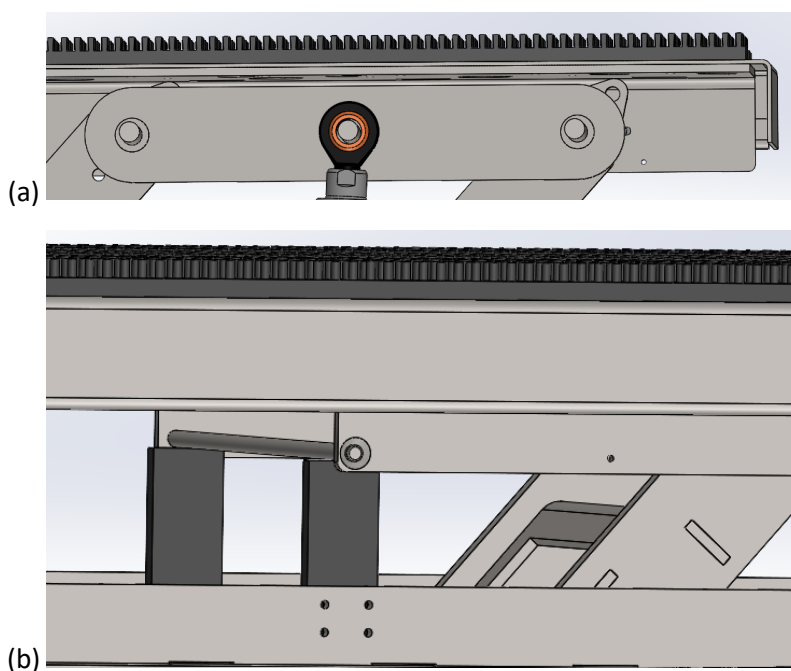


Figura 43 - Pontos de contacto entre os braços e a mesa (a), mecanismo *fail-safe* (b).

O ciclo de funcionamento do acompanhador divide-se em quatro fases distintas:

- Arranque e ascensão da chapa - desde o movimento inicial até ao ângulo pretendido;
- Primeira paragem - onde o sistema permanece imóvel no ângulo definido;
- Descida - momento que o mecanismo retorna à posição horizontal;
- Segunda paragem - correspondente à imobilização total na posição inicial.

Durante estas fases, o acompanhador executa uma trajetória circular em torno do CIR, coincidente com o vértice da matriz. Este movimento depende da rotação entre os braços e os

pontos fixos, bem como do movimento entre os próprios braços. Deste modo, é permitido movimento pela presença de rolamentos dimensionados para suportar as cargas envolvidas. A geometria e a configuração dos braços foram alvo de um estudo cinemático, nos *softwares* GIM e Excel, de forma a garantir que o movimento do acompanhador segue a trajetória natural da chapa durante a quinagem e que assegura um contacto adequado ao longo de todo o processo.

O acionamento do sistema foi concretizado através de um cilindro elétrico da marca SMC, modelo LEY 100, devidamente dimensionado para suportar as cargas envolvidas e transmitir a força necessária ao movimento do mecanismo. Este cilindro é alimentado por um motor elétrico da marca Schneider, modelo BCH 750W, selecionado por cumprir integralmente as especificações técnicas impostas pelo cilindro. Em conjunto, estes elementos constituem o sistema de acionamento responsável pelo movimento do acompanhador.

No que respeita à capacidade de ajuste, o acompanhador permite regulação nas três direções espaciais, como se observa na Figura 44: o eixo Y (direção do comprimento de quinagem), o eixo X (direção perpendicular ao eixo y) e o eixo Z (altura entre o solo e a matriz). A regulação nos eixos X e Z é efetuada manualmente através de manivelas localizadas respetivamente na parte traseira e no lado direito do acompanhador, o que proporciona um ajuste intuitivo e rápido. No eixo Y, o ajuste é garantido por guias fixas que deslizam ao longo do avental da quinadora, permitindo a deslocação longitudinal.

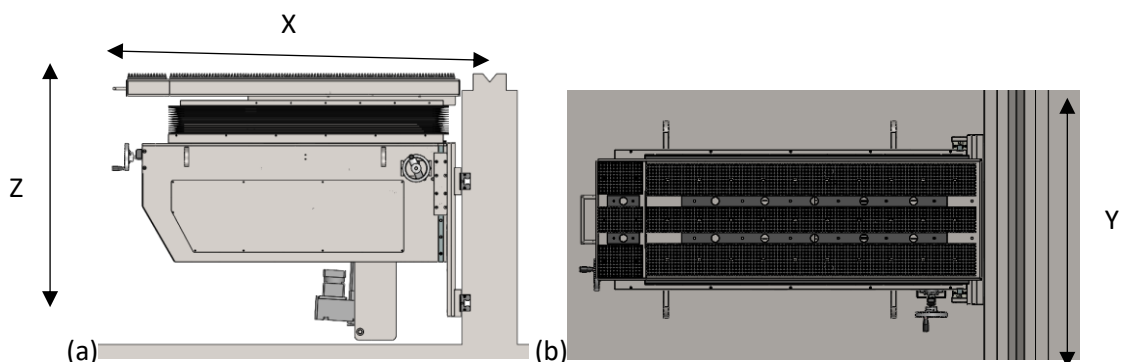


Figura 44 - Eixos do acompanhador: X e Z (a), Y (b).

A integração do sistema de controlo do acompanhador na própria programação da quinadora assegura uma operação coordenada e eficiente. Este sistema, desenvolvido para ser compatível com os modelos PA da marca ADIRA, controla parâmetros como a velocidade de movimento, o tempo de subida e descida, o ângulo pretendido, o binário aplicado e a interface do painel de controlo. A integração otimizada com a quinadora garante precisão, fiabilidade e repetibilidade no processo de quinagem assistida.

3.8.3. Validação estrutural

A validação estrutural constitui uma etapa essencial para garantir que o acompanhador apresenta a capacidade de suportar o peso da chapa durante a operação. Para este efeito, recorreu-se à ferramenta de simulação do SolidWorks® para analisar o comportamento do modelo sob uma determinada carga e com as respetivas restrições impostas.

3.8.3.1. Pré-processamento

Tal como será analisado com maior detalhe no capítulo 3.8.6, a posição mais crítica do ciclo de funcionamento do acompanhador corresponde à sua posição inicial, a 0°, com a mesa em horizontal. Nesta configuração, o peso total da chapa é aplicado diretamente sobre o acompanhador, o que constitui o estado de carregamento mais exigente. Durante as fases de ascensão ou de descida, o peso apresenta uma componente paralela à direção da chapa, o que reduz significativamente o esforço suportado. Assim, a simulação estrutural considerou a posição inicial como representativa do pior cenário de carregamento. Deste modo, optou-se por realizar uma análise de natureza estática, uma vez que se pretende avaliar a resposta estrutural do sistema numa condição de carregamento estacionário, e não o seu comportamento dinâmico ao longo do movimento.

Com o intuito de simplificar a geometria da estrutura e otimizar o tempo de processamento, foram eliminados alguns elementos considerados irrelevantes para a análise estrutural, como parafusos, porcas e anilhas. A presença destes componentes aumentaria de forma significativa a complexidade da malha e o tempo necessário para a resolução do estudo. No início da simulação, foram também removidos outros componentes não relevantes, como escovas, esferas deslizantes e elementos de pequena dimensão, cuja inclusão apenas aumentaria o tempo de processamento sem qualquer benefício para a precisão da análise.

Adicionalmente, várias peças foram substituídas por geometrias equivalentes com o mesmo momento de inércia e dimensões exteriores similares, de forma a preservar o comportamento estrutural sem comprometer a fiabilidade dos resultados. Com o mesmo objetivo, foram eliminados furos não estruturais, utilizados apenas para fixação de peças secundárias, assim como chanfros e *fillet* sem impacto significativo no comportamento global da estrutura. Em componentes de maior complexidade geométrica, procedeu-se à substituição por modelos equivalentes simplificados, tal como ocorreu nas guias que permitem o movimento de ajuste do acompanhador (Figura 45).

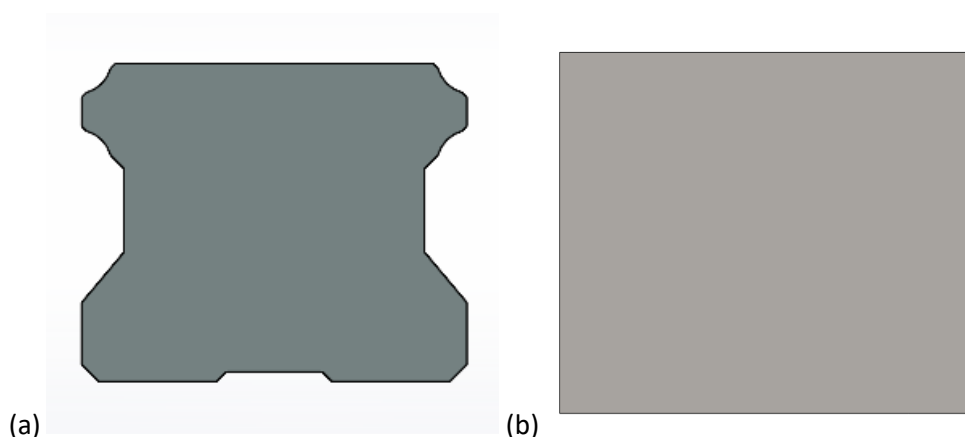


Figura 45 - Mudança da geometria do perfil: inicial (a), final (b).

No que respeita ao tipo de elementos e à ordem geométrica, foi utilizada a malha “*curvature based mesh*”, considerada a mais adequada à geometria em estudo. Este tipo de malha gera elementos que se adaptam com maior rigor a superfícies curvas, furos e contornos irregulares,

que assegura uma representação tridimensional mais fiel e resultados mais consistentes [79]. Relativamente aos materiais, foram atribuídas propriedades correspondentes a cada componente com base na análise direta do equipamento existente. Para o novo modelo, selecionou-se o aço AISI 1020, cuja caracterização será desenvolvida no capítulo 3.8.7, contemplando as suas propriedades físicas e mecânicas relevantes para a simulação estrutural. Em seguida, as ligações entre os braços foram realizadas através de conexões do tipo pino, que substitui os veios existentes. Esta ligação, ilustrada na Figura 46 (a), impede translações entre braços mas permite rotação, o que simula com elevada precisão o comportamento de um veio. Adicionalmente, aplicou-se a restrição *bonded* no contexto de *global interaction*, que fixa todas as superfícies que se encontrem coincidentes. No que se refere ao carácter da análise, adotou-se um regime linear, partindo do pressuposto de que as deformações permanecem dentro do domínio elástico do material e que os deslocamentos não induzem alterações significativas na geometria do modelo. Esta abordagem permite simplificar o processo de cálculo sem comprometer a fiabilidade e a representatividade dos resultados obtidos. Relativamente às restrições, estas foram definidas em três pontos da estrutura: no braço central, no braço inferior do acompanhador e no ponto de ligação do atuador. Estes pontos funcionam como apoios principais, que asseguram o equilíbrio das forças resultantes do peso da chapa e da própria estrutura do equipamento.

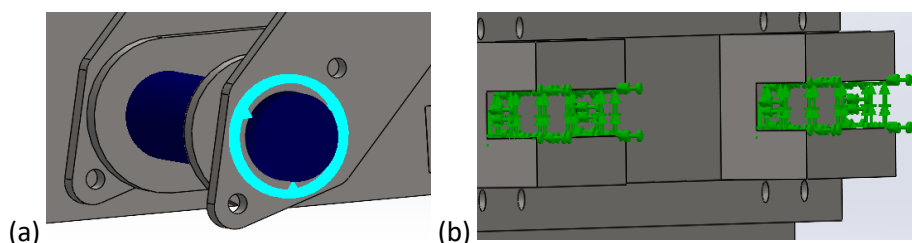


Figura 46 - Diferentes tipos de conexões: ligação tipo pino (a), pontos encastrados (b).

Foram definidas diferentes cargas externas aplicadas ao modelo. Em primeiro lugar, aplicou-se a força gravitacional sobre todos os componentes do modelo, considerando as massas reais atribuídas a cada peça. Em segundo lugar, foi aplicada uma carga remota, aplicada no centro de massa da chapa, correspondente ao peso da chapa. Para este cálculo, considerou-se uma chapa de aço inoxidável com massa volúmica de 8000 kg/m^3 , comprimento de 2 m, largura de 1 m e espessura de 6 mm, que resulta numa força total de 941,76 N, aplicada sobre a área de contacto entre a chapa e o acompanhador, conforme representado na Figura 47. Por último, foi adicionada uma força correspondente ao peso do sistema de atuação no ponto de apoio do sistema do acompanhador.

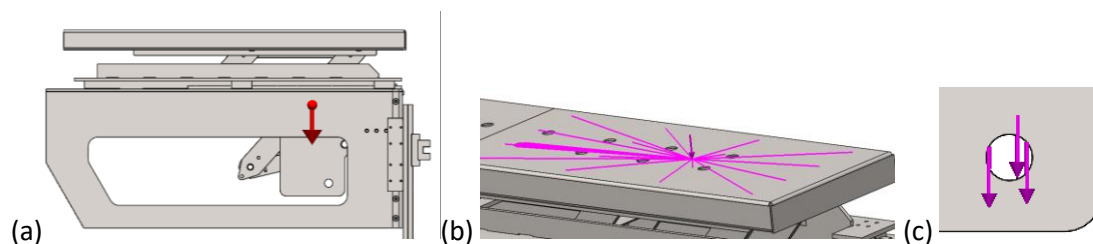


Figura 47 - Forças externas na simulação: força da gravidade (a), força do peso da chapa (b), força de suporte do atuador (c).

3.8.3.2. Estudo de convergência

Com todas as condições estabelecidas, iniciou-se o processo de convergência da malha. Para realizar este estudo, foi selecionado um ponto do acompanhador suscetível de apresentar tensão e deformação significativas, de forma a garantir resultados consistentes e fiáveis. O ponto selecionado encontra-se identificado na Figura 48.

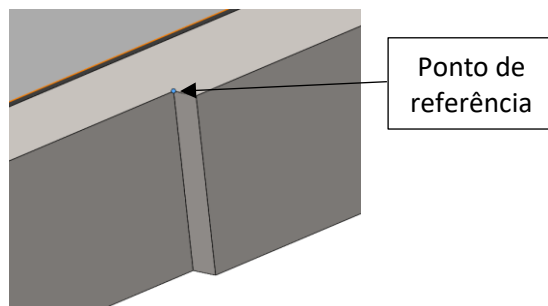


Figura 48 - Ponto de referência do estudo de convergência.

A partir dos dados obtidos, através da função *probe* do SolidWorks®, relativos à tensão de Von Mises, deslocamento e fator de segurança para cada malha testada (Tabela 12), foram calculados os desvios relativos associados a cada um destes parâmetros. A análise desses desvios permitiu determinar qual a malha mais adequada para a validação estrutural do acompanhador.

Tabela 12 - Estudo de convergência.

Tamanho da malha	Tamanho mínimo da malha	N.º mínimo elementos	Rácio de crescimento	Tensão Von Mises (MPa)	Fator Segurança	Desl. (mm)	N.º de elementos	Desvio tensão	Desvio fator de segurança	Desvio desl.
80	16	8	1,4	25,29	13,9	0,2465	44221			
50	10	8	1,4	25,07	14,02	0,251	70444	0,87%	0,86%	1,78%
45	9	8	1,4	25,1	14,01	0,251	78450	0,12%	0,07%	0,20%
40	8	8	1,4	24,8	14,17	0,252	90771	1,20%	1,14%	0,08%
35	7	8	1,4	25,11	14	0,253	109091	1,25%	1,20%	0,40%
30	6	8	1,4	25,25	13,98	0,253	129114	0,56%	0,14%	0,04%
25	5	8	1,4	26,33	13,35	0,254	163700	4,28%	4,51%	0,59%
20	4	8	1,4	25,24	13,93	0,256	223807	4,14%	4,34%	0,83%

A partir da análise da Tabela 12, verifica-se que, para a malha com tamanho 30, os desvios apresentam valores muito reduzidos. Observa-se que, antes de atingir esse tamanho de malha, os desvios são superiores, enquanto no tamanho 30 os desvios de tensão, do fator de segurança e de deslocamento se revelam bastante inferiores relativamente aos restantes valores obtidos para outras dimensões de malha. Após o tamanho 30, regista-se um aumento significativo dos desvios correspondentes às malhas subsequentes. Assim, foi selecionado o tamanho 30 para a realização da simulação no SolidWorks®.

3.8.3.3. Resultados

Com o estudo da malha finalizado, foi possível dar início à simulação estrutural dos componentes do acompanhador. Esta simulação permite validar os elementos utilizados na versão final do projeto, de modo a assegurar que o material, a geometria e a disposição relativa dos componentes cumprem os requisitos estruturais. Para além da validação do conceito, a análise tem como objetivo fornecer dados fundamentais para o dimensionamento de componentes normalizados, como os rolamentos. Neste contexto, a validação estrutural através do SolidWorks® assume particular relevância no processo de desenvolvimento do acompanhador. Tal como no estudo de convergência de malha, a validação estrutural será realizada com os mesmos dados de pré-processamento que o estudo de convergência. Concluída a preparação da simulação, todos os parâmetros foram introduzidos no *software* SolidWorks®, de modo a permitir obter os resultados da Figura 49.

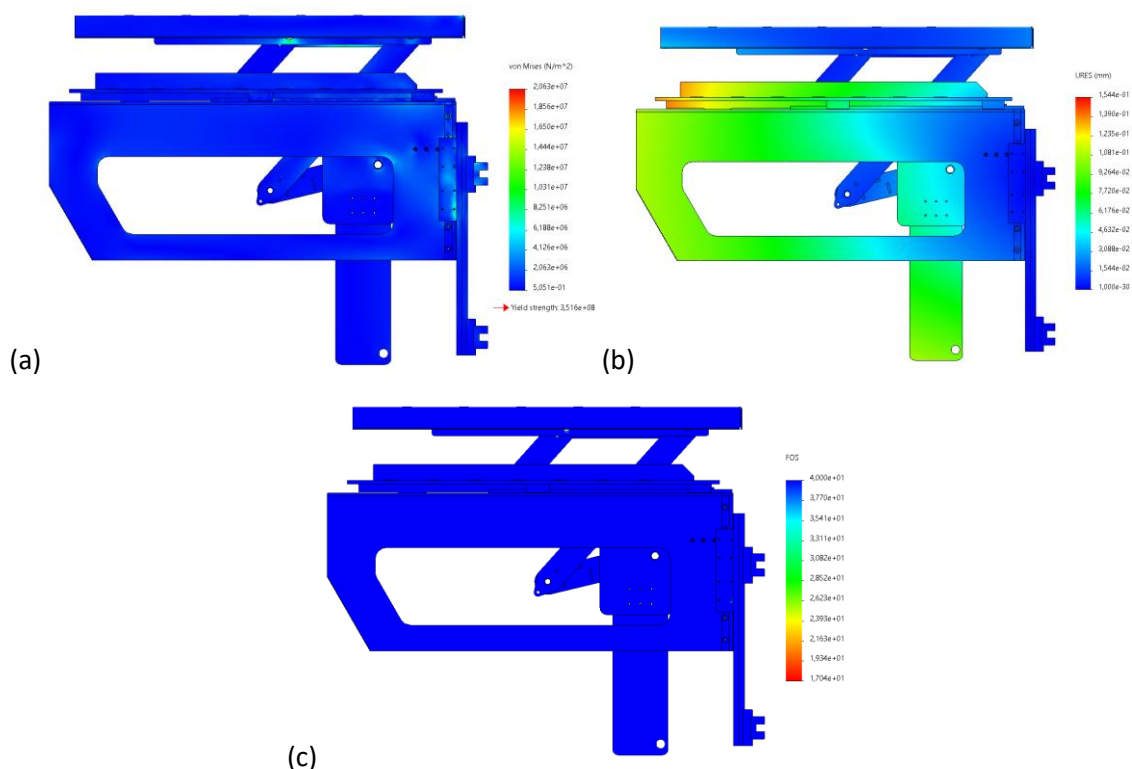


Figura 49 - Simulação do SolidWorks®: Tensão de Von Mises (a), deslocamento (b) e fator de segurança (c).

Como se observa na Figura 49 (a), a tensão de Von Mises máxima na estrutura do acompanhador é de 20,63 MPa, valor que confirma o correto dimensionamento do equipamento, uma vez que a tensão de cedência do material considerado na simulação é de 351,6 MPa. Constata-se, contudo, que a maior parte da estrutura do acompanhador apresenta coloração azul, correspondente ao intervalo entre 0 e 6,19 MPa.

De seguida, a Figura 49 (b) apresenta os resultados da simulação relativamente ao deslocamento do acompanhador. O valor máximo obtido é de 0,15 mm, o que demonstra tratar-se de um deslocamento reduzido e confirma a adequação do comportamento estrutural

do equipamento. A análise destes resultados permite concluir que a zona mais crítica em termos de deslocamento corresponde ao lado esquerdo do acompanhador. Tal resultado era expectável em virtude da flexão sofrida pela estrutura. De facto, uma vez que o ponto fixo do acompanhador se localiza na ligação à quinadora, a aplicação da força vertical de peso da chapa induz flexão global, o que conduz a um maior deslocamento na extremidade esquerda.

A Figura 49 (c) apresenta os resultados do fator de segurança obtidos. O valor do fator de segurança resulta da razão entre a tensão de cedência do material e a tensão de Von Mises em cada ponto da estrutura. Verifica-se que o valor mínimo registado é de 17,04, o que assegura a estabilidade estrutural do acompanhador. Consta-se ainda que a maior parte da estrutura se encontra no intervalo entre 35,41 e 40,00, o que reforça a fiabilidade desta solução.

Apesar disso, identificam-se zonas localizadas com valores de tensão superiores. Na Figura 50 evidenciam-se alguns desses pontos críticos. Na Figura 50 (a), verifica-se um ponto de maior tensão no local de aplicação do acionador, consequência da necessidade de suportar cargas elevadas, sobretudo quando o acompanhador se encontra na posição horizontal. A Figura 50 (b) mostra um ponto de concentração de tensões na região onde o mecanismo de braços se apoia na estrutura fixa do acompanhador. Este ponto apresenta valores superiores ao restante conjunto estrutural por corresponder à zona de suporte na estrutura de todo o mecanismo de braços e da chapa. Por fim, a Figura 50 (c) indica um ponto crítico de ligação entre o acompanhador e a quinadora. Esta região concentra tensões mais elevadas por corresponder a um dos quatro patins de ligação à máquina, responsáveis por suportar o peso do sistema, que inclui o mecanismo de braços, o sistema de acionamento e a chapa em processo de quinagem.

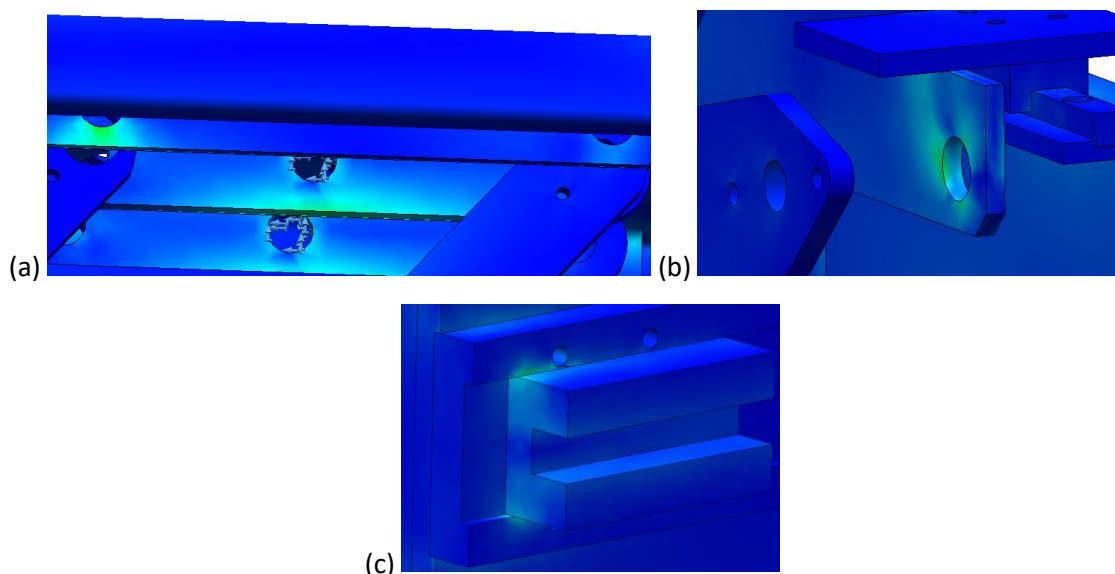


Figura 50 - Pontos críticos de Tensão de Von Mises: veio de aplicação (a), ponto de fixação do mecanismo de braços (b) e ponto de ligação do acompanhador à quinadora.

3.8.4. Estrutura e ligação à quinadora

Este capítulo é dedicado à estrutura e ligação à quinadora, que aborda os elementos físicos que constituem o acompanhador, com especial destaque nos seus braços, na mesa de contacto com

a chapa, na carcaça do acompanhador e nas estruturas que garantem a ligação mecânica à quinadora. A análise detalhada destes componentes permite compreender o funcionamento global do sistema e avaliar a sua capacidade para suportar os esforços a que este está sujeito durante o processo de quinagem. A estrutura do acompanhador assume um papel determinante na estabilidade, precisão de quinagem e durabilidade do equipamento. Deste modo, a estrutura do acompanhador é fundamental para garantir a sua robustez, integridade mecânica e correta integração com a máquina principal. Ao longo do capítulo, é descrito o conceito estrutural adotado, que inclui a disposição dos elementos principais e a lógica de funcionamento do conjunto. A modelação CAD permitirá visualizar e validar a geometria da solução desenvolvida. Proceder-se-á ao dimensionamento dos componentes normalizados. Através da validação estrutural, avaliar-se-á o comportamento da estrutura sob as condições de carga previstas. Por fim, serão definidos os materiais e processos de fabrico mais adequados, tendo em conta critérios de resistência, viabilidade de produção e custos associados. Este conjunto de análises visa garantir uma solução estrutural eficiente e consistente.

3.8.4.1. Descrição do conceito

A estrutura do acompanhador tem como principal função suportar o peso da chapa durante a quinagem, bem como o peso próprio dos seus componentes. A ligação entre o acompanhador e a quinadora realiza-se através de quatro patins, dois por cada eixo, que sustentam o conjunto sobre o avental fixo da quinadora e permitem o movimento do acompanhador ao longo das guias do avental, como se observa na Figura 51.

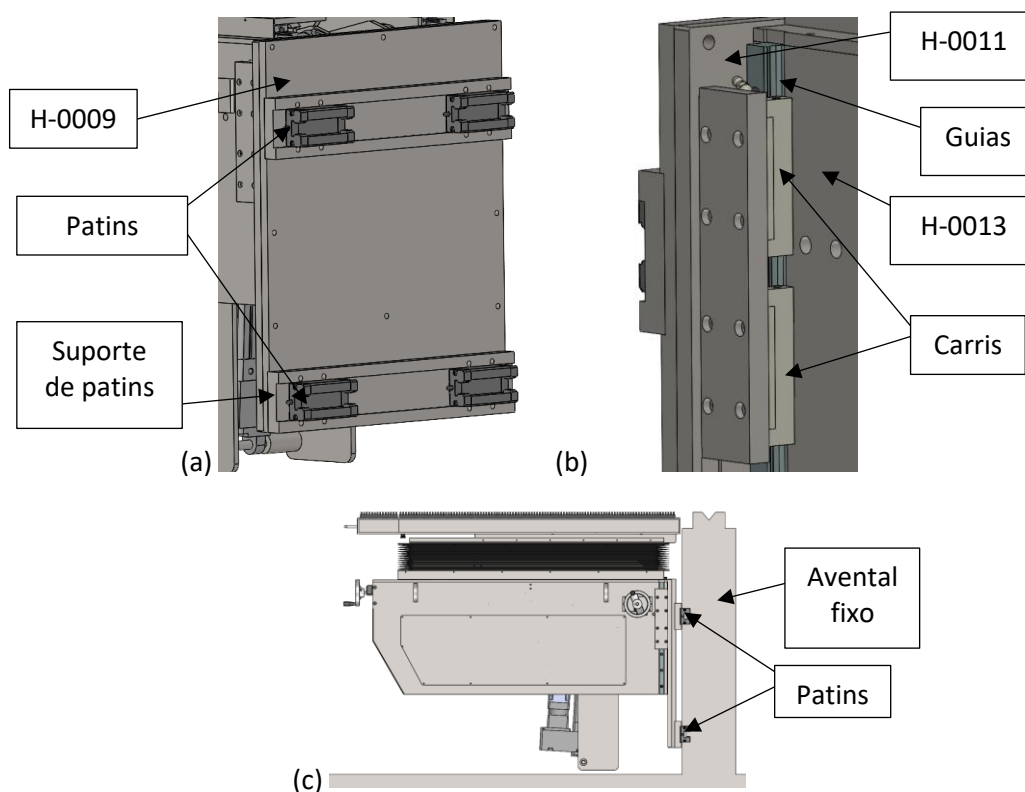


Figura 51 - Ligação do acompanhador à quinadora: sistema de fixação à quinadora (a), movimento do ajuste em Z (b) e avental fixo (c).

Cada par de patins é fixo a um suporte de patins, cuja função consiste em receber as forças provenientes dos patins e transmiti-las à restante estrutura. Estes suportes encontram-se ligados a uma chapa (H-0009) com 15 mm de espessura que, por sua vez, se une a outra chapa (designada por chapa por H-0011) através de múltiplos parafusos dispostos ao longo do seu comprimento. Esta segunda chapa assegura a fixação dos carris laterais, que permite o deslizamento em guias presentes na peça H-0013. A peça H-0013 (Figura 52) possui particular relevância uma vez que, para além de alojar as guias do eixo Z, incorpora duas orelhas destinadas ao transporte do acompanhador desde o chão de fábrica até à montagem na quinadora. A peça simétrica H-0012 apresenta configuração idêntica, com exceção da inclusão de furação na H-0013 para passagem do veio do volante, bem como da respetiva fixação do rolamento. Ambas as peças, H-0012 e H-0013, permitem a ligação a chapas laterais e a uma chapa traseira de proteção, destinada a evitar a contaminação do interior do mecanismo com poeiras e outros elementos externos.

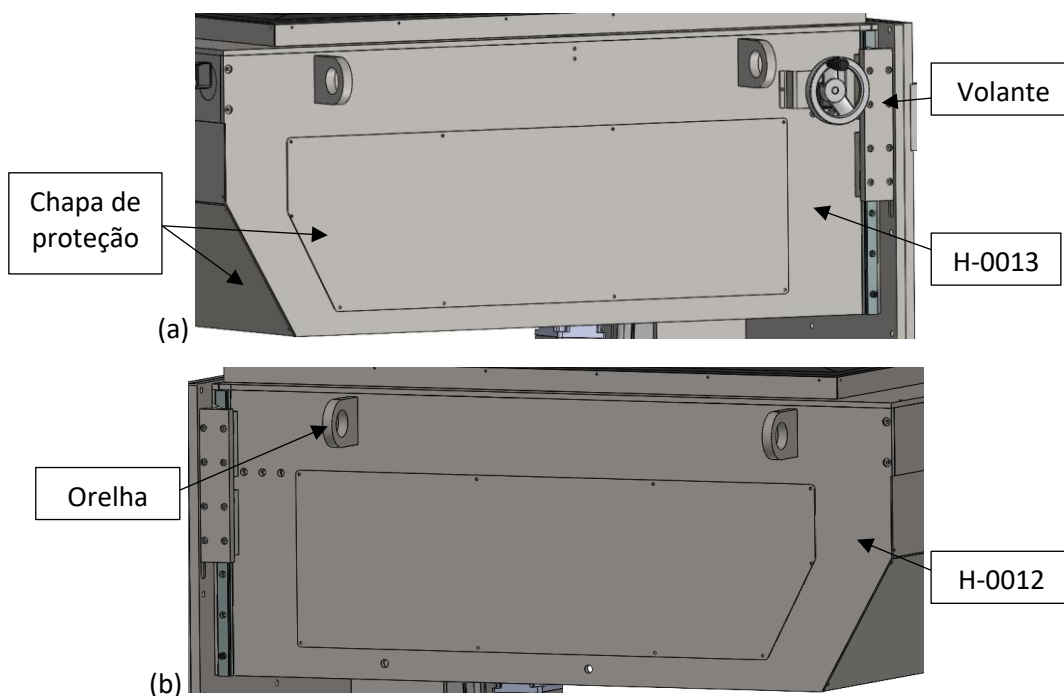


Figura 52 - Componentes laterais do acompanhador: H-0013 (a) e H-0012 (b).

A peça H-0024, sustentada pelas peças H-0012 e H-0013, integra as guias lineares que possibilitam o ajuste ao longo do eixo X, como se observa na Figura 53. As funções da peça H-0024 são suportar o peso que será exercido nas guias e a junção das peças H-0012 e H-0013. Com ligação aparafusada entre estes três componentes é possível manter a integridade e estrutura dos componentes laterais do acompanhador. Tal como as chapas de proteção mencionadas previamente, este sistema de guias também tem uma chapa que impede a interferência de corpos estranhos ao funcionamento das guias e dos patins. Os patins acoplados à peça H-0025 deslocam-se sobre estas guias. O componente H-0025 inclui entalhes ao longo do seu corpo, que permite a união, através de soldadura, aos componentes H-0027 e H-0031. Estes três elementos garantem o suporte do sistema de acionamento e funcionam como pontos de apoio do mecanismo de braços. Segundo o DCL do acompanhador, este tem dois pontos de

fixação, como se observa na Figura 54. Deste modo, existem dois veios que estão acoplados aos componentes H-0027 e H-0031 que funcionam como os dois pontos de apoio do mecanismo de movimento do acompanhador. Estes veios estão acoplados através de um casquilho que se encontra soldado aos componentes adjacentes.

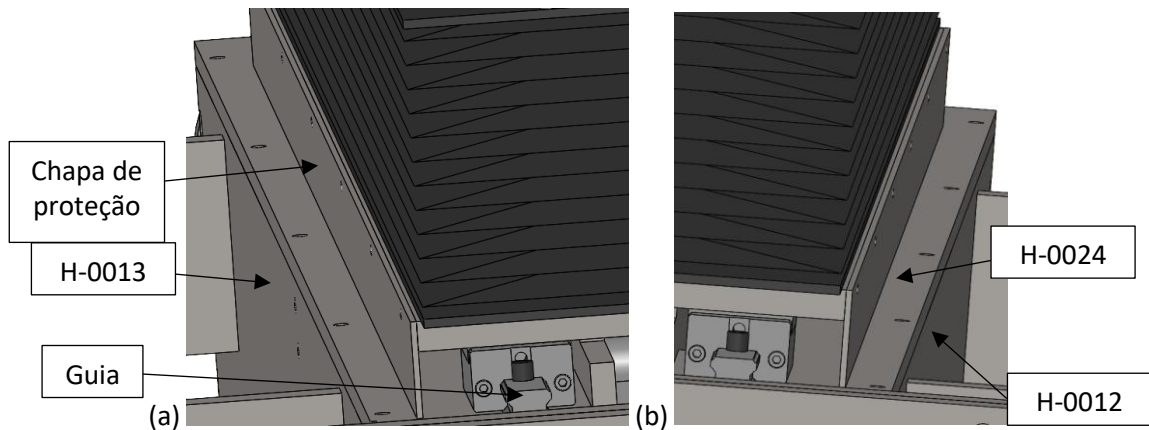


Figura 53 - Detalhe do componente H-0024 com: H-0013 (a) e H-0012 (b)

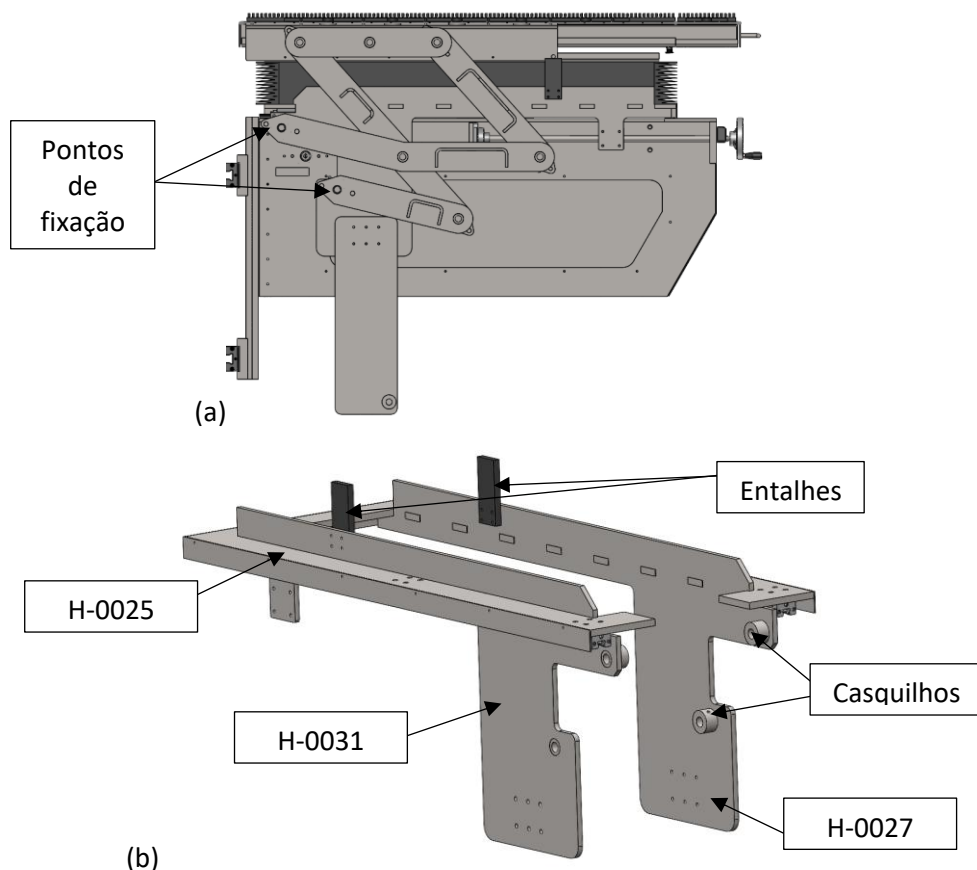


Figura 54 - Componentes de fixação da estrutura: pontos de fixação (a) e H-0027, H-0031 (b).

A peça H-0027 distingue-se da H-0031 pela presença de um entalhe adicional, necessário ao mecanismo de ajuste do eixo X, que irá ser abordado neste capítulo. Os dois componentes a preto na Figura 54 são suportes de um veio de apoio à estrutura que funcionará como mecanismo de *fail-safe* de todo o sistema de braços, mencionado no capítulo 3.8.5.1.

Na parte inferior dos componentes H-0027 e H-0031 encontram-se seis furos que servem para o suporte do sistema de acionamento. O componente que liga o sistema de acionamento à estrutura é o H-0018, que tem como função o suporte de todos os componentes de acionamento. Na extremidade da peça H-0018 encontra-se um casquilho soldado, atravessado por um pino que imobiliza o veio acoplado ao cilindro elétrico. Este veio liga os componentes H-0018 à base do cilindro elétrico, que permite que o veio fique fixo e o cilindro rode (Figura 55). A rotação do cilindro vai ser abordada com mais profundidade no capítulo 3.8.6.

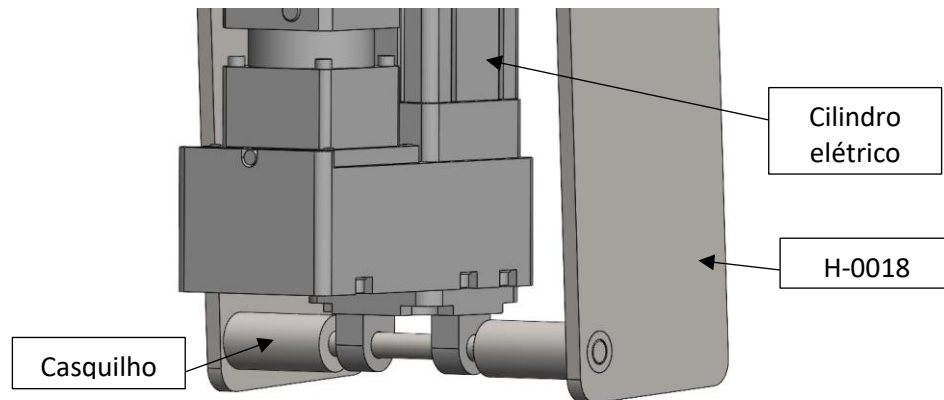


Figura 55 - Fixação do sistema de acionamento.

O acompanhador de quinagem dispõe de dois sistemas de ajuste: um no eixo Z e outro no eixo X. O sistema de ajuste no eixo Z baseia-se na rotação de uma manivela que transmite o movimento a um veio, como se observa na Figura 56. Este veio atravessa um contador de rotações, que permite ao operador monitorizar a extensão do ajuste. De seguida o veio entra em contacto com um rolamento alojado na peça H-0013. Posteriormente, o veio acopla-se ao componente V-0011 que, por sua vez, se liga ao redutor através de uma chaveta. O redutor converte o movimento rotativo do veio num movimento linear vertical do acompanhador. O redutor encontra-se suportado pelo componente H-0020, que possui um alojamento para uma caixa de rolamentos de contacto angular, responsável por suportar o peso do acompanhador. Esta caixa de rolamentos está fixa ao componente H-0020 por intermédio da soldadura de um casquilho. O veio de saída do redutor transmite o movimento a uma caixa roscada, acoplada ao componente H-0021. A caixa roscada permite a deslocação vertical do veio e assegura a sua estabilidade estrutural. A peça H-0021 encontra-se solidamente fixa à chapa H-0011, que impede qualquer deslocamento da caixa roscada.

O sistema de ajuste no eixo X também é acionado por uma manivela que atravessa um contador de rotações, seguido de um rolamento alojado no componente H-0016 e fixo por um casquilho, conforme ilustrado na Figura 57. O veio deste sistema entra em contacto com uma caixa roscada acoplada ao componente H-0031, o que permite a deslocação controlada deste elemento sempre que a manivela é acionada. Deste modo, quando a manivela é acionada, a caixa roscada vai fazer com que o componente H-0031 se movimente na direção x. Na extremidade oposta do veio encontra-se um segundo rolamento, fixo à peça H-0023, cuja função consiste em garantir a imobilização do sistema.

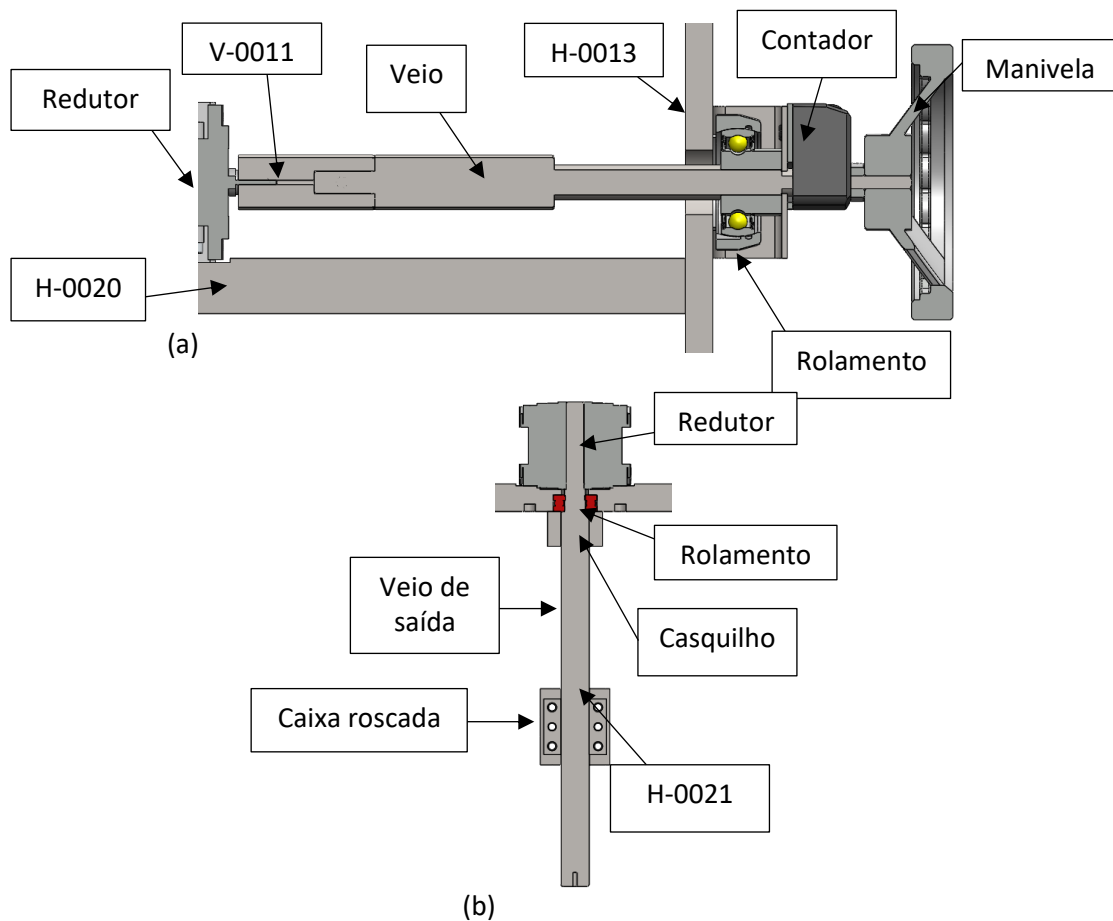


Figura 56 - Sistema de ajuste do eixo z: mecanismo da manivela (a) e mecanismo do redutor (b).

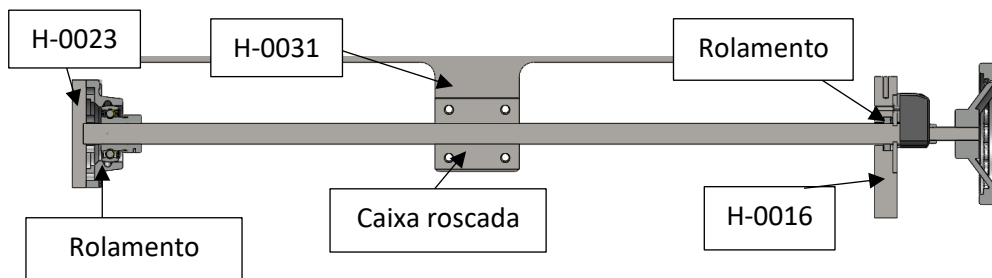


Figura 57 - Sistema de ajuste no eixo x.

O fole encontra-se preso na parte superior através das chapas H-0029 e H-0030, fixas ao suporte da mesa (H-0008), como se observa na Figura 58. Esta configuração permite que, sempre que a mesa se eleva, o fole acompanhe o seu movimento, de forma a garantir a proteção do mecanismo interno contra impurezas ou agentes externos.

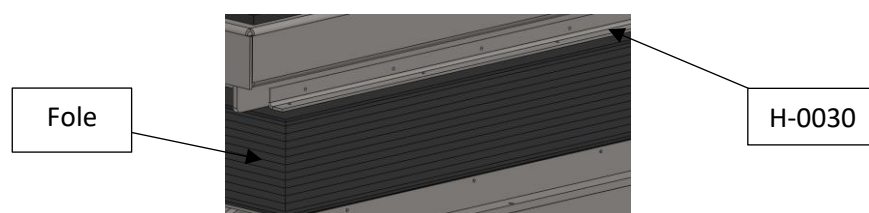


Figura 58 - Sistema de fole.

3.8.4.2. Dimensionamento de componentes normalizados

O redutor sem-fim é o elemento responsável por converter o esforço manual aplicado na manivela do ajuste em Z em binário suficiente para movimentar a carga através do veio roscado. Foi selecionado o modelo MAEDLER H/I tamanho 31, com rácio $i=15:1$, rendimento nominal $\eta \approx 0,77$ e binário máximo admissível na saída $T_2=22$ N/m, de acordo com o catálogo do fabricante [80]. O comprimento efetivo da manivela para o acionamento é de 44,5 mm e a força humana considerada no punho é de 20 N. Desta forma, o binário de entrada dá-se por:

$$T_1 = F_{hum} \times L = 20 \times 0,0445 = 0,89 \text{ N/m} \quad (9)$$

Com: T_1 - binário de entrada, F_{hum} - força estimada de punho humano e L - comprimento efetivo da manivela. A partir do binário de entrada é possível determinar o binário de saída através:

$$T_2 = T_1 \times i \times \eta = 0,89 \times 15 \times 0,77 = 10,3 \text{ N/m} \quad (10)$$

Com: T_2 - binário de saída, i - rácio e η - rendimento do redutor. Comparando com o valor máximo admissível pelo catálogo:

$$T_2 = 10,3 < 22 \text{ N}$$

Assim, o redutor encontra-se dentro da sua capacidade nominal e pode ser utilizado em segurança para o esforço humano previsto.

Para o dimensionamento do veio de saída considera-se a transmissão linear através de uma rosca trapezoidal TR 21×6. Assume-se ainda uma força axial de 2184 N, resultante do peso que o rolamento deverá suportar no veio de saída. O redutor é responsável por suportar esta carga, associada ao peso do acompanhador. O valor do peso suportado pelo redutor foi obtido através da funcionalidade de *mass properties* do SolidWorks®, que corresponde a aproximadamente 222,7 kg, o que equivale a uma força de 2184 N. A rosca trapezoidal, para além de transformar o movimento rotativo em movimento linear, assegura um efeito de bloqueio mecânico ao conjunto: a geometria do TR 21×6 e o atrito associado impedem o retorno sob carga, o que evita que o peso do acompanhador provoque a descida do redutor e do mecanismo de ajuste do eixo Z. Assim, a relação entre o binário de saída e a força axial estabelece-se como:

$$T_2 = \frac{F_a \times p}{2\pi \times \eta_s} = 6 \text{ N/m} \quad (11)$$

Com: T_2 - binário de saída, F_a - força axial, p - passo e η_s - rendimento de uma rosca trapezoidal lubrificada. Como $T_2=10,3$ N/m, o redutor fornece binário suficiente para movimentar a carga, com margem de segurança em relação ao binário requerido. O redutor MAEDLER H/I também é reversível, o que permite movimentar a carga tanto no sentido ascendente como descendente, o que responde ao requisito funcional de ajuste bidirecional.

Nos ajustes X e Z encontram-se instalados quatro rolamentos no total. Três destes não requerem dimensionamento, uma vez que estão sujeitos a cargas reduzidas, baixas velocidades, bem como a condições pouco exigentes de temperatura e ambiente de trabalho. No ajuste em X foram selecionados os rolamentos SKF FY 15 M e SKF 61802-2RS1, como se observa na Figura 59 (a) e (b). O primeiro atua como suporte radial do peso do ajuste e

possibilita a rotação do veio com rosca trapezoidal TR 15x6, presente neste mesmo ajuste e responsável pelo seu acionamento. O rolamento SKF 61802-2RS1, por sua vez, suporta simultaneamente cargas radiais e axiais e está localizado na extremidade do veio roscado, de forma a permitir a sua rotação e a suportar os esforços necessários para o movimento.

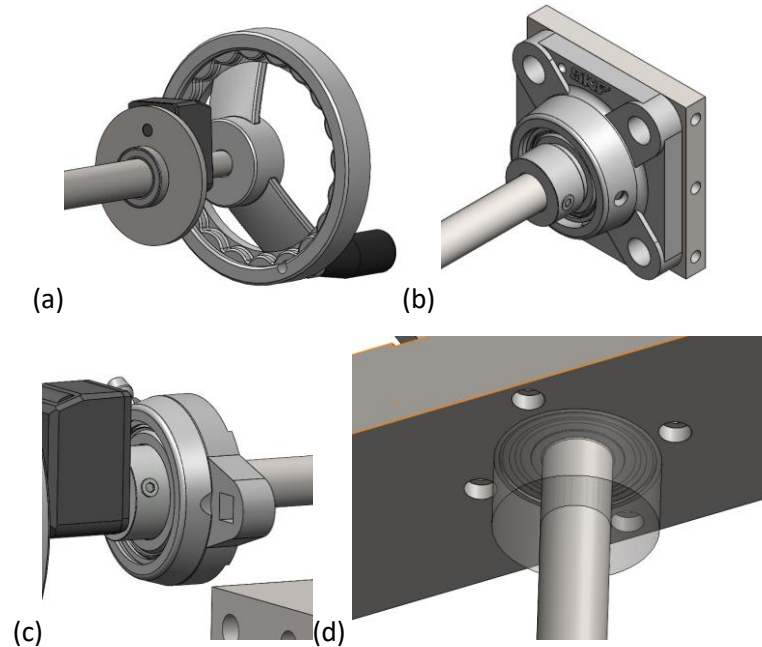


Figura 59 - Rolamentos do sistema de ajuste: SKF FY 15 M (a), SKF 61802-2RS1 (b), SKF F2BRD 503 (c) e SKF 3204 A-2RS1 (d).

No ajuste Z foram considerados os rolamentos SKF F2BRD 503 e SKF 3204 A-2RS1, como se observa na Figura 59 (c) e (d). Entre estes, o rolamento SKF 3204 A-2RS1 foi identificado como o componente a dimensionar, dado que estará sujeito a uma carga axial significativa. O veio de saída do acompanhador deve suportar uma carga axial elevada, resultante do peso aplicado no ajuste em Z, referido anteriormente no dimensionamento do redutor. A carga axial a considerar corresponde a 222,7 kg, o que equivale a 2184 N. Para esse efeito, foi selecionado um rolamento de contacto angular com diâmetro interno de 20 mm com contacto de 30°, adequado para suportar cargas combinadas. Os dados principais do modelo SKF 3204 A-2RS1: $C=20,4$ kN, $C_o=12,9$ kN, $n_{lim}=10\ 000$ rpm. Pelo catálogo da SKF, o dimensionamento segue os critérios normalizados pela norma ISO 281. A carga dinâmica equivalente dá-se por:

$$P = XF_r + YF_a \quad (12)$$

Com: P - carga dinâmica equivalente, X - fator do ângulo de contacto, F_r - força radial, Y - fator do ângulo de contacto e F_a - força axial. Para carga axial pura, o catálogo fornece $Y > 1$ e para dimensão e ângulo de 30°, usar Y entre 1,3-1,7 é típico. Para garantir uma abordagem conservadora, considerou-se $Y=1,7$:

$$P = 1,7 \times 2184 = 3,713 \text{ kN}$$

Com o valor de carga dinâmica é possível determinar a vida básica L_{10} expressa em milhões de rotações foi calculada através da equação:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3 = \left(\frac{20,4}{3,713}\right)^3 = 165 \quad (13)$$

Com: L_{10} - vida básica, C - capacidade dinâmica e P - carga dinâmica equivalente. E a correspondente vida em horas L_{10h} determinada por:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P}\right)^3 \quad (14)$$

Com: L_{10h} - vida básica em horas, n - rotações por minuto, C - capacidade dinâmica e P - carga dinâmica equivalente. Para a variável n foram analisados dois valores: 600 rpm e 300 rpm. Os resultados evidenciaram que, mesmo a uma rotação de 600 rpm, a vida útil projetada atinge aproximadamente 4583 horas, valor superior às referências típicas apresentadas no catálogo da SKF, que variam entre 4000 e 8000 horas para máquinas utilizadas de forma intermitente. De modo a fazer a verificação estática segue-se a seguinte equação:

$$P_0 = 0,6F_r + 0,5F_a = 1,092 \text{ kN}$$

O coeficiente de segurança estática representa-se como:

$$s_0 = \frac{C_0}{P_0} = \frac{12,9}{1,092} = 11,8 \quad (15)$$

Este valor situa-se muito acima do mínimo recomendado pela SKF para cargas normais, sem vibrações e com níveis sonoros regulares ($s_0 \geq 1$), bem como da faixa mais exigente indicada para situações de choque ou em que os níveis de som são especificados ($s_0 \geq 2$). Assim, o rolamento selecionado cumpre os requisitos para o coeficiente de segurança estática.

3.8.5. Cadeia cinemática

O presente capítulo dedica-se ao estudo da cadeia cinemática do acompanhador, elemento essencial para assegurar o correto funcionamento do sistema durante o processo de quinagem. O mecanismo cinemático do acompanhador define a trajetória percorrida pelo acompanhador e, por consequência, a forma como este interage com a chapa ao longo da operação. O desempenho do acompanhador depende diretamente da precisão do movimento descrito, pelo que a análise cinemática se torna determinante para garantir um acompanhamento eficaz. Neste contexto, o estudo da cadeia cinemática assume particular importância, não apenas pela sua influência no comportamento dinâmico do sistema, mas também pelo impacto direto na qualidade dimensional e geométrica das peças produzidas. Ao longo do capítulo, procede-se à descrição conceptual da cadeia cinemática adotada, seguida da respetiva modelação CAD. Posteriormente, realiza-se o estudo cinemático, no qual se analisam os movimentos relativos de todos os componentes do mecanismo do acompanhador, com vista à otimização do acompanhamento da chapa. Com base nesta análise, avança-se para o dimensionamento de componentes normalizados, de forma a garantir a compatibilidade dos elementos mecânicos com os esforços envolvidos. Segue-se a validação estrutural, etapa que assegura a integridade mecânica da solução proposta. Por fim, procede-se à seleção dos materiais e processos de fabrico adequados à produção dos componentes, tendo em conta critérios de resistência, durabilidade e viabilidade económica.

3.8.5.1. Descrição do conceito

A cadeia cinemática corresponde à sequência de elementos mecânicos interligados, cuja função principal consiste em transmitir o movimento gerado pela fonte de acionamento até à mesa de apoio da chapa. No caso específico de um acompanhador de quinagem, esta cadeia encontra-se estruturada de modo a assegurar que a trajetória da mesa replica, com elevada fidelidade, o movimento natural da chapa durante o processo de quinagem. A trajetória do acompanhador é crítica, uma vez que a precisão da trajetória percorrida pelo acompanhador influencia de forma direta a eficácia do acompanhamento e, por consequência, a qualidade final da quinagem. Desta forma, a análise e definição da cadeia cinemática assumem um papel central no projeto do acompanhador, que permite garantir que a interação entre a máquina e a chapa se realiza de forma controlada, estável e tecnicamente adequada. A correta definição geométrica da cadeia cinemática permite também prever o comportamento cinemático do acompanhador, facilitar o dimensionamento dos componentes e assegurar a compatibilidade com os requisitos geométricos e funcionais da operação de quinagem.

A Figura 60 apresenta uma vista em corte do mecanismo de braços onde se observa todos os componentes mencionados de seguida. O mecanismo de movimento do acompanhador é constituído por cinco pares de braços e pelo sistema da mesa, sustentado no próprio conjunto de braços. Como visto na Figura 54, o sistema de braços articula-se através de dois pontos fixos onde passam veios imobilizados por casquilhos soldados às peças H-0027 e H-0031. O braço B-0002 (Figura 60), ligado ao ponto fixo inferior, roda em torno do veio por intermédio de um rolamento. Os rolamentos são acoplados aos braços através de dois parafusos nas suas extremidades. Desta forma, o veio está fixo aos componentes H-0031 e H-0027, enquanto o braço B-0002 roda em torno do veio devido ao rolamento.

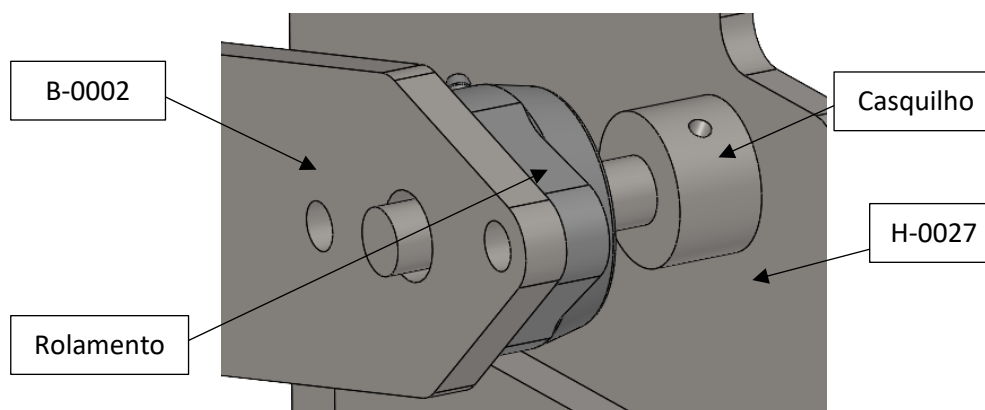


Figura 60 - Braços B-0002: detalhe do ponto fixo.

Na Figura 61 é possível observar que o braço B-0003 se liga aos braços B-0002, B-0001 e B-0005, realizando os seus movimentos por meio de rolamentos. O braço B-001, além de ligar aos braços B-0003 e B-0004, fixa ao ponto fixo superior, permanecendo solidário aos veios através de casquilhos soldados (em semelhança ao braço B-0002). O braço B-0004 articula com os braços B-0001 e B-0005, de modo a ser equipado com rolamentos em ambas as extremidades. O braço B-0005 estabelece a ligação ao sistema de acionamento, através do veio com a rótula da haste do cilindro elétrico, e suporta os veios que unem os braços ao componente H-0008.

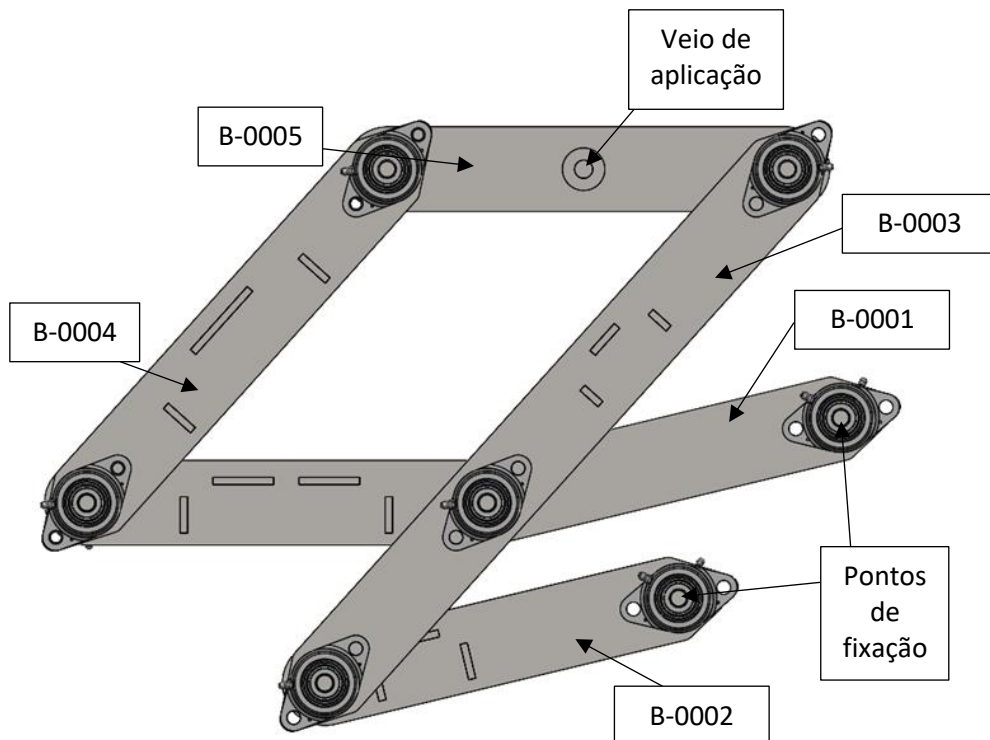


Figura 61 - Sistema de braços do mecanismo.

Entre cada par de braços encontra-se um componente de reforço, como se observa na Figura 62, destinado a suportar cargas transversais, o que torna estes braços mais estáveis durante o movimento do acompanhador. A geometria dos braços justifica-se através do espaço disponível em entre cada par de braços. Os braços são otimizados através de vários cortes de modo a diminuir o peso dos mesmos. No caso dos braços B-0003, o reforço foi dividido em dois para proporcionar ao cilindro elétrico espaço para operar.

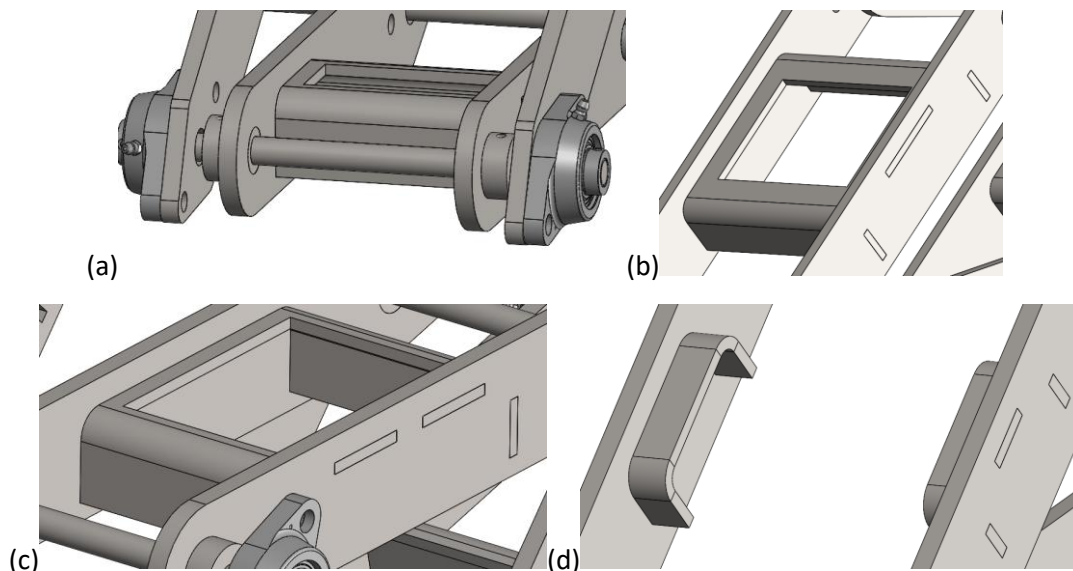


Figura 62 - Reforços entre os braços: B-0002 (a), B-0004 (b), B-0001 (c) e B-0003 (d).

O componente H-0008 (Figura 63) representa a interface entre o conjunto de braços e a mesa de apoio à chapa. Este componente liga ao sistema de braços através de uma manga soldada aos veios e liga à mesa de apoio por uma série de parafusos distribuídos ao longo do seu comprimento. A peça H-0008 apresenta vários entalhes que permitem o acoplamento dos

acessórios da mesa de apoio como as escovas e esferas deslizantes. O componente H-008 integra um veio de segurança posicionado na parte posterior, cuja função consiste em servir de apoio de emergência, apoiando-se em dois suportes laterais (a preto na Figura 54) no caso de falha estrutural do mecanismo de movimentação.

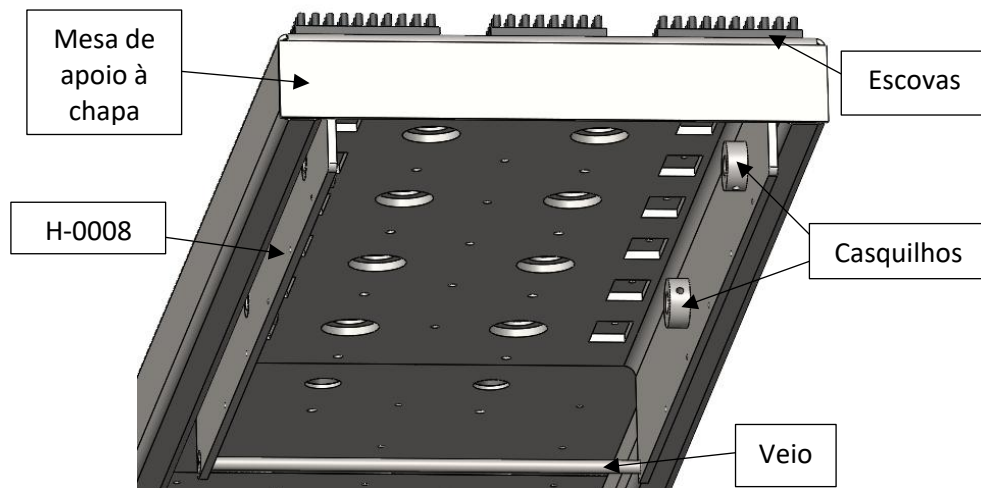


Figura 63 - Componente H-008.

A mesa de apoio à chapa, designada por H-005, contém escovas e esferas deslizantes que facilitam o movimento da chapa, como se observa na Figura 64. Na parte traseira, a mesa dispõe de um sistema de extensão constituído por dois perfis retangulares acionados pelo componente H-0007. O ajuste desta extensão realiza-se através da manipulação de um puxador e a posição do componente H-0007 é travada por um pino de posicionamento.

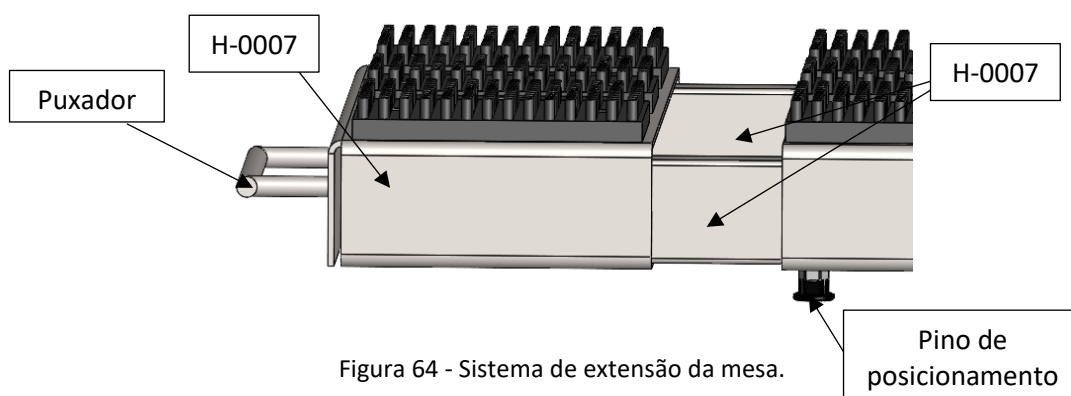


Figura 64 - Sistema de extensão da mesa.

3.8.5.2. Estudo cinemático

O estudo cinemático representa um dos processos mais relevantes no funcionamento do acompanhador, uma vez que o seu desempenho depende diretamente do movimento gerado para assegurar um acompanhamento eficaz da chapa durante o processo de quinagem. A qualidade da quinagem, quando se recorre a um acompanhador, está fortemente condicionada pela análise cinemática, dado que esta define a trajetória do sistema e, consequentemente, o contacto entre a mesa do acompanhador e a chapa a deformar durante o processo de quinagem.

Neste contexto, o estudo iniciou-se com a análise dos dois mecanismos disponíveis na empresa: o acompanhador da Adira e o acompanhador de uma empresa externa, ambos ilustrados na Figura 37. A observação do movimento dos braços e da estrutura global de cada acompanhador permitiu concluir que o sistema descreve uma trajetória circular. Como em qualquer movimento circular, o acompanhador possui um CIR. Tal como abordado no capítulo 3.7.3, o CIR da mesa de contacto do acompanhador deve, idealmente, coincidir com o primeiro vértice da matriz, por se tratar do ponto inicial de contacto entre a chapa e a matriz. Na prática, a chapa realiza o seu movimento de quinagem em torno deste vértice. Assim, o objetivo central consiste em fazer coincidir o CIR da mesa do acompanhador com o primeiro vértice da matriz, de forma a garantir um acompanhamento eficaz da chapa durante a operação.

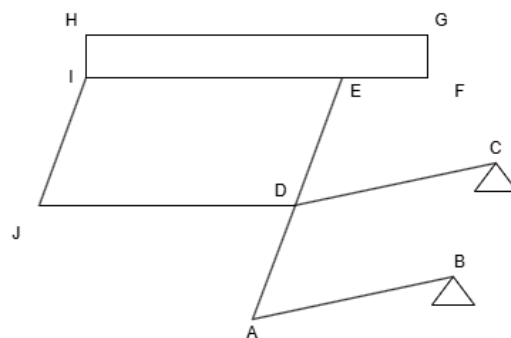


Figura 65 - Mecanismo do acompanhador de quinagem desenvolvido.

Para determinar o CIR da estrutura (Figura 65), tornou-se necessário compreender de que forma este varia consoante o tipo de geometria e como se altera com modificações nas dimensões dos braços ou nos ângulos de ligação entre os mesmos. A posição do CIR pode ser identificada através de uma análise detalhada a todas as barras que compõem o sistema. Com base na localização do CIR das diferentes barras, é possível determinar o CIR da mesa de contacto com a chapa, o qual corresponde, por analogia cinemática, ao CIR da própria chapa durante o seu movimento natural no processo de quinagem. Neste enquadramento, a Figura 65 apresenta a estrutura do acompanhador desenvolvido, que inclui os seus braços, a mesa e os pontos fixos, todos devidamente numerados. Considerando que a barra AB está apoiada no ponto B, infere-se que o ponto A descreve uma rotação em torno de B. De forma análoga, a barra CDJ possui como ponto de apoio o ponto C, o que implica que os pontos D e J executam um movimento circular em torno de C. Assim, o CIR da barra CDJ corresponde ao ponto C, conforme representado na Figura 66.

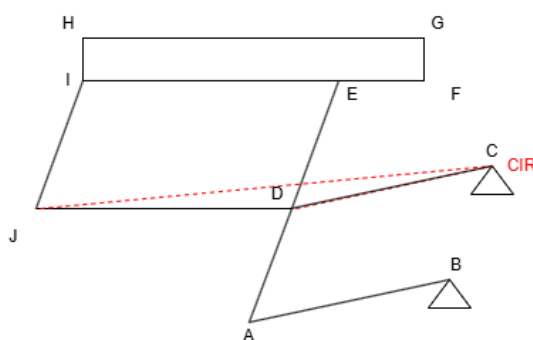


Figura 66 - CIR da barra CDJ.

Segundo o raciocínio anteriormente desenvolvido, ao analisar a barra ADE verifica-se que, ao contrário das anteriores, esta não apresenta pontos apoiados. No entanto, é já conhecido o CIR do ponto A, que descreve a sua rotação em torno do ponto B, bem como o CIR do ponto D, correspondente ao ponto C. Se for considerado que a barra AB e o segmento CD possuem o mesmo comprimento e o mesmo ângulo entre si, torna-se possível determinar o CIR do ponto E. Este CIR resulta da projeção da barra AB, ou segmento CD, a partir do ponto E, conforme representado na Figura 67.

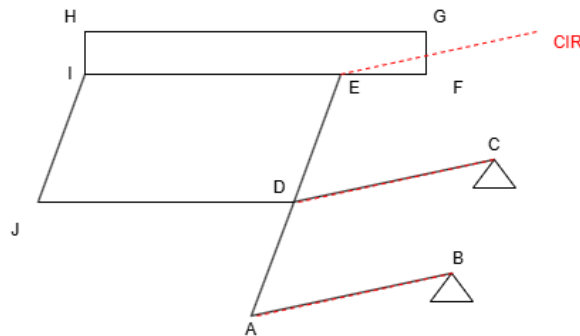


Figura 67 - CIR da barra ADE.

Relativamente à barra IJ, quando se aplica o mesmo raciocínio utilizado na análise da barra ADE, constata-se que não existem pontos de apoio nesta ligação. No entanto, com base na análise prévia da barra CDJ, é já conhecido o CIR do ponto J, que corresponde ao ponto C. Assim, o CIR do ponto I resulta da projecção do braço entre J e C, tal como ilustrado na Figura 68.

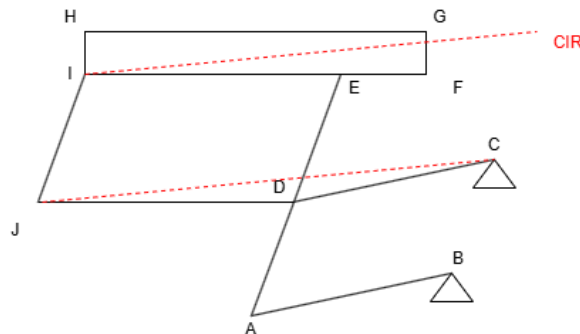


Figura 68 - CIR da barra IJ.

Com todos os centros instantâneos de rotação previamente determinados, resta agora calcular o CIR do componente mais relevante do acompanhador: a mesa de contacto com a chapa. Tal como referido anteriormente, a mesa deve replicar o movimento natural da chapa ao longo do processo de quinagem, pelo que o seu CIR deverá coincidir com o vértice da matriz, considerado como o centro de rotação da chapa. Ao analisar a mesa, definida pelos pontos E, F, G, H e I, verifica-se que os CIR dos pontos E e I já foram determinados e que ambos coincidem no mesmo ponto. O facto de os CIR de E e I coincidirem no mesmo ponto permite assumir que o CIR dos restantes pontos da mesa também se localizam neste ponto comum, uma vez que toda a mesa se comporta como um corpo rígido solidário entre si. Para validar esta conclusão, traça-se o vetor tangente à trajetória do movimento em diferentes pontos da mesa e, a partir destes

vetores, constrói-se a reta normal correspondente. O ponto de interseção dessas retas normais define o CIR da mesa, conforme representado na Figura 69.

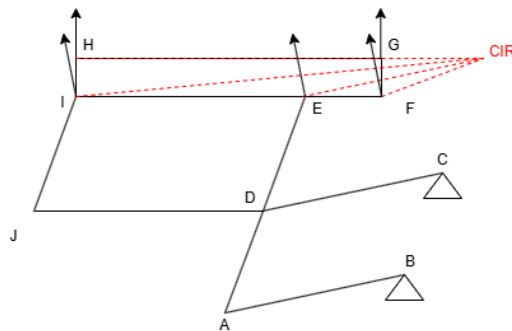


Figura 69 - CIR da mesa de contacto com a chapa.

Com o CIR da mesa determinado, torna-se possível compreender de que forma este se altera consoante possíveis modificações introduzidas nas dimensões e geometria do acompanhador. Sempre que se altera o comprimento da barra AB, e consequentemente o do segmento CD da barra CDJ (uma vez que ambos devem manter igual comprimento e orientação), o CIR do ponto E, e por consequência o CIR da mesa do acompanhador, desloca-se em conformidade com a alteração dimensional aplicada. De igual modo, conforme evidenciado na análise da barra IJ, o CIR do ponto I corresponde à projeção do segmento entre os pontos J e C. Assim, qualquer modificação neste segmento provoca uma variação no CIR do ponto I, que se reflete igualmente na posição do CIR da mesa.

Desta forma, uma vez determinado o CIR da mesa para diferentes configurações geométricas, torna-se intuitivo proceder ao dimensionamento dos comprimentos dos braços, dado que, como demonstrado, os comprimentos e orientações destes elementos influenciam diretamente a localização do CIR. Como o objetivo consiste em fazer coincidir esse ponto com o vértice da matriz, o conhecimento da distância entre o acompanhador e a matriz de quinagem permite dimensionar os braços de forma a posicionar o CIR exatamente no local pretendido.

Dada a importância do estudo cinemático, responsável por definir a qualidade de acompanhamento deste equipamento, procedeu-se à realização de um ensaio com o objetivo de validar os resultados obtidos teoricamente e já apresentados no presente capítulo. O principal propósito do ensaio consistiu em avaliar o erro de acompanhamento em função da distância entre o acompanhador e a matriz. O procedimento experimental foi realizado diretamente na quinadora, em ambiente industrial, com o objetivo de reproduzir as condições reais de funcionamento do equipamento. Este procedimento baseou-se na variação da distância entre o acompanhador e a matriz em três configurações distintas. Para cada distância entre o acompanhador e a matriz foram definidos três ângulos de análise (20°, 45° e 60°), em cada um dos quais se registaram medições em ambos os lados da chapa.

Para determinar o erro de quinagem na chapa, tornou-se necessário estabelecer uma metodologia coerente, com fundamento teórico e possível de reprodução em qualquer contexto técnico. Com base na observação do processo de quinagem, é seguro afirmar que a

chapa roda em torno do primeiro vértice da matriz que entra em contacto com a mesma. No entanto, não se pode garantir que a linha da mesa do acompanhador interseste este vértice, como se observa na Figura 70. A experiência prática no setor industrial demonstra precisamente o contrário: em diversas situações, apesar de a chapa efetuar o seu movimento em torno do vértice da matriz, o acompanhador não segue esta mesma trajetória, o que origina deformações indesejadas na chapa e desvios nos ângulos de quinagem obtidos. Assim, ao comparar a distância entre a reta definida pela chapa e a reta definida pela mesa do acompanhador para cada ângulo analisado, obtém-se uma medida representativa do erro cometido pelo sistema de acompanhamento ao longo do seu movimento.

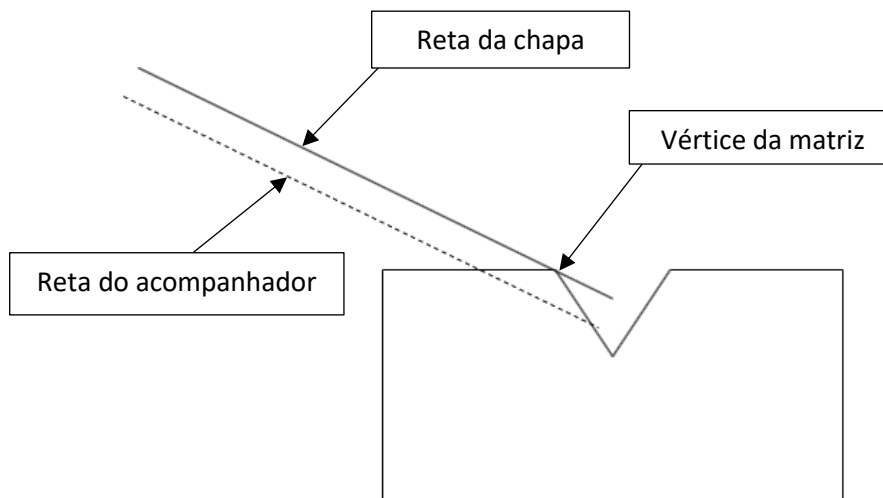


Figura 70 - Princípio lógico do ensaio.

A reta da chapa caracteriza-se por possuir o mesmo declive da reta da mesa do acompanhador e por passar sempre por um ponto fixo, designadamente o vértice da matriz. Em contraste, a reta associada à mesa do acompanhador apresenta igualmente o mesmo declive, mas não se encontra associada a um ponto fixo, uma vez que poderá ou não intercepar o vértice da matriz. Dado que ambas as retas possuem o mesmo declive, estas podem ser consideradas paralelas entre si. Assim, a avaliação do erro entre os dois elementos baseia-se na distância entre estas duas retas paralelas (medida na perpendicular), a qual pode ser calculada através da equação apresentada no capítulo 3.4:

$$d = \frac{c_2 - c_1}{\sqrt{m_d^2 + b^2}} \quad (5)$$

Com: d - distância entre retas, m_d - declive, b - constante associada à coordenada y , c_1 - coordenada vertical para a interseção da reta com o eixo vertical do acompanhador, c_2 - coordenada vertical para a interseção da reta com o eixo vertical da chapa. Como no início do movimento a chapa e a mesa do acompanhador se encontram em posição horizontal, pode assumir-se que ambas se encontram colineares, com declive nulo. No entanto, o posicionamento incorreto do CIR, aliado a uma distância inadequada entre o acompanhador e a matriz, impede que a superfície superior da mesa do acompanhador se mantenha colinear com a chapa durante a quinagem. Este desalinhamento conduz ao adiantamento ou atraso do movimento do acompanhador relativamente ao da chapa, conforme ilustrado na Figura 24. No

caso de o acompanhador se encontrar atrasado, a chapa realiza o seu movimento natural sem o devido acompanhamento durante grande parte do percurso, o que compromete a eficácia do processo. Em contrapartida, se o acompanhador se encontrar adiantado, este exerce uma força excessiva sobre a chapa, que provoca desvios nos ângulos de quinagem. Entre estas duas situações, o movimento adiantado assume maior criticidade, uma vez que compromete diretamente a precisão do processo e pode originar defeitos significativos na peça final. De forma análoga ao procedimento descrito no capítulo 3.4, ao reproduzir a geometria do acompanhador no software GIM, é possível obter a posição de todos os seus pontos, registados para cada incremento de $0,5^\circ$. Este registo permite determinar o valor de c_1 , dado que são conhecidas as coordenadas de um ponto da reta e o declive da mesma, calculado a partir da seguinte expressão:

$$m_d = \tan(\theta) \quad (3)$$

Com: m_d - declive e θ - ângulo da chapa e do acompanhador. Com o valor de c_1 determinado e o declive conhecido, torna-se possível definir a equação da reta correspondente à mesa do acompanhador. Para a equação da reta da chapa, considera-se como ponto de referência o ponto de contacto com a matriz (correspondente ao vértice) e o declive, obtido com base no respetivo ângulo de quinagem. Através destas duas equações, calcula-se a distância entre a reta da mesa do acompanhador e a reta da chapa, o que permite estabelecer os dados teóricos a comparar com os resultados obtidos experimentalmente.

O método de medição utilizado foi definido previamente com base nos princípios teóricos estabelecidos, não tendo sido alterado durante a execução do ensaio. As medições foram realizadas manualmente com recurso a um paquímetro (precisão de 0,05 mm) para determinação das distâncias e a um inclinómetro para registo dos ângulos, o que permitiu uma avaliação prática e direta das condições reais de funcionamento do acompanhador. Para a medição experimental, recorreu-se a um provete composto por uma chapa com comprimento de 300 mm, largura de 200 mm e espessura de 2,5 mm. O material utilizado foi aço S235JR. A matriz utilizada corresponde ao modelo V10 TECNOSTAMP 25.103 (Figura 71).

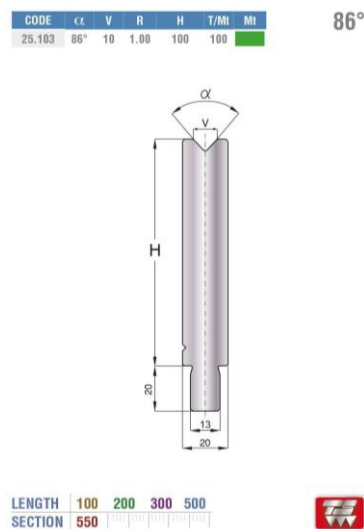


Figura 71 - Matriz utilizada no ensaio [81].

A temperatura ambiente durante a realização do ensaio foi de 11 °C. A distância entre o acompanhador e a matriz foi calculada a partir do último ponto de contacto do acompanhador com a chapa até ao vértice da matriz. Para garantir estabilidade e repetibilidade dos resultados recolhidos, a chapa foi fixada tanto ao acompanhador como contra a matriz de quinagem. Além disso, o ensaio contou com a participação de dois operadores distintos, medida que visou reduzir erros de manuseamento e aumentar a fiabilidade dos resultados registados.

A primeira distância considerada entre o ponto da mesa mais próximo da matriz para o plano de quinagem foi de 260 mm. Para esta configuração, a chapa penetra no interior da matriz sem ultrapassar os seus limites externos. Ou seja, a chapa entra integralmente no perfil em V da matriz, embora não estabeleça contacto direto com o vértice, o que indica que se encontra a ser empurrada para o interior da quinadora. Para determinar a distância entre as retas da chapa e da mesa do acompanhador, realizaram-se três medições em cada lado da chapa, ao longo do comprimento de quinagem, para três ângulos distintos: 20°, 45° e 60°. Posteriormente, foi calculada a média de cada conjunto de medições de cada lado da chapa, e, com base nestes dois valores, foi determinada a média geral, correspondente ao valor representativo do erro para cada ângulo analisado. Dado que, neste ensaio, a chapa se encontra posicionada dentro da matriz (como se observa na Figura 72), procedeu-se à medição da distância perpendicular à reta do acompanhador, entre a chapa e o vértice exterior da matriz com recurso a um paquímetro. Com este valor, e com a dimensão da aba da matriz obtida a partir da Figura 71, foi possível calcular a distância entre as duas retas.

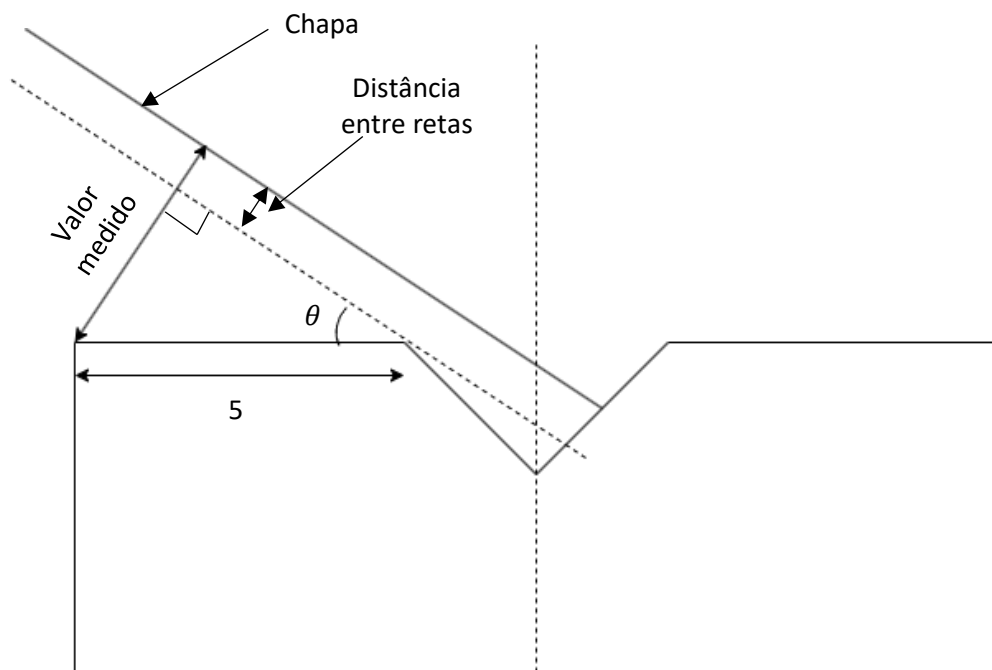


Figura 72 - Esquema do ensaio para uma distância de 260 mm.

De acordo com a Figura 72 é possível obter a distância entre retas através da seguinte fórmula:

$$l = -V_m + 5 \times \sin \theta \quad (16)$$

Com: l - distância entre retas, V_m - valor medido e θ - ângulo entre a chapa e o acompanhador. É importante salientar que o valor obtido na medição tem o sinal negativo, dado que se considerou como referência o sinal positivo para o atraso do acompanhador em relação à chapa. Para a distância de 260 mm, o acompanhador encontra-se adiantado, o que justifica a atribuição do sinal negativo ao resultado. Posteriormente, aplicou-se o mesmo procedimento de medição para as distâncias de 280 mm e 300 mm. A principal diferença entre estas distâncias e a anterior (260 mm) reside no facto de, nestes dois casos, o acompanhador se encontrar atrasado em relação ao movimento da chapa. Desta forma, em vez de estar posicionada dentro da matriz, a chapa está posicionada contra a face lateral da matriz, como se observa na Figura 73. Assim, torna-se necessária a adoção de um novo método para calcular a distância entre as retas, adequado ao posicionamento relativo alterado entre a chapa e a mesa do acompanhador.

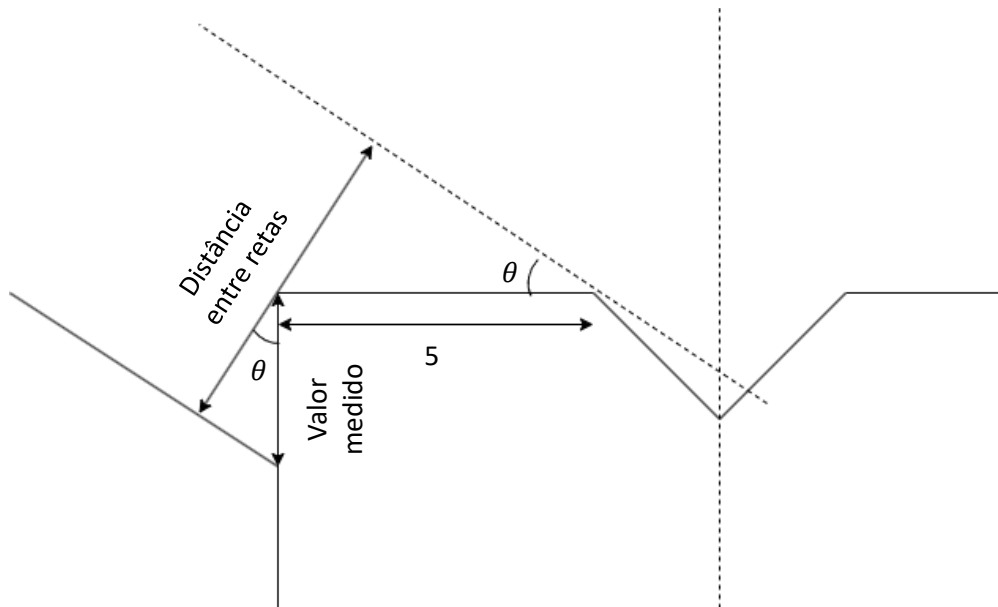


Figura 73 - Esquema do ensaio para uma distância de 280 mm e 300 mm.

Através da análise da Figura 73 é possível deduzir a seguinte equação:

$$l = (V_m + e \times \cos \theta) \times \cos \theta + 5 \times \sin \theta \quad (17)$$

Com: l - distância entre retas, V_m - valor medido, e - espessura da chapa e θ - ângulo entre a chapa e o acompanhador. Desta forma, é possível calcular todas as distâncias entre retas resultantes do ensaio, o que permite a análise e extração de conclusões relevantes. Segue-se a apresentação da Tabela 13, que relaciona as distâncias entre retas com os ângulos do acompanhador e a respetiva distância ao vértice da matriz. A análise dos dados permite extrair duas conclusões particularmente relevantes no que respeita à variação da distância entre retas. Em primeiro lugar, verifica-se que esta distância aumenta progressivamente com o aumento da distância entre o acompanhador e a matriz, de forma a passar de uma situação em que o acompanhador se encontra adiantado em relação à chapa (260 mm) para situações em que se encontra atrasado (280 mm e 300 mm). Como se pode observar, a configuração de 300 mm apresenta os valores de distância entre retas absolutos mais elevados. Em segundo lugar,

constata-se que a distância entre retas tende igualmente a aumentar com o crescimento do ângulo de quinagem, tal como se evidencia na Figura 74.

Tabela 13 - Distância entre retas em função do ângulo da quinadora e da distância do acompanhador ao vértice da matriz.

Distância (mm)	Ângulo (°)	Distância entre retas (mm)
260	20	-2,4
	45	-3,2
	60	-10,5
280	20	7,6
	45	11,1
	60	15,3
300	20	15,5
	45	20,9
	60	23,1

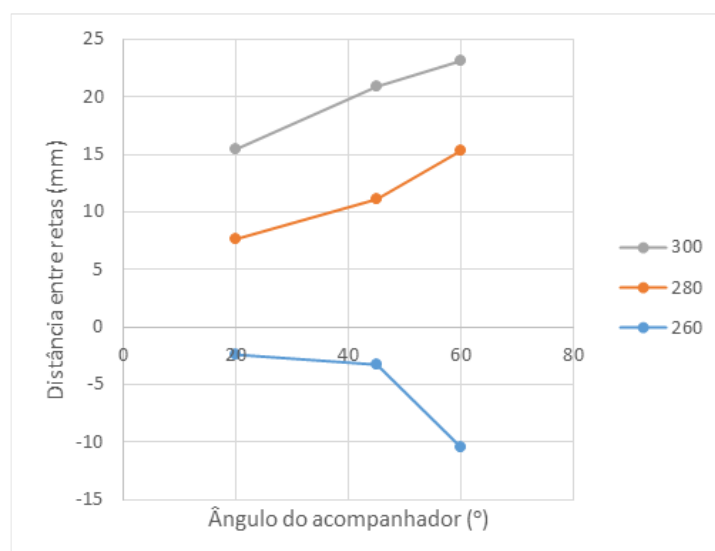


Figura 74 - Distância entre retas em função do ângulo do acompanhador.

Apesar de estas duas conclusões fornecerem informações valiosas, torna-se essencial validar os resultados experimentais com os valores obtidos analiticamente. Apresenta-se a Tabela 14 e a Figura 75, correspondentes à comparação entre os dados teóricos e experimentais. Com base na Tabela 14 e na Figura 75, é possível afirmar que os valores experimentais obtidos se encontram validados, uma vez que as curvas representadas no gráfico revelam um comportamento coerente ao longo da variação do ângulo do acompanhador. Destaca-se, em particular, a curva correspondente à distância de 280 mm, que apresenta uma elevada proximidade aos dados teóricos, com um erro absoluto máximo de apenas 3,3 mm. As curvas relativas às distâncias de 260 mm e 300 mm também evidenciam valores semelhantes aos previstos teoricamente para os ângulos de 20° e 45°, embora apresentem discrepâncias mais significativas para o ângulo de 60°. O erro mais elevado para o ângulo de 60° é justificado pela própria formulação teórica do cálculo da distância entre retas, a qual prevê um aumento

proporcional deste valor com o crescimento do ângulo do acompanhador. Consequentemente, quanto maior for o ângulo, maior será a distância entre retas e, por extensão, o erro absoluto associado, conforme se verifica nos dados obtidos. Os resultados do ensaio permitem, assim, validar os cálculos analíticos e confirmam que, à medida que o CIR se afasta do vértice da matriz, a qualidade do acompanhamento realizado pela máquina diminui.

Tabela 14 - Distância entre retas: experimental e analítica.

Distância (mm)	Ângulo (°)	Distância entre retas experimental (mm)	Distância entre retas analítica (mm)	Erro absoluto (mm)
260	20	-2,4	-1,5	0,9
	45	-3,2	-3,9	0,7
	60	-10,5	-5,3	5,2
280	20	7,6	5,4	2,3
	45	11,1	10,2	0,9
	60	15,3	12,0	3,3
300	20	15,5	12,2	3,3
	45	20,9	24,4	3,5
	60	23,1	29,3	6,2

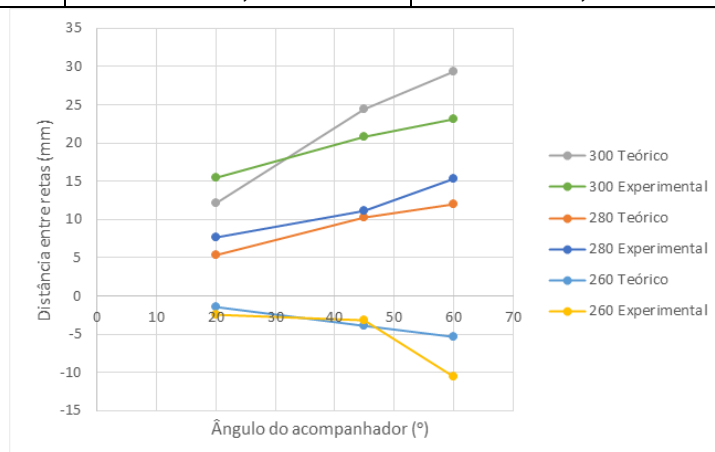


Figura 75 - Dispersão: ensaios e teórico.

No entanto, existem alguns erros absolutos de valor considerável (Figura 76), nomeadamente de 5,2 mm e 6,2 mm, que carecem de uma explicação técnica adequada. Entre os possíveis fatores que justificam estas discrepâncias destaca-se a flexão da chapa entre o ponto de contacto com o acompanhador e o vértice da matriz. Esta zona, por não dispor de suporte, pode sofrer deformações que comprometem a planeza da chapa. Adicionalmente, a flexão das escovas sob o peso da chapa poderá alterar o ponto real de contacto entre a chapa e o acompanhador, de modo a tornar o ponto de contacto inferior em altura ao previsto teoricamente.

Outras fontes de erro incluem a eventual falta de planicidade da chapa, cuja textura rugosa pode interferir com a precisão do posicionamento do paquímetro, bem como erros de manuseamento do próprio instrumento por parte do operador. Em situações onde a chapa se encontra em contacto direto com a matriz, o paquímetro poderá não conseguir um acoplamento perfeito à superfície da chapa. Acrescem ainda possíveis imprecisões associadas

à utilização do inclinômetro e o eventual deslizamento da chapa durante o ensaio, caso esta não se encontre corretamente apoiada na matriz, o que compromete a fiabilidade das medições.

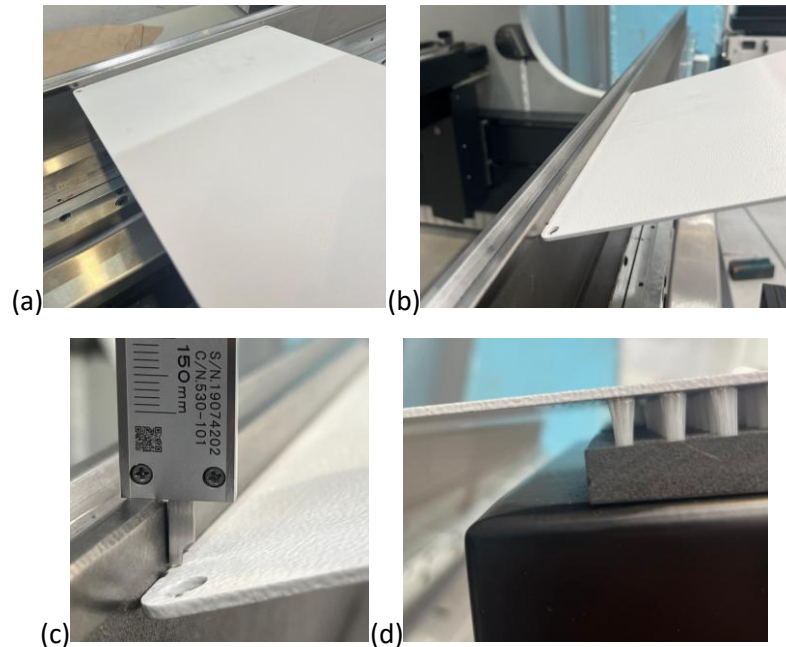


Figura 76 - Possíveis erros no ensaio: (a) zona sem apoio entre o acompanhador e a matriz, (b) falta de apoio da chapa na matriz, (c) erros no posicionamento do paquímetro e (d) flexão das escovas.

3.8.5.3. Dimensionamento de componentes normalizados

O dimensionamento dos rolamentos utilizados no mecanismo de braços do acompanhador foi realizado com base nos resultados obtidos na simulação estrutural no SolidWorks® Simulation do capítulo 3.8.3.3. Esta ferramenta permitiu determinar os esforços atuantes em cada veio, em todas as direções relevantes, o que possibilita a identificação das cargas radiais e axiais que incidem sobre os apoios. Deste modo, tornou-se viável proceder ao cálculo e verificação da adequação dos rolamentos, recorrendo ao catálogo técnico da SKF como referência.

Para o caso em estudo, foi selecionada a unidade SKF FYTB 15 TF (Figura 77), composta por um alojamento com dois furos em ferro fundido, adequado a um veio de 15 mm. De acordo com o catálogo SKF, este rolamento apresenta uma capacidade dinâmica C de 9,56 kN, uma capacidade estática C_0 de 4,75 kN e uma velocidade limite de 9 500 rpm [82].

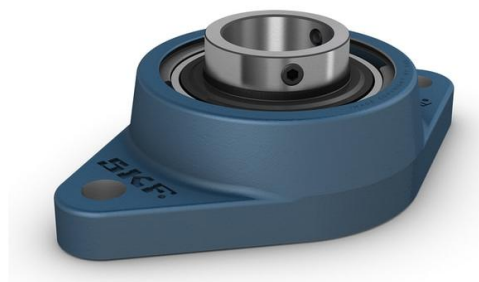


Figura 77 - Rolamento utilizado nos braços do mecanismo [82].

A simulação realizada permitiu a verificação das forças radiais e axiais em cada nó dos braços destinados a suportar um rolamento. A partir desta análise foram identificados os valores máximos, considerados críticos, como demonstra a figura.

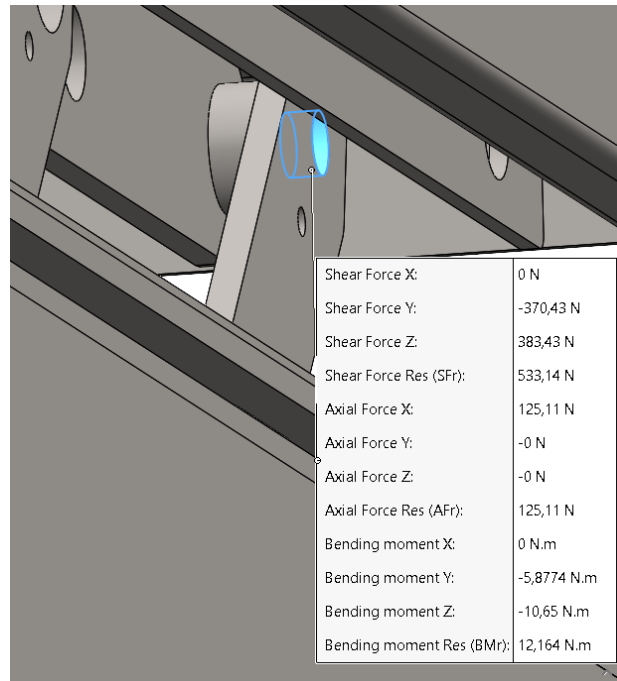


Figura 78 - Forças críticas para dimensionamento de rolamentos.

Assim, a simulação forneceu como resultados os valores críticos de força radial F_r e de força axial F_a , respetivamente 533,14 N e 135,83 N. Estes valores foram aplicados nas equações de dimensionamento definidas pela norma ISO 281, conforme indicado no catálogo SKF. A carga dinâmica equivalente foi considerada, de forma conservadora, igual à carga radial $P = F_r = 0,533$ kN. Assim, a vida básica L_{10} expressa em milhões de rotações foi calculada através da relação:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3 = \left(\frac{9,56}{0,533}\right)^3 = 5766 \quad (18)$$

Com: L_{10} - vida básica, C - capacidade dinâmica e P - carga dinâmica equivalente. A correspondente vida em horas L_{10h} determinada por:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P}\right)^3 \quad (14)$$

Com: L_{10h} - vida básica em horas, n - rotações por minuto, C - capacidade dinâmica e P - carga dinâmica equivalente. Para a variável n foram considerados três valores: 1200 rpm, 600 rpm e 300 rpm. Os resultados demonstraram que, mesmo para rotações de 1200 r/min, a vida útil projetada atinge aproximadamente 80 000 horas, valor bastante superior aos típicos, para máquinas usadas por oito horas por dia e completamente utilizadas, de 12 000 a 30 000 horas indicadas pelo catálogo para aplicações industriais. Para rotações inferiores, a vida calculada aumenta proporcionalmente, o que assegura margens ainda mais confortáveis. No caso da

rotação aplicada aos braços, pode afirmar-se que estes valores se revelam mais do que suficientes para comprovar a adequação do rolamento relativamente à sua vida básica.

Procedeu-se igualmente à verificação estática, que avalia a resistência do rolamento a cargas máximas instantâneas e choques. A carga estática equivalente foi calculada como:

$$P_0 = \max(F_r; 0,6F_r + 0,5F_a) = 0,533 \text{ kN} \quad (19)$$

Com: P_0 - carga estática equivalente, F_r - força radial e F_a - força axial. O coeficiente de segurança estática resulta de:

$$s_0 = \frac{C_0}{P_0} = \frac{4,75}{0,533} = 8,9 \quad (20)$$

Com: s_0 - coeficiente de segurança estática, C_0 - capacidade estática e P_0 - carga estática equivalente. Este valor encontra-se muito acima do mínimo recomendado para cargas normais, sem vibrações e os níveis de som normais ($s_0 \geq 1$) e também da faixa mais exigente sugerida para casos de choques e para casos que os níveis de som são especificados ($s_0 \geq 2$). Deste modo, o rolamento selecionado satisfaz os requisitos definidos relativamente ao coeficiente de segurança estática.

Em síntese, o dimensionamento confirmou que a unidade FYTB 15 TF garante uma vida útil muito superior às exigências normais de serviço e um elevado coeficiente de segurança estática. Assim, o rolamento selecionado revela-se plenamente adequado para o funcionamento do acompanhador, que assegura fiabilidade e durabilidade em condições operacionais reais.

3.8.6. Acionamento

O capítulo que se segue incide sobre o sistema de acionamento, elemento essencial para a geração e transmissão do movimento no acompanhador de quinagem. O acionamento define o modo como a energia é convertida em movimento, que influencia diretamente a precisão do acompanhamento, a estabilidade do processo e a repetibilidade do sistema. A função do acionamento torna-se determinante para garantir que a trajetória imposta à mesa do acompanhador respeita o movimento natural da chapa durante a quinagem. Além disso, o acionamento afeta o controlo do sistema, o esforço nos componentes, o tempo de ciclo e a resposta dinâmica do mecanismo, pelo que assume um papel central no desempenho global do conjunto. Ao longo do capítulo, são apresentados o conceito do sistema de acionamento adotado, a sua representação através de modelação digital, os critérios de dimensionamento dos componentes utilizados e as opções de materiais e processos de fabrico que asseguram a viabilidade técnica da solução.

3.8.6.1. Descrição do conceito

Após a definição do conceito de acionamento, torna-se pertinente analisar o ponto de aplicação da força do atuador no acompanhador. A posição do ponto de aplicação da força revela-se um parâmetro de elevada importância, uma vez que esta influencia diretamente o momento gerado no sistema e, por consequência, a intensidade de força que o acionador necessita de

exercer. Para além disso, a localização deste ponto afeta também o espaço disponível para a implementação do restante mecanismo, podendo facilitar ou limitar o arranjo estrutural dos braços do mecanismo consoante a sua configuração. Neste contexto, realizou-se a comparação entre diferentes pontos possíveis de aplicação da força, como se observa na Figura 79.

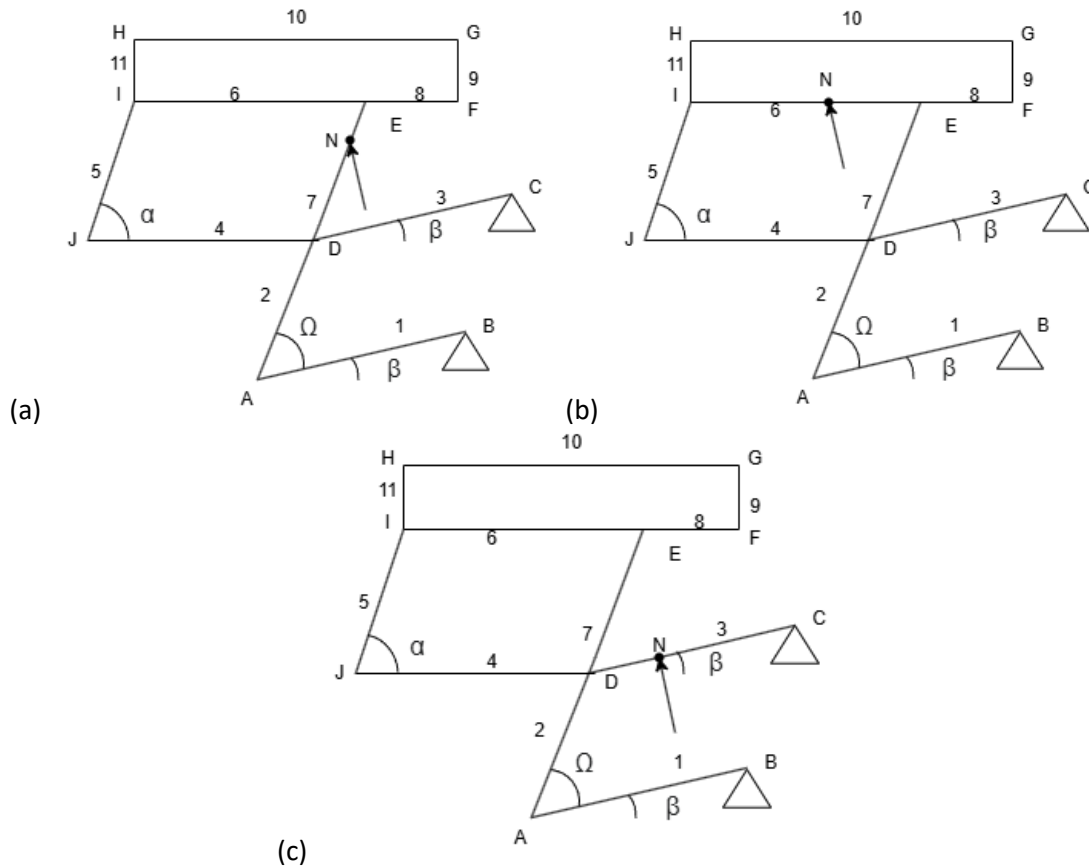


Figura 79 - Diferentes pontos de acionamento: braço AE (a), braço EI (b) e braço CDJ (c).

No sistema (a), o braço corresponde ao segmento CD; no sistema (c), o braço é ainda mais reduzido e corresponde ao segmento entre os pontos N e C; já no sistema (b), o braço considerado estende-se desde o ponto N até ao CIR do acompanhador, localizado no vértice da matriz, que constitui o maior braço entre todas as configurações analisadas. Esta característica permite gerar o mesmo momento com uma força inferior, o que reduz a exigência sobre o dimensionamento do sistema de acionamento. Após esta análise, selecionou-se o ponto de aplicação (b), apresentado na Figura 79, por apresentar vantagens significativas face às restantes opções.

Adicionalmente, o ponto de aplicação (b) situa-se mais próximo da zona onde se concentra a força exercida pela chapa, o que implica uma menor transmissão de esforços ao longo dos braços da estrutura. A proximidade entre o ponto de atuação do acionador e a zona de solicitação principal contribui para a redução dos esforços internos dos braços, o que se traduz numa menor exigência no dimensionamento dos componentes estruturais do acompanhador. A principal desvantagem associada à configuração (b) é o facto de, ao possuir um braço mais longo, implicar um maior curso de deslocamento angular em torno do CIR. Esta exigência

adicional pode constituir um fator limitativo na seleção do acionador, ao impor requisitos mais rigorosos relativamente ao seu curso útil e amplitude de movimento.

Neste enquadramento, e com o ponto de aplicação definido anteriormente, a direção que transmite a totalidade da força no instante inicial corresponde à reta tangente à trajetória do acompanhador nesse ponto. Este momento inicial representa a fase mais exigente em termos de esforço, uma vez que o peso da chapa exerce a totalidade da sua força na direção da estrutura do acompanhador. Esta condição crítica verifica-se quando a mesa do acompanhador se encontra perfeitamente na horizontal. À medida que o acompanhador se eleva, a força exercida pela chapa deixa de atuar exclusivamente na direção do movimento. Conforme ilustrado na Figura 80, a força passa a decompor-se em dois vetores: um componente na direção da trajetória do acompanhador e outro componente perpendicular a essa direção. Quanto maior for a elevação do acompanhador, menor será a componente de força que atua sobre o mesmo, o que confirma que o instante mais crítico ocorre no início do movimento.

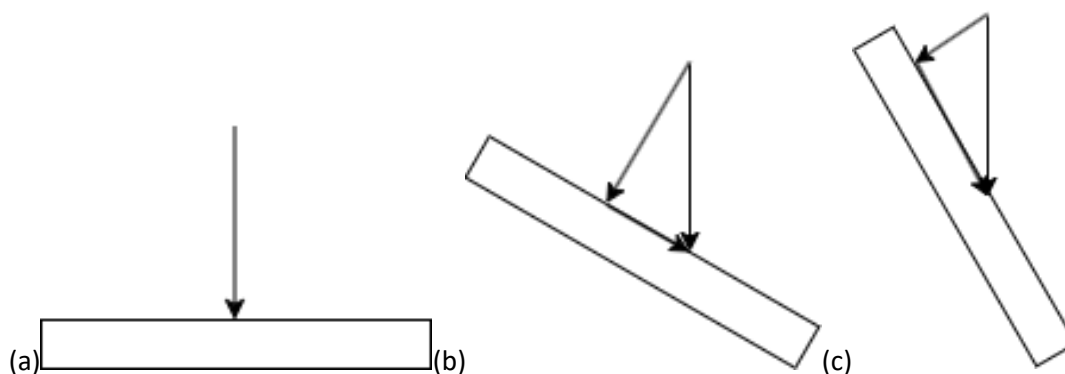


Figura 80 - Decomposição do peso da chapa com o acompanhador a: 0° (a), 45° (b) e 60° (c).

A direção da força aplicada pelo sistema de acionamento constitui um fator de elevada relevância, dado que a sua eficácia depende do alinhamento com a trajetória do ponto de aplicação. Quanto mais alinhada estiver a força de acionamento com a direção tangente ao movimento, maior será o contributo efetivo desta força na elevação do acompanhador. Inversamente, qualquer desalinhamento reduz a componente útil da força transmitida ao sistema. Como se observa na Figura 81, a direção de aplicação mais favorável corresponde à tangente à trajetória do ponto de aplicação, precisamente no instante em que o acompanhador se encontra na posição horizontal. Esta orientação maximiza o rendimento do acionador e assegura uma resposta mais eficiente do mecanismo.

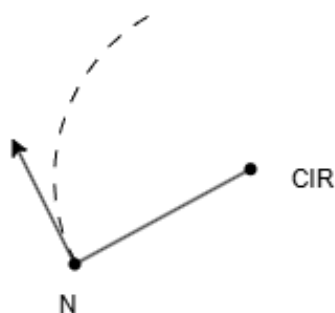


Figura 81 - Direção da força de acionamento.

Por questões relacionadas com o espaço disponível, o atuador do acompanhador encontra-se desviado da orientação que maximiza o rendimento do sistema, conforme referido anteriormente, o que influencia a força necessária a aplicar pelo acionador. Esta questão será detalhada no capítulo 3.8.6.2.

3.8.6.2. Dimensionamento de componentes normalizados

A escolha do modelo LEY100 resultou de um processo de dimensionamento rigoroso, fundamentado em critérios técnicos como a carga suportada, o *work load*, o curso necessário ao movimento e a velocidade requerida para a operação. A SMC foi selecionada como fornecedora devido à relação de longa data com a empresa, o que garante fiabilidade, compatibilidade técnica e facilidade no suporte e fornecimento.

O processo de dimensionamento teve início com a determinação da carga total suportada pelo cilindro. Para este efeito, recorreu-se a uma equação de equilíbrio de momentos, que permite calcular a força necessária do cilindro elétrico para sustentar o peso do acompanhador. Esta análise considera o instante inicial do movimento, com a mesa do acompanhador na posição horizontal, uma vez que este representa o momento de maior exigência, tanto em termos de peso aplicado como de aceleração inicial. Deste modo, os momentos do mecanismo do acompanhador foram calculados através das forças apresentadas pelo diagrama de corpo livre na Figura 82.

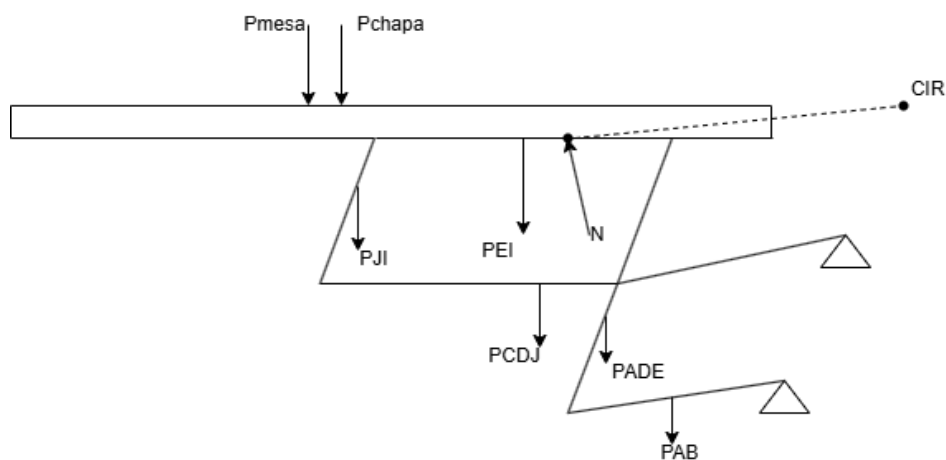


Figura 82 - Diagrama de corpo livre do mecanismo do acompanhador.

A análise do Diagrama de Corpo Livre (DCL) permite identificar as diferentes forças atuantes durante o funcionamento do acompanhador. Estão representadas as forças correspondentes ao peso de todas as barras do mecanismo, ao peso da mesa de apoio da chapa, ao peso da própria chapa a quinar e à força N , que corresponde à força exercida pelo atuador. Esta última constitui a grandeza fundamental a determinar para o correto dimensionamento do cilindro elétrico.

O valor do peso das barras foi estimado através do *software* SolidWorks®, pela consideração do material e o respetivo volume de cada componente. Para barras com formas mais complexas, o cálculo do centro de massa também foi efetuado com recurso ao mesmo *software*, enquanto

para geometrias simples, onde as barras são simétricas, foi possível determinar o centro de massa de forma analítica. O braço do peso de cada barra corresponde à distância horizontal entre o centro de massa do braço e o CIR.

O valor do peso da mesa foi igualmente determinado através do *software* SolidWorks®, que toma em conta a geometria e o material de todos os seus componentes. Dado que a mesa não apresenta uma forma simétrica nem uma geometria simples, o cálculo do centro de massa foi também realizado pelo mesmo *software*. O peso da chapa foi calculado com base no volume, previamente definido no capítulo 3.6, e na massa volúmica do material mais denso entre os que se encontram previstos para utilização com o acompanhador. Consideraram-se chapas de alumínio, aço ao carbono e aço inoxidável, sendo este último o material com maior massa volúmica. Assim, para garantir um dimensionamento conservador, foi utilizada a massa volúmica do aço inoxidável no cálculo da massa da chapa. Esta apresenta dimensões máximas de 0,006 m × 1 m × 2 m, conforme estabelecido.

$$m = \rho \times v \Leftrightarrow m = 8000 \times 0,006 \times 1 \times 2 \Leftrightarrow m = 96 \text{ kg} \quad (21)$$

Com: m - massa, ρ - massa volúmica e v - volume. O braço exercido pela mesa corresponde à distância horizontal entre o ponto de aplicação da força peso da chapa e o centro instantâneo de rotação do mecanismo. Considerando que a chapa apresenta uma extensão de 1 m para fora da máquina, o centro geométrico localiza-se a 0,5 m desse limite. Assim, adotou-se este valor como o braço associado ao peso da chapa, com origem no respetivo centro de massa.

Para determinar o valor da inércia necessário à aplicação da equação de equilíbrio de momentos, foi utilizado o *software* SolidWorks®, com o objetivo de obter o momento de inércia de massa do conjunto composto pela mesa, pelos braços e pela chapa. O cálculo da inércia foi efetuado em relação ao CIR, uma vez que todos os momentos considerados na equação de equilíbrio se encontram referidos a esse ponto. Assim, a inércia do sistema tem de ser expressa em torno do CIR para garantir a coerência das condições de equilíbrio.

Já a aceleração utilizada para o dimensionamento do sistema de acionamento foi estabelecida com base na relação entre a aceleração angular e o tempo necessário para a realização do movimento do acompanhador. Esta aceleração encontra-se diretamente dependente do tempo de execução do movimento, conforme descrito por duas equações distintas. A primeira equação corresponde à expressão fundamental do movimento uniformemente acelerado:

$$w = w_0 + \alpha t \quad (22)$$

Com: w - velocidade angular, w_0 - velocidade angular inicial, α aceleração angular e t - tempo. A segunda equação utilizada corresponde à equação de Torricelli, adaptada ao contexto do movimento angular. Esta equação permite relacionar a aceleração com a variação da velocidade angular e o deslocamento angular total, sem necessidade de recorrer explicitamente ao tempo:

$$w^2 = w_0^2 + 2\alpha\theta \quad (23)$$

Com: w - velocidade angular, w_0 - velocidade angular inicial, α aceleração angular e θ - variação angular. Ao substituir o primeiro termo da equação inicial pela expressão correspondente à equação de Torricelli, obtém-se a seguinte relação:

$$\sqrt{w_0^2 + 2\alpha\theta} = w_0 + \alpha t \quad (24)$$

Após reordenação dos termos, resulta a seguinte expressão:

$$t = \frac{1}{\alpha} (\sqrt{w_0^2 + 2\alpha\theta} - w_0) \quad (25)$$

A velocidade angular inicial do movimento do acompanhador mantém-se nula, uma vez que o sistema parte sempre do repouso. Com base neste pressuposto, torna-se possível determinar o tempo de movimento em função da aceleração angular e da variação angular imposta. Considerando que o ângulo máximo de abertura do acompanhador é de 60°, o cálculo foi efetuado com base numa variação angular de 60°, correspondente ao intervalo entre a posição inicial (0°) e a posição final (60°).

Nesta equação, os únicos parâmetros não constantes são o tempo de subida e a aceleração angular. Conforme indicado no capítulo 3.6, uma das limitações técnicas definidas corresponde a um tempo de subida máximo de 5 s. Para respeitar esta restrição, procedeu-se a um processo iterativo entre os valores de aceleração angular e o tempo de subida, até se alcançar uma solução que respeitasse essa condição.

Embora o limite de tempo admissível tenha sido estabelecido nos 5 s, adotou-se como valor final uma aceleração angular de 0,2 rad/s², correspondente a um tempo de subida de 3,2 s. Esta escolha justifica-se pela maior proximidade com os tempos de resposta verificados em equipamentos de acompanhamento de quinagem atualmente em utilização na indústria.

Com a aceleração definida para o movimento do mecanismo, as forças e os respetivos braços de aplicação devidamente determinados, e a inércia total do sistema calculada em relação ao CIR, torna-se possível aplicar a equação de equilíbrio de momentos em função da força N. Esta força corresponde ao esforço que o atuador deverá exercer sobre o sistema, para garantir a sua estabilidade e o correto funcionamento. A equação de equilíbrio de momentos é dada por:

$$\begin{aligned} \sum M + N \times d &= I_{CIR} \times \alpha \\ &\Leftrightarrow P_{mesa} \times L_{mesa} + P_{chapa} \times L_{chapa} + P_{EI} \times L_{EI} + P_{JI} \times L_{JI} \\ &\quad + P_{CDJ} \times L_{CDJ} + P_{ADE} \times L_{ADE} + P_{AB} \times L_{AB} + N \times d \\ &= I_{CIR} \times \alpha \end{aligned} \quad (26)$$

Com: $\sum M$ - somatório de momentos, N - força exercida pelo cilindro, d - distância do ponto de atuação da força até ao CIR, I_{CIR} - momento de inércia do mecanismo em relação ao CIR, α - aceleração angular, P_{mesa} - peso da mesa, L_{mesa} - distância do centro de massa da mesa ao CIR, P_{chapa} - peso da chapa, L_{chapa} - distância do centro de massa da chapa ao CIR, P_{EI} - peso do braço EI, L_{EI} - distância do centro de massa do braço EI ao CIR, P_{JI} - peso do braço JI, L_{JI} - distância do centro de massa do braço JI ao CIR, P_{CDJ} - peso do braço CDJ, L_{CDJ} - distância do centro de massa do braço CDJ ao CIR, P_{ADE} - peso do braço ADE, L_{ADE} - distância do centro de massa do braço ADE ao CIR, P_{AB} - peso do braço AB e L_{AB} - distância do centro de massa do braço AB ao CIR.

Através da análise da equação de equilíbrio de momentos, torna-se possível determinar a incógnita N , correspondente à força que o cilindro elétrico deverá exercer. Para garantir um dimensionamento mais conservador, tendo em conta a existência de massas não consideradas diretamente na equação, como parafusos, rolamentos e outros componentes de menor dimensão, foi aplicado um coeficiente de segurança de 2. Com base neste pressuposto, a força necessária para elevar o sistema resultou em 1254,7 N. Contudo, este valor corresponde a uma situação ideal, na qual a totalidade da força aplicada se converte em força útil. Em termos práticos, trata-se de uma força perfeitamente perpendicular ao vetor da distância entre o ponto de atuação e o CIR, conforme ilustrado na Figura 81. No entanto, o cilindro elétrico encontra-se desviado desse vetor perpendicular, o que implica um acréscimo na força necessária. Assim, o valor da força requerida eleva-se para 1309,3 N. De forma a aumentar a segurança no dimensionamento foi aplicado um fator de segurança igual a 2, o que resultou na força considerada para 2618,6 N.

Com este valor, foi consultado o catálogo da SMC (Anexo A) com o objetivo de selecionar um cilindro elétrico capaz de suportar a carga exigida pelo acompanhador. A análise do catálogo permitiu concluir que o modelo mais adequado é o LEY100. Verificou-se também que, dentro deste modelo, apenas as versões com passos de 2 mm e 3,3 mm possuem capacidade suficiente para suportar a carga em questão. O modelo com passo de 10 mm foi, por isso, excluído, conforme ilustrado na Figura 83.

Model			LEY100□L	LEY100□D	LEY100□B
Stroke [mm]			100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000		
Work load [kg]		Horizontal ^{*1}	1200	1200	240
		Vertical	200	185	80
Rated force [N]/Set value ^{*2} : 25 % ^{*3}			5500	3300	1100
Max. force [N]/Set value ^{*2} : 55 % ^{*3} ^{*4}			12000	7200	2600
Max. speed [mm/s] ^{*5}	Stroke range	Up to 500	100	167	500
		600	74	123	370
		700	57	95	285
		800	45	75	225
		900	36	60	180
		1000	30	50	150
Pushing speed [mm/s] ^{*6}			20 or less		
Max. acceleration/deceleration [mm/s ²] ^{*7}			2000	3000	
Positioning repeatability [mm]			0.02		
Lost motion [mm] ^{*8}			0.10		
Screw lead [mm]			10		
Reduction ratio			1/5	1/3	—
Lead [mm]			2	3.3	10

Figura 83 - Catálogo do modelo do cilindro elétrico LEY100 [83].

O valor do *work load* foi determinado com base no momento de inércia do mecanismo rotativo e na distância ao CIR. Esta grandeza, expressa em kg, representa a massa equivalente que o cilindro elétrico deverá movimentar e controlar dinamicamente. O *work load* contempla todos os componentes que participam diretamente no movimento do mecanismo, nomeadamente os braços, a mesa de apoio à chapa e todos os elementos acoplados a estas estruturas. Não se considera, para este efeito, a massa da chapa, uma vez que se assume que esta acompanhará naturalmente o movimento imposto pela própria quinagem. O cálculo do *work load* baseia-se na definição de momento de inércia de um sistema, conforme indicado na equação seguinte.

$$I = mr^2 \quad (27)$$

Com: I - momento de inércia, m - massa de um corpo que gira em torno de um eixo e r - distância entre o corpo e o eixo. No âmbito do dimensionamento do cilindro elétrico, torna-se necessário determinar a massa reduzida equivalente de todo o sistema no ponto de aplicação

da força, ou seja, na extremidade da haste do cilindro. Este valor corresponde ao *work load*, entendido como a massa que o cilindro deverá controlar ao longo de todo o movimento do acompanhador, tanto na fase de subida como na descida, bem como no momento de paragem.

Para o cálculo do *work load* O momento de inércia de todos os componentes que realizam movimento foi efetuado a partir do SolidWorks®. Com todas as peças definidas geometricamente e com o devido material associado a cada uma delas é possível determinar o momento de inércia em relação ao CIR, que resulta num valor de 37,26 kg. m². Já o r é obtido pela distância do ponto de aplicação ao CIR, igual a 465 mm. Deste modo, é possível executar o cálculo do *work load* de forma a obter 172,3 kg. De acordo com os dados disponíveis no catálogo do modelo LEY100 (Figura 83), conclui-se que apenas as versões com passos de 2 mm e 3,3 mm apresentam capacidade superior à necessária, e satisfazem os requisitos do sistema.

Para o cálculo do curso necessário do cilindro, considerou-se o movimento do acompanhador entre as posições de 0° e 60°. Como ilustrado na Figura 34, a trajetória da ponta do mecanismo é circular, porém a haste do cilindro executa um movimento aproximadamente linear, tangente à trajetória circular do acompanhador. Consequentemente, o curso do cilindro não corresponde ao comprimento do arco descrito, mas sim à distância retilínea entre os pontos inicial e final da trajetória. Esta distância foi obtida através da construção de um triângulo definido pelos pontos inicial e final do movimento e pelo CIR. Com o ângulo entre os lados (60°) e os comprimentos dos dois lados adjacentes conhecidos, correspondentes à distância do ponto de aplicação ao CIR, foi possível aplicar a lei dos cossenos e determinar o curso aproximado do cilindro, estimado em cerca de 465 mm.

De acordo com o dimensionamento do *work load*, os únicos passos admissíveis para o cilindro elétrico são 2 mm e 3,3 mm. No entanto, para um curso máximo de 500 mm, o passo de 2 mm permite uma velocidade máxima de 100 mm/s, enquanto o passo de 3,3 mm permite atingir 167 mm/s. Torna-se, por isso, necessário proceder à análise da velocidade de acionamento exigida, para selecionar o passo mais adequado ao funcionamento do acompanhador.

Para este efeito, foi determinado o valor da velocidade angular do acompanhador, com base numa relação geométrica entre a chapa e a matriz da quinadora. A Figura 84 apresenta esta relação, onde se representa a amarelo a velocidade de quinagem (V_q), aplicada pela quinadora, e a laranja a velocidade linear resultante na extremidade da chapa (V_{aq}), que corresponde ao movimento do acompanhador. A velocidade da chapa resulta da decomposição do vetor de velocidade de quinagem segundo o ângulo β , o qual corresponde ao ângulo formado pela chapa em relação ao eixo horizontal. Através desta decomposição, obtém-se o valor da velocidade linear da extremidade da chapa, correspondente ao ponto de contacto entre o punção e a peça durante o processo de quinagem.

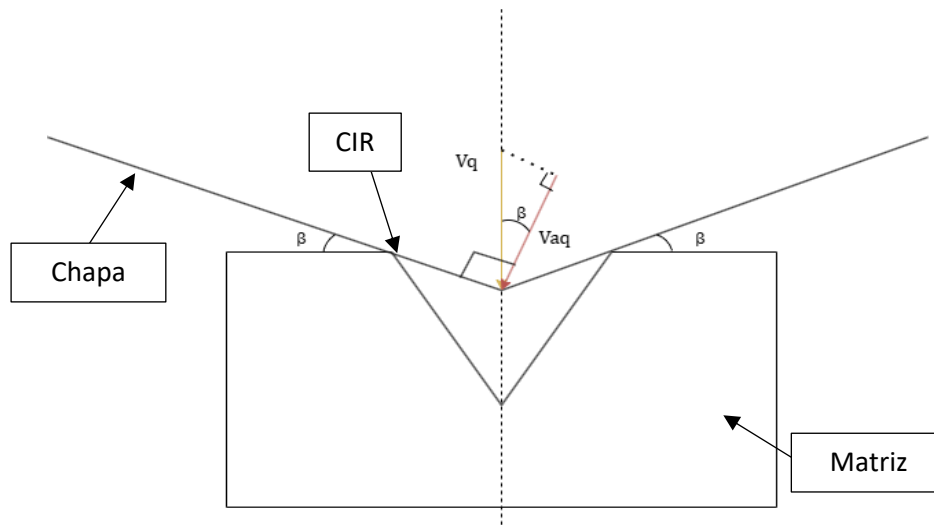


Figura 84 - Esquema da velocidade do acompanhador.

Desta forma, a velocidade angular é dada pela seguinte equação:

$$V_{aq} = \cos \beta \times V_q \quad (28)$$

Com: V_{aq} - velocidade linear da chapa, β - ângulo da chapa/acompanhador e V_q - velocidade de quinagem. Para o cálculo da velocidade angular da chapa, torna-se necessário conhecer o raio entre o ponto de aplicação da velocidade linear e o centro de rotação. Este raio pode ser determinado com base no estudo geométrico apresentado na Figura 85, onde se encontra destacado a vermelho.

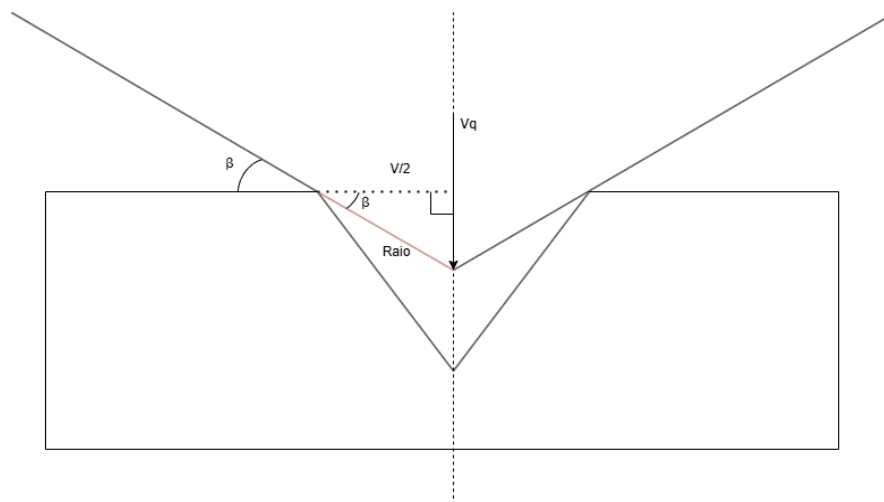


Figura 85 - Raio do ponto de contacto do punção com a chapa até ao CIR.

A análise da Figura 85 permite concluir que o raio pretendido se encontra relacionado com a abertura da matriz, representada por V , de acordo com a seguinte equação:

$$r = \frac{\frac{V}{2}}{\cos \beta} \quad (29)$$

Com: r - raio, V - abertura da matriz e β - ângulo do chapa/acompanhador. Para determinar a velocidade angular pretendida, recorreu-se à equação que estabelece a relação entre a velocidade angular e a velocidade linear, utilizando o raio anteriormente calculado. Assim, obtém-se:

$$w = \frac{V_{aq}}{r} \Leftrightarrow w = \frac{\cos \beta \times V_q}{\frac{V}{2 \cos \beta}} \Leftrightarrow w = \frac{2V_q \times (\cos \beta)^2}{V} \quad (30)$$

Com a equação definida, torna-se possível calcular a velocidade angular da chapa e, por conseguinte, do acompanhador, a partir da velocidade de quinagem, do ângulo de rotação do acompanhador e da abertura da matriz. A velocidade máxima de quinagem (V_q) permitida para quinadoras corresponde a 10 mm/s. A abertura da matriz (V) considerada neste estudo foi fixada em 20 mm, uma vez que se trata de uma das mais utilizadas na indústria de quinagem. Assim, obtém-se a equação da velocidade angular do acompanhador em função do ângulo descrito por este.

Posteriormente, para o dimensionamento do acionador, tornou-se necessário determinar a velocidade linear que este deve atingir para fornecer o movimento requerido ao acompanhador. A velocidade do acionador encontra-se relacionada com a velocidade angular do acompanhador através da seguinte equação:

$$V_a = r_{CIR} \times w \quad (31)$$

Com: V_a - velocidade do acionador, r_{CIR} - raio do ponto de acionamento até ao CIR e w - velocidade angular da chapa/acompanhador. Através da equação anteriormente apresentada, foi possível determinar os valores da velocidade do acionador da Tabela 15. No entanto, ao analisar o catálogo do modelo LEY100 (Figura 83), verifica-se que as velocidades máximas admissíveis para um curso de 500 mm são de 100 mm/s para o passo de 2 mm e de 167 mm/s para o passo de 3,3 mm. Conforme a Tabela 15, a velocidade do acionador excede estes limites. Por este motivo, foi selecionado o passo de 3,3 mm, uma vez que permite a maior velocidade entre as duas opções disponíveis. Apesar de os valores calculados ultrapassarem a velocidade máxima estipulada no catálogo, é possível limitar a velocidade de funcionamento do acionador a 167 mm/s, conforme indicado na última coluna da Tabela 15.

O sistema de acionamento do acompanhador de quinagem foi concebido com base num cilindro elétrico da marca SMC, modelo LEY100, como visto anteriormente. A fonte elétrica deste atuador será assegurada por um motor da Schneider Electric, acoplado ao cilindro através da flange de motor definida no catálogo da SMC. A orientação do motor em relação ao cilindro revela-se determinante devido às limitações de espaço disponíveis na zona de instalação do cilindro. Como o atuador do acompanhador deve exercer uma força praticamente vertical, o cilindro será montado na vertical. Para esta configuração, o catálogo da SMC disponibiliza duas opções (Figura 86): a montagem em linha, na qual o motor se posiciona diretamente na base do cilindro, com os eixos de ambos os elementos colineares; e a montagem em paralelo, na qual o motor se encontra disposto lateralmente, com o seu eixo paralelo ao do cilindro.

Tabela 15 - Dimensionamento da velocidade do cilindro.

Ângulo do acompanhador (°)	Velocidade angular do acompanhador (rad/s)	Velocidade do acionador (mm/s)	Velocidade do acionador ajustada à velocidade do acionador máxima (mm/s)
0	0,0	0,0	0,0
5	0,2	86,9	86,9
10	0,3	122,9	122,9
15	0,3	150,5	150,5
20	0,4	173,8	167,0
25	0,4	194,3	167,0
30	0,5	212,8	167,0
35	0,5	229,9	167,0
40	0,5	245,7	167,0
45	0,5	232,5	167,0
50	0,4	192,1	167,0
55	0,3	153,0	153,0
60	0,3	116,3	116,3

Dado que o acompanhador foi concebido para quinadoras do modelo PA, a distância entre o topo da matriz e o solo encontra-se condicionada pela estrutura do avental fixo, que apresenta um valor máximo do topo da matriz ao solo de 979 mm. Deste modo, a necessidade de manter a altura total do acompanhador abaixo de um limite fixado pelo avental fixo tornou a configuração em linha inviável. Assim, foi selecionada a montagem em paralelo, que permite deslocar o motor lateralmente e diminuir a altura disponível para o curso do cilindro.

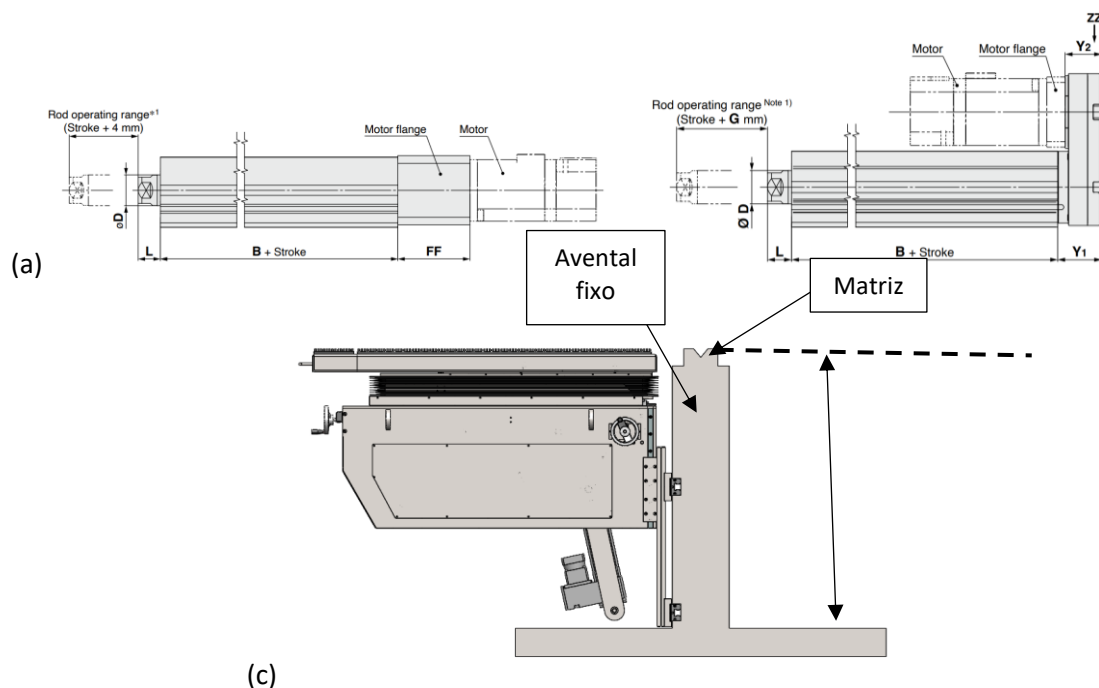


Figura 86 - Diferentes tipos de montagem do motor: em linha (a), em paralelo (b) e distância do topo da matriz ao solo (c).

Relativamente ao modo de fixação do cilindro, foram analisadas as opções disponíveis. Uma das possibilidades seria a utilização de *foot bracket*, que consiste em pés de fixação, acoplados à base e ao topo do cilindro, que se fixam à estrutura com dois parafusos. No entanto, esta solução mostrou-se desvantajosa para a aplicação em causa, uma vez que, durante a ascensão da haste, o cilindro necessita de liberdade de rotação, o que não é viável com a configuração *foot bracket*. A alternativa adotada foi a configuração *double clevis*, que se baseia na utilização de um veio transversal na base do cilindro, suportado por dois apoios paralelos à direção vertical. Esta solução permite o encaixe do cilindro entre os braços do mecanismo, os quais estão por sua vez fixos à estrutura principal do acompanhador. Esta também permite a rotação do sistema sobre o veio do *double clevis*, o que vai ser necessário para o funcionamento do cilindro, como previamente mencionado. Esta configuração oferece uma fixação robusta e compatível com o espaço disponível, de modo a ser a única viável para o sistema desenvolvido.

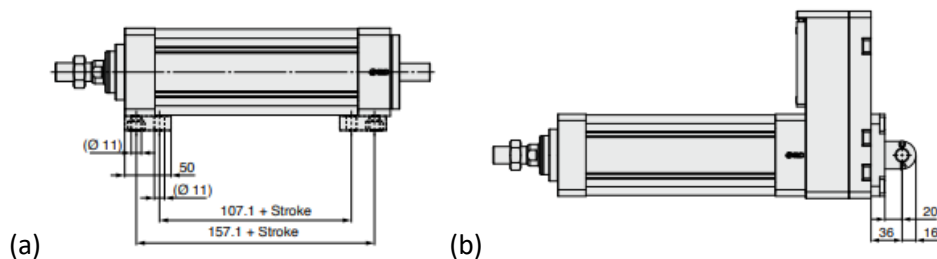


Figura 87 - Diferentes tipos de fixação do cilindro: *foot bracket* (a), *double clevis* (b).

Os braços de suporte ligam o cilindro à estrutura fixa do acompanhador, o que permite estabilidade ao cilindro durante o seu funcionamento. O extremo da haste do cilindro elétrico liga-se ao veio de acionamento do mecanismo por intermédio de uma rótula, o que permite a orientação angular da haste durante o seu curso. Esta solução é essencial, uma vez que a trajetória do ponto de aplicação da força não é retilínea, mas sim um arco de circunferência centrado no CIR do acompanhador. Assim, caso o cilindro estivesse rigidamente alinhado e sem possibilidade de oscilação, a incongruência entre a sua trajetória linear e a trajetória curvilínea do mecanismo provocaria esforços indesejados na haste e na ligação ao veio de acionamento, que comprometeria o desempenho e a durabilidade do sistema. Deste modo, o cilindro elétrico só apresenta dois graus de liberdade, designadamente um grau de liberdade de rotação no veio fixo ao *double clevis* e outro grau de liberdade de rotação na rótula do cilindro.

De acordo com as especificações apresentadas no catálogo da SMC, o cilindro elétrico LEY100 requer a utilização de um servomotor elétrico com potência de 750 W e um corpo com 80 mm de largura, como ilustrado na Figura 88. Face a este requisito, foi selecionado o modelo BCH da Schneider Electric, com as seguintes características: 80 mm de largura, 750 W de potência, grau de proteção IP65 e equipado com chaveta. Os motores da série BCH foram concebidos para aplicações de controlo de movimento que exigem elevada precisão, controlo rigoroso do binário, altas velocidades e sincronização eficiente com sistemas de acionamento eletrónico. A presença da chaveta no veio do motor assegura a transmissão fiável do movimento rotativo, evitando qualquer deslizamento entre o veio e o cubo, mesmo sob cargas elevadas, ao não depender exclusivamente da força de aperto para garantir a união.

Electric specifications	Motor output [W]/Size [mm]	750/□80
	Motor type	AC servo motor (200 VAC)
	Encoder	Absolute 22-bit encoder (Resolution: 4194304 p/rev) Absolute 18-bit encoder (Resolution: 262144 p/rev) (For LECSC-T□ only)
	Power ^{※10}	Max. power 1100

Figura 88 - Especificações da compatibilidade do motor elétrico com o cilindro SMC ([83]).

Com o objetivo de garantir a ausência de interferências mecânicas entre o cilindro e os restantes componentes móveis da estrutura, foi efetuado um estudo cinemático no *software* GIM. Este estudo analisou a possibilidade de colisão entre a trajetória do cilindro e a trajetória dos braços e dos veios durante a rotação do acompanhador. A verificação teve em conta variáveis como a geometria e comprimento dos braços, a posição do ponto de aplicação da força e o ângulo do cilindro em relação à horizontal. O desenvolvimento desta análise implicou um processo iterativo, sujeito às restrições impostas pela cadeia cinemática e pela estrutura, conforme nos capítulos 3.8.5 e 3.8.4 respetivamente. Após a definição do mecanismo final, com todos os comprimentos e geometrias devidamente ajustados, foi realizada a simulação da rotação total de 60° do acompanhador no *software* GIM. Como se demonstra na Figura 89, não se verificou qualquer colisão entre os elementos móveis, que confirma a viabilidade funcional e geométrica do sistema desenvolvido.

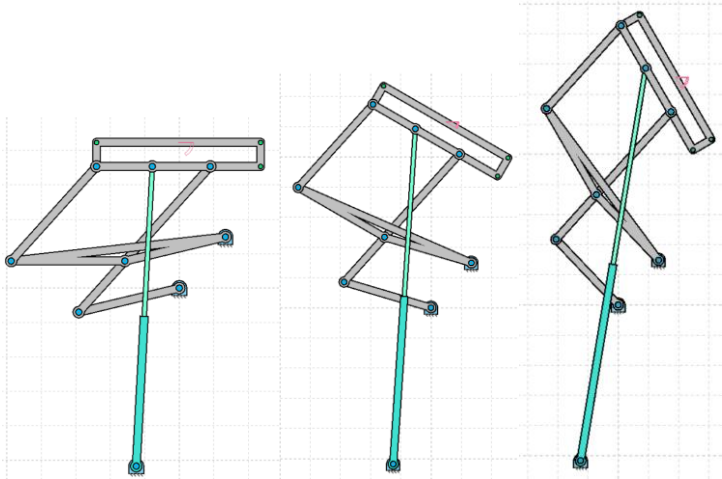


Figura 89 - Diferentes posições do acompanhador: 0° (a), 30° (b) e 60° (c).

Através da análise da Figura 89, conclui-se que as posições mais críticas, em termos de proximidade entre o cilindro e os braços do mecanismo, ocorrem para ângulos de 0° e 60°. Para assegurar a inexistência de colisões entre o cilindro e os restantes componentes, foi realizado um esboço no SolidWorks® correspondente a estas duas posições. Este esboço incluiu a largura efetiva do corpo do cilindro e o diâmetro do veio, conforme ilustrado na Figura 90. A introdução das dimensões reais dos componentes, em substituição das suas representações geométricas simplificadas, permitiu validar a ausência de interferências físicas entre o cilindro e os braços ao longo de todo o movimento.

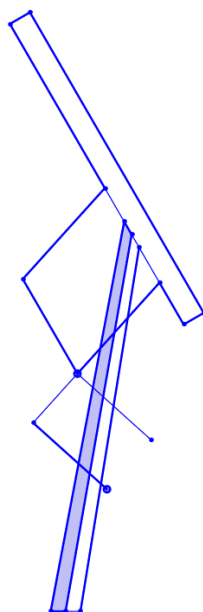


Figura 90 - *Sketch* do acompanhador em diferentes ângulos: 0° (a) e 60° (b).

3.8.7. Materiais e processos de fabrico

A construção do acompanhador de quinagem contempla a aplicação de diversos materiais e processos de fabrico, seleccionados de acordo com as exigências funcionais, estruturais e económicas do equipamento. O material predominante na estrutura é o aço AISI 1020, utilizado na maioria dos componentes estruturais, como os braços e as chapas de suporte. As propriedades deste aço encontram-se detalhadas na Tabela 16.

Tabela 16 - Propriedades do aço AISI 1020 [84].

Propriedade	Valor
Massa volúmica	7.87 g/cm ³
Dureza, Brinell	121
Dureza, Knoop	140
Dureza, Rockwell B	68
Dureza, Vickers	126
Resistência à tração, máxima	420 MPa
Limite elástico à tração	350 MPa
Alongamento na rutura	15 %
Redução da área	40 %
Módulo de elasticidade	186 GPa
Módulo de compressibilidade	148 GPa
Coefficiente de Poisson	0.29
Maquinabilidade	65 %
Módulo de cisalhamento	72.0 GPa

O aço AISI 1020 apresenta resistência mecânica adequada, boa maquinabilidade e elevada ductilidade, o que o torna apropriado para operações de quinagem, que constituem um processo amplamente utilizado nos componentes do acompanhador. Este material possui ainda uma excelente soldabilidade, o que representa uma mais-valia no contexto de ligações estruturais permanentes. Para além destas vantagens técnicas, este material destaca-se também pela sua boa relação custo/benefício, o que o torna numa escolha eficiente para aplicações industriais. Sempre que se pretenda aumentar a dureza superficial dos componentes sujeitos a impacto ou contacto com o exterior, é possível submeter o material a tratamento térmico por têmpera. Para preservar o aspeto visual do equipamento, os componentes com exposição direta ao ambiente podem ser revestidos com tinta industrial adequada, que assegura a proteção contra a corrosão. Outro material utilizado na construção do acompanhador é o poliuretano (PUR), aplicado nos dois suportes que integram o sistema *fail-safe* do mecanismo de braços. Outros materiais presentes no acompanhador correspondem a componentes adquiridos externamente e não fabricados internamente, como as escovas, os patins, as guias lineares e outros elementos normalizados.

No que respeita aos processos de fabrico, recorreu-se a operações convencionais amplamente disseminadas na indústria metalomecânica, nomeadamente:

- **Quinagem**

Processo de deformação controlada de chapas metálicas com o objetivo de obter uma geometria definida. Este processo foi aplicado em suportes entre braços, na mesa de apoio à chapa e no respetivo suporte (Figura 91). A quinagem assume especial relevância na conformação da mesa, atendendo às suas grandes dimensões. Dado que este processo ocorre geralmente após outras operações, torna-se necessário garantir rigor e cuidado para evitar deformações indesejadas.

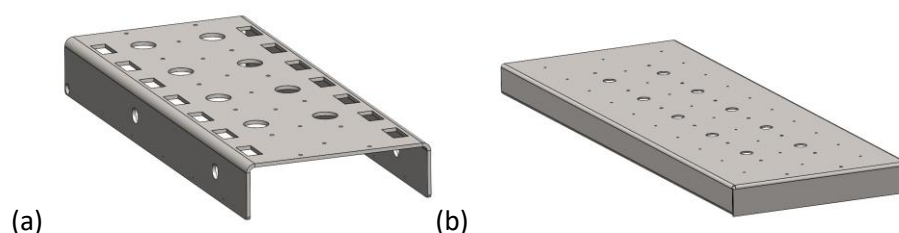


Figura 91 - Componentes quinados: suporte da mesa (a) e mesa (b).

- **Furação**

Processo essencial para a criação de orifícios e pontos de ligação aparafusada, presente em praticamente todos os componentes do acompanhador, o que leva à sua elevada frequência no fabrico dos componentes.

- **Corte**

Operação de remoção de material com o intuito de gerar geometrias específicas, perfurações para veios ou entalhes para acoplamentos. Este processo foi aplicado em peças críticas como as H-0012, H-0013, H-0027, H-0031 e H-0008 (Figura 92).

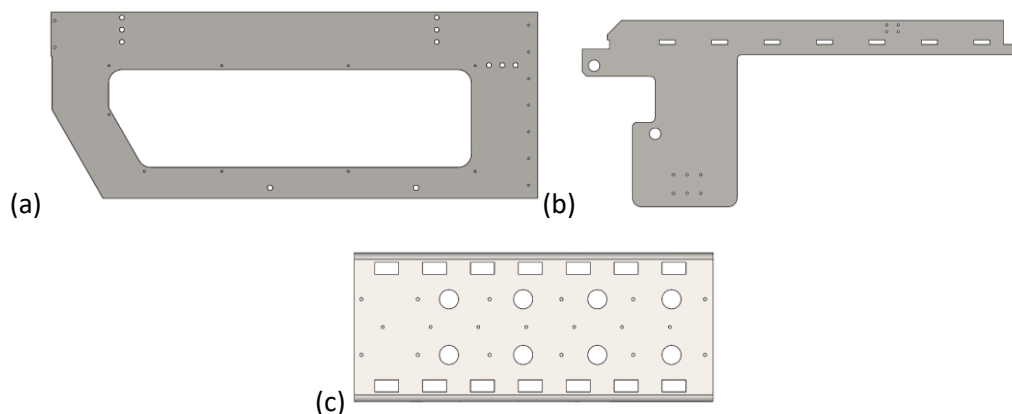


Figura 92 - Componentes sujeitos a corte: H-0012 (a), H-0027 (b) e H-0008 (c).

- **Maquinação**

Operação destinada à obtenção de geometrias com tolerâncias apertadas ou entalhes específicos. A maquinação foi utilizada, como se observa na Figura 93, nos componentes H-0020 e H-0016 para a criação de alojamentos para rolamentos de contacto angular. A fresagem foi também aplicada em superfícies que exigem maior rigor dimensional.

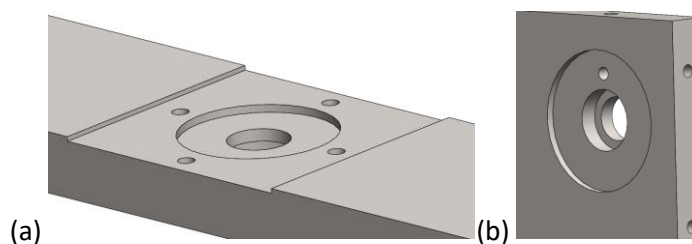


Figura 93 - Componentes maquinados: H-0020 (a) e H-0016 (b).

- **Torneamento**

O torneamento é um processo de fabrico por remoção de material que utiliza uma ferramenta de corte, normalmente em contacto com uma peça em rotação, para criar superfícies cilíndricas, cónicas ou outras formas axissimétricas. Este processo é utilizado na preparação de veios (Figura 94), com especial atenção ao cumprimento das tolerâncias exigidas pela interface com rolamentos. Todos os veios do acompanhador foram sujeitos a esta operação.

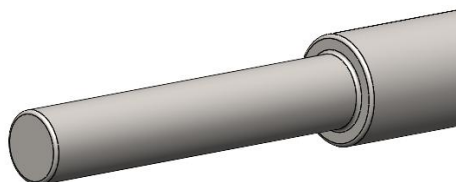


Figura 94 - Componente torneado.

- **Rosqueamento**

O rosqueamento consiste na criação de filetes helicoidais, também designados por roscas, em superfícies cilíndricas internas ou externas, com o objetivo de permitir a união de componentes através de elementos de fixação como parafusos ou veios roscados. Foi realizado

rosqueamento externo em dois veios, um para o sistema de ajuste em Z e outro para o sistema em X, bem como rosqueamento interno em peças que necessitam alojamento de parafuso.

- **Soldadura**

Processo de união permanente entre componentes, utilizado quando não é viável recorrer a ligações aparafusadas ou se pretende uma distribuição mais uniforme das tensões. Destacam-se, entre outros exemplos, a soldadura de casquilhos (Figura 95) aos braços e a união do componente H-0025 às peças H-0031 e H-0027. A qualidade da execução dos cordões de soldadura deve ser garantida para atender às elevadas cargas estruturais envolvidas.

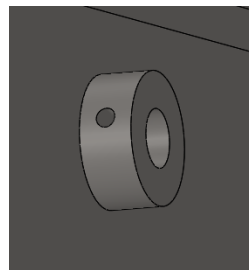


Figura 95 - Componentes soldados.

3.8.8. Automação e controlo

A automação e o controlo representam os pilares fundamentais dos sistemas industriais modernos, pois permitem a gestão eficiente, precisa e segura de operações mecânicas e eletromecânicas. A automação consiste na capacidade de um sistema executar tarefas previamente definidas sem necessidade de intervenção humana constante, enquanto o controlo corresponde ao conjunto de técnicas e dispositivos que regulam o funcionamento do sistema em tempo real e asseguram que o comportamento desejado é alcançado [85]. Ambos os conceitos estão intrinsecamente ligados e constituem a base do funcionamento eficiente de equipamentos automatizados, como é o caso do acompanhador de quinagem.

A importância da automação e do controlo reside na sua capacidade de melhorar o desempenho global do sistema, reduzir erros operacionais e aumentar a produtividade [85]. No contexto do acompanhador, estes elementos tornam possível garantir o acompanhamento adequado da chapa durante o processo de quinagem, através da monitorização constante da posição e da aplicação precisa do movimento. O controlo permite ainda corrigir desvios em tempo real, que asseguram que a trajetória prevista é cumprida, mesmo perante variações nas condições de operação. Assim, a integração de sistemas de automação e controlo revela-se essencial para o funcionamento fiável, seguro e repetível do acompanhador.

Entre as principais características da automação e do controlo destacam-se a capacidade de operação contínua, a elevada precisão de posicionamento e a possibilidade de integrar sensores e atuadores num sistema centralizado. As vantagens incluem a redução do erro humano, a melhoria da qualidade do produto, a otimização do tempo de ciclo e o aumento da segurança no processo. No entanto, também existem desvantagens, nomeadamente o custo da implementação, a complexidade dos sistemas de controlo e a necessidade de manutenção.

Apesar destes desafios, a aplicação de sistemas automatizados constitui uma mais-valia para processos industriais que exigem elevada precisão, consistência e eficiência [85].

Com base na arquitetura funcional definida para o sistema, a automação e o controlo do acompanhador de quinagem foram integrados diretamente no *software* da própria quinadora. Esta abordagem permite garantir uma correspondência exata entre a operação de quinagem e o movimento do acompanhador, que evita atrasos, desvios ou falhas na sincronização. Dado que a deformação da chapa implica a sua elevação durante o processo, o controlo da quinadora está programado para acionar o movimento ascendente do acompanhador assim que o punção inicia a penetração na matriz de quinagem. Este sincronismo assegura que a chapa permanece suportada, o que minimiza o risco de flexões indesejadas ou perda de precisão no perfil final.

O controlo do movimento do acompanhador baseia-se em parâmetros obtidos diretamente do processo de quinagem. Ao definir, no painel de controlo, o tipo de chapa e o ângulo pretendido de quinagem, o sistema calcula automaticamente o ângulo de rotação necessário para o acompanhador, bem como a respetiva velocidade. Estes cálculos têm em consideração a geometria do equipamento e as propriedades da chapa, de modo a permitir uma adaptação automática e precisa às condições impostas pelo processo. A comunicação entre a quinadora e o acompanhador é assegurada por um sistema de controlo partilhado, o que permite uma resposta imediata e coordenada entre os dois sistemas.

Apesar da automatização do processo, o sistema oferece ao operador a possibilidade de ajustar manualmente os parâmetros de acompanhamento. Através do painel de controlo da quinadora, normalmente localizado no lado esquerdo da máquina, o utilizador pode modificar o ângulo de acompanhamento, a velocidade de subida ou outros parâmetros operacionais, consoante as necessidades específicas da peça em fabrico. Esta flexibilidade revela-se especialmente útil em situações em que é necessário realizar quinagens não convencionais ou quando se pretende testar novas configurações. O facto de a interface da quinadora e do acompanhador se apresentar num único sistema facilita a interação com o equipamento, reduz o tempo de operação e promove um ambiente de trabalho mais eficiente e intuitivo.

3.8.9. Dispositivos de segurança

A utilização de dispositivos de segurança em sistemas de máquinas, como o acompanhador de quinagem, assume um papel fundamental na prevenção de acidentes e na proteção dos operadores. Estes dispositivos visam garantir que o funcionamento da máquina decorre de forma segura, conforme com as normas de segurança vigentes, de modo a evitar situações perigosas resultantes de falhas humanas, erros de operação ou avarias dos sistemas mecânicos e elétricos. Desta forma, é essencial que qualquer máquina disponha de um sistema de segurança funcional, capaz de prevenir o movimento perigoso sempre que uma condição insegura seja detetada. Neste contexto, os sistemas de controlo relacionados com a segurança podem incluir sensores, unidades lógicas de processamento e atuadores interligados para garantir o bloqueio do movimento ou o desligar do sistema sempre que necessário [86].

As principais características dos dispositivos de segurança incluem a capacidade de operação independente dos sistemas de controlo principais, a fiabilidade em condições adversas e a

facilidade de detetar falhas. As vantagens da sua aplicação passam pela redução significativa do risco de acidentes, aumento da confiança dos operadores e cumprimento da legislação aplicável. Entre as principais desvantagens encontram-se o custo adicional da implementação de sistemas de segurança complexos, a necessidade de manutenção e, em alguns casos, o impacto no tempo de ciclo da máquina devido às medidas de proteção adotadas [86].

No caso do acompanhador de quinagem desenvolvido neste projeto, os dispositivos de segurança físicos assumem um papel preventivo na proteção dos componentes e na salvaguarda do ambiente de operação. A estrutura exterior do equipamento encontra-se revestida por chapas de proteção (Figura 96) que delimitam claramente a zona interna da máquina em relação ao meio envolvente. Estas chapas, de espessura reduzida e sem função estrutural, protegem os elementos internos contra agentes externos, como poeiras ou pequenas partículas metálicas, que poderiam comprometer o bom funcionamento do sistema. A sua função consiste exclusivamente em criar uma barreira física entre o mecanismo interno e o exterior, de modo a assegurar um ambiente de operação mais limpo e seguro.

Complementarmente, foram instaladas chapas de proteção sobre as guias lineares do sistema de ajuste em X, de modo a preservar a integridade destes elementos e a prolongar a eficácia da lubrificação. As guias lineares, ao constituírem componentes críticos para o movimento do acompanhador nos eixo de ajuste em X, devem operar sem interferências provocadas por contaminação ou desgaste prematuro. Além disso, o acompanhador incorpora um fole que acompanha todo o movimento do mecanismo de braços. Este fole protege o conjunto de articulações, rolamentos e ligações do mecanismo durante a sua trajetória, que previne o depósito de partículas, o desgaste prematuro e a perda de desempenho, fatores que poderiam comprometer a segurança e a fiabilidade do equipamento a longo prazo.

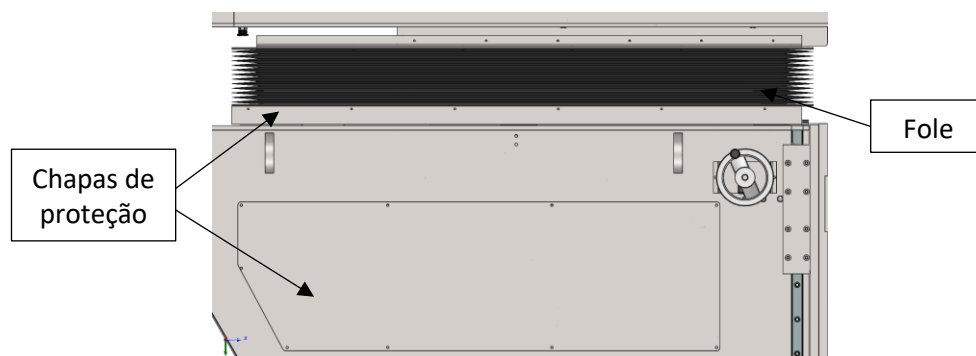


Figura 96 - Dispositivos de segurança.

Relativamente ao sistema de controlo, o acompanhador encontra-se equipado com funcionalidades específicas de segurança operacional. O painel de controlo dispõe de um botão de paragem de emergência dedicado exclusivamente ao acompanhador, permitindo interromper imediatamente o seu funcionamento em caso de avaria ou de comportamento anómalo durante o processo de quinagem. Este botão garante ao operador uma via rápida de atuação em situações imprevistas, o que reforça a segurança durante a operação. Adicionalmente, o sistema encontra-se programado para interromper automaticamente o movimento do acompanhador sempre que a quinadora entra em modo de paragem de emergência. Esta interligação entre os sistemas de segurança de ambos os equipamentos

assegura uma resposta coordenada e imediata a qualquer falha, minimizando o risco de danos mecânicos ou de acidentes com o operador.

3.8.10. Plano de manutenção

A manutenção constitui um pilar fundamental na gestão de equipamentos industriais, que a torna essencial para garantir a fiabilidade, segurança e longevidade das máquinas. Um plano de manutenção bem estruturado permite preservar as condições operacionais ideais dos sistemas mecânicos, prevenir falhas inesperadas e reduzir os tempos de paragem não planeados. Ao assegurar o funcionamento contínuo e eficiente dos equipamentos, a manutenção contribui diretamente para a produtividade e para a qualidade dos processos industriais. Na Tabela 17 apresenta-se o plano de manutenção do acompanhador de quinagem.

Tabela 17 - Plano de manutenção do acompanhador de quinagem.

Tipo	Tarefa	Método	Ferramentas e Materiais	Periodicidade
Inspeção	Verificação do estado do lubrificante	Visual	-	1000 h de operação ou 6 meses
Inspeção	Avaliação geral das condições dos rolamentos	Visual	-	1000 h de operação ou 6 meses
Inspeção	Análise das guias lineares e verificação de necessidade de lubrificação	Visual	-	1000 h de operação ou 6 meses
Inspeção	Verificação do aperto dos parafusos	Visual	Chave de aperto	1000 h de operação ou 6 meses
Inspeção	Verificação do estado das escovas e esferas deslizantes no topo da mesa	Visual	-	1000 h de operação ou 6 meses
Inspeção	Inspeção dos sistemas de ajuste (rolamentos, veios, redutor)	Visual	-	1000 h de operação ou 6 meses
Inspeção	Verificação do estado da cablagem	Visual	-	1000 h de operação ou 6 meses
Manutenção preventiva	Lubrificação das chumaceiras	Manual	Lubrificante adequado	2000 h de operação ou 12 meses
Manutenção preventiva	Lubrificação dos rolamentos	Manual	Lubrificante adequado	2000 h de operação ou 12 meses
Manutenção preventiva	Reaperto sistemático de todos os parafusos	Manual	Chave de aperto	12 meses

3.8.11. Análise de custos

O presente capítulo aborda os custos associados aos materiais e às operações necessárias para a produção do acompanhador de quinagem.

De acordo com os critérios internos da empresa para a estimativa de custos, a metodologia adotada para a análise económica do acompanhador baseou-se no custo do equipamento atualmente utilizado. Para tal, foi considerado o valor do acompanhador em uso, excluindo o respetivo sistema de acionamento, e dividiu-se este valor pela massa total da estrutura, igualmente sem o sistema de acionamento.

O sistema atualmente em operação recorre a um redutor de grande dimensão, conforme descrito no capítulo 3.3, enquanto a solução proposta neste projeto incorpora um cilindro elétrico. Tendo em conta que ambos os componentes possuem massas significativas, mas substancialmente distintas, optou-se por eliminar a influência do sistema de acionamento no cálculo da razão custo/massa. Através desta abordagem, obteve-se uma razão de 17,9 €/kg.

Com recurso ao *software* SolidWorks®, foi determinada a massa do novo acompanhador, excluindo o cilindro elétrico, que resulta num valor de aproximadamente 297 kg. Multiplicando este valor pela razão anteriormente calculada, estimou-se o custo da estrutura em 5.316,30 €.

A exclusão do sistema de acionamento do equipamento atual, e a substituição pelo sistema de acionamento deste projeto, justifica-se pelo facto de os sistemas de acionamento entre os dois equipamentos apresentarem diferenças substanciais, tanto em termos de tecnologia como de massa. O preço da estrutura calculado desta forma engloba os processos que foram utilizados para realizar as peças do acompanhador.

Embora esta metodologia constitua uma aproximação, apresenta um grau de fiabilidade elevado. Ambos os acompanhadores são constituídos pelo mesmo tipo de aço, são projetados para suportar cargas equivalentes e incluem rolamentos nos respetivos nós dos braços, cujas dimensões e massas são semelhantes. As mesas de apoio à chapa apresentam também dimensões comparáveis, e ambos os equipamentos recorrem a acessórios idênticos, como escovas e esferas deslizantes. Apesar das diferenças nos mecanismos de ajuste, o número de rolamentos e a presença de redutores mantêm-se nos dois sistemas. Além disso, os processos de fabrico aplicados aos materiais são idênticos em ambos os acompanhadores. Estas semelhanças estruturais e funcionais reforçam a validade da abordagem adotada, que permite uma estimativa credível dos custos de fabrico.

Complementarmente, foi contactado o representante comercial da empresa SMC, fornecedora do cilindro elétrico utilizado. A solução adotada para o sistema de acionamento, composta por cilindro elétrico e sistema de fixação *double clevis*, apresenta um custo de aproximadamente 2.420,46 €. Acresce a este valor o motor elétrico da Schneider Electric, modelo BCH-80mm-750W-IP65 com chaveta, cujo custo é de 432,65 €.

Somando o custo da estrutura ao do sistema de acionamento, obteve-se uma estimativa global de aproximadamente 8.169,41 € para o custo total de fabrico do acompanhador desenvolvido nesta dissertação.

Dado que o acompanhador atualmente utilizado pela empresa não se encontra disponível para venda, em virtude das limitações identificadas no capítulo 3.4, torna-se necessário recorrer à aquisição de um equipamento externo para utilização nas quinadoras do modelo PA. A aquisição de um acompanhador externo com características equivalentes às do equipamento desenvolvido no presente dissertação apresenta um custo aproximado de 9.844,37 €. Considerando que o custo total estimado para o acompanhador projetado nesta dissertação é de 8.169,41 €, verifica-se uma diferença de 1.674,96 €, o que representa uma poupança económica relevante a favor da solução interna.

3.8.12. Comparação com produtos concorrentes

Este capítulo procede à análise comparativa entre as principais características do acompanhador desenvolvido e de soluções concorrentes já existentes no mercado. Com o objetivo de aferir o grau de competitividade do produto projetado, torna-se essencial estabelecer uma comparação com acompanhadores externos, ainda que estes apresentem diferenças significativas ao nível dos materiais utilizados, do sistema de acionamento, do mecanismo de movimentação ou da própria estrutura. Para tal, compilou-se uma a Tabela 18 que reúne, de forma sistematizada, as especificações técnicas mais relevantes de cada solução, o que permite uma avaliação objetiva e direta entre os diversos produtos.

Tabela 18 - Comparação com produtos concorrentes.

Fabricante / Modelo	Capacidade máx. (kg)	Tipo de acionamento	Ajustes (X, Y, Z)	Ângulo máx. (°)	Custo aprox. (€)
Gasparini - Sheet Lifter	Até 500	Automático	Altura + posição em X	>60	-
EnuLIFT - EnuA/1 e EnuA/2	>200 (versão dupla)	Elétrico / servo	Limitados	~60	-
Triveneta Impianti - UP	Não especificado (projetado para chapas pesadas)	Automático	Dependente da versão	>60	-
Amada - Work Follower	Não especificado	Servo / CNC	Ajustes básicos em altura	~60	-
Argesystems - F1	180	Elétrico	X e R manuais	65	9.844,37
Argesystems - F1P	400	Elétrico	X e R motorizados (opção)	65	15000
Modelo desenvolvido	96	Cilindro Elétrico	X e Z manuais	60	8 169,41

4. Conclusão

O presente capítulo tem como objetivo sintetizar o trabalho desenvolvido ao longo da dissertação. Nele são reunidas as principais conclusões obtidas e é avaliado o grau de cumprimento dos objetivos inicialmente definidos. Para além da análise crítica dos resultados alcançados, são igualmente discutidas as limitações identificadas no estudo e apresentadas possíveis linhas de investigação e desenvolvimento futuro, de forma a potenciar a evolução e a aplicação prática do equipamento projetado.

4.1. Conclusões finais

Neste capítulo apresenta-se a última fase da metodologia aplicada, correspondente à síntese dos resultados obtidos e à validação dos objetivos estabelecidos para a presente dissertação. Concluído o trabalho desenvolvido, é possível afirmar que todos os objetivos definidos inicialmente foram cumpridos com sucesso.

Foi concebido um acompanhador de quinagem capaz de reproduzir o movimento natural da chapa durante o processo de conformação e de garantir um desempenho estrutural adequado. O equipamento desenvolvido revelou tensões de Von Mises bastante inferiores ao limite de cedência do material, deslocamentos máximos reduzidos (0,15 mm) e um fator de segurança mínimo elevado, o que assegura estabilidade estrutural e fiabilidade do funcionamento.

A análise cinemática demonstrou que o movimento do acompanhador acompanha a trajetória da chapa de forma precisa, o que garante a correta execução do processo de quinagem. Esta conclusão foi reforçada pelo ensaio experimental realizado, que validou os cálculos teóricos previamente efetuados.

O dimensionamento dos componentes normalizados permitiu concluir que tanto os rolamentos como o cilindro elétrico cumprem integralmente os requisitos de vida útil e de segurança. Assim, o equipamento projetado encontra-se apto para utilização prática, embora se identifiquem margens de evolução através da implementação de melhorias futuras.

O impacto do projeto para a empresa é particularmente relevante. O equipamento desenvolvido assegura melhores funções do que o acompanhador atualmente utilizado, e também apresenta custos significativamente inferiores, o que representa uma clara vantagem competitiva em termos técnico-económicos.

No que respeita aos requisitos definidos para o projeto do acompanhador, todos foram cumpridos, tal como se apresenta na Tabela 19.

Conclusão

Tabela 19 - Avaliação do cumprimento dos requisitos.

Requisitos	Conclusão	Avaliação
O equipamento deve reproduzir o movimento natural da chapa durante o processo de quinagem	O equipamento acompanha de forma precisa o movimento da chapa	✓
A operação não deve provocar danos ou marcas visíveis na superfície da chapa	A mesa do acompanhador garante contacto adequado, sem provocar danos	✓
O funcionamento deve ser totalmente automático, sem intervenção do operador	O ciclo do equipamento decorre de forma automática, dispensando intervenção do operador	✓
O acionamento deve ser realizado através do painel de controlo da quinadora	O sistema foi concebido para total integração com o painel de controlo da quinadora	✓
A interface deve ser simples, intuitiva e acessível ao operador	O equipamento assegura operação clara e acessível	✓
A superfície da mesa deve permitir o deslizamento da chapa com baixo atrito	A mesa projetada garante o deslizamento adequado e facilita o posicionamento da chapa	✓
Os componentes sujeitos a manutenção devem ser acessíveis	O equipamento apresenta acessibilidade adequada para intervenções rápidas e eficazes	✓
O equipamento deve permitir ajustes dimensionais a diferentes geometrias de chapa	O sistema integra mecanismos de ajuste dimensional adaptáveis	✓
Os mecanismos de ajuste nas três direções (X, Y e Z) devem ser simples, robustos e fiáveis	Os sistemas de ajuste cumprem os critérios de simplicidade, robustez e fiabilidade	✓

4.2. Limitações e trabalhos futuros

O trabalho desenvolvido apresenta algumas limitações que importa destacar. Deste modo, as limitações identificadas no trabalho desenvolvido são:

- Acesso limitado ao equipamento presente na empresa, o que dificultou a recolha de dados diretos e observações complementares;
- Impossibilidade de construção de um protótipo físico, o que inviabilizou a validação prática do projeto em condições reais de operação;
- Constrangimentos relacionados com o *software*, devido à ausência de licença para o Solid Edge®, tendo sido necessário utilizar o SolidWorks®, o que originou atrasos;
- Limitação da componente experimental, uma vez que não foi possível realizar ensaios instrumentados adicionais para reforçar a validação dos modelos;
- Projeto desenvolvido especificamente para o modelo PA da empresa, o que restringe a sua aplicabilidade a outros modelos de quinadoras.

Embora o equipamento projetado esteja apto para utilização prática, identificam-se linhas de desenvolvimento futuro que poderão potenciar a sua aplicação industrial:

- Construção e ensaio de protótipos físicos do equipamento;
- Realização de ensaios instrumentados para validar experimentalmente os modelos numéricos;
- Otimização estrutural mais aprofundada, de modo a reduzir ainda mais massa e custos de fabrico;
- Refinamento do sistema de controlo, com integração em ambientes de automação e monitorização de condição, incluindo sensores e diagnóstico preditivo;
- *Benchmarking* técnico-económico com soluções comerciais de referência, visando consolidar o *business case* e orientar estratégias de industrialização.

Conclusão

Referências

- [1] A. Completo and F. Q. de Melo, "Introdução ao Projeto Mecânico, 2a edição," ed: Engebook, 2019.
- [2] C. M. Eastman, *Design for X: concurrent engineering imperatives*. Berlim, Alemanha: Springer Science & Business Media, 2012.
- [3] T.-C. Kuo, S. H. Huang, and H.-C. Zhang, "Design for manufacture and design for 'X': concepts, applications, and perspectives," *Computers & industrial engineering*, vol. 41, no. 3, pp. 241-260, 2001.
- [4] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Shigley's mechanical engineering design*. New York, EUA: McGraw-Hill New York, 2011.
- [5] V. Raja and K. J. Fernandes, *Reverse engineering: an industrial perspective*. Berlim, Alemanha: Springer Science & Business Media, 2007.
- [6] A. Kumar, P. K. Jain, and P. M. Pathak, "Reverse engineering in product manufacturing: an overview," *DAAAM international scientific book*, vol. 39, pp. 665-678, 2013.
- [7] K. Lee, *Principles of CAD/CAM/CAE Systems*. Boston, EUA: Addison-Wesley, 1999.
- [8] V. Lyashenko, S. Sotnik, and V. Manakov, "Modern CAD/CAM/CAE systems: brief overview," 2021.
- [9] M. T. H. Khan and S. Rezwana, "A review of CAD to CAE integration with a hierarchical data format (HDF)-based solution," *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, vol. 33, no. 4, pp. 248-258, 2021.
- [10] R. L. Norton, *Cam design and manufacturing handbook*. New York, EUA: Industrial Press Inc., 2002.
- [11] J. J. Uicker, J. J. Uicker Jr, G. R. Pennock, and J. E. Shigley, *Theory of machines and mechanisms*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 2023.
- [12] P. P. Teodorescu, *Mechanical Systems, Classical Models: Volume 1: Particle Mechanics*. Heidelberg, Países Baixos: Springer Netherlands, 2007.
- [13] T. Altan and A. E. Tekkaya, *Sheet Metal Forming: Fundamentals*. Novelty, EUA: ASM International, 2012.
- [14] V. Boljanovic, *Sheet Metal Forming Processes and Die Design*. New York, EUA: Industrial Press, 2014.
- [15] D. J. Thomas, "The effect of laser cutting parameters on the formability of complex phase steel," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 64, pp. 1297-1311, 2013.
- [16] E. Gustafsson, M. Oldenburg, and A. Jansson, "Design and validation of a sheet metal shearing experimental procedure," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 214, no. 11, pp. 2468-2477, 2014.
- [17] Wikipedia. "Blanking and Piercing."
https://en.wikipedia.org/wiki/Blanking_and_piercing# (accessed 19 de dezembro de 2024).

Referências

- [18] C. P. Singh and G. Agnihotri, "Study of deep drawing process parameters: a review," *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 5, no. 2, pp. 1-15, 2015.
- [19] R. S.p.A, *Bending Handbook: Press Brake Bending Guide*. Itália: Rolleri, 2023.
- [20] J. Hu, Z. Marciniak, and J. Duncan, *Mechanics of sheet metal forming*. Elsevier, 2002.
- [21] ADHMT. "Press Brake U Bend." <https://www.adhmt.com/press-brake-u-bend/> (accessed 19 de dezembro de 2024).
- [22] T. Fabricator. "Die basics 101: Bending methods—Wipe, coin, relief, pivot, V bending." (accessed 19 de dezembro de 2024).
- [23] A. Roller. "Pre-bending and Roll Bending Process." <https://www.angleroller.com/section-bending/pre-bending-and-roll-bending-process.html> (accessed 19 de dezembro de 2024).
- [24] S. Chikalthankar, G. Belurkar, and V. Nandedkar, "Factors affecting on springback in sheet metal bending: a review," *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 3, no. 4, pp. 247-251, 2014.
- [25] Y.-M. Huang and D.-K. Leu, "Effects of process variables on V-die bending process of steel sheet," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 40, no. 7, pp. 631-650, 1998.
- [26] T. Fabricator. "Dissecting defects - Part I." <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/bending/dissecting-defects---part-i> (accessed 19 de dezembro de 2024).
- [27] Trumpf. "Site oficial da Trumpf – Soluções para Processamento da Chapa." https://www.trumpf.com/pt_PT/solucoes/setores/processamento-da-chapa/ (accessed 2 de dezembro de 2024).
- [28] Amada. "Site oficial da Amada – Soluções de Processamento de Chapas e Máquinas Industriais." <https://www.amada.eu/pt-pt/> (accessed 2 de dezembro de 2024).
- [29] Dimakin. "Site oficial da Dimakin – Quinadeiras e Guilhotinas." <https://www.dimakin.pt/produtos/quinadeiras-e-guilhotinas/> (accessed 2 de dezembro de 2024).
- [30] Maproc. "Site oficial da Maproc – Máquinas e Ferramentas para Indústria e Engenharia." <https://maproc.pt/> (accessed 2 de dezembro de 2024).
- [31] Rico. "Site oficial da Rico – Máquinas e Ferramentas para Indústria." <https://www.rico.pt/> (accessed 2 de dezembro de 2024).
- [32] Trumpf. "TruBend Série 8000 – Nova Geração." https://www.trumpf.com/pt_BR/produtos/maquinas-sistemas/dobradeiras/trubend-serie-8000-nova-geracao/ (accessed 23 de dezembro de 2024).
- [33] Amada. "Bending Automation." <https://www.amada.com/america/bending-automation> (accessed 23 de dezembro de 2024).
- [34] Bystronic. "Máquina de Dobra de Chapa ByBend Smart." <https://www.bystronic.com/bra/pt/b/maquina-dobra-chapa-bybend-smart> (accessed 23 de dezembro de 2024).
- [35] Adira. "PA / PA Plus – Quinadoras." <https://adira.pt/produtos/quinadoras/pa-pa-plus/> (accessed 23 de dezembro de 2024).
- [36] H. Tschaetsch, *Metal forming practise: processes—machines—tools*. Berlim, Alemanha: Springer, 2006.
- [37] W. Emmens, G. Sebastiani, and A. H. van den Boogaard, "The technology of incremental sheet forming—a brief review of the history," *Journal of Materials processing technology*, vol. 210, no. 8, pp. 981-997, 2010.

- [38] H. A. Khan, K. Asim, F. Akram, A. Hameed, A. Khan, and B. Mansoor, "Roll bonding processes: State-of-the-art and future perspectives," *Metals*, vol. 11, no. 9, p. 1344, 2021.
- [39] T. Trzepieciński, "Recent developments and trends in sheet metal forming," *Metals*, vol. 10, no. 6, p. 779, 2020.
- [40] S.-H. Zhang, S.-F. Chen, Y. Ma, H.-W. Song, and M. Cheng, "Developments of new sheet metal forming technology and theory in China," *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, vol. 28, pp. 1452-1470, 2015.
- [41] L. Zgripcea, V. Putan, M. Ardelean, and C. B. Baneasa, "Technology of thin metal sheet cutting with fiber laser," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1781, no. 1: IOP Publishing, p. 012059.
- [42] A. M. C. Ferreira, "Projecto de sistema de fixação de punções para quinadoras hidráulicas," Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014.
- [43] D. Cattrysse, P. Beullens, P. Collin, J. Duflou, and D. Van Oudheusden, "Automatic production planning of press brakes for sheet metal bending," *International journal of production research*, vol. 44, no. 20, pp. 4311-4327, 2006.
- [44] M. Ü. Öziç, M. Barstuğan, and A. Özdamar, "An autonomous system design for mold loading on press brake machines using a camera platform, deep learning, and image processing," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 37, no. 8, pp. 4239-4247, 2023.
- [45] N. Kontolatis and G.-C. Vosniakos, "Optimisation of press-brake bending operations in 3D space," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 23, pp. 457-469, 2012.
- [46] ADHMT. "Press Brake Structure and Components." <https://www.adhmt.com/press-brake-structure-and-components/> (accessed 31 de dezembro de 2024).
- [47] Accurl. "Bending Follower Supports." <https://www.accurl.com/bending-follower-supports/> (accessed 28 de dezembro de 2024).
- [48] Durmapress. "CNC Bending Follower for Press Brake." <https://www.durmapress.com/cnc-bending-follower-for-press-brake/> (accessed 28 de dezembro de 2024).
- [49] S. K. Gupta and D. Rajagopal, "Sheet metal bending: forming part families for generating shared press-brake setups," *Journal of manufacturing systems*, vol. 21, no. 5, pp. 329-349, 2002.
- [50] C. Group. "Software." <https://www.ehu.eus/compmech/software/> (accessed 27 de dezembro de 2024).
- [51] Gasparini. "Front support arms and sheet lifters." <https://www.gasparini.com/en/accessori/front-support-arms-and-sheet-lifters/> (accessed 30 de dezembro de 2024).
- [52] SafanDarley. "H-Brake HD 700-1000T." <https://safandarley.com/us/products/hydraulic-press-brakes/h-brake-hd-700-1000t> (accessed 30 de dezembro de 2024).
- [53] D. J. Jarman, "Press brake plate lifter table," Estados Unidos Patent U.S. Patent 4,341,104, 1982.
- [54] Bystronic. "Sheet Metal Bender Xpert Pro." <https://www.bystronic.com/int/en/b/sheet-metal-bender-xpert-pro> (accessed 30 de dezembro de 2024).
- [55] T. Impianti. "Sheet metal lifting system for press brakes – UP." <https://www.trivenetaimpianti.com/en/sheet-metal-lifting-system-for-press-brakes-up/> (accessed 28 de dezembro de 2024).

Referências

- [56] J. A. B. Pacheco, "Dispositivo de apoio da chapa com acompanhamento automático em operações de quinagem," Portugal Patent PT 101360 B, 2001.
- [57] Gizelis. "Movies." <https://www.gizelis.com/en/movies> (accessed 29 de dezembro de 2024).
- [58] J. P. Santos, M. Oliveira, F. G. Almeida, J. P. Pereira, and A. Reis, "Improving the environmental performance of machine-tools: influence of technology and throughput on the electrical energy consumption of a press-brake," *Journal of cleaner production*, vol. 19, no. 4, pp. 356-364, 2011.
- [59] S. Lavanya, S. Mahadevan, C. Mukhopadhyay, and S. A. Kumar, "Acoustic emission during press-brake bending of SS 304L sheets and its correlation with residual stress distribution after bending," *Journal of Materials Engineering and Performance*, pp. 1-12, 2022.
- [60] H. Wang, Y. Zhai, L. Zhou, and Z. Zhang, "Study on laser surface hardening behavior of 42CrMo press brake die," *Coatings*, vol. 11, no. 8, p. 997, 2021.
- [61] Adira. "Empresa." <https://adira.pt/empresa/> (accessed 25 de fevereiro de 2025).
- [62] Adira. "ADIRA - Engenharia e Fabricação." <https://adira.pt> (accessed 11 de março de 2025).
- [63] A. Dresch, D. P. Lacerda, J. A. V. Antunes Jr, A. Dresch, D. P. Lacerda, and J. A. V. Antunes, *Design science research*. Springer, 2015.
- [64] ArgeSystems. "Bending Followers." <https://argesystems.com/en/project/bending-followers/> (accessed 25 de fevereiro de 2025).
- [65] *Adira Metal Forming Solutions: Catálogo Geral*, Adira, Vila Nova de Gaia, 2020. [Online]. Available: <https://www.adira.pt>.
- [66] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*. Butterworth-Heinemann, 2016.
- [67] J. L. Salmerona and F. Smarandacheb, "Redesigning Decision Matrix Method with an indeterminacy-based inference process," *Multispace and Multistructure. Neutrosophic Transdisciplinarity (100 Collected Papers of Sciences)*, vol. 4, p. 151, 2010.
- [68] A. P. D. A. d. Campos, "Design of a Linear Actuator for Soft Robotics Applications," Masters, Mechanical engineering, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Porto, 2016.
- [69] D. Saravanakumar, B. Mohan, and T. Muthuramalingam, "A review on recent research trends in servo pneumatic positioning systems," *Precision Engineering*, vol. 49, pp. 481-492, 2017.
- [70] Q. Cheng, B. Qi, Z. Liu, C. Zhang, and D. Xue, "An accuracy degradation analysis of ball screw mechanism considering time-varying motion and loading working conditions," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 134, pp. 1-23, 2019.
- [71] P. Simionescu and M. Smith, "Initial estimates in the design of rack-and-pinion steering linkages," *J. Mech. Des.*, vol. 122, no. 2, pp. 194-200, 2000.
- [72] J. M. McCarthy, "Cam and Follower Systems," *PowerPoint Presentation*, pp. 1-14, 2009.
- [73] Festo. "Cilindro elétrico – ESBF." https://www.festo.com/pt/pt/p/cilindro-eletrico-id_ESBF/?q=%7E%3A%20sortByCoreRangeAndNewProduct (accessed 2 de abril de 2025).
- [74] Festo. "Cilindro padronizado – DSBC." https://www.festo.com/pt/pt/p/cilindro-padronizado-id_DSBC/ (accessed 2 de abril de 2025).
- [75] B. Portugal. "Fusos de Esferas e Trapezoidais (THOMSON)." <https://www.bibus.pt/produtos-e-solucoes/mecanica/guias-lineares-e-fusos-thomson/fusos-de-esferas-e-trapezoidais-thomson/> (accessed 2 de abril de 2025).
- [76] Compraco. "Como dimensionar uma transmissão de cremalheira e pinhão." <https://compraco.com.br/blogs/industria/como-dimensionar-uma-transmissao-de-cremalheira-e-pinhao> (accessed 2 de abril de 2025).

- [77] N. Industries. "Atuador linear elétrico acionado por correia dentada." <https://www.directindustry.com/pt/prod/nook-industries/product-11687-566354.html> (accessed 2 de abril de 2025).
- [78] T. M. Engineering. "Cam and Follower." <https://themechanicalengineering.com/cam-and-follower/> (accessed 2 de abril de 2025).
- [79] O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, *The finite element method set*. Elsevier, 2005.
- [80] MÄDLER GmbH, Stuttgart, Germany, 2025.
- [81] Tecnostamp. "Matrizes BYSTRONIC – modelo 25.103." <https://tecnostamp.ru/catalog/matritsy-BYSTRONIC/25-103-matritsy-BYSTRONIC/> (accessed 6 de maio de 2025).
- [82] *Y-bearings and Y-bearing units – Product Catalogue*, SKF Group, Göteborg, Sweden, 2025. [Online]. Available: <https://www.skf.com>. Accessed: 27 de junho de 2025.
- [83] *Electric Actuator LEY100 Series – Catalogue*, SMC Corporation, Japão, 2023. [Online]. Available: <https://www.smc.eu>. Accessed: 2 de abril de 2025.
- [84] MatWeb. "AISI 1020 Steel, as rolled." <https://www.matweb.com> (accessed 2 de julho de 2025).
- [85] A. M. Annaswamy and A. L. Fradkov, "A historical perspective of adaptive control and learning," *Annual Reviews in Control*, vol. 52, pp. 18-41, 2021.
- [86] D. Macdonald, *Practical machinery safety*. Elsevier, 2004.
- [87] M. S. Matos and H. V. Neto, "Instruções de trabalho e segurança de máquinas numa empresa de metalomecânica," *Cesqua-Cadernos de Engenharia de Segurança, Qualidade e Ambiente*, vol. 1, no. 2, pp. 21-38, 2019.
- [88] (2006). *Directiva 2006/42/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 17 de Maio de 2006 relativa às máquinas e que altera a Directiva 95/16/CE (reformulação)*.
- [89] (2010). *ISO 12100:2010 - Safety of machinery — General principles for design — Risk assessment and risk reduction*.
- [90] (2013). *EN 12622:2009+A1:2013 - Segurança de máquinas — Prensas dobradeiras — Requisitos de segurança*.
- [91] (2009). *EN 614-1:2006+A1:2009 - Segurança de máquinas — Princípios de concepção ergonómica — Parte 1: Terminologia e princípios gerais*.
- [92] (2008). *Decreto-Lei n.º 103/2008, de 24 de junho*.
- [93] V. Jagota, A. P. S. Sethi, and K. Kumar, "Finite element method: an overview," *Walailak Journal of Science and Technology (WJST)*, vol. 10, no. 1, pp. 1-8, 2013.
- [94] M. Mano, "Finite element method," 2003.
- [95] M. Industrial. "Sensor de posição." <https://www.mecanicaindustrial.com.br/308-sensor-de-posicao/> (accessed 28 de dezembro de 2024).
- [96] RMT. "RMT DSP Press Brake Safety Laser System." <https://www.rmtus.com/shop/product/rmt-dsp-press-brake-safety-laser-system> (accessed 28 de dezembro de 2024).

Referências

Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

NOME: Miguel Santos Costa Oliveira

ISEP, Porto, 13 de setembro de 2025

Apêndice A

Normalização aplicável

A normalização é essencial no projeto mecânico, pois assegura que os equipamentos atendam aos requisitos de segurança, qualidade e conformidade técnica. Além disso protege os operadores e garante eficiência. No desenvolvimento de um acompanhador de quinagem, a aplicação de normas específicas é fundamental para garantir a segurança do equipamento e a sua adequação ao ambiente de trabalho industrial [87].

Neste contexto, a Diretiva Europeia Máquinas – 2006/42/CE estabelece requisitos essenciais de segurança para o design e construção de máquinas na União Europeia e abrange todas as fases do ciclo de vida do equipamento [88].

A norma EN ISO 12100:2010 – Segurança de Máquinas fornece um quadro abrangente para a gestão de riscos em projetos mecânicos. Este regulamento orienta a avaliação e mitigação de riscos. Desta forma, a norma adota medidas de proteção necessárias para garantir a segurança dos operadores [89].

A EN 12622:2009+A1:2013 – Requisitos de Segurança de Quinadoras aplica-se especificamente às quinadoras hidráulicas e aos equipamentos auxiliares, como os acompanhadores de quinagem. Esta norma define os requisitos de segurança para a operação e estrutura de quinadoras e inclui aspetos como a estabilidade estrutural e os sistemas de proteção [90].

A norma EN 614-1 – Ergonomia e Proteção do Operador aborda os aspetos ergonómicos do design e a proteção do operador, promovendo a sua segurança e conforto durante a interação com máquinas [91].

Por fim, o Decreto-Lei n.º 103/2008 adapta a Diretiva Europeia Máquinas ao contexto português. O Decreto-Lei especifica as obrigações para o cumprimento das normas de segurança no território nacional [92].

Apêndice B

O Método de Elementos Finitos (MEF) é uma técnica numérica amplamente utilizada para resolver problemas complexos em engenharia e física, nos quais soluções analíticas exatas são frequentemente inviáveis. A essência do MEF reside na capacidade de dividir um problema contínuo em pequenos elementos discretos ou finitos, o que simplifica as equações diferenciais parciais que descrevem o comportamento de um sistema num conjunto de equações algébricas. Estas equações podem ser resolvidas numericamente para fornecer aproximações dos valores das grandezas de interesse, como deslocamentos, rotações ou temperatura, em pontos específicos de cada elemento [93]. Aplicações práticas do MEF abrangem diversas áreas da engenharia, incluindo estruturas, mecânica dos fluidos, eletromagnetismo e transferência de calor. Em cada caso, o método permite simular e prever o comportamento de componentes ou sistemas inteiros sob condições de operação específicas, pelo que se forma essencial no processo de projeto e otimização de produtos e processos industriais [93].

As principais vantagens do método dos elementos finitos em relação a outros métodos numéricos estão relacionadas com a sua versatilidade e precisão, particularmente na modelação de geometrias complexas e na definição de condições de contorno variadas [93]. Este método distingue-se pela capacidade de representar formas geométricas complexas e pela possibilidade de aplicar diferentes condições de carga e condições de fronteira, o que confere ao MEF uma aplicabilidade superior. Adicionalmente, o MEF permite a análise de materiais não homogêneos, o que expande a sua utilização em materiais cujas propriedades variam espacialmente. Outra vantagem significativa é a modularidade do processo, que permite a adição ou modificação de partes do modelo sem comprometer a integridade da simulação [93].

O processo de discretização é fundamental para a implementação do MEF e consiste na divisão da estrutura numa série de sub-regiões chamadas “elementos finitos”. Cada elemento representa uma parte do sistema global e, ao serem conectados por nós, estes formam uma rede chamada malha. Esta malha permite que o problema seja abordado em escala local, dentro de cada elemento e facilita a resolução das equações diferenciais [79].

A precisão dos resultados obtidos pelo MEF está intimamente relacionada com o nível de refinamento da malha: quanto maior o número de elementos, mais próxima a solução estará do valor real. Contudo, o aumento no número de elementos também resulta num aumento proporcional do tempo de cálculo e dos recursos computacionais necessários para resolver o sistema de equações. Em muitas aplicações, uma malha moderadamente refinada pode oferecer um bom compromisso entre qualidade do resultado e tempo de processamento [79].

A escolha do tipo de elemento finito é outro fator crucial no MEF, uma vez que diferentes tipos de elementos – como elementos unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais – podem representar distintas geometrias e responder de maneira variada a diferentes condições. Os elementos unidimensionais, representados por barras ou vigas, são apropriados para estruturas onde apenas uma direção precisa ser considerada, apesar de ser possível a transformação das coordenadas. Os elementos bidimensionais, aplicam-se a modelos que se desenvolvem num plano com dois eixos e permitem a representação de geometrias mais complexas, como membranas e cascas. Já os elementos tridimensionais são usados para estruturas com dimensão significativa em três direções. A seleção do tipo de elemento deve ser cuidadosa, pois uma escolha inadequada pode resultar em cálculos ineficientes ou resultados imprecisos [94].

A técnica de gradação de malha é uma estratégia para otimizar a utilização de recursos computacionais ao concentrar elementos menores e mais refinados apenas em áreas onde grandes gradientes de resposta são esperados como, por exemplo, em regiões de alta tensão. Nas regiões onde a variação dos resultados é menor, podem ser utilizados elementos de maior tamanho, o que reduz o número total de elementos sem comprometer significativamente a precisão global da solução. Esta abordagem não apenas economiza tempo de cálculo como também mantém a integridade do modelo, as áreas críticas são representadas com o detalhe necessário, enquanto áreas de menor interesse mantêm uma resolução mais econômica [94].

Apêndice C

Os sistemas auxiliares à quinagem são indispensáveis para otimizar o processo de quinagem, na medida que asseguram melhores níveis de desempenho, proteção e qualidade na produção [13]. Os sistemas incluem:

- **Sistemas de apoio de chapa**

Os sistemas de apoio de chapa, como os acompanhadores de quinagem, são projetados para evitar deformações indesejadas e oferecer suporte durante o processo de quinagem. Enquanto os acompanhadores se ajustam ao movimento da chapa, os apoios estáticos mantêm a chapa estável durante a operação e ambos são indispensáveis em aplicações com chapas de grande dimensão. Os acompanhadores destacam-se pela sua capacidade de minimizar vibrações durante a dobra da chapa, pelo que conseguem fornecer maior estabilidade à chapa durante todo o processo de quinagem. Na Figura 97 observa-se um exemplo de um acompanhador. Nesta categoria de sistemas ainda se podem incluir os braços robóticos ou *grippers* de apoio, tanto na colocação da chapa na zona de quinagem como na deformação da mesma [44].



Figura 97 - Acompanhador de quinagem [55]

- **Sistemas de monitorização**

A monitorização em tempo real é uma funcionalidade essencial em quinadoras atuais, especialmente com CNC. Sensores, como réguas lineares permitem o controlo, em todos os momentos do processo de quinagem, da posição do avental e da chapa, o que garante a

execução correta da quinagem e a redução de erros. Estes sistemas melhoram a confiabilidade e a repetibilidade da operação. Na Figura 98 está presente um sistema de posição.



Figura 98 - Sensores de posição [95]

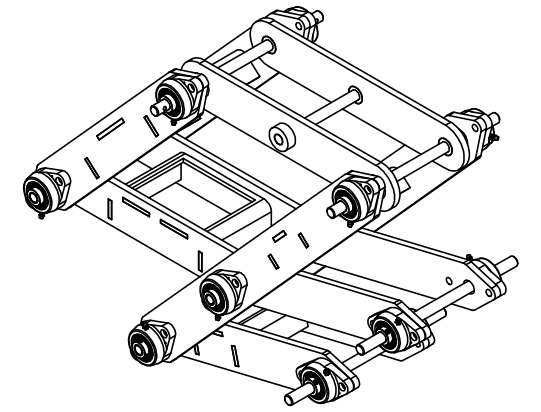
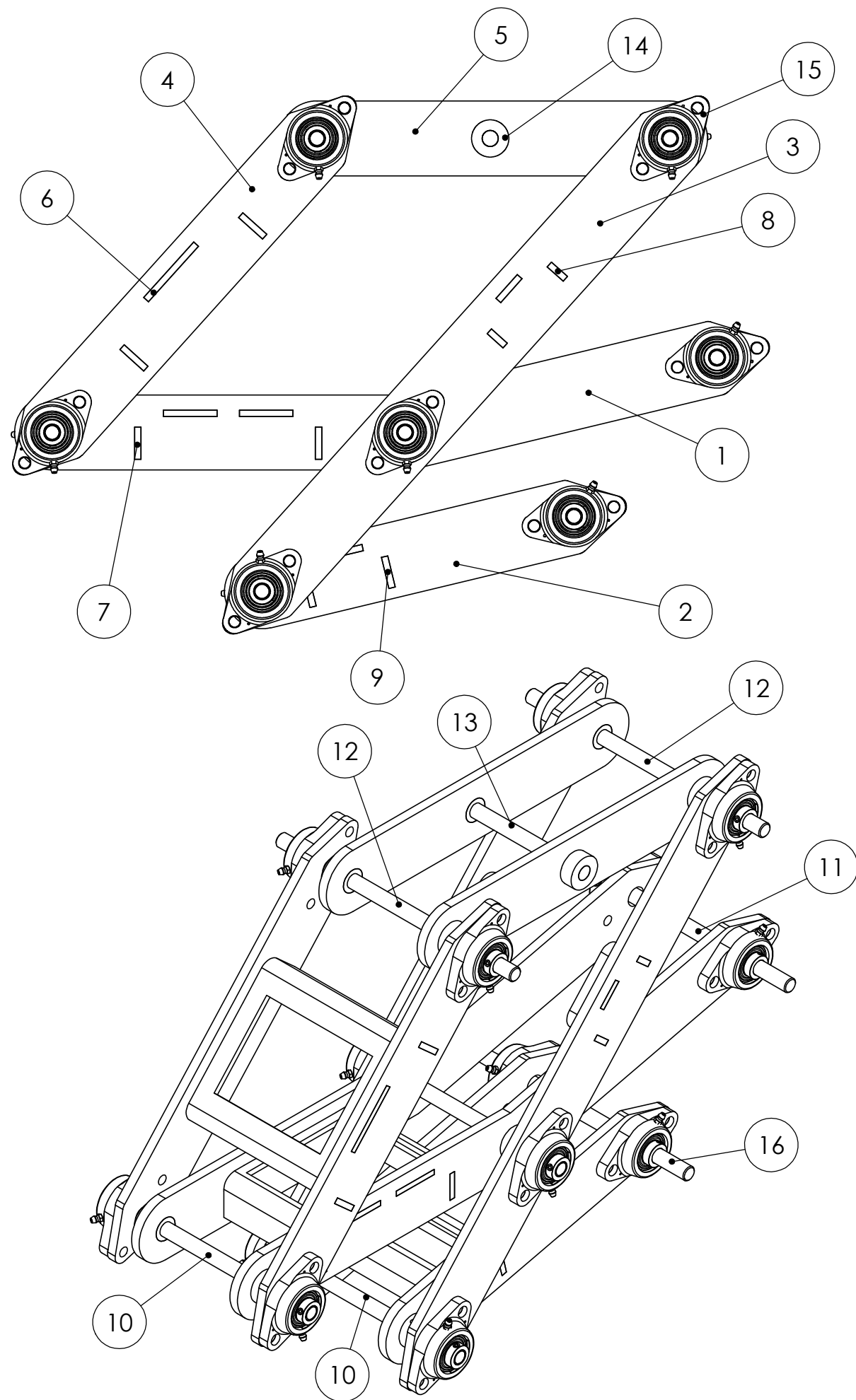
- **Sistemas de segurança**

Os sistemas de segurança protegem os operadores e evitam acidentes em todos os equipamentos associados à quinagem. Exemplos incluem lasers de segurança (ilustrado na Figura 99), que detetam obstruções na zona de trabalho e interrompem automaticamente o equipamento, e fotocélulas, que monitorizam a área de operação para evitar movimentações inesperadas [96].



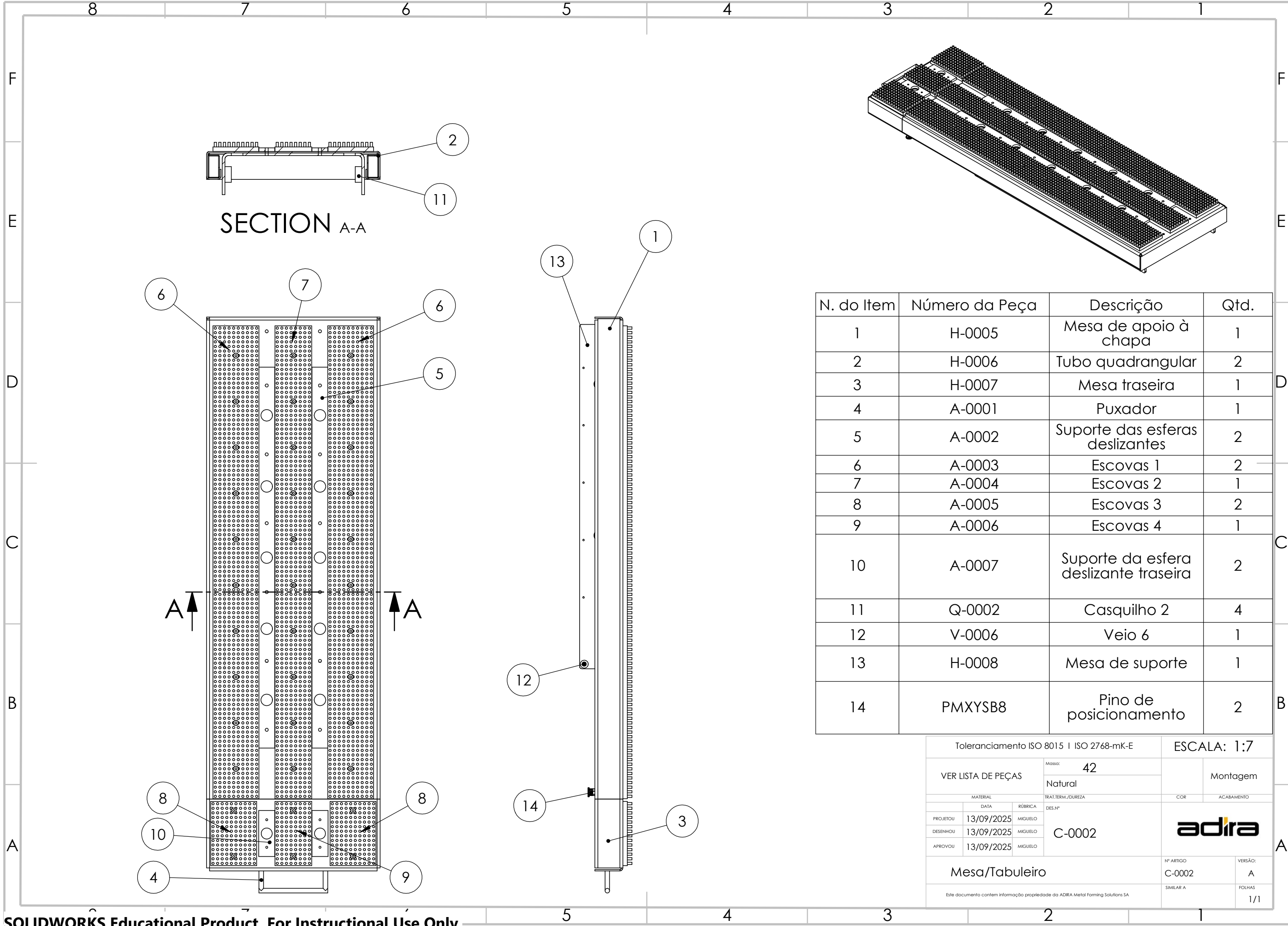
Figura 99 - Laser de segurança [96]

Apêndice D



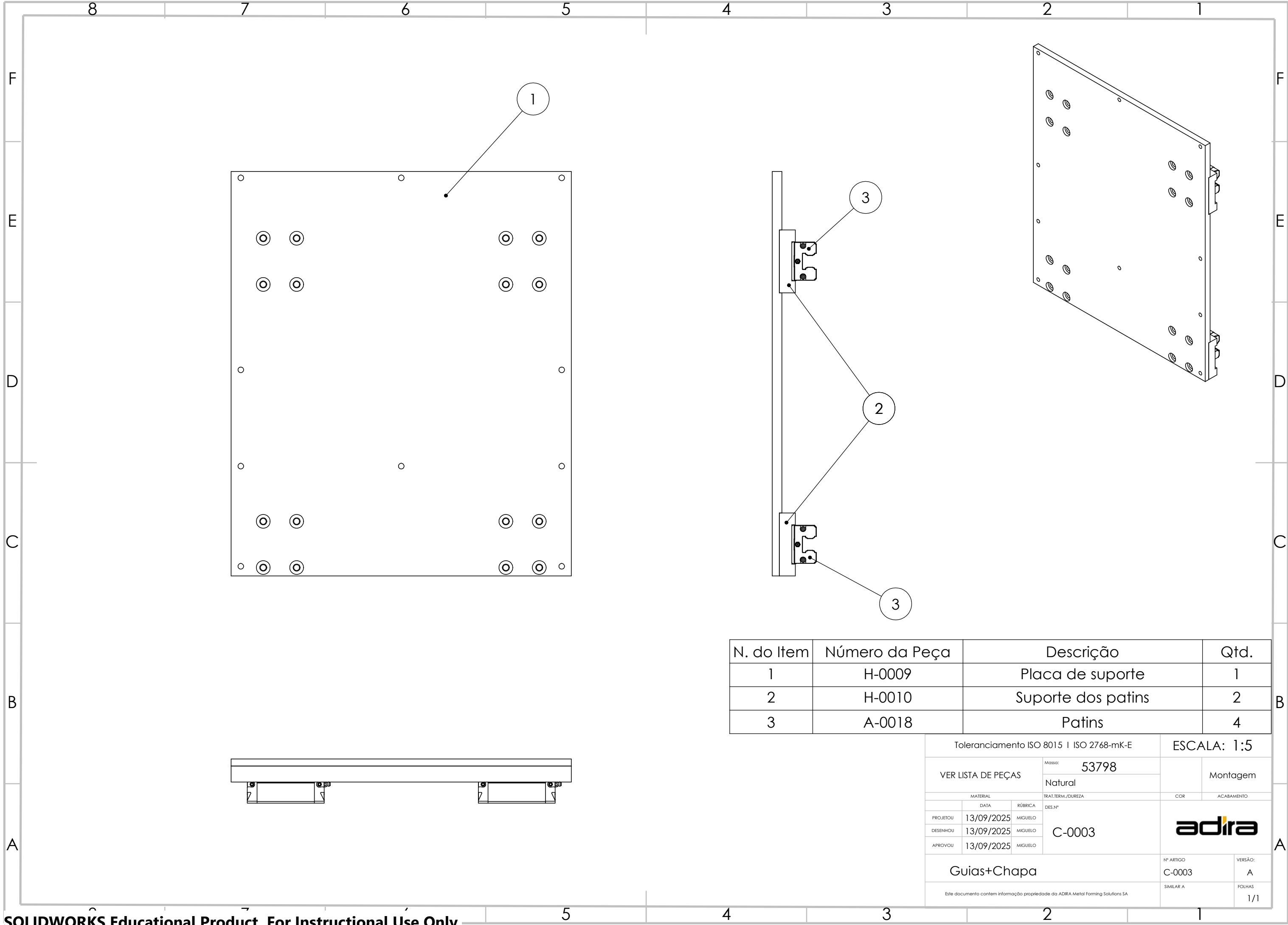
N. do Item	Número da Peça	Descrição	Qtd.
1	B-0001	Braço	2
2	B-0002	Braço	2
3	B-0003	Braço	2
4	B-0004	Braço	2
5	B-0005	Braço	2
6	H-0001	Suporte entre braços	1
7	H-0002	Suporte entre os braços	1
8	H-0003	Suporte entre os braços	2
9	H-0004	Suporte entre braços	1
10	V-0001	Veio 1	3
11	V-0002	Veio 2	1
12	V-0003	Veio 3	2
13	V-0004	Veio 4	1
14	Q-0001	Casquilho 1	12
15	L-0001	SKF FYTB 15 TF	14
16	V-0005	Veio 5	1

Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:5		
VER LISTA DE PEÇAS			Massa:			Montagem
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO	C-0001			
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Conjunto braços				Nº ARTIGO C-0001		VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA				SIMILAR A		FOLHAS 1/1



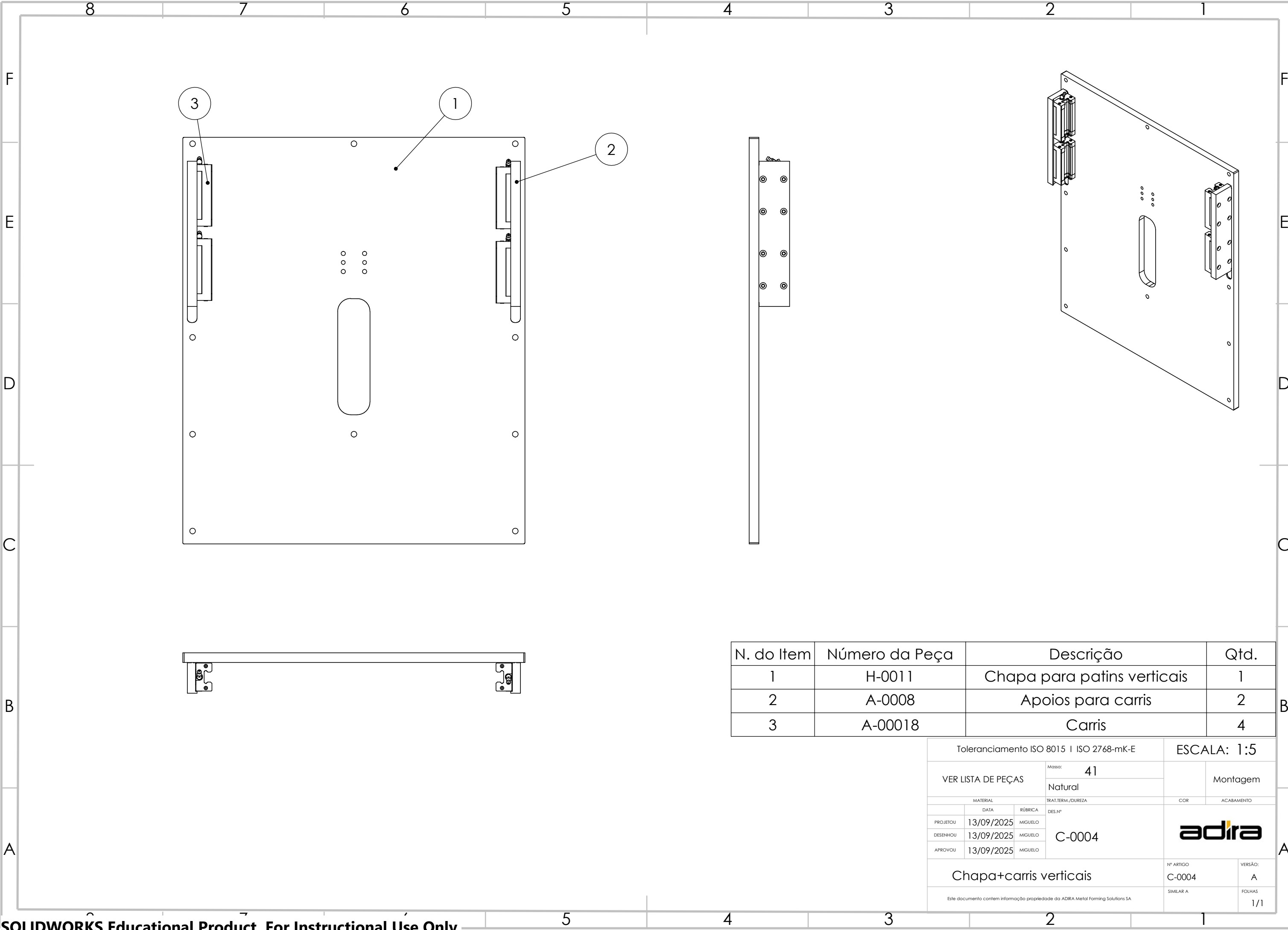
N. do Item	Número da Peça	Descrição	Qtd.
1	H-0005	Mesa de apoio à chapa	1
2	H-0006	Tubo quadrangular	2
3	H-0007	Mesa traseira	1
4	A-0001	Puxador	1
5	A-0002	Suporte das esferas deslizantes	2
6	A-0003	Escovas 1	2
7	A-0004	Escovas 2	1
8	A-0005	Escovas 3	2
9	A-0006	Escovas 4	1
10	A-0007	Suporte da esfera deslizante traseira	2
11	Q-0002	Casquilho 2	4
12	V-0006	Veio 6	1
13	H-0008	Mesa de suporte	1
14	PMXYSB8	Pino de posicionamento	2

Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:7	
VER LISTA DE PEÇAS			Massa:	42	Montagem
			Natural		
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA	COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº		
PROJETOU	13/09/2025	MIGUEL	C-0002		
DESENHOU	13/09/2025	MIGUEL			
APROVOU	13/09/2025	MIGUEL			
Mesa/Tabuleiro				Nº ARTIGO	VERSÃO:
				C-0002	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA				SIMILAR A	FOLHAS
					1/1



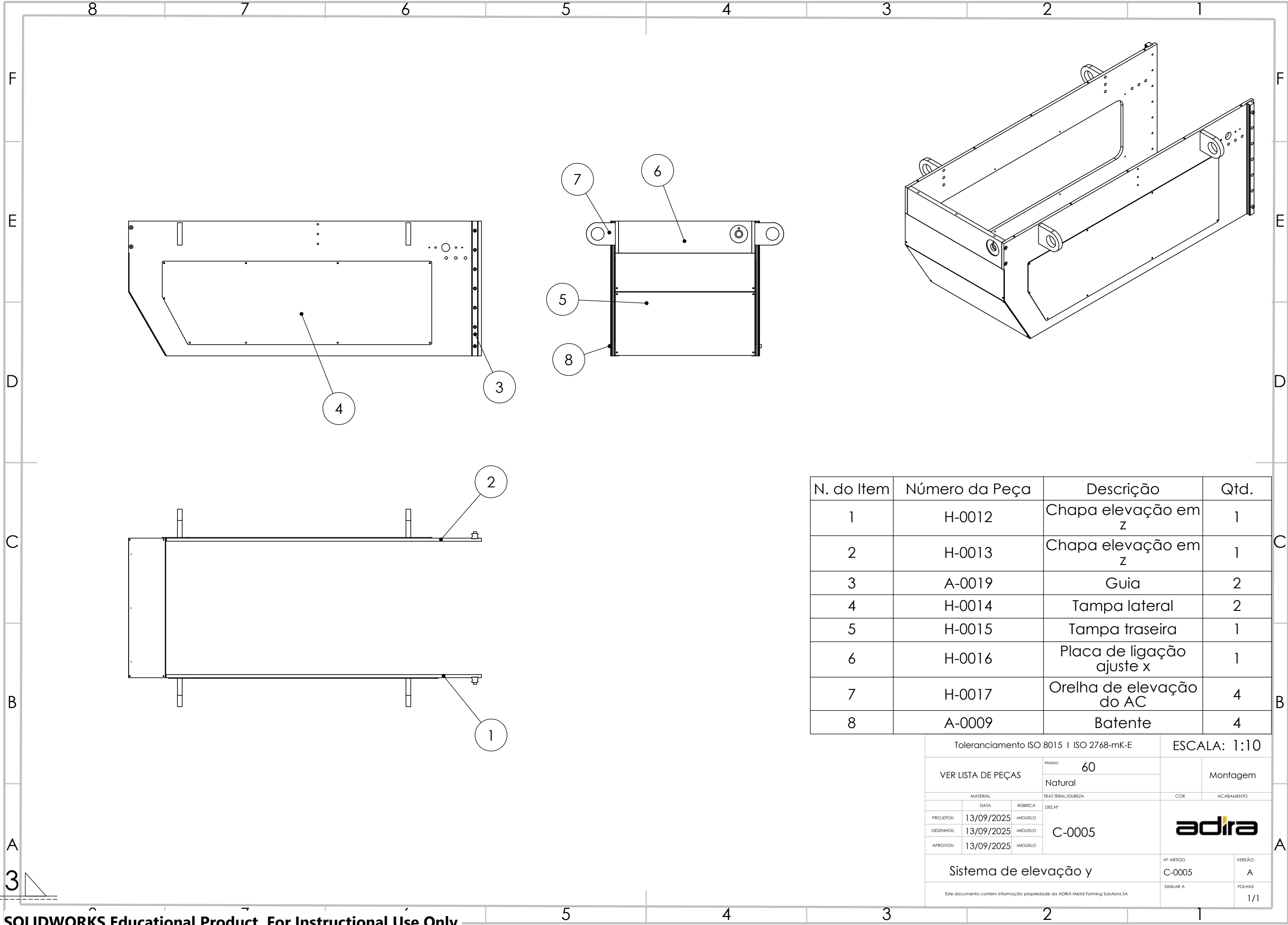
N. do Item	Número da Peça	Descrição	Qtd.
1	H-0009	Placa de suporte	1
2	H-0010	Suporte dos patins	2
3	A-0018	Patins	4

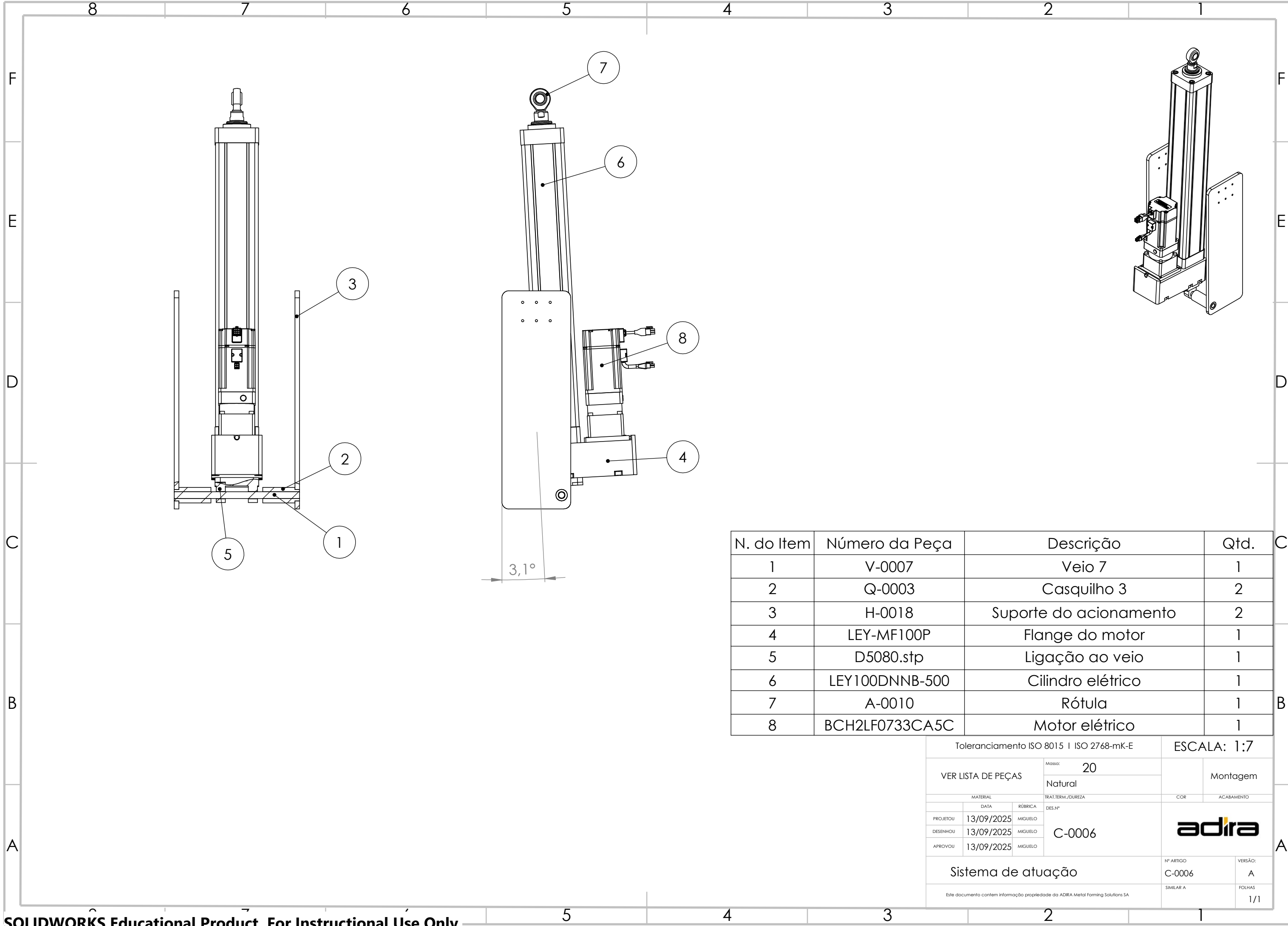
Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E			ESCALA: 1:5	
VER LISTA DE PEÇAS			Massa: 53798	Montagem
			Natural	
MATERIAL		TRAT.TERM./DUREZA	COR	ACABAMENTO
DATA	RÚBRICA	DES.Nº		
PROJETOU 13/09/2025	MIGUELO			
DESENHOU 13/09/2025	MIGUELO			
APROVOU 13/09/2025	MIGUELO			
Guias+Chapa				
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA			Nº ARTIGO C-0003	VERSÃO: A
			SIMILAR A	FOLHAS 1/1

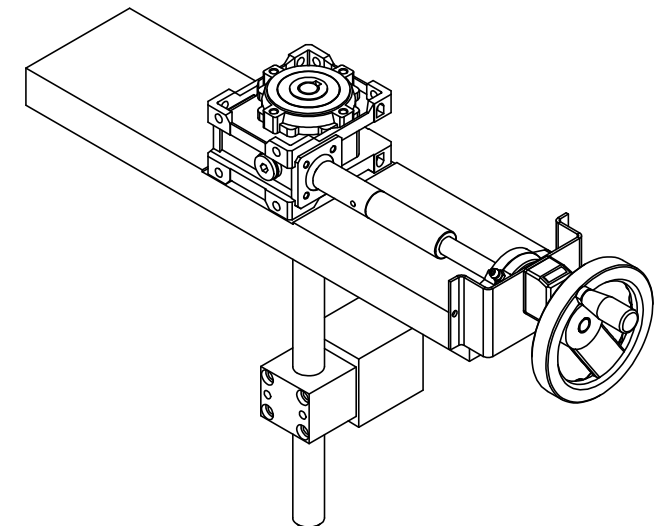
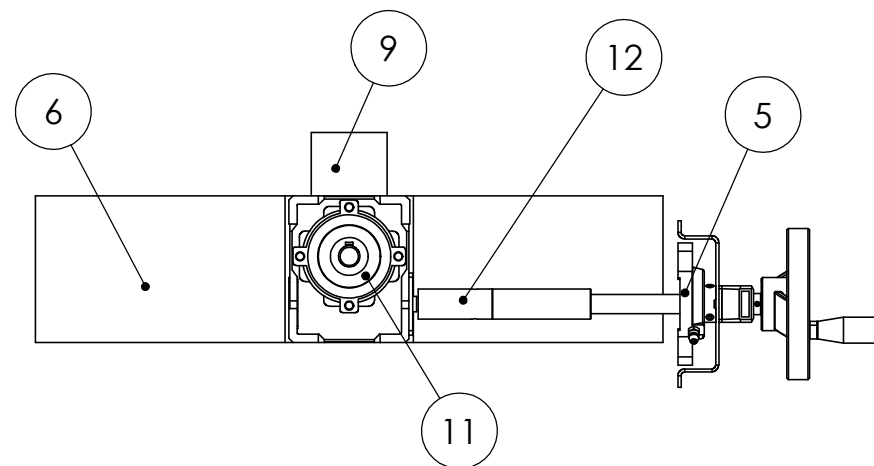
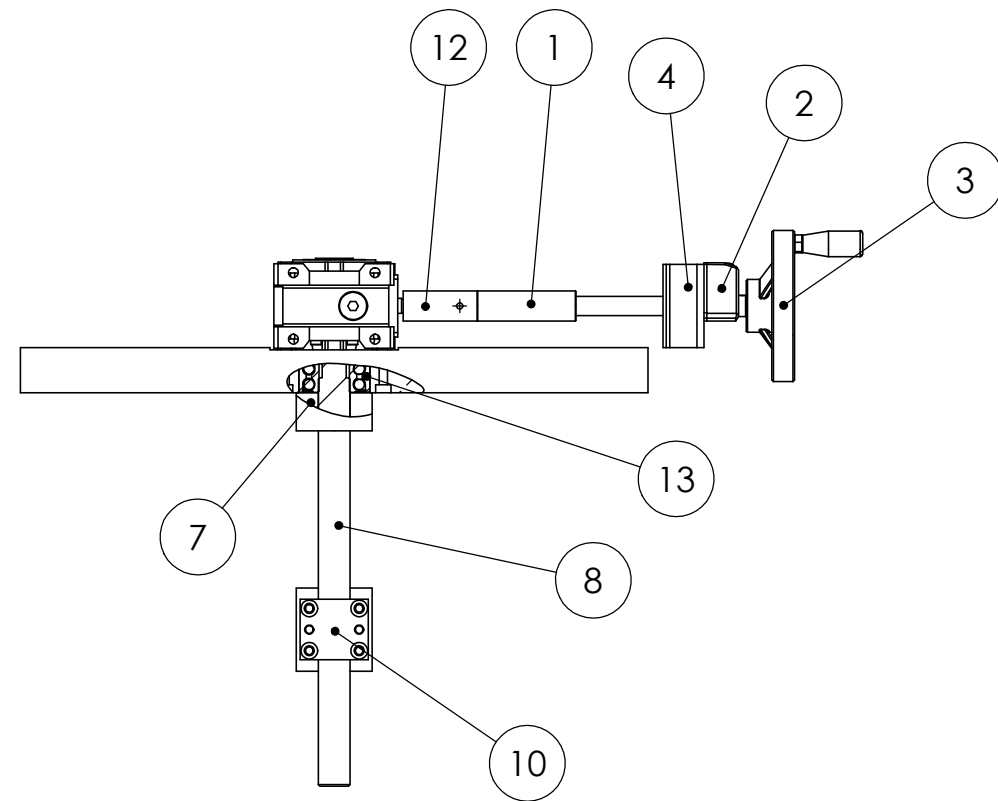


N. do Item	Número da Peça	Descrição	Qtd.
1	H-0011	Chapa para patins verticais	1
2	A-0008	Apoios para carris	2
3	A-00018	Carris	4

Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:5	
VER LISTA DE PEÇAS			Massa:	41	Montagem
			Natural		
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA	COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº		
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO	C-0004		
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO			
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO			
Chapa+carris verticais				Nº ARTIGO C-0004	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA				SIMILAR A	FOLHAS 1/1

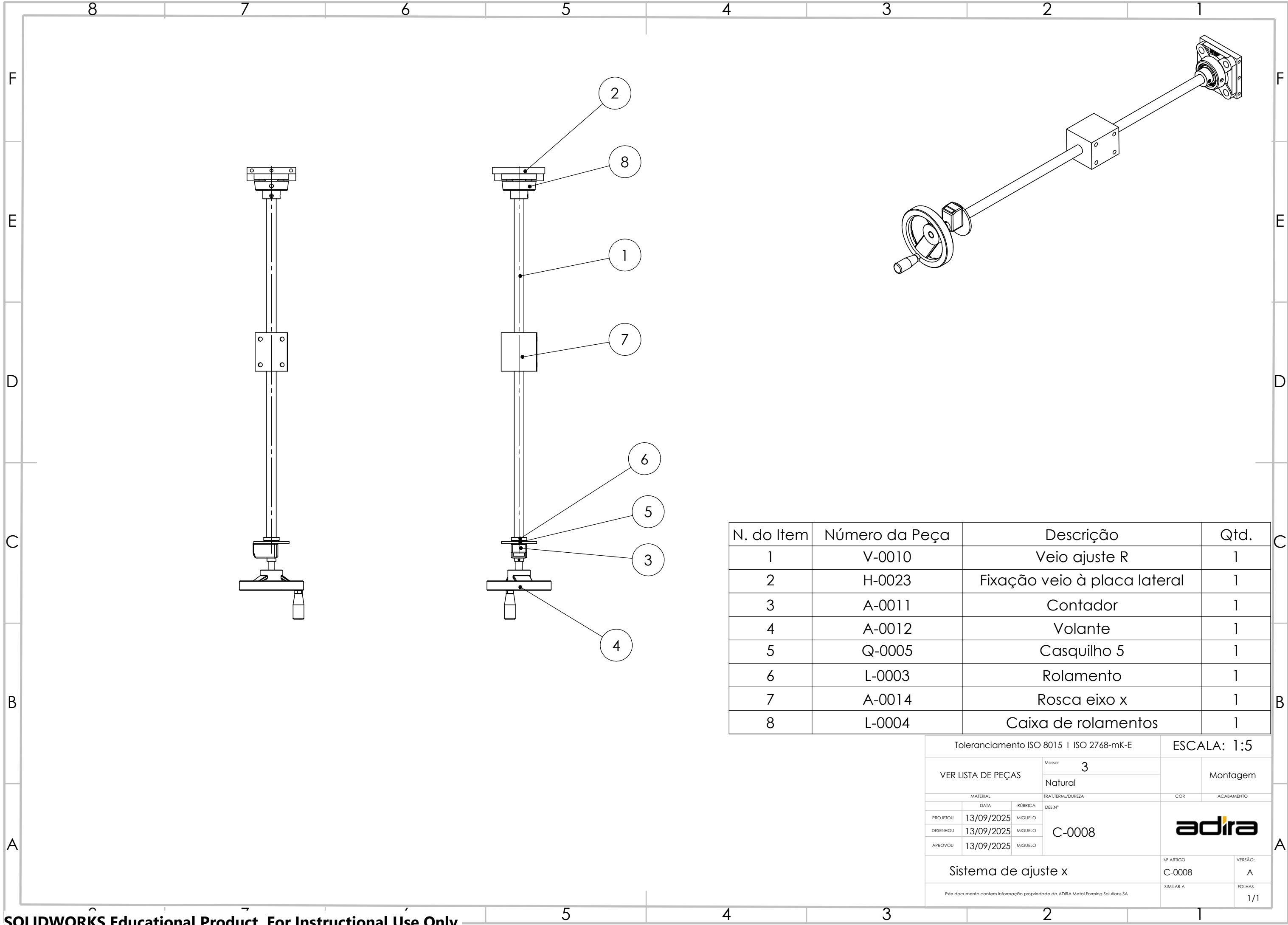






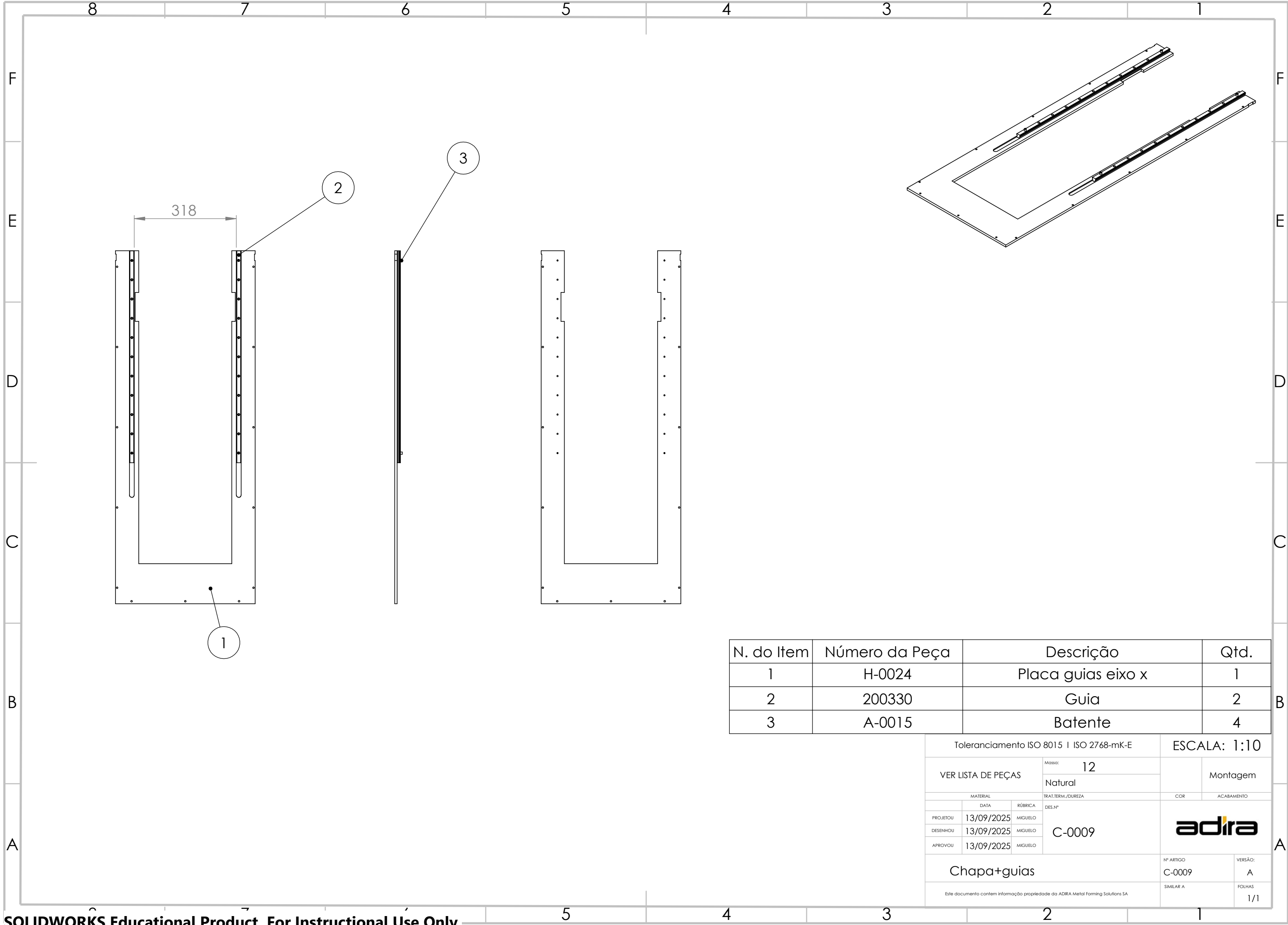
N. do Item	Número da Peça	Descrição	Qtd.
1	V-0008	Veio 8	1
2	A-0011	Contador	1
3	A-0012	Volante	1
4	H-0019	Proteção rolamento	1
5	L-0002	Rolamento	1
6	H-0020	Suporte caixa angular	1
7	Q-0004	Casquilho 4	1
8	V-0009	Veio 9	1
9	H-0021	Fixação à placa de suporte	1
10	A-0013	Bloco de apoio	1
11	Worm Gear Unit H/I	Redutor	1
12	V-0011	Veio do redutor	1
13	SKF 3204 A-2RS1	Rolamento	1

Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E		ESCALA: 1:5	
VER LISTA DE PEÇAS		Massa: 13	Montagem
		Natural	
MATERIAL		TRAT.TERM./DUREZA	COR
DATA	RÚBRICA	DES.Nº	ACABAMENTO
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO	adira
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO	
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO	
Sistema de ajuste y		Nº ARTIGO	VERSÃO:
		C-0007	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA		SIMILAR A	FOLHAS
			1/1



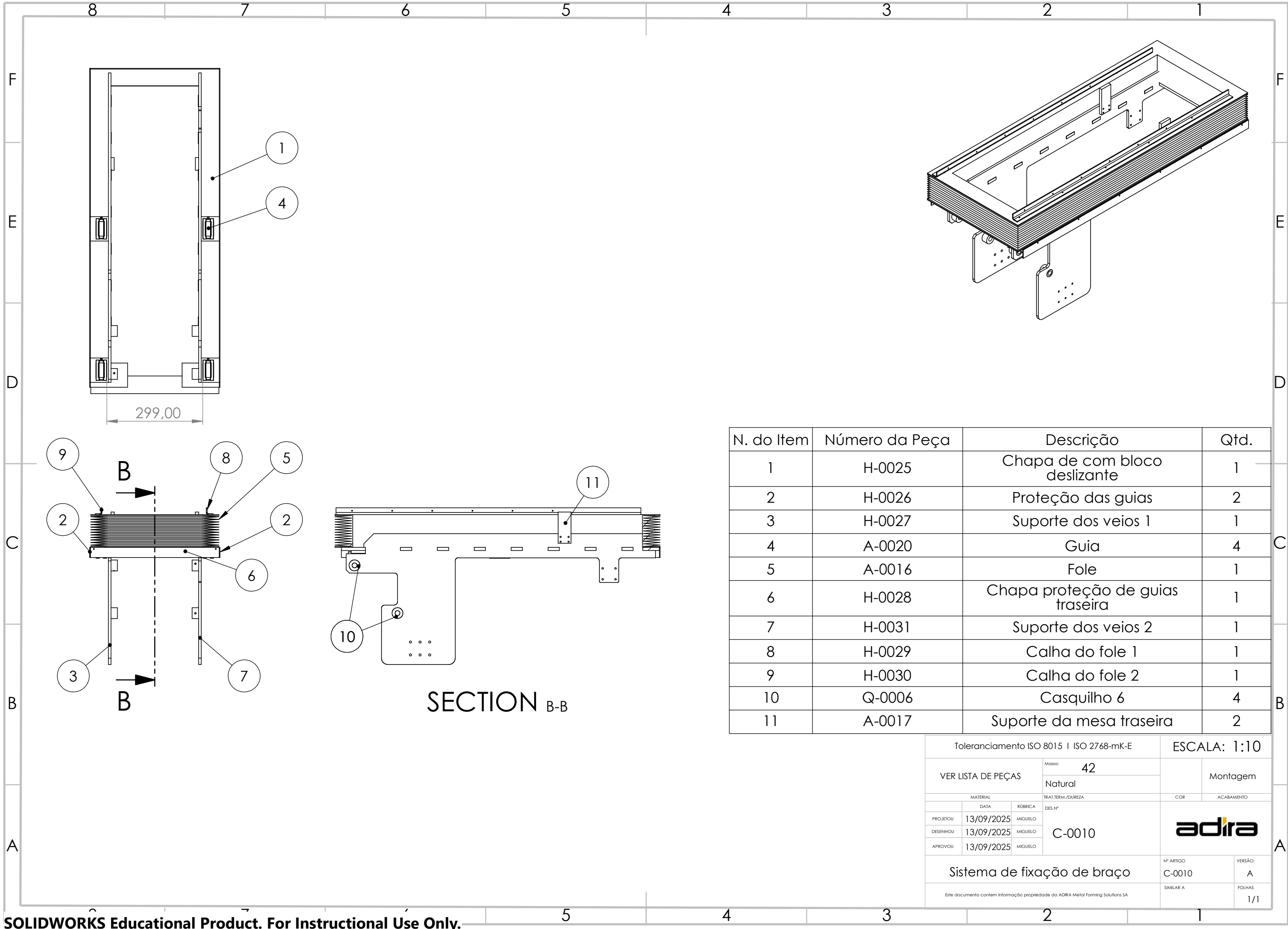
N. do Item	Número da Peça	Descrição	Qtd.
1	V-0010	Veio ajuste R	1
2	H-0023	Fixação veio à placa lateral	1
3	A-0011	Contador	1
4	A-0012	Volante	1
5	Q-0005	Casquilho 5	1
6	L-0003	Rolamento	1
7	A-0014	Rosca eixo x	1
8	L-0004	Caixa de rolamentos	1

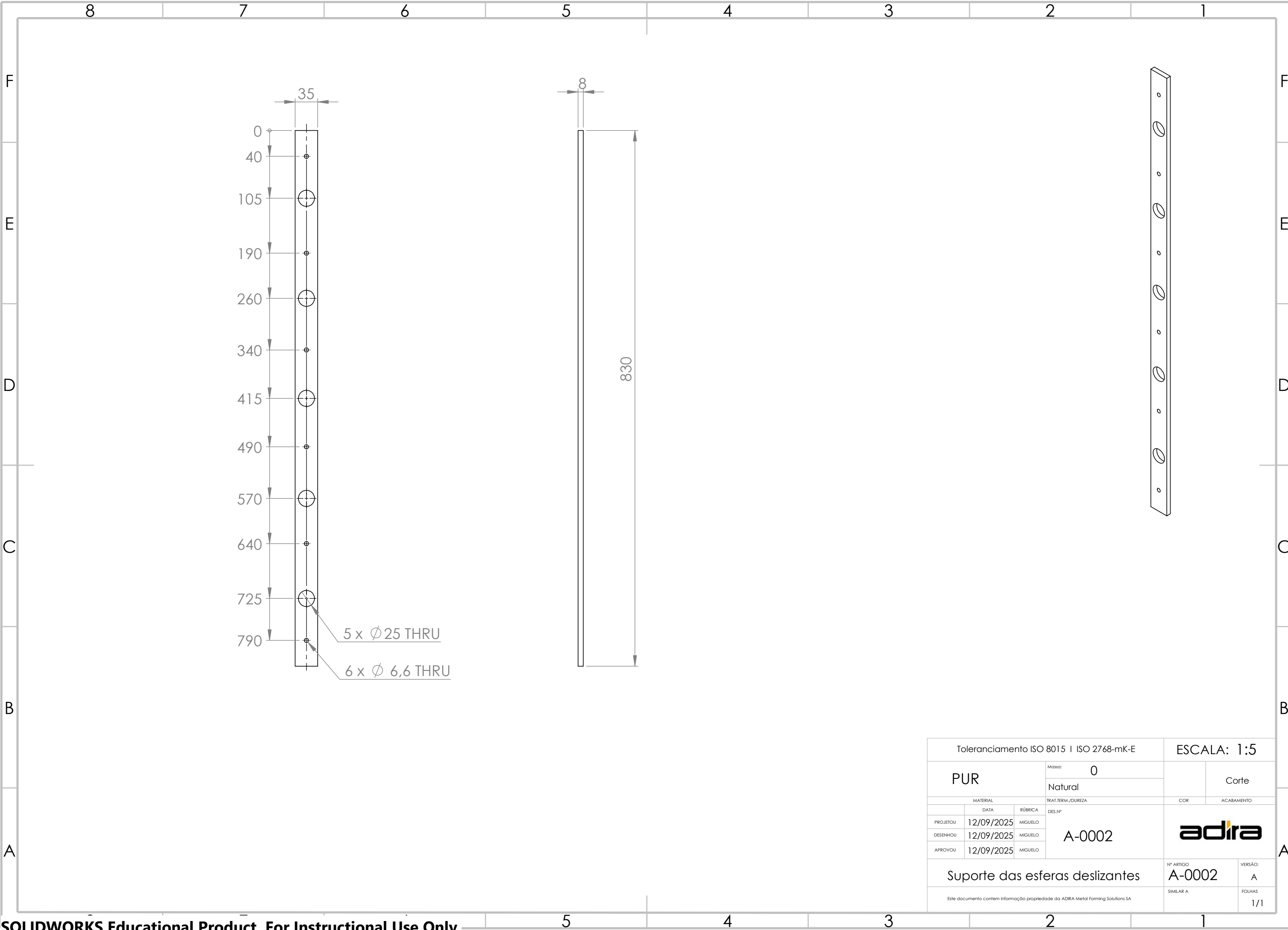
Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:5		
VER LISTA DE PEÇAS			Massa:	3	Montagem	
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA	COR	ACABAMENTO	
DATA	RÚBRICA	DES.Nº C-0008				
PROJETOU	13/09/2025					MIGUELO
DESENHOU	13/09/2025					MIGUELO
APROVOU	13/09/2025					MIGUELO
Sistema de ajuste x				Nº ARTIGO	VERSÃO:	
				C-0008	A	
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA				SIMILAR A	FOLHAS	
					1/1	



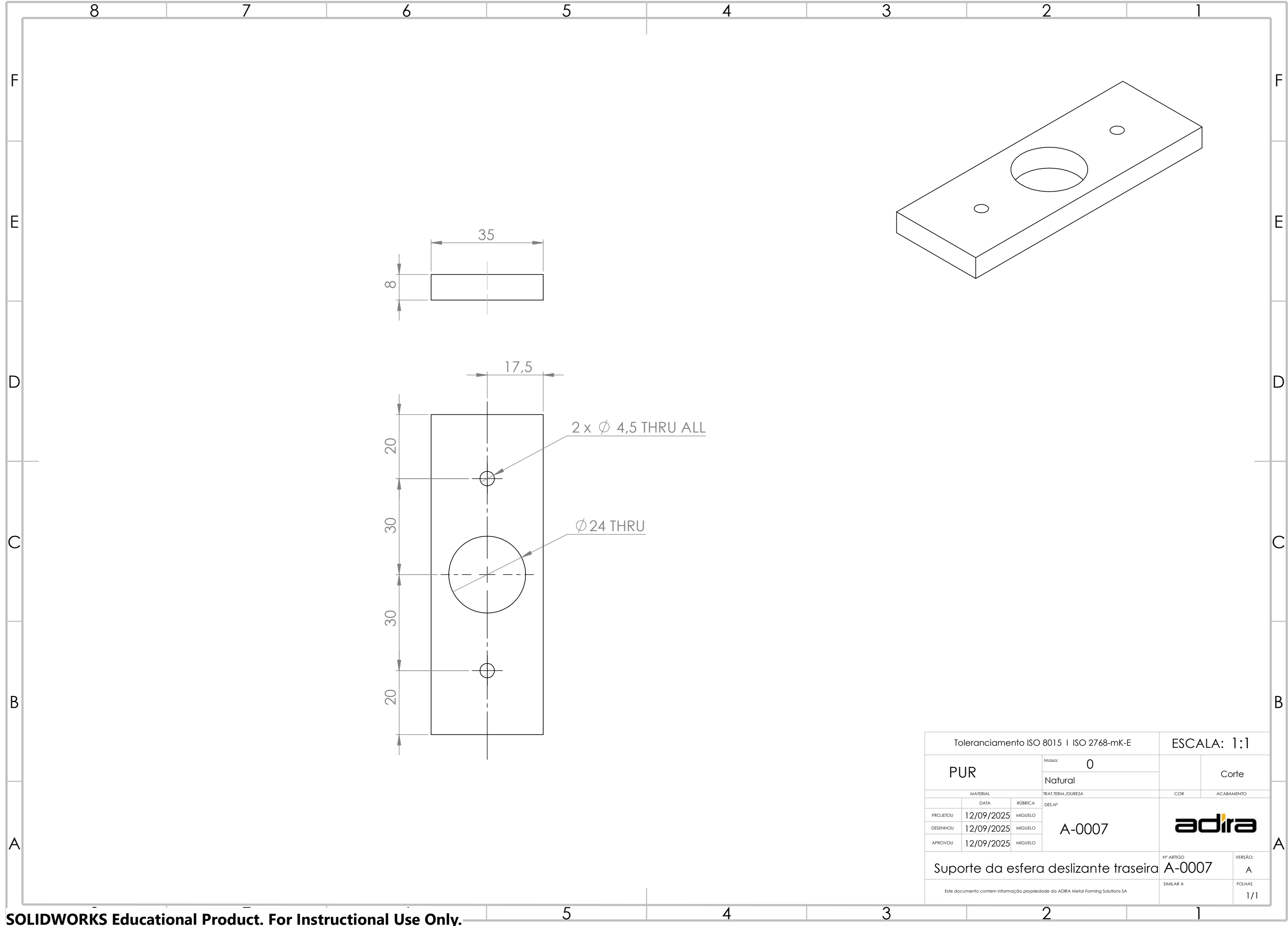
N. do Item	Número da Peça	Descrição	Qtd.
1	H-0024	Placa guias eixo x	1
2	200330	Guia	2
3	A-0015	Batente	4

Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:10	
VER LISTA DE PEÇAS			Massa:	12	Montagem
			Natural		
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA	COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº		
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO			
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO			
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO			
C-0009					
Chapa+guias				Nº ARTIGO	VERSÃO:
				C-0009	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA				SIMILAR A	FOLHAS
					1/1

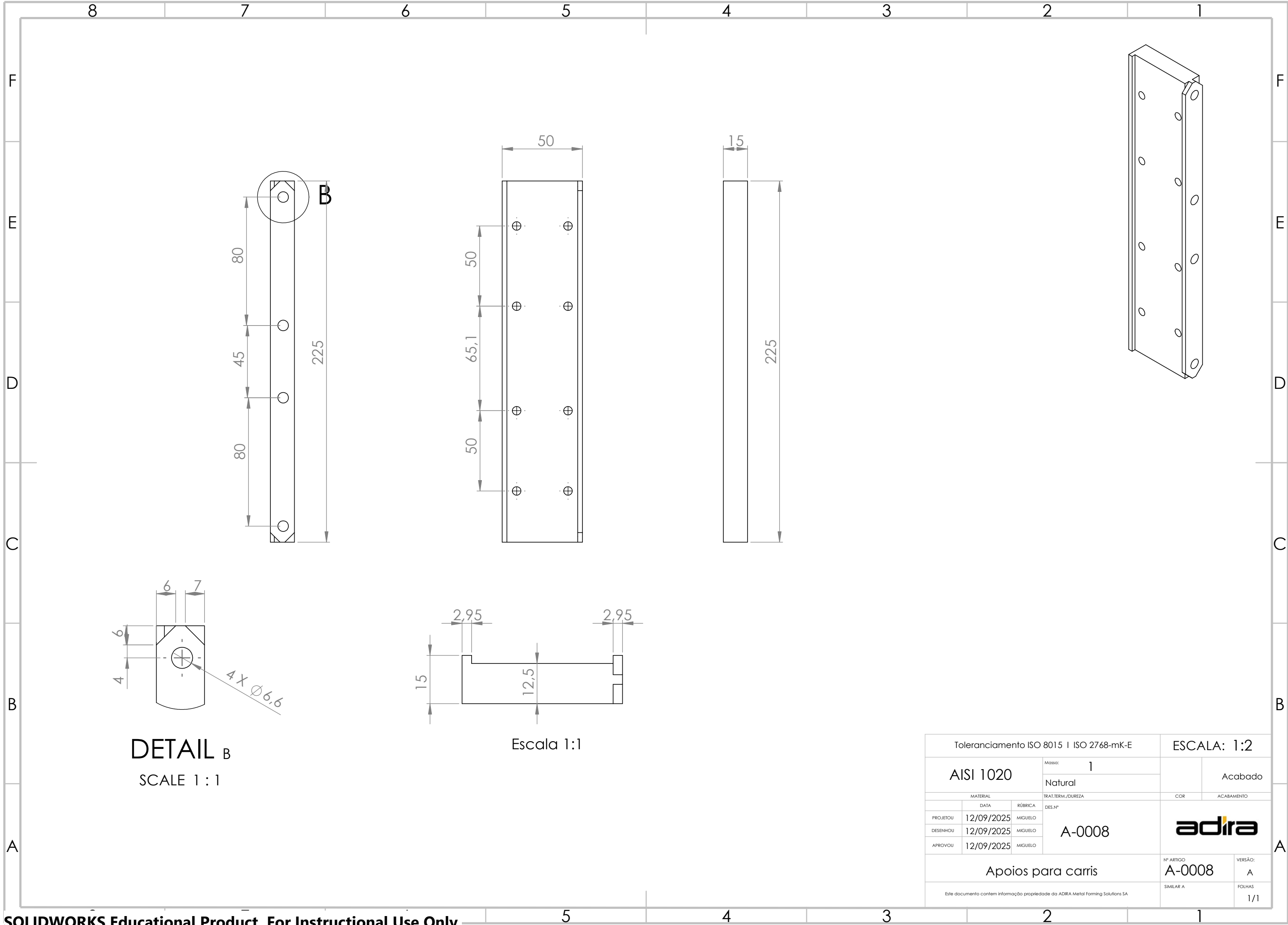




Toleranciamento ISO 8015 I ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:5		
PUR			Módulo: 0			Corte
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	A-0002			
PROJETOU	12/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	12/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	12/09/2025	MIGUELO				
Suporte das esferas deslizantes					Nº ARTIGO	VERSÃO:
					A-0002	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS
						1/1



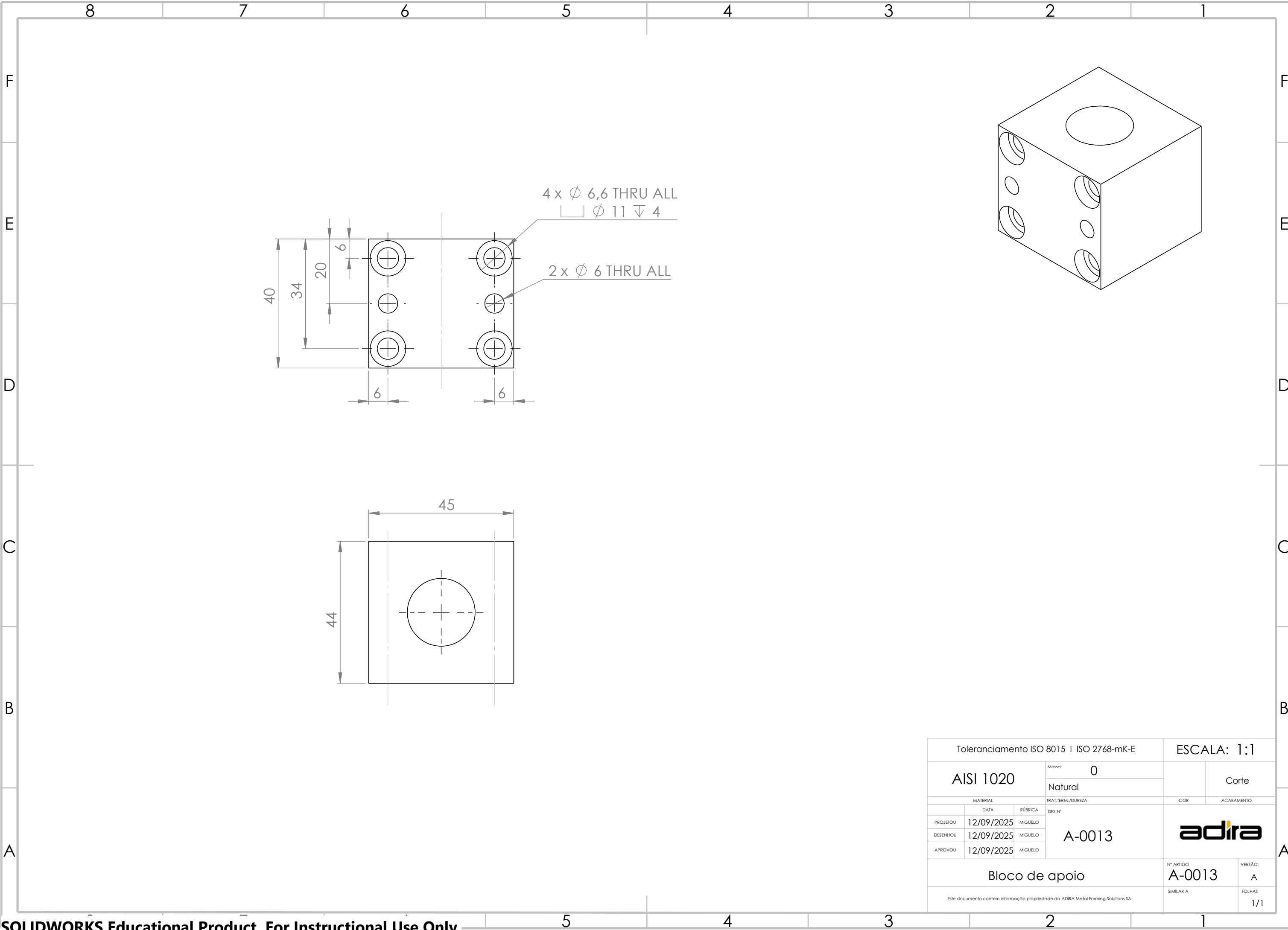
Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:1		
PUR			Módulo: 0			Corte
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº A-0007			
PROJETOU	12/09/2025	MIGUEL				
DESENHOU	12/09/2025	MIGUEL				
APROVOU	12/09/2025	MIGUEL				
Suporte da esfera deslizante traseira					Nº ARTIGO	VERSÃO:
					A-0007	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS
						1/1



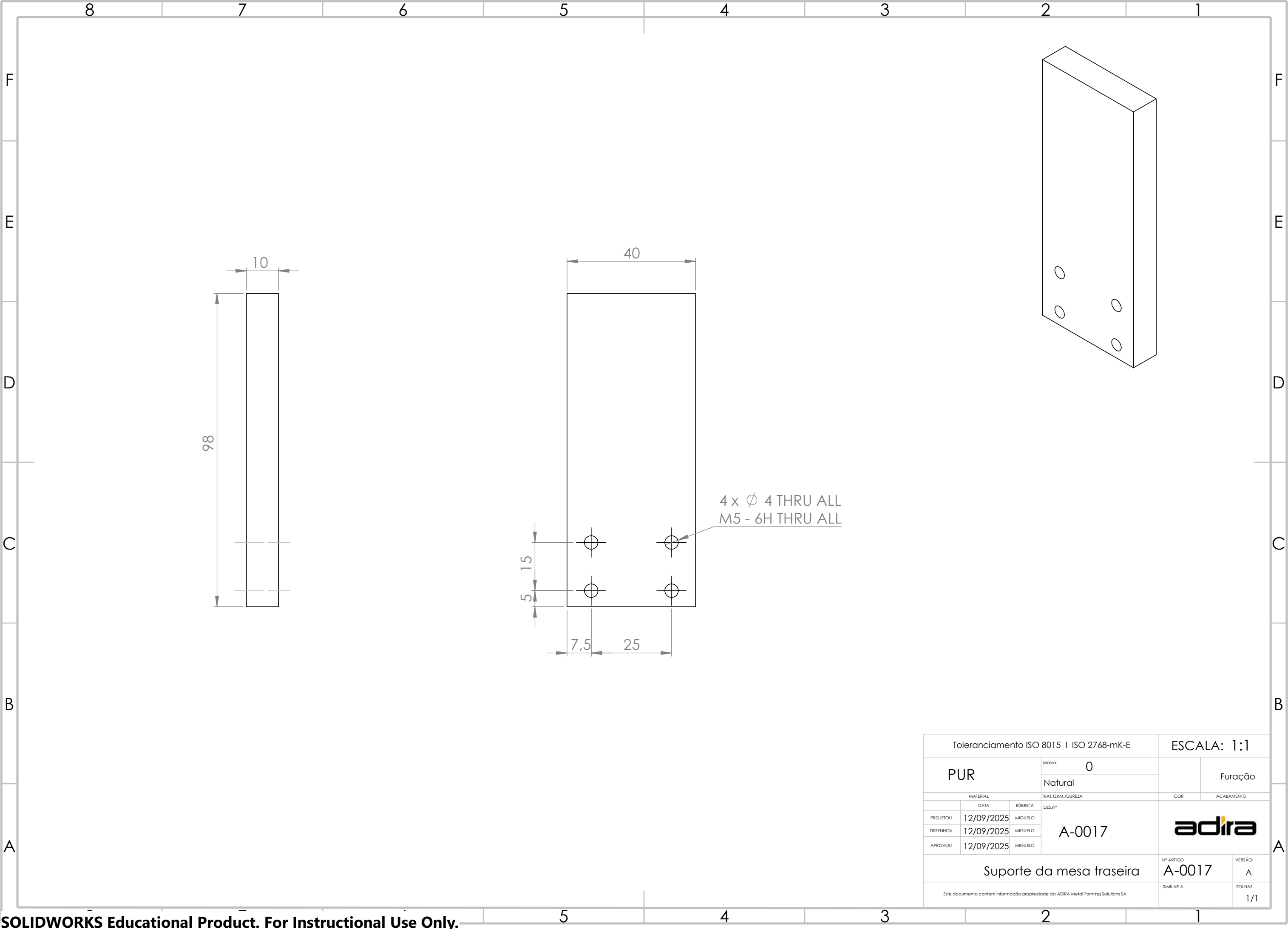
DETAIL B
SCALE 1 : 1

Escala 1:1

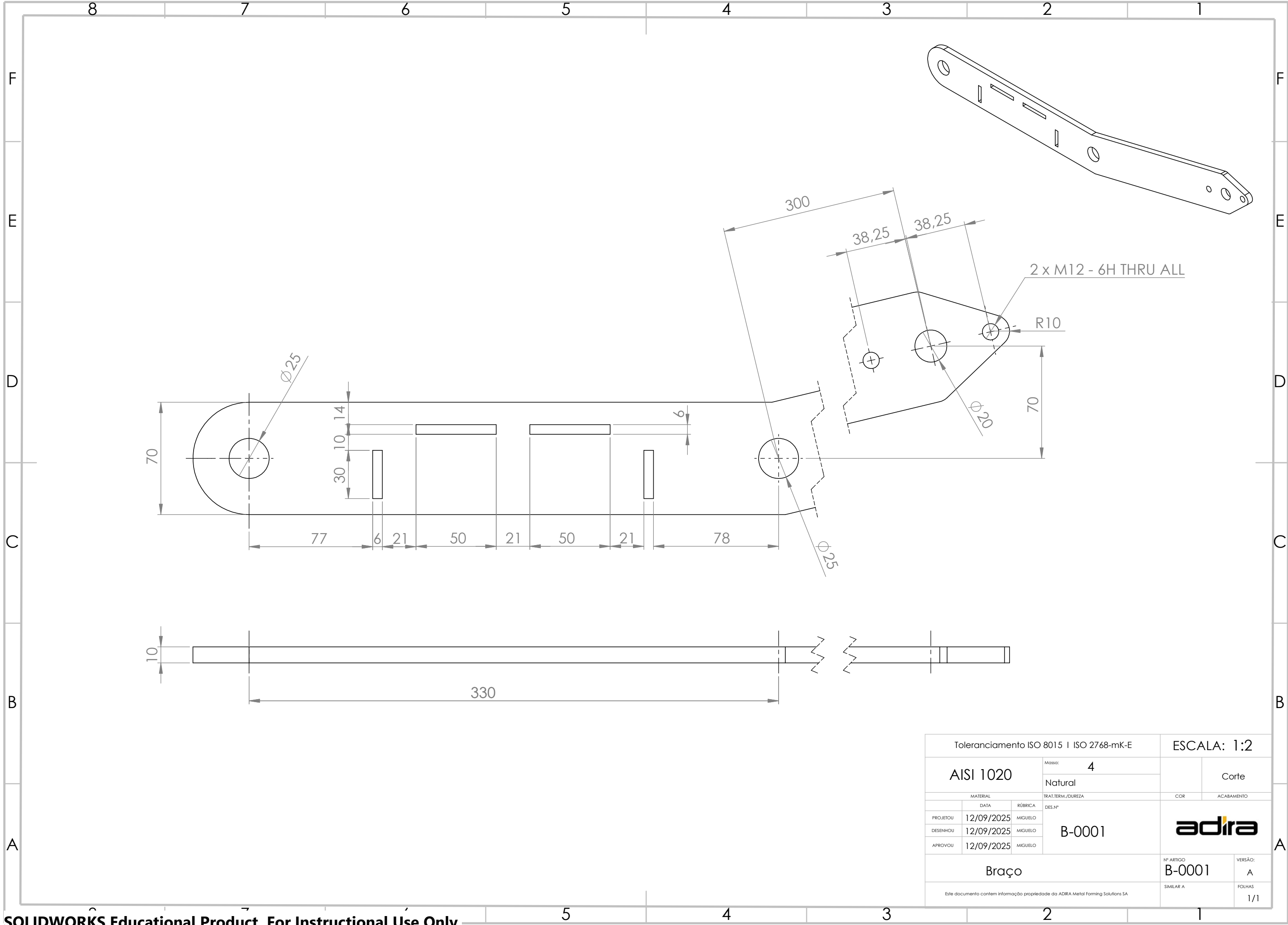
Toleranciamento ISO 8015 I ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:2		
AISI 1020			Módulo: 1			Acabado
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº A-0008			
PROJETOU	12/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	12/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	12/09/2025	MIGUELO				
Apoios para carris					Nº ARTIGO A-0008	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS 1/1

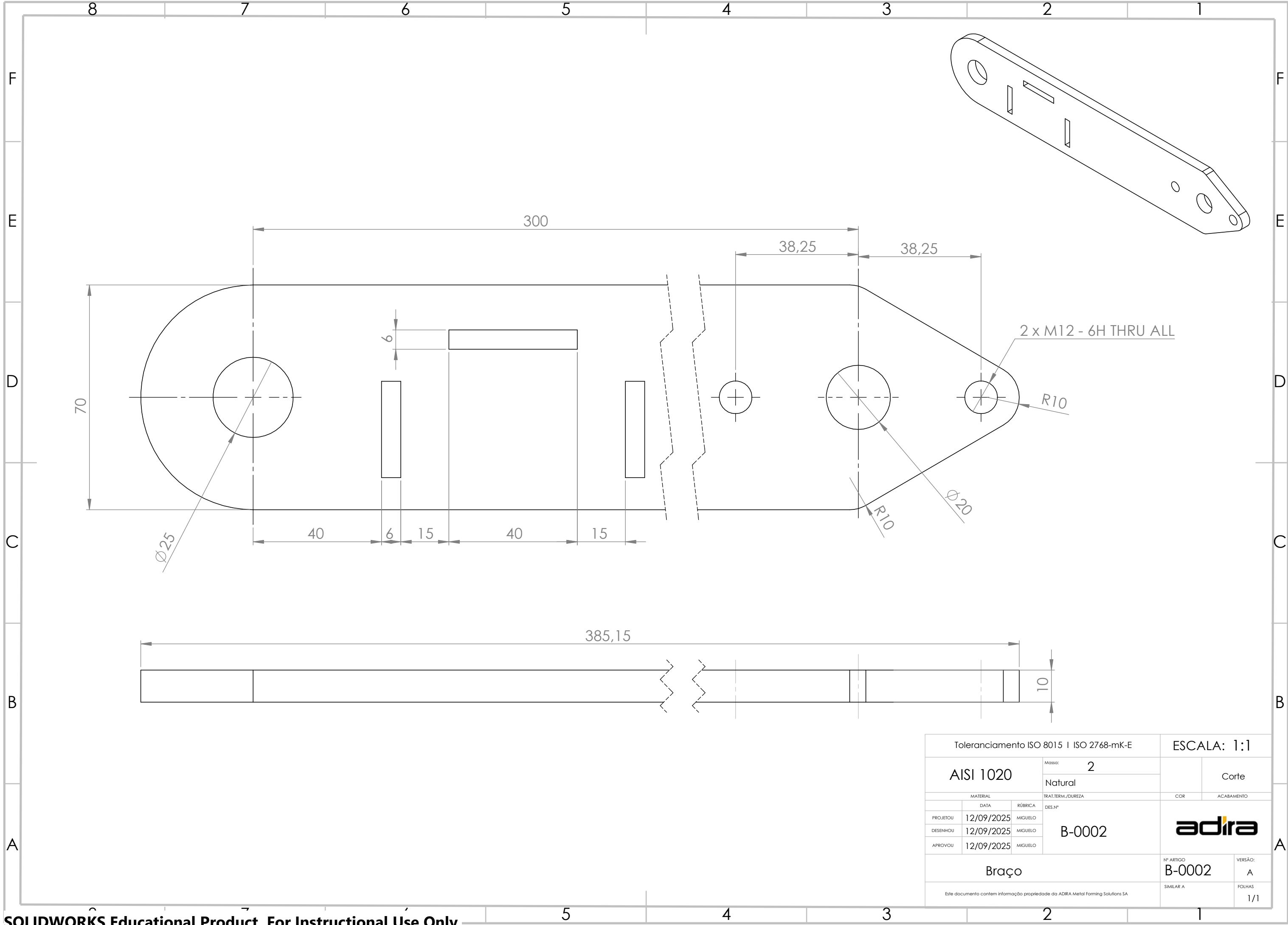


Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:1		
AISI 1020			Módulo: 0			Corte
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº A-0013			
PROJETOU	12/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	12/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	12/09/2025	MIGUELO				
Bloco de apoio					Nº ARTIGO A-0013	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS 1/1

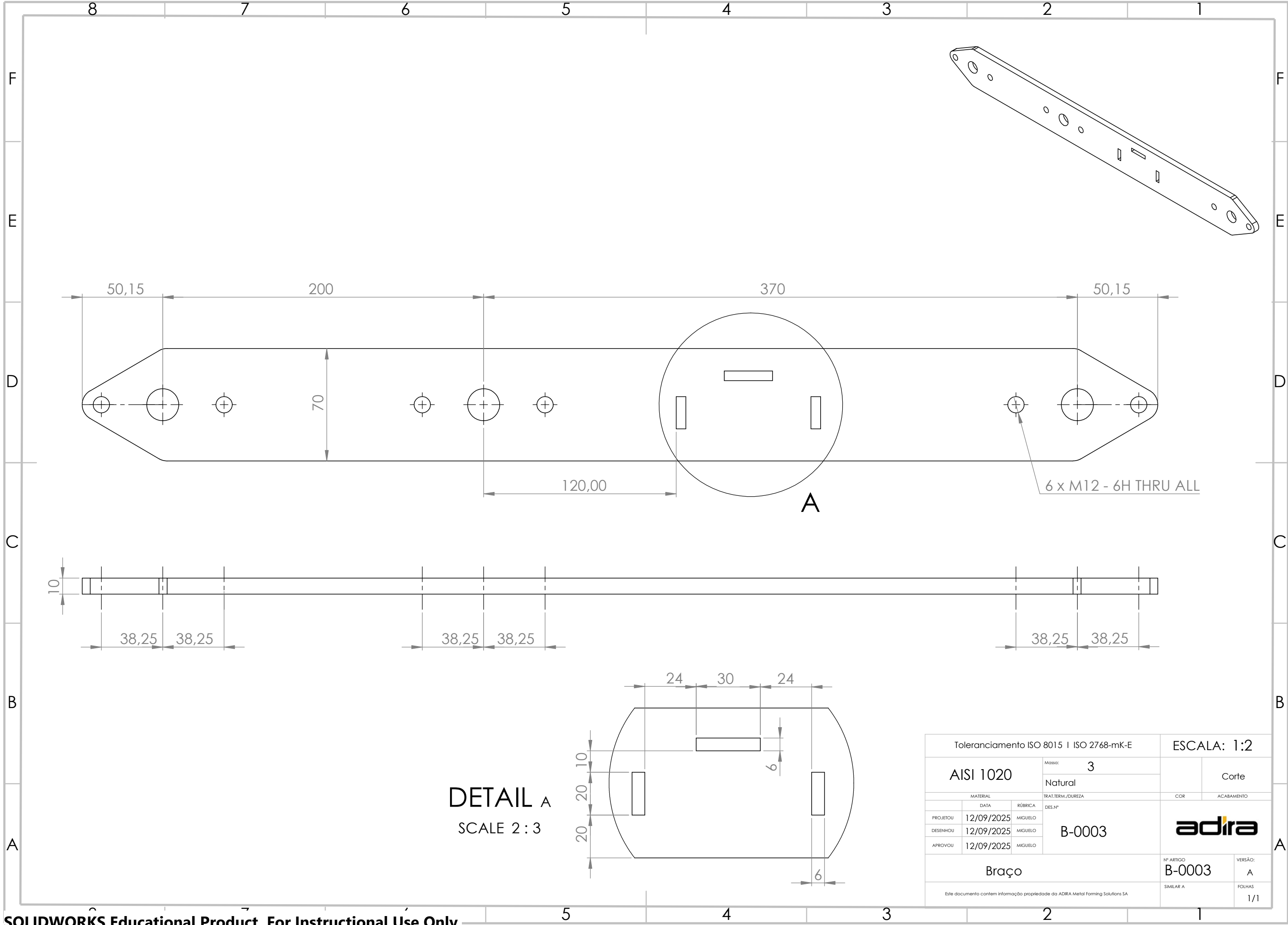


Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:1		
PUR			Módulo: 0			Furação
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº A-0017			
PROJETOU	12/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	12/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	12/09/2025	MIGUELO				
Suporte da mesa traseira					Nº ARTIGO A-0017	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS 1/1

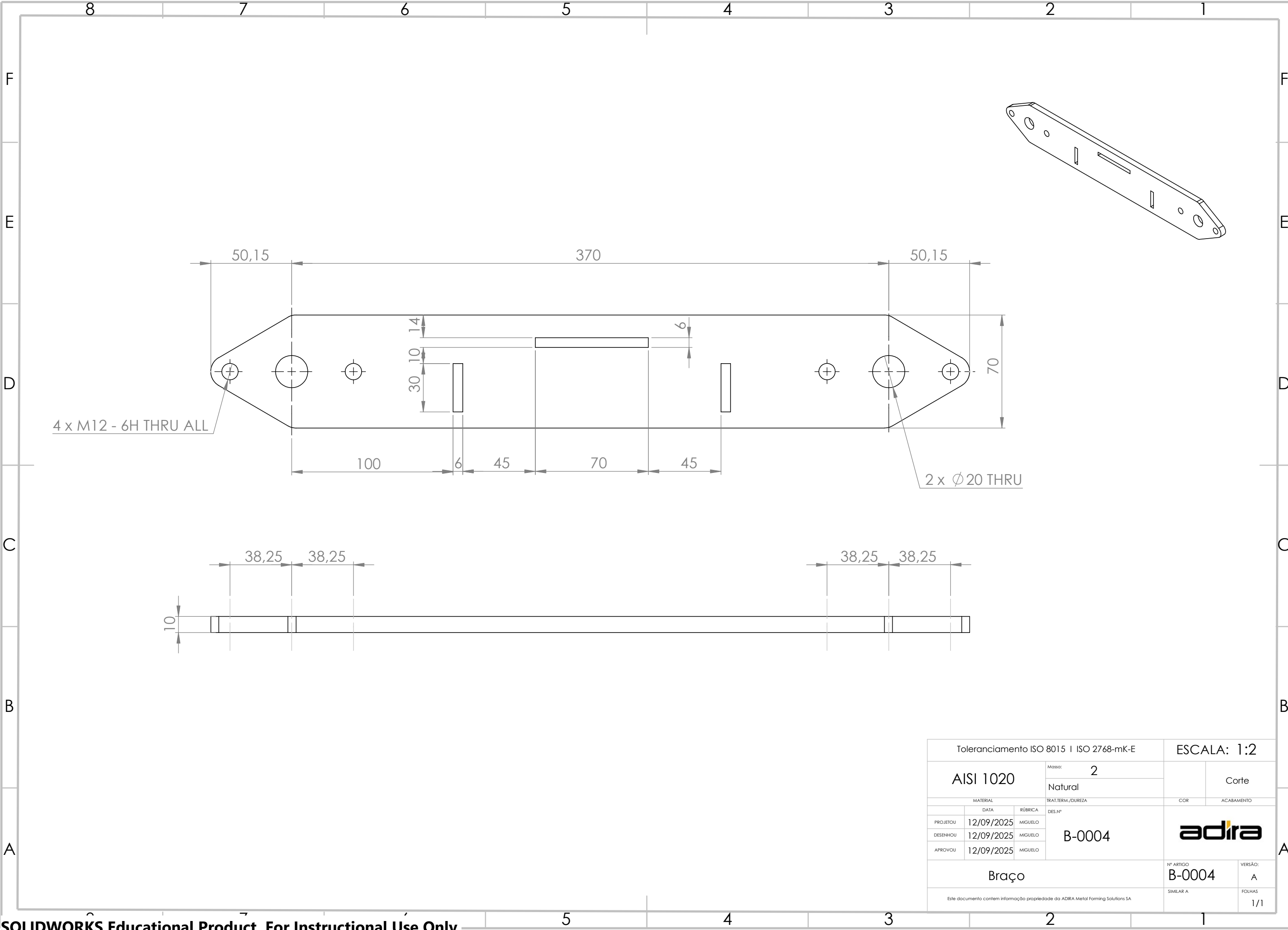




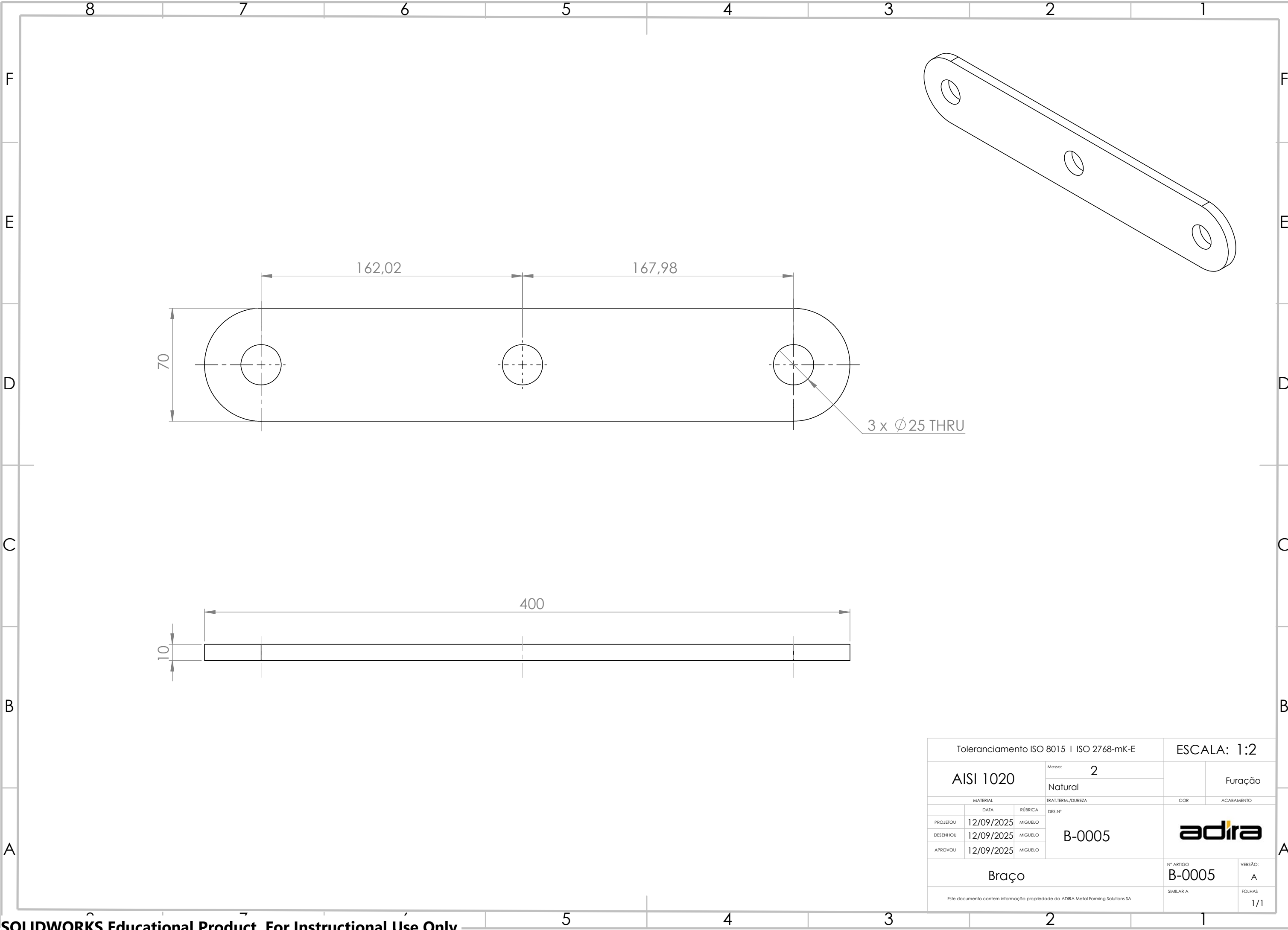
Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:1		
AISI 1020			MATERIAL: 2			Corte
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº B-0002			
PROJETOU	12/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	12/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	12/09/2025	MIGUELO				
Braço					Nº ARTIGO B-0002	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS 1/1



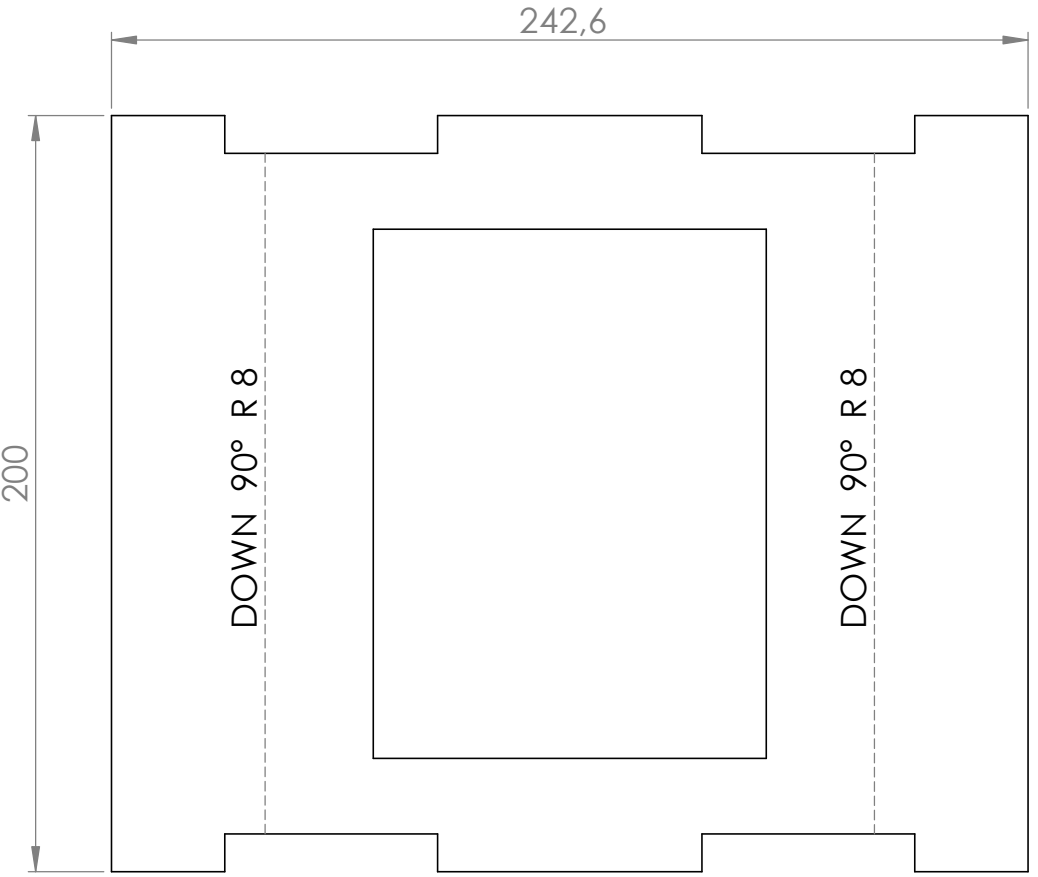
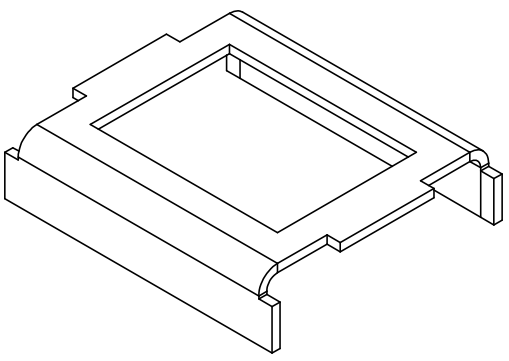
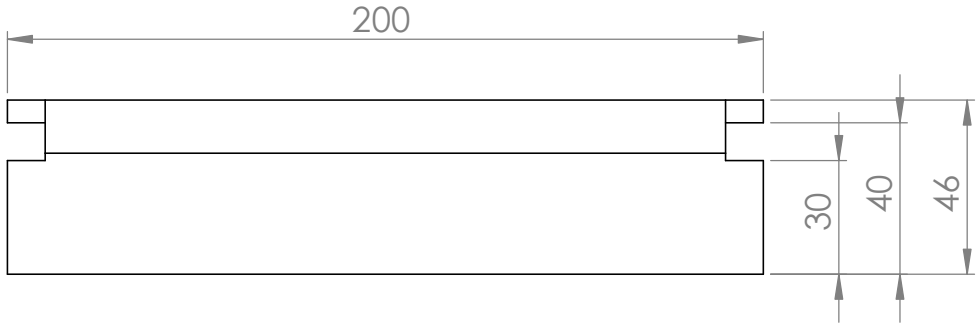
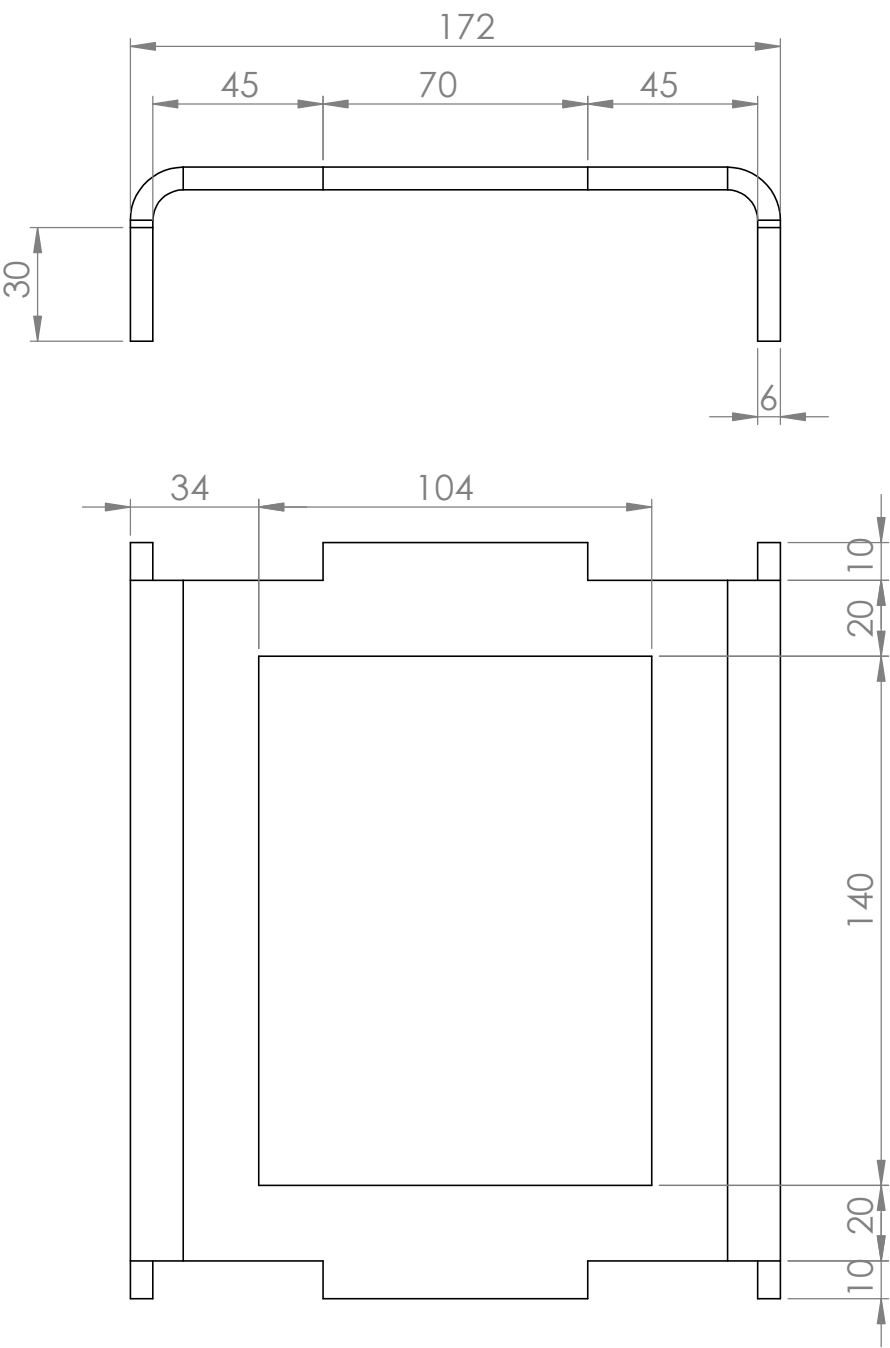
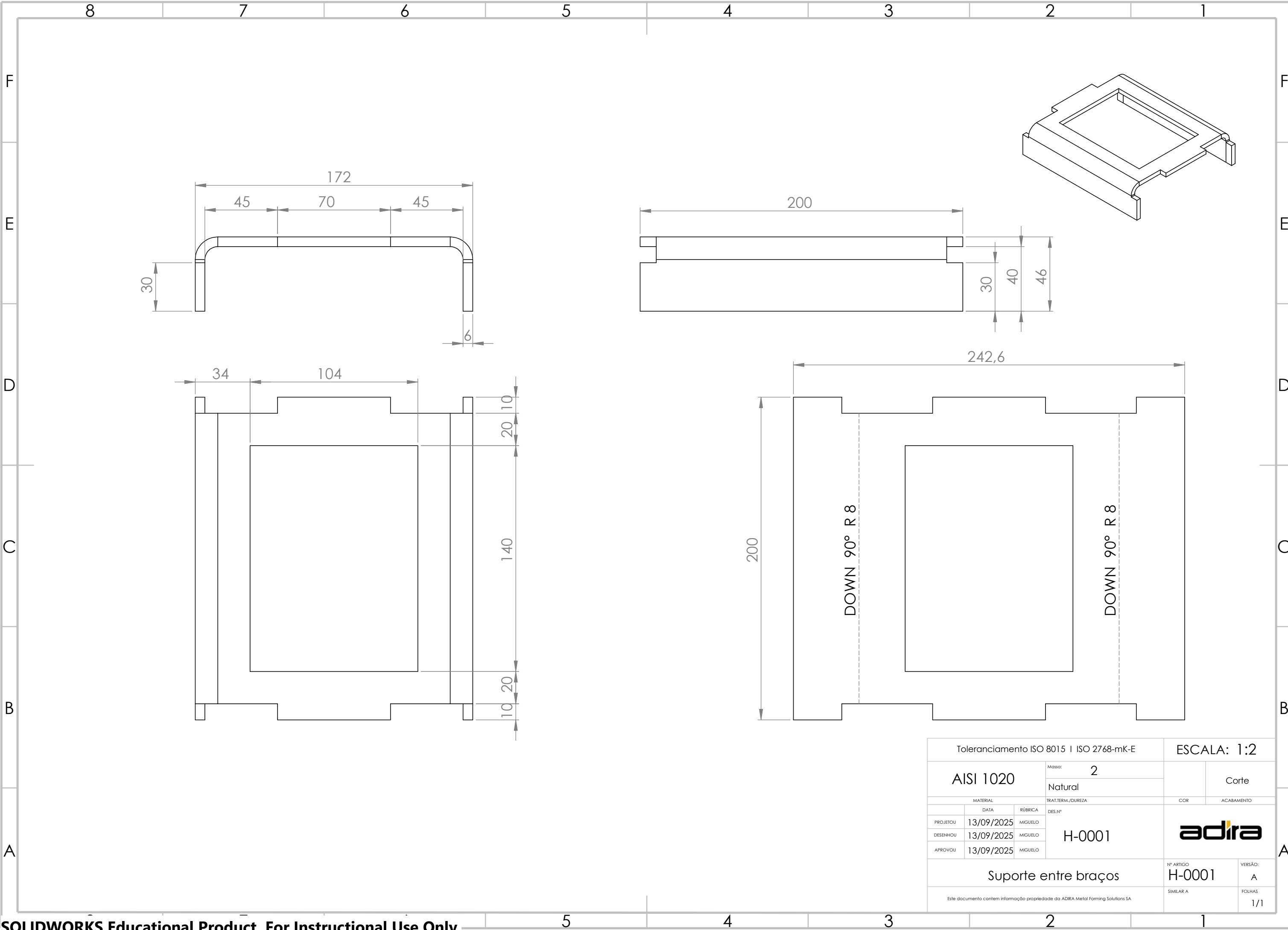
Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:2		
AISI 1020			MATERIAL: 3			Corte
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº B-0003			
PROJETOU	12/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	12/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	12/09/2025	MIGUELO				
Braço					Nº ARTIGO B-0003	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS 1/1



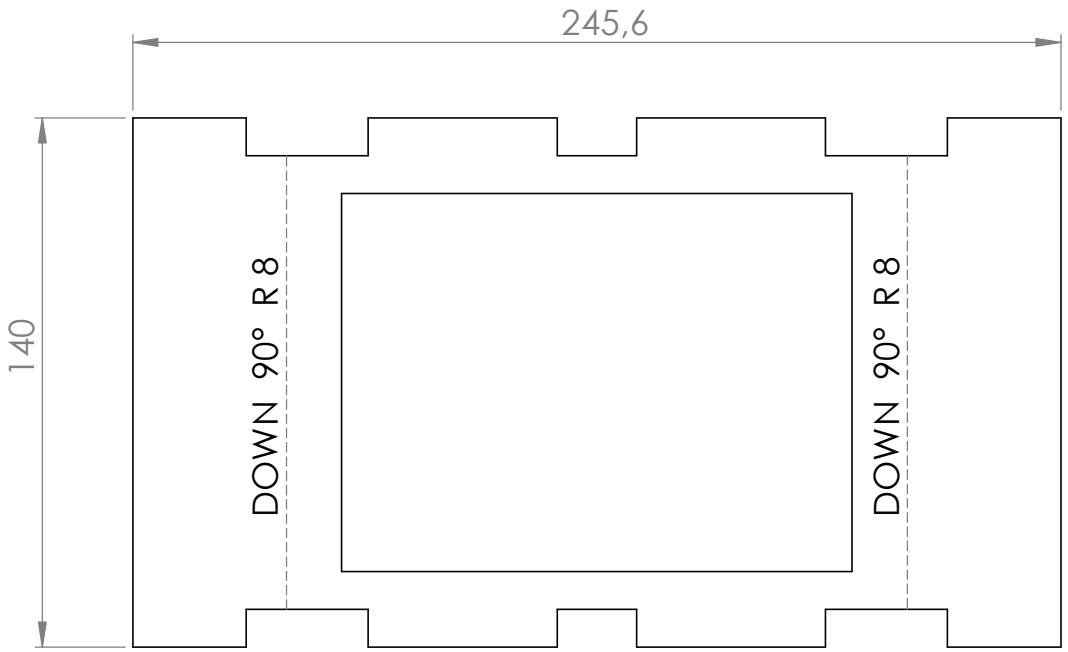
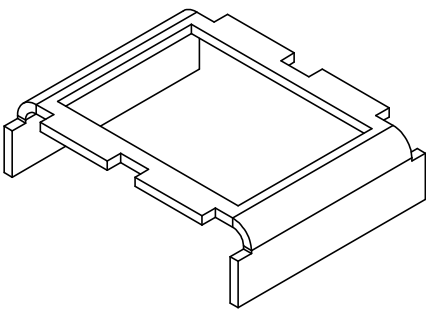
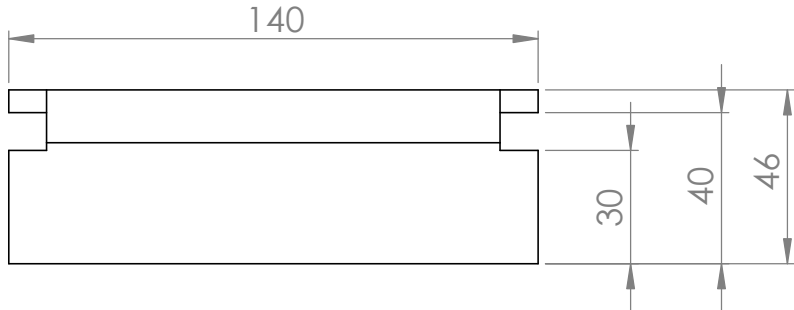
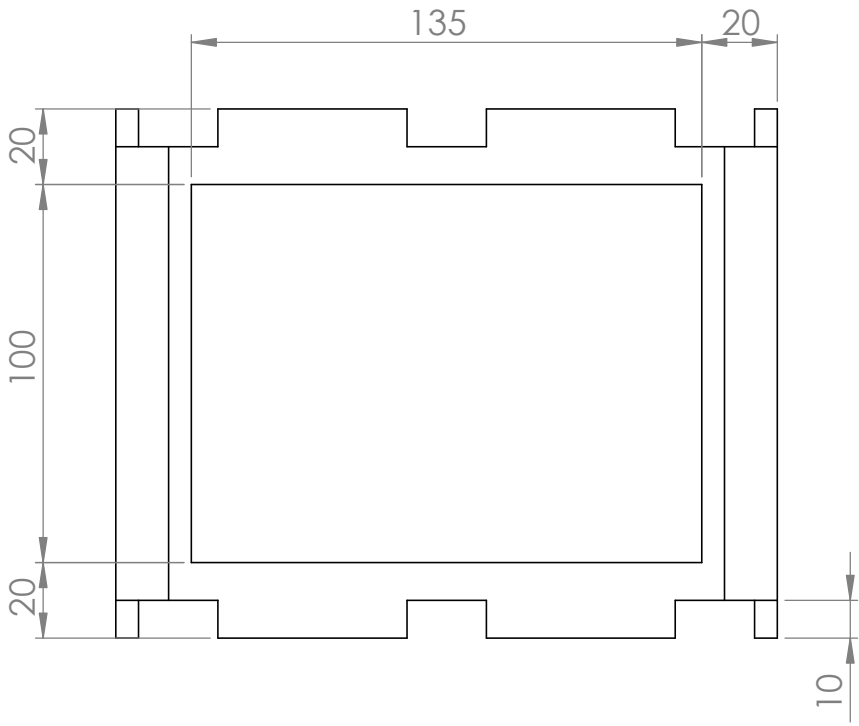
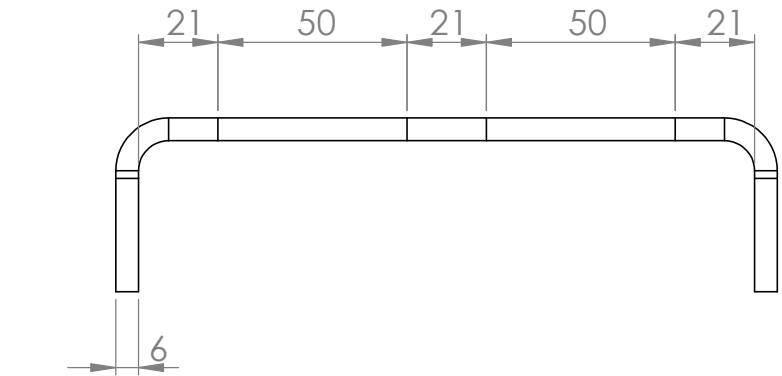
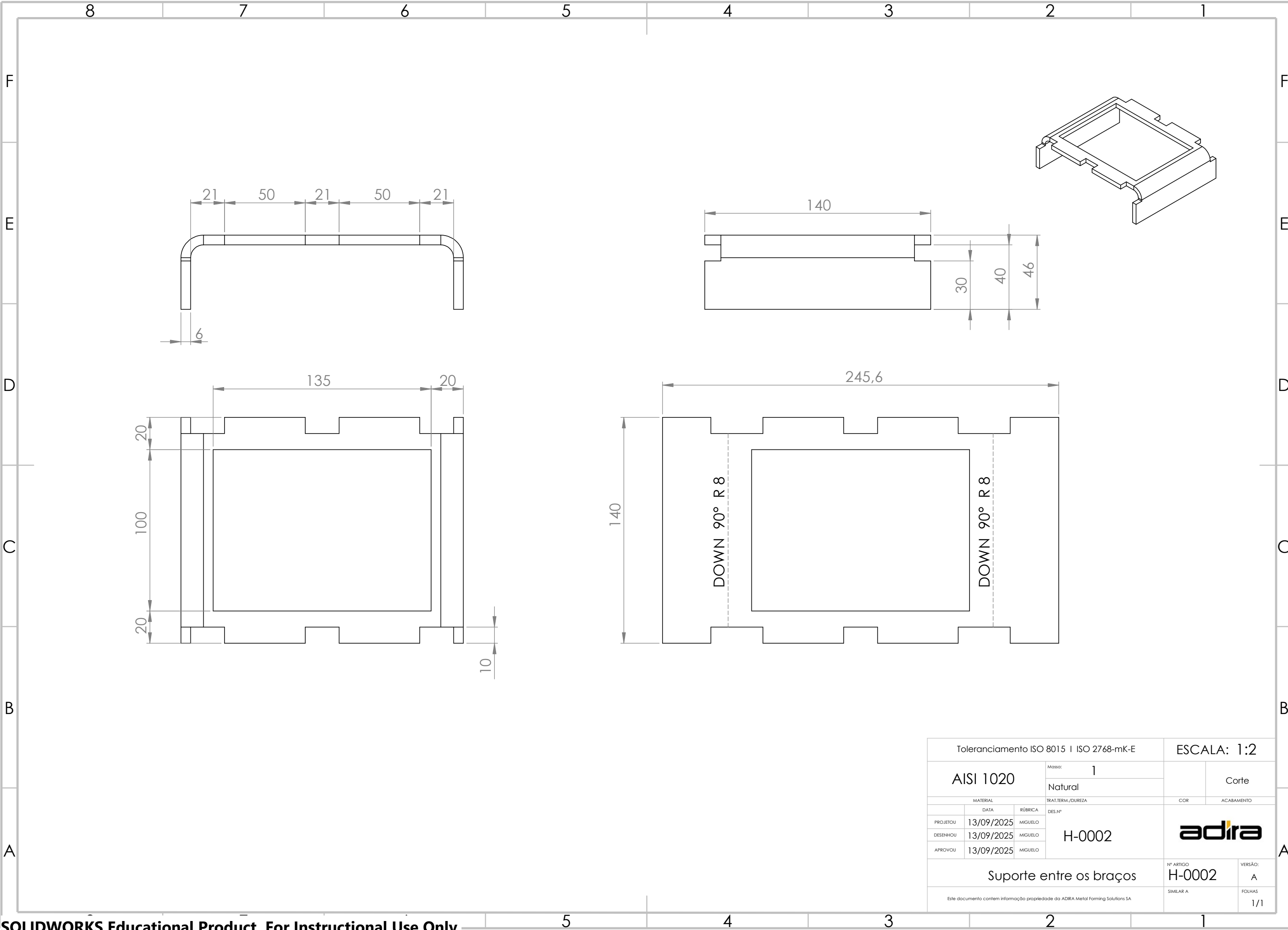
Toleranciamento ISO 8015 I ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:2	
AISI 1020		Massa: 2			Corte
		Natural			
MATERIAL		TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
DATA	RÚBRICA	DES.Nº			
PROJETOU	12/09/2025	MIGUELO			
DESENHOU	12/09/2025	MIGUELO			
APROVOU	12/09/2025	MIGUELO			
Braço				Nº ARTIGO B-0004	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA				SIMILAR A	FOLHAS 1/1



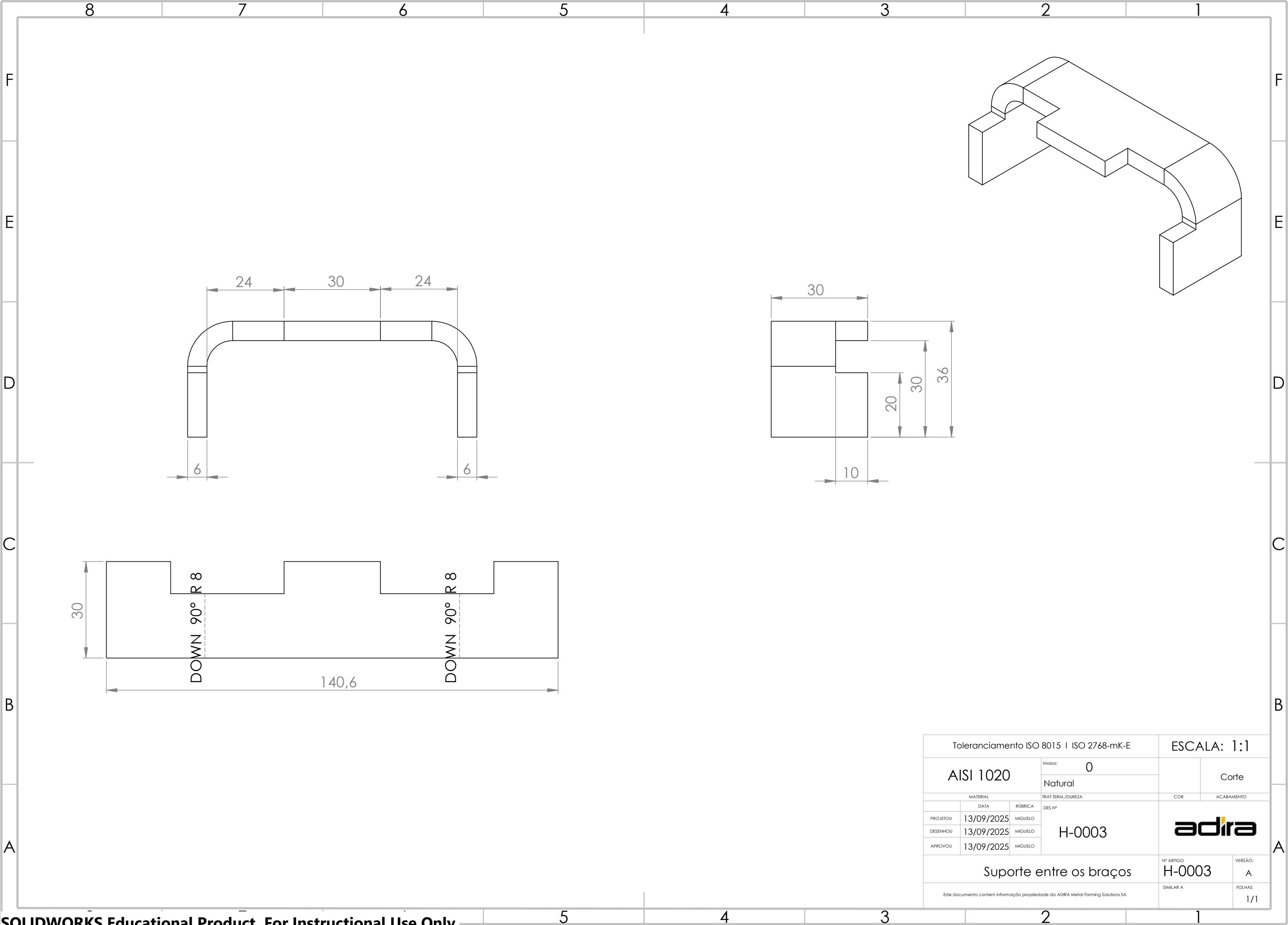
Toleranciamento ISO 8015 I ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:2		
AISI 1020			Módulo: 2			Furação
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº B-0005			
PROJETOU	12/09/2025	MIGUEL				
DESENHOU	12/09/2025	MIGUEL				
APROVOU	12/09/2025	MIGUEL				
Braço					Nº ARTIGO B-0005	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS 1/1



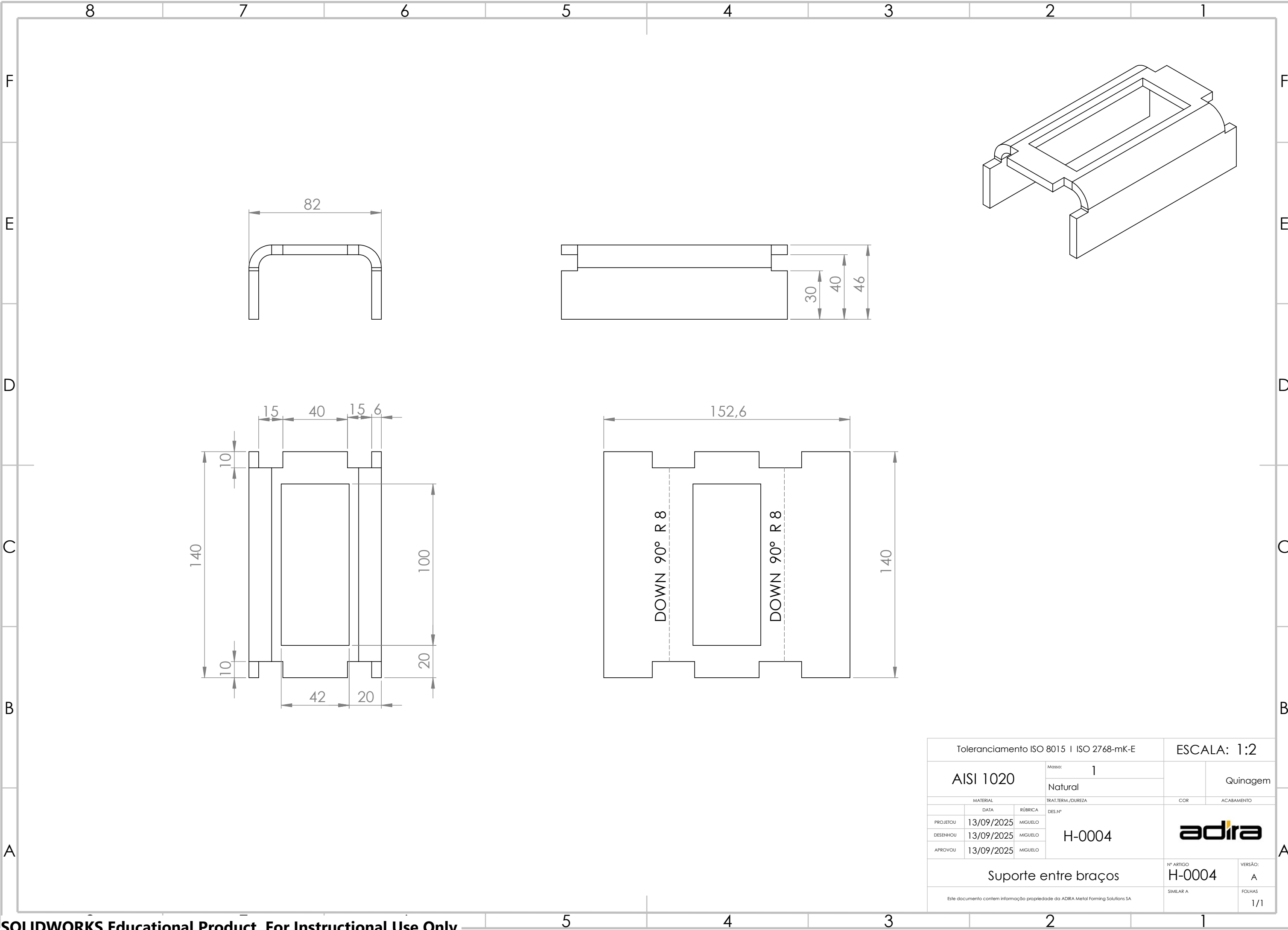
Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:2	
AISI 1020			Massa: 2		Corte
			Natural		
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA	COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº		
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO	H-0001		
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO			
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO			
Suporte entre braços				Nº ARTIGO H-0001	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA				SIMILAR A	FOLHAS 1/1



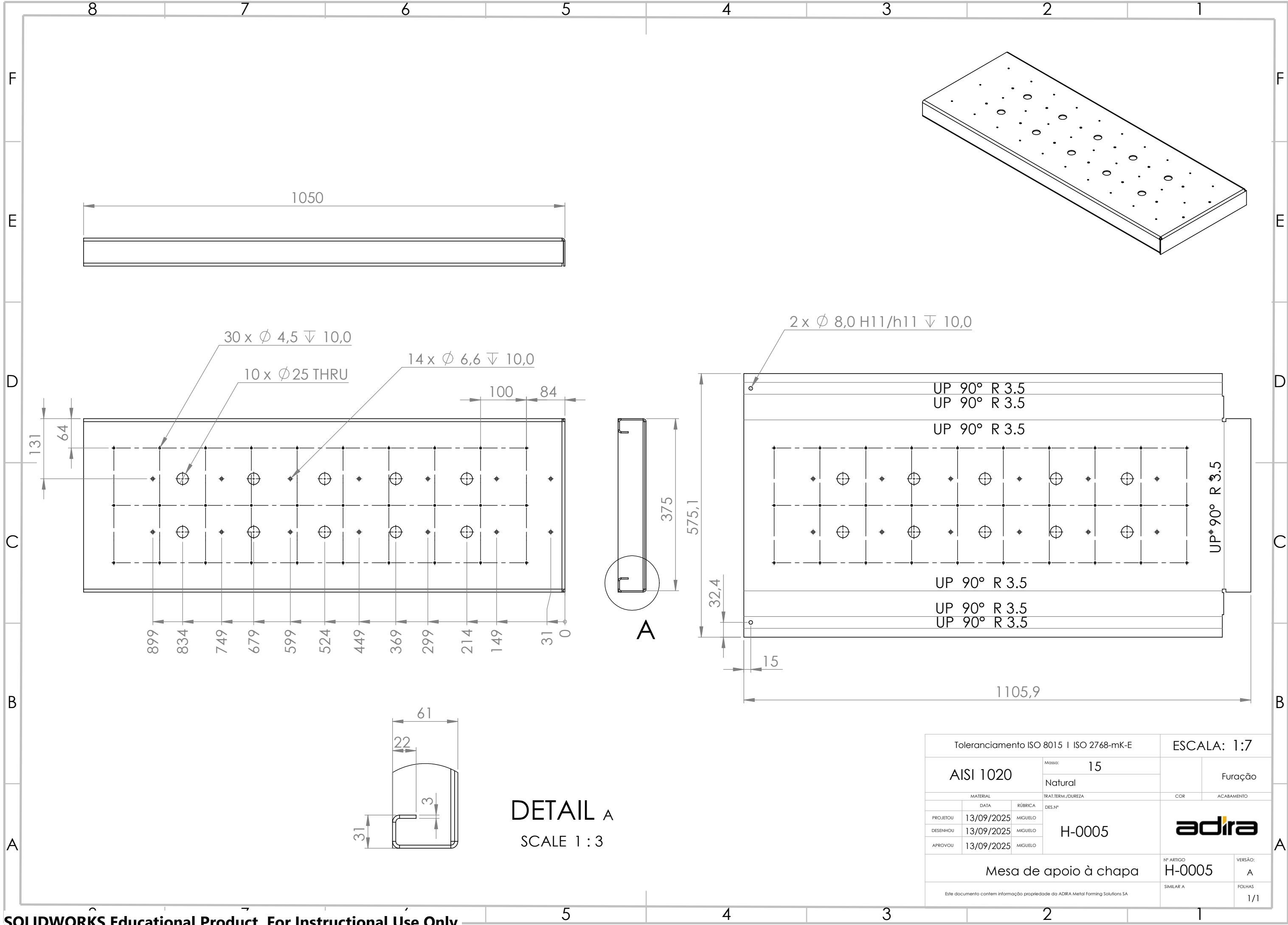
Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:2		
AISI 1020			Massa: 1			Corte
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº H-0002			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Suporte entre os braços					Nº ARTIGO H-0002	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS 1/1

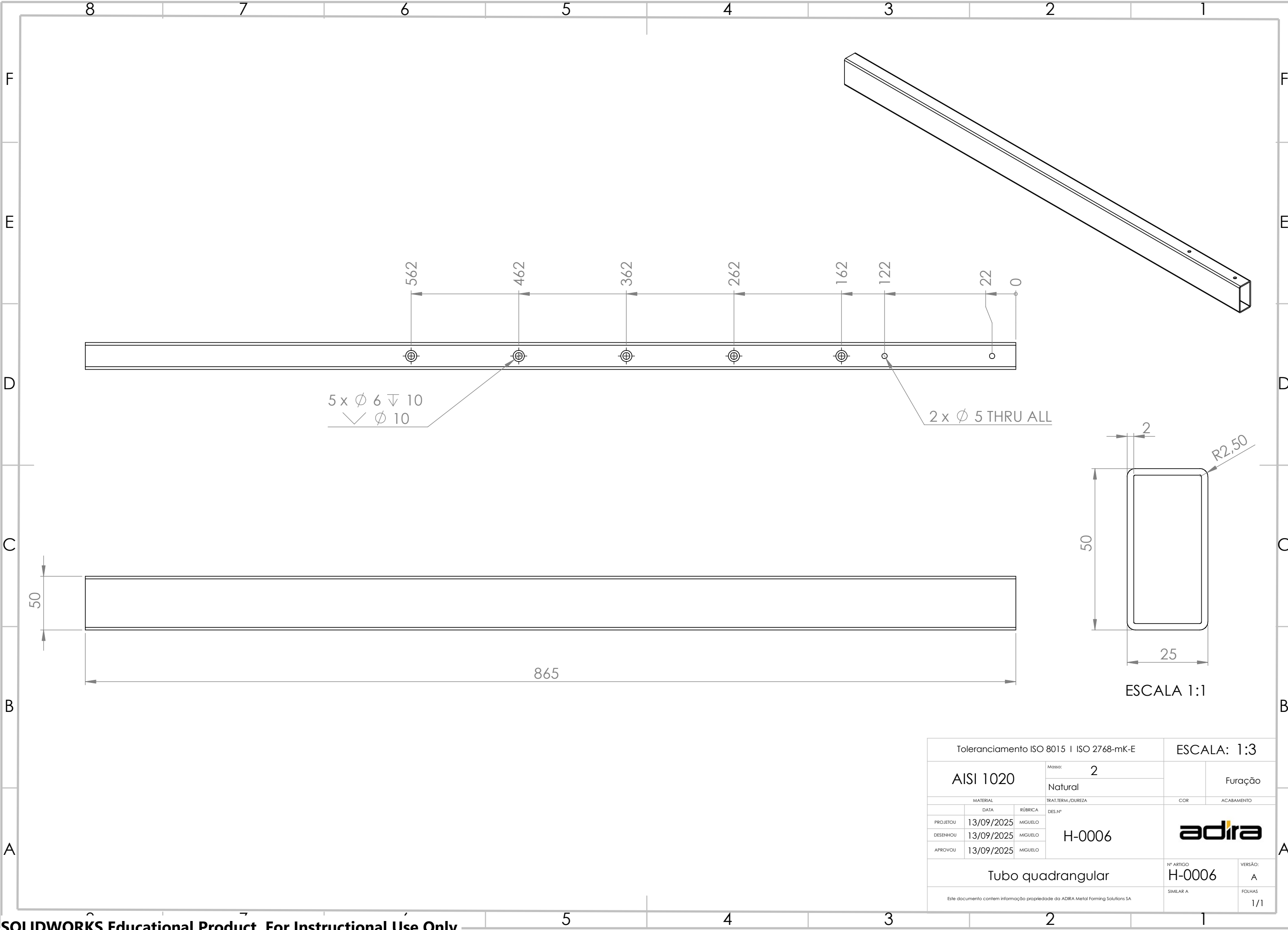


Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:1		
AISI 1020			Módulo: 0			Corte
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Suporte entre os braços					Nº ARTIGO	VERSÃO:
					H-0003	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS
						1/1



Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:2		
AISI 1020			Módulo: 1			Quinagem
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº H-0004			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Suporte entre braços					Nº ARTIGO H-0004	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS 1/1



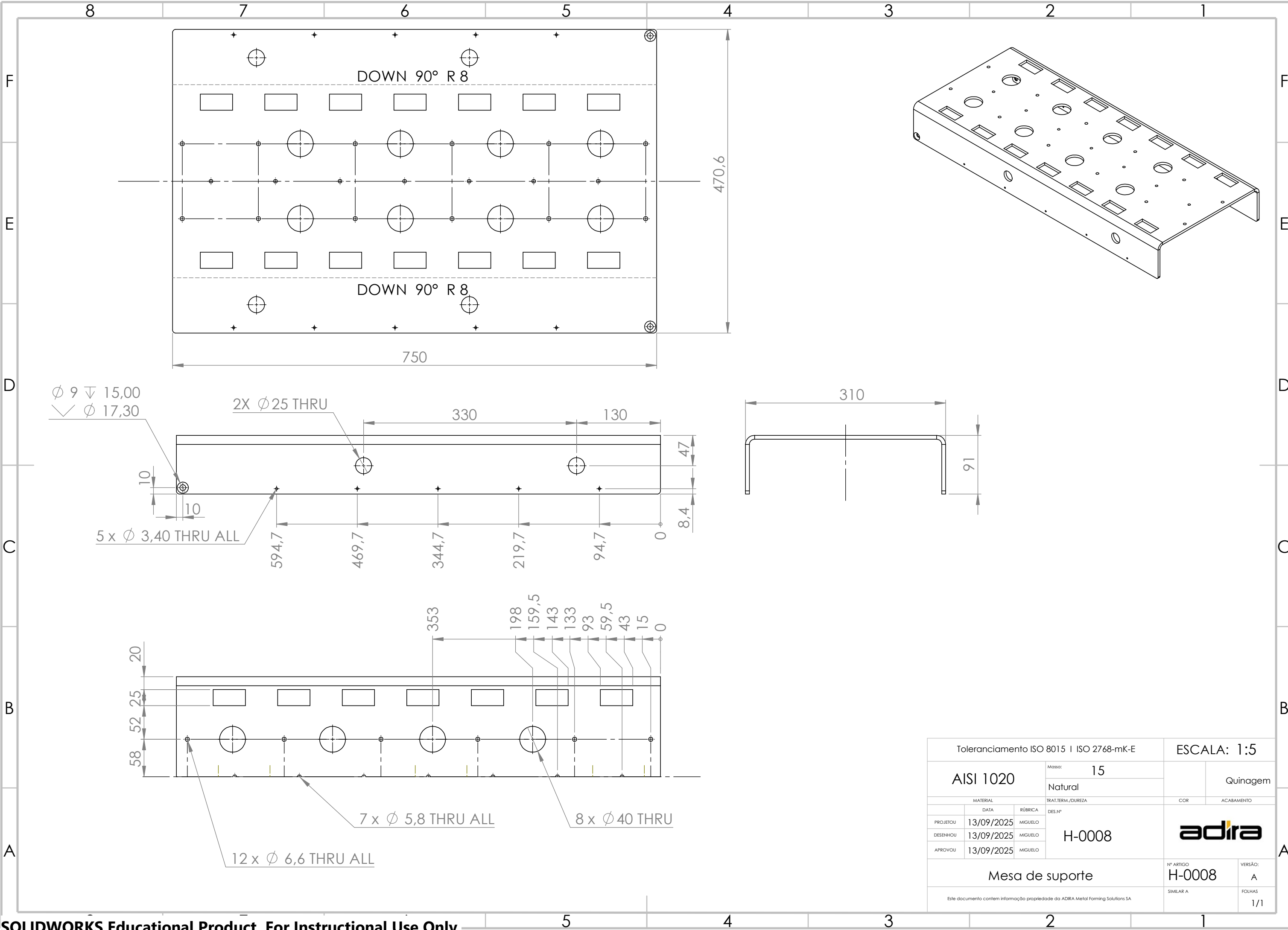


5 x Ø 6 ∇ 10
✓ Ø 10

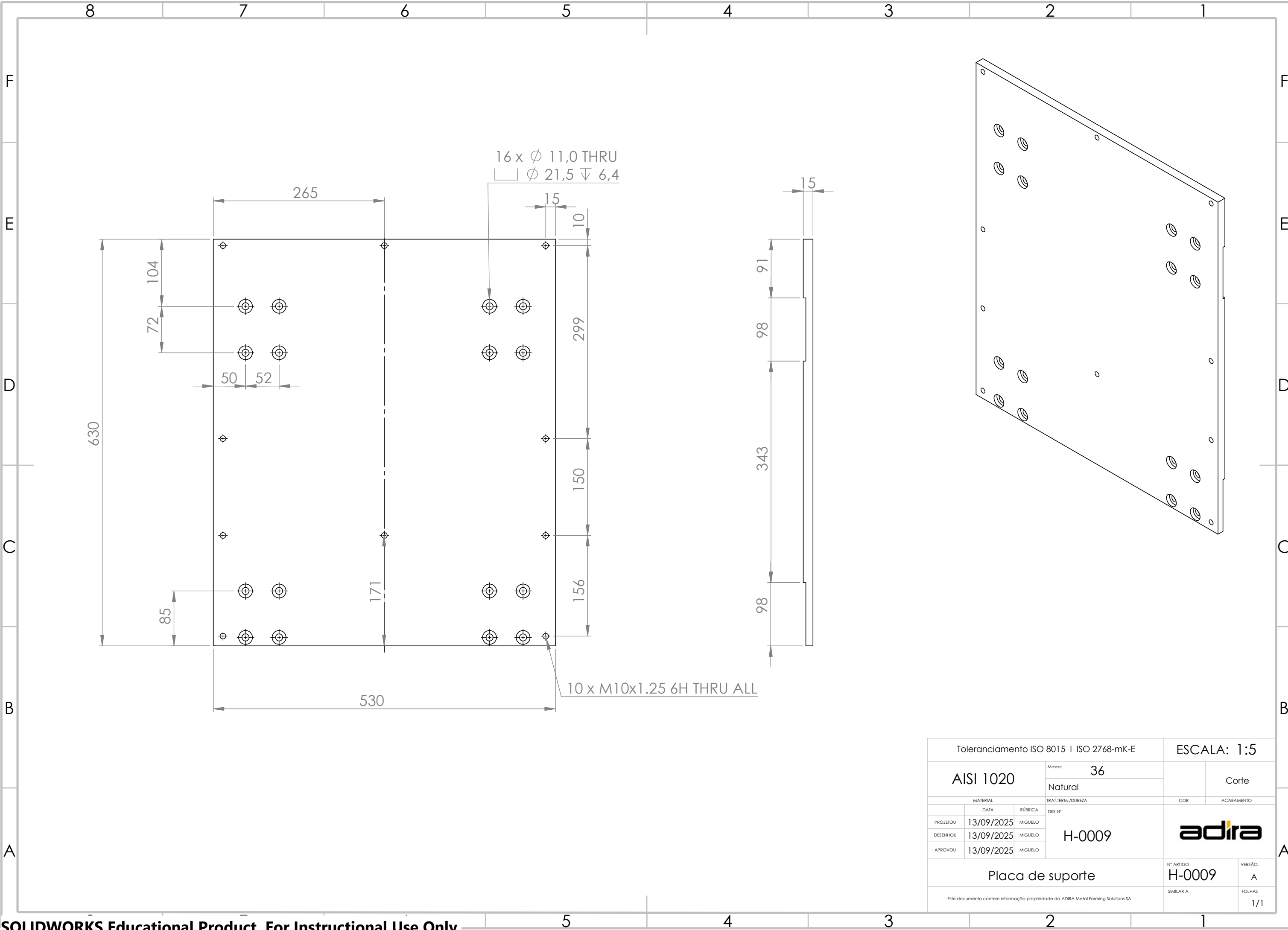
2 x Ø 5 THRU ALL

ESCALA 1:1

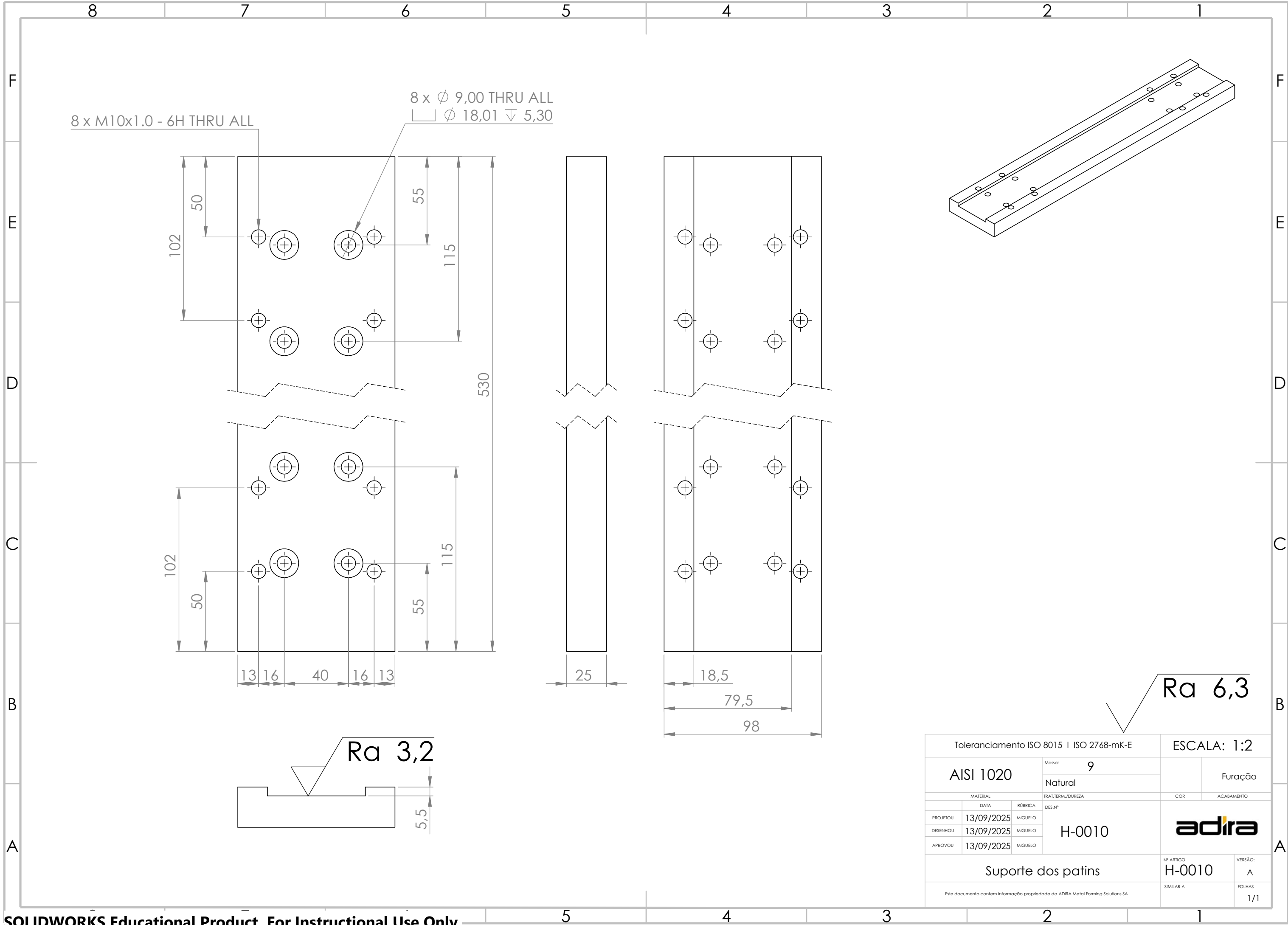
Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:3	
AISI 1020		Massa: 2			Furação
		Natural			
MATERIAL		TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº		
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO			
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO			
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO			
H-0006					
Tubo quadrangular				Nº ARTIGO H-0006	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA				SIMILAR A	FOLHAS 1/1

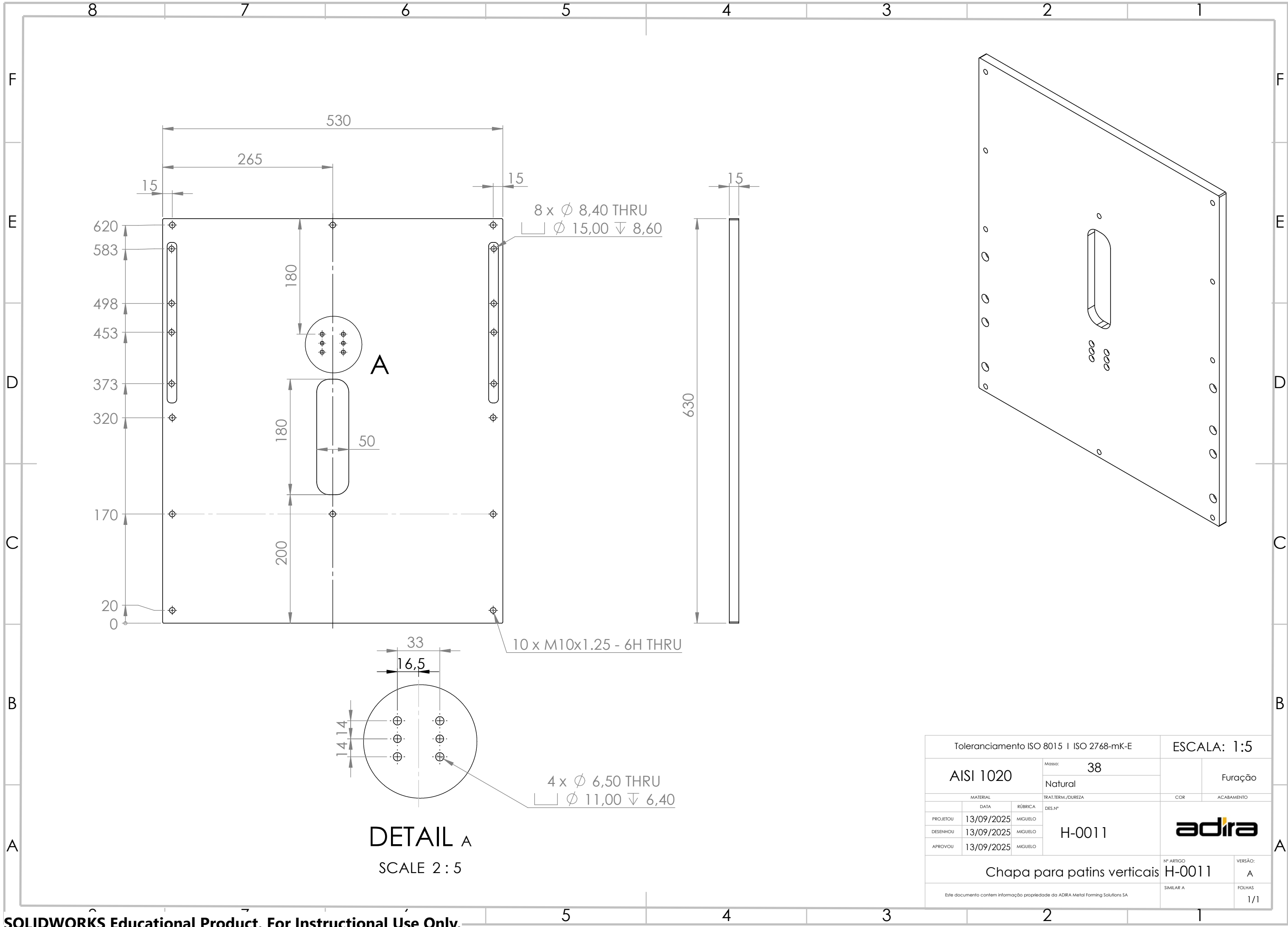


Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:5		
AISI 1020			MAGNA: 15			Quinagem
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Mesa de suporte					Nº ARTIGO	VERSÃO:
					H-0008	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS
						1/1

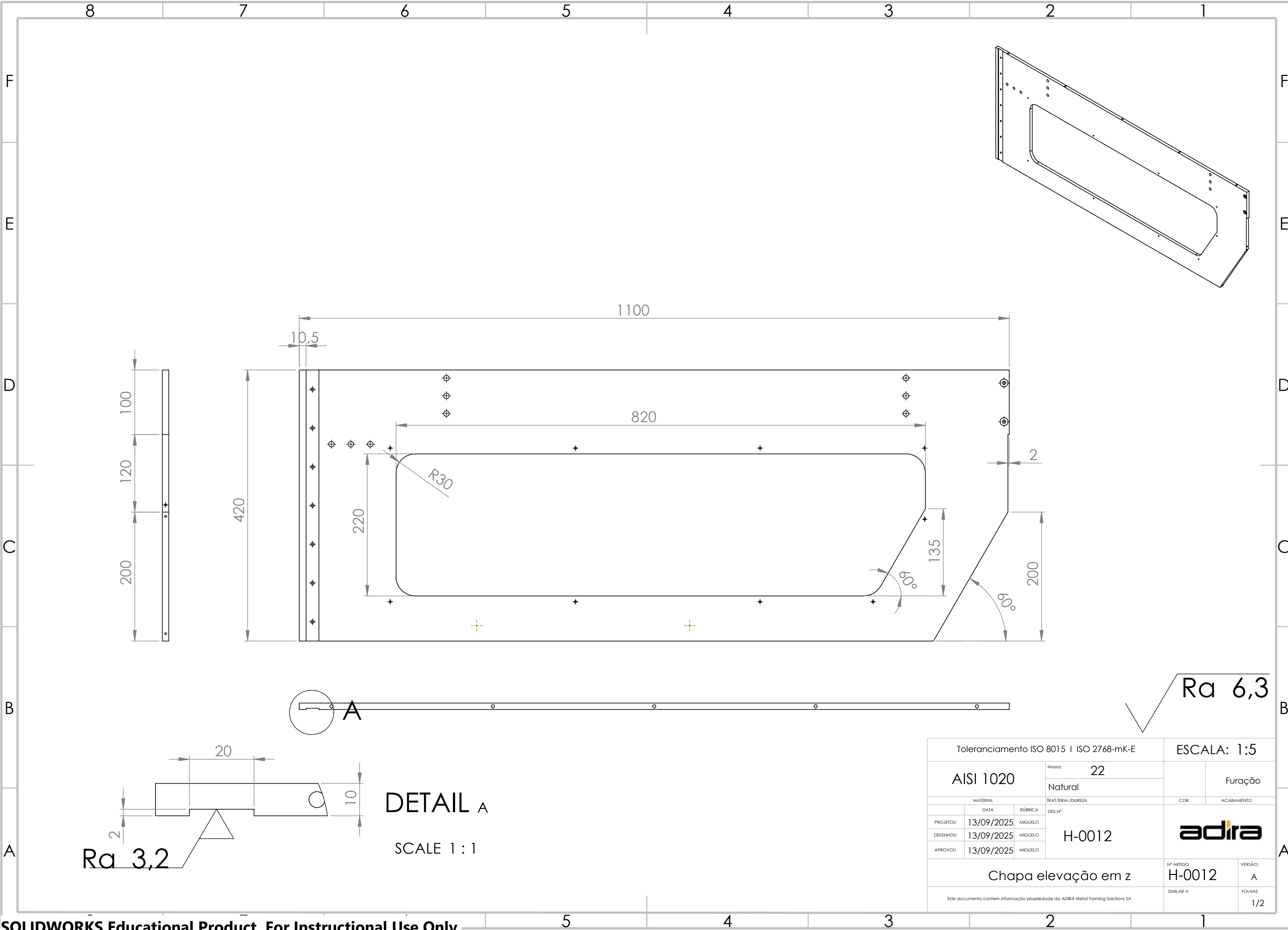


Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:5	
AISI 1020		Módulo: 36			Corte
		Natural			
MATERIAL		TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº		
PROJETOU	13/09/2025	MIGUEL			
DESENHOU	13/09/2025	MIGUEL			
APROVOU	13/09/2025	MIGUEL			
Placa de suporte				Nº ARTIGO	VERSÃO:
				H-0009	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA				SIMILAR A	FOLHAS
					1/1

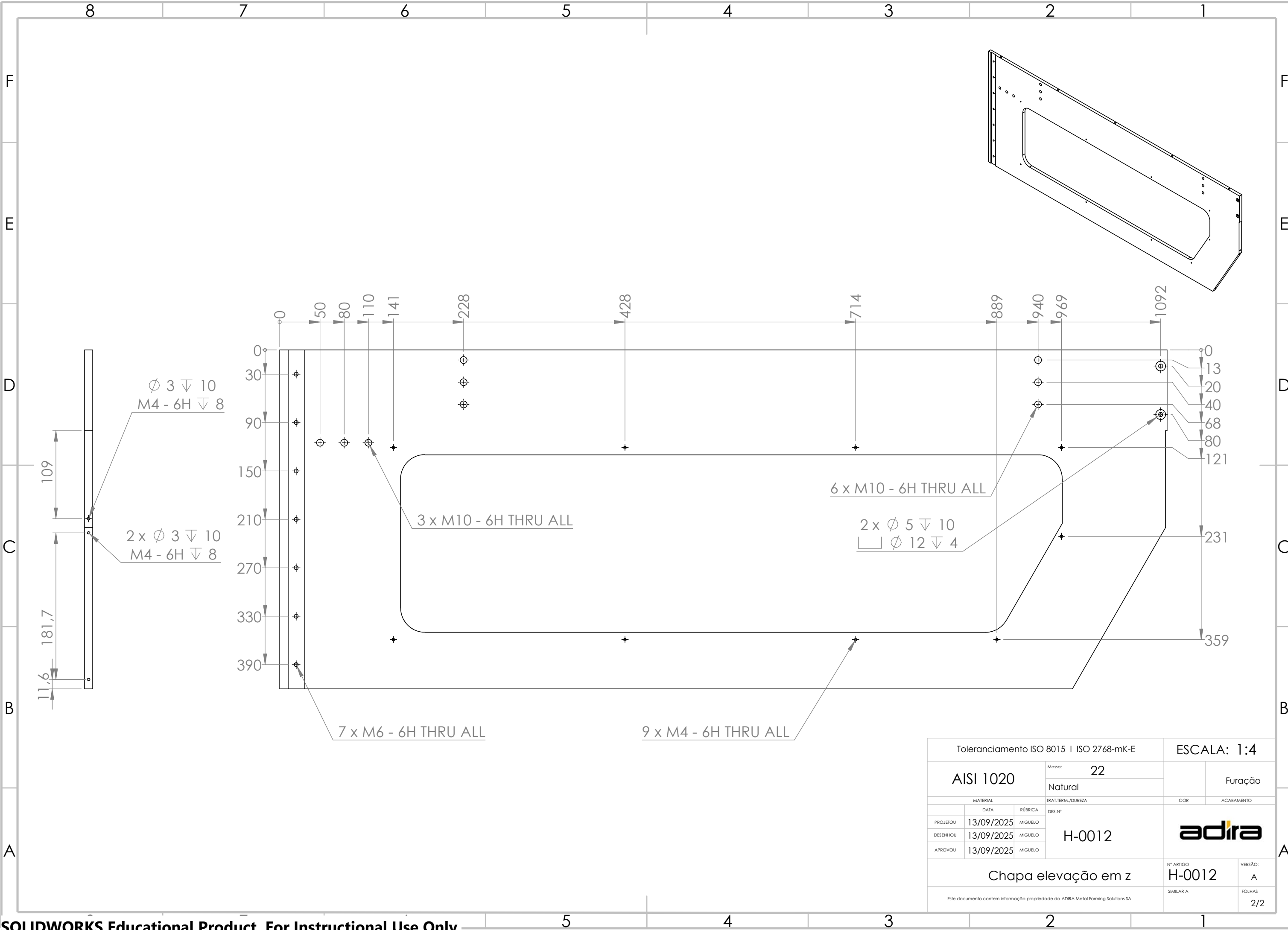




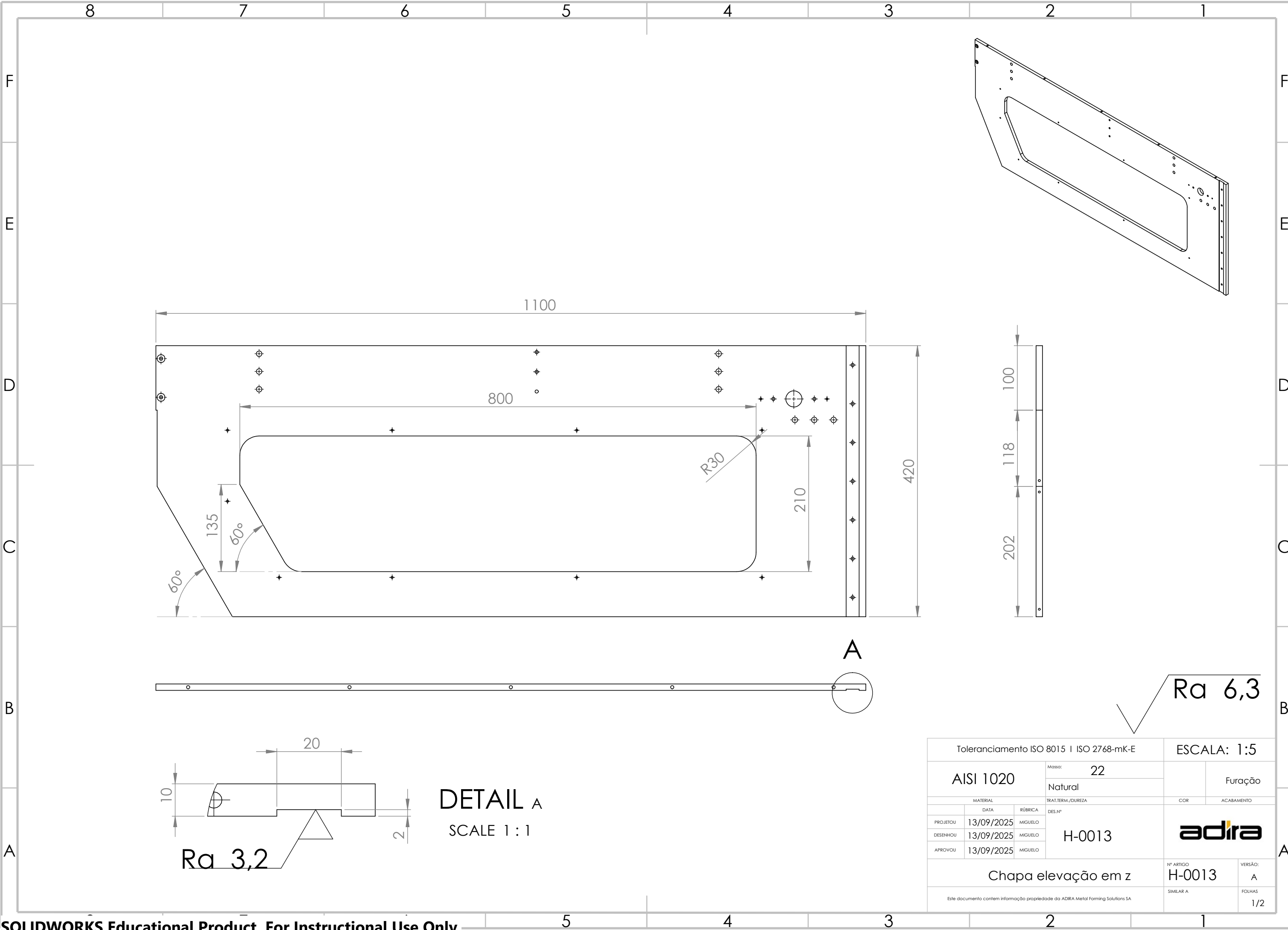
Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:5	
AISI 1020		Massa: 38			Furação
		Natural			
MATERIAL		TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº		
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO			
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO			
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO			
H-0011					
Chapa para patins verticais				Nº ARTIGO	VERSÃO:
				H-0011	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA				SIMILAR A	FOLHAS
					1/1



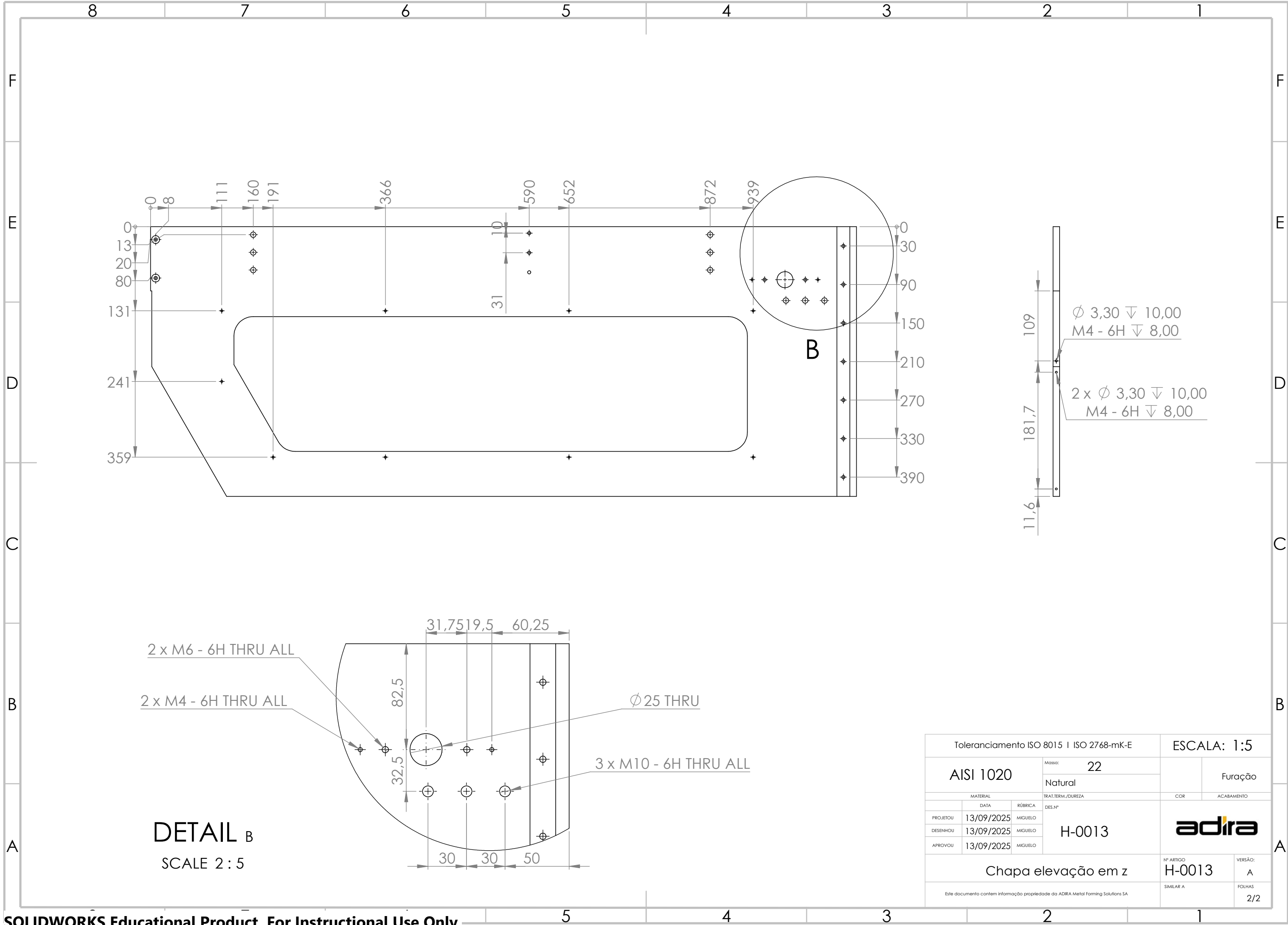
Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:5		
AISI 1020			Massa: 22			Furação
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Chapa elevação em z					Nº ARTIGO	VERSÃO:
					H-0012	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS
						1/2



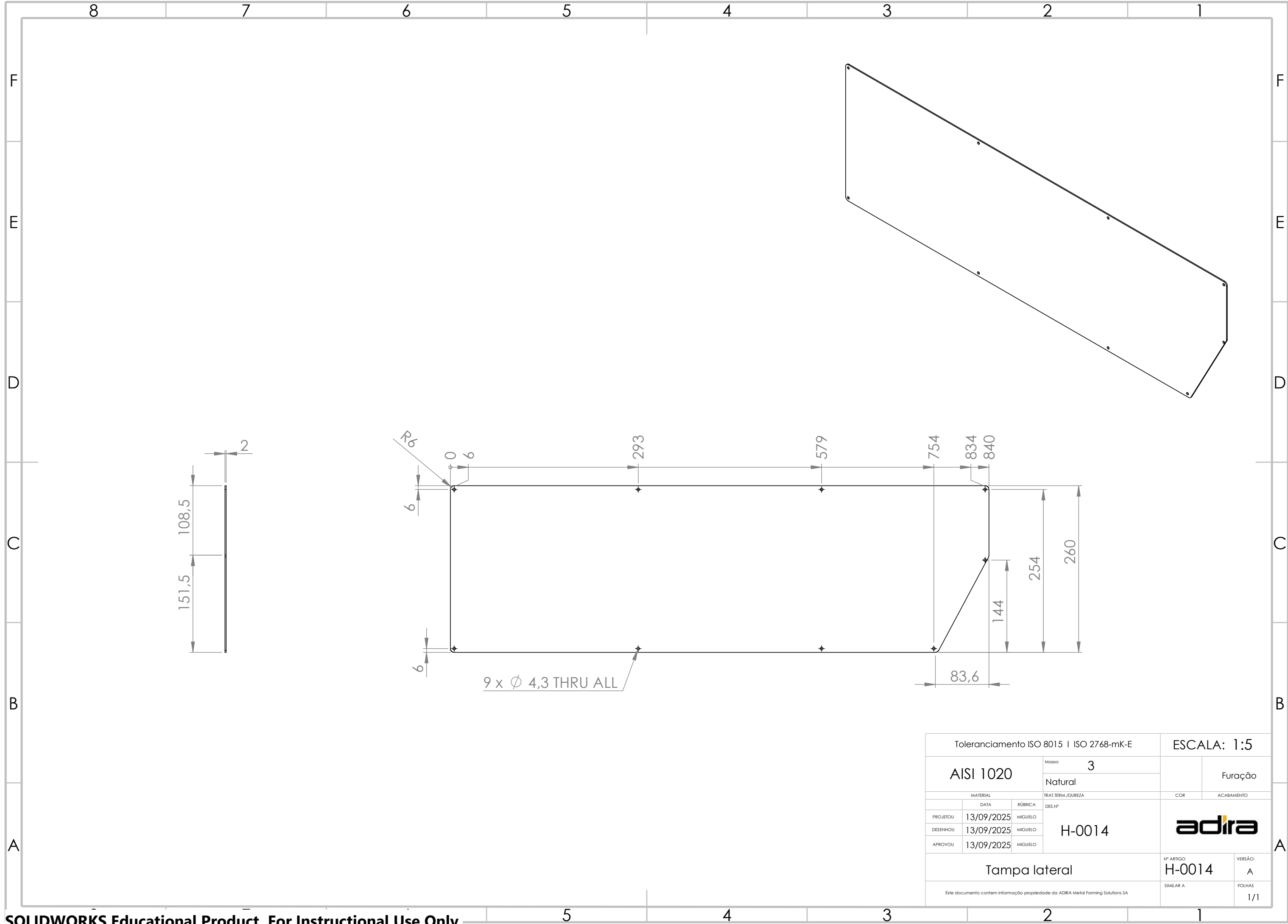
Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:4		
AISI 1020			MATERIAL: 22			Furação
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Chapa elevação em z					Nº ARTIGO	VERSÃO:
					H-0012	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS
						2/2



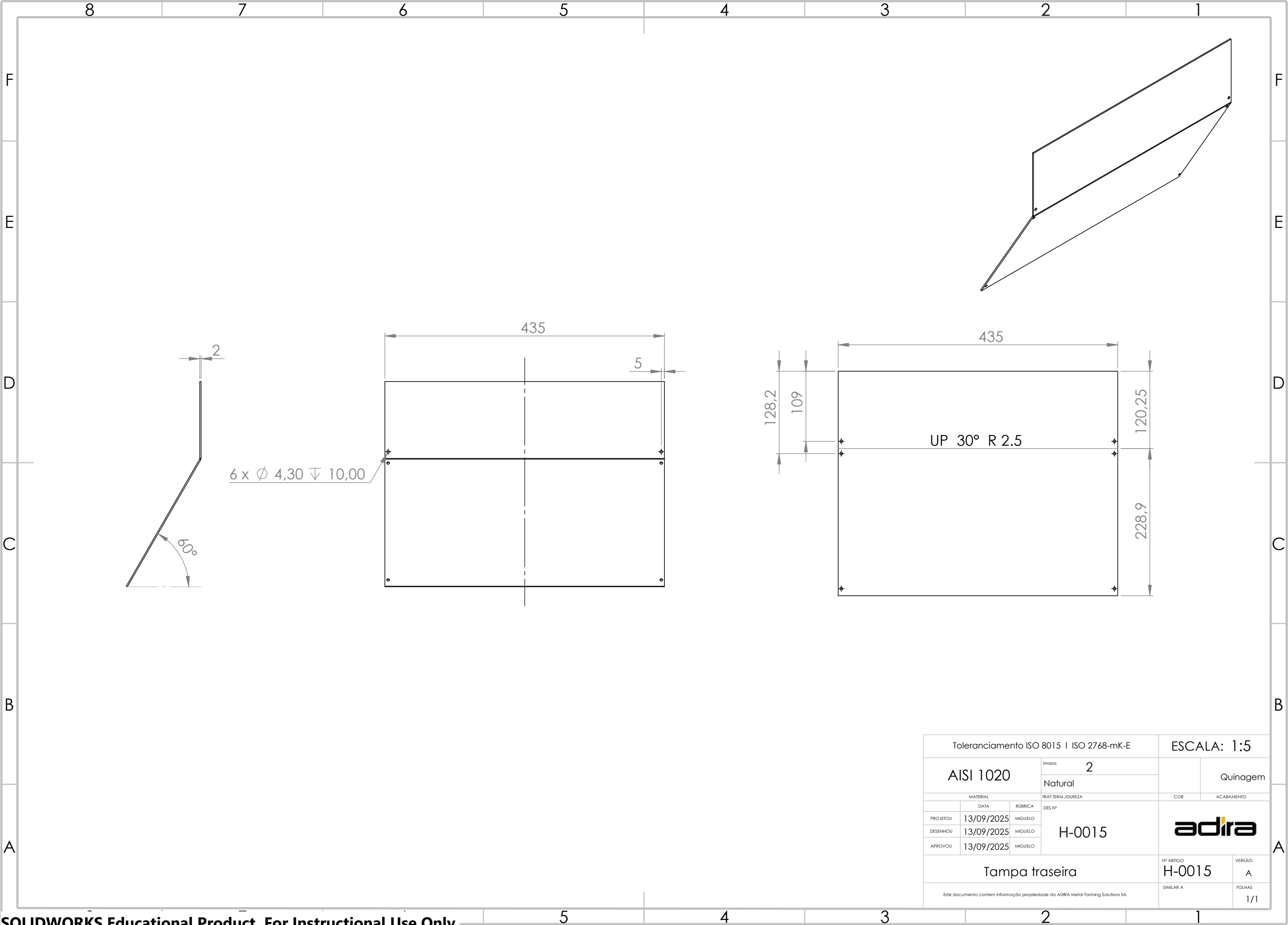
Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:5	
AISI 1020			Massa:	22	
			Natural		
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA	COR	ACABAMENTO
DATA			RÚBRICA		
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO	DES.Nº		
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO			
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO			
H-0013					
Chapa elevação em z				Nº ARTIGO	VERSÃO:
				H-0013	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA				SIMILAR A	FOLHAS
					1/2

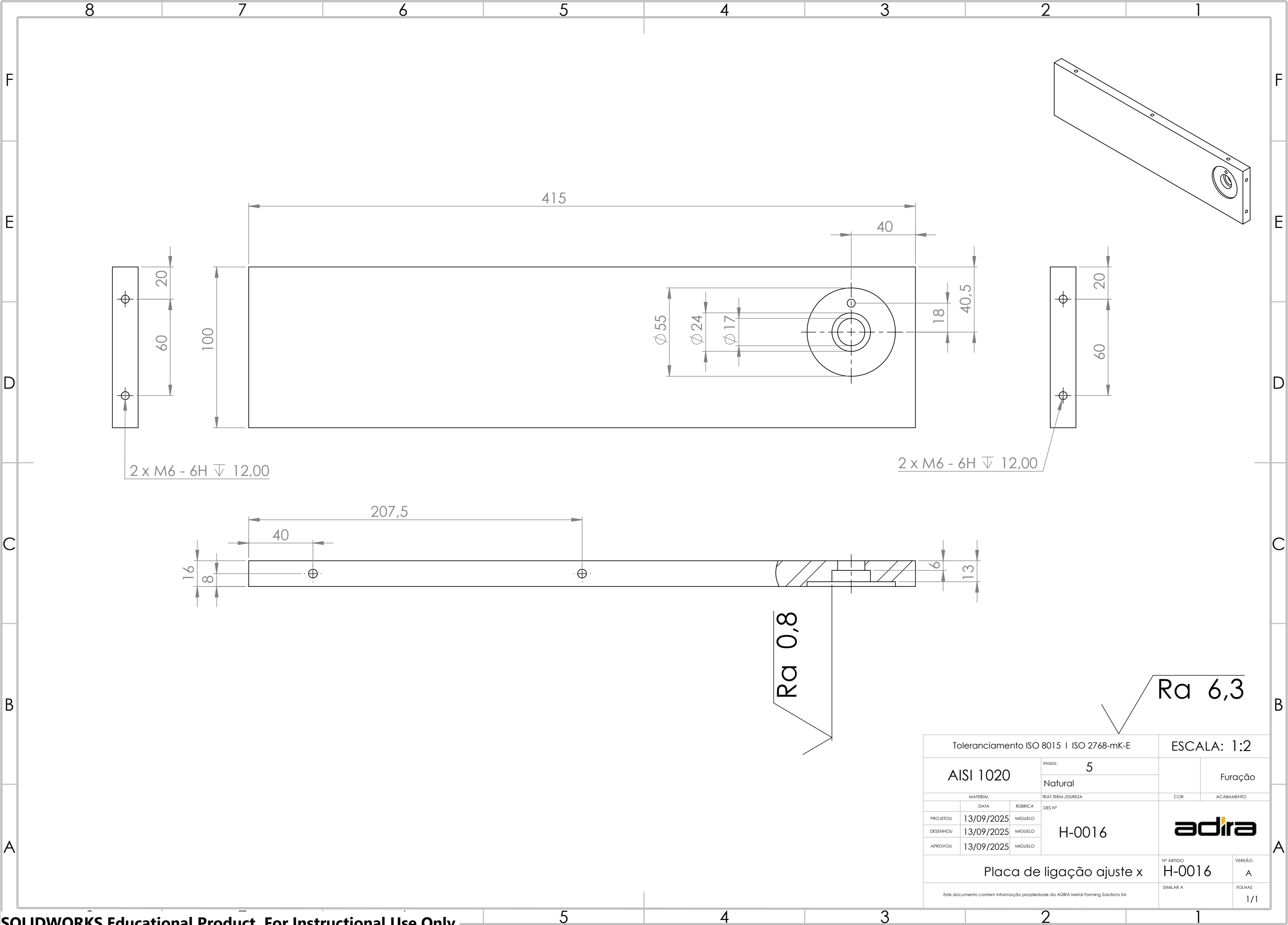


Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:5	
AISI 1020			Massa:	22	
			Natural		
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA	COR	ACABAMENTO
DATA			RÚBRICA		
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO	DES.Nº		
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO			
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO			
H-0013					
Chapa elevação em z				Nº ARTIGO	VERSÃO:
				H-0013	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA				SIMILAR A	FOLHAS
					2/2

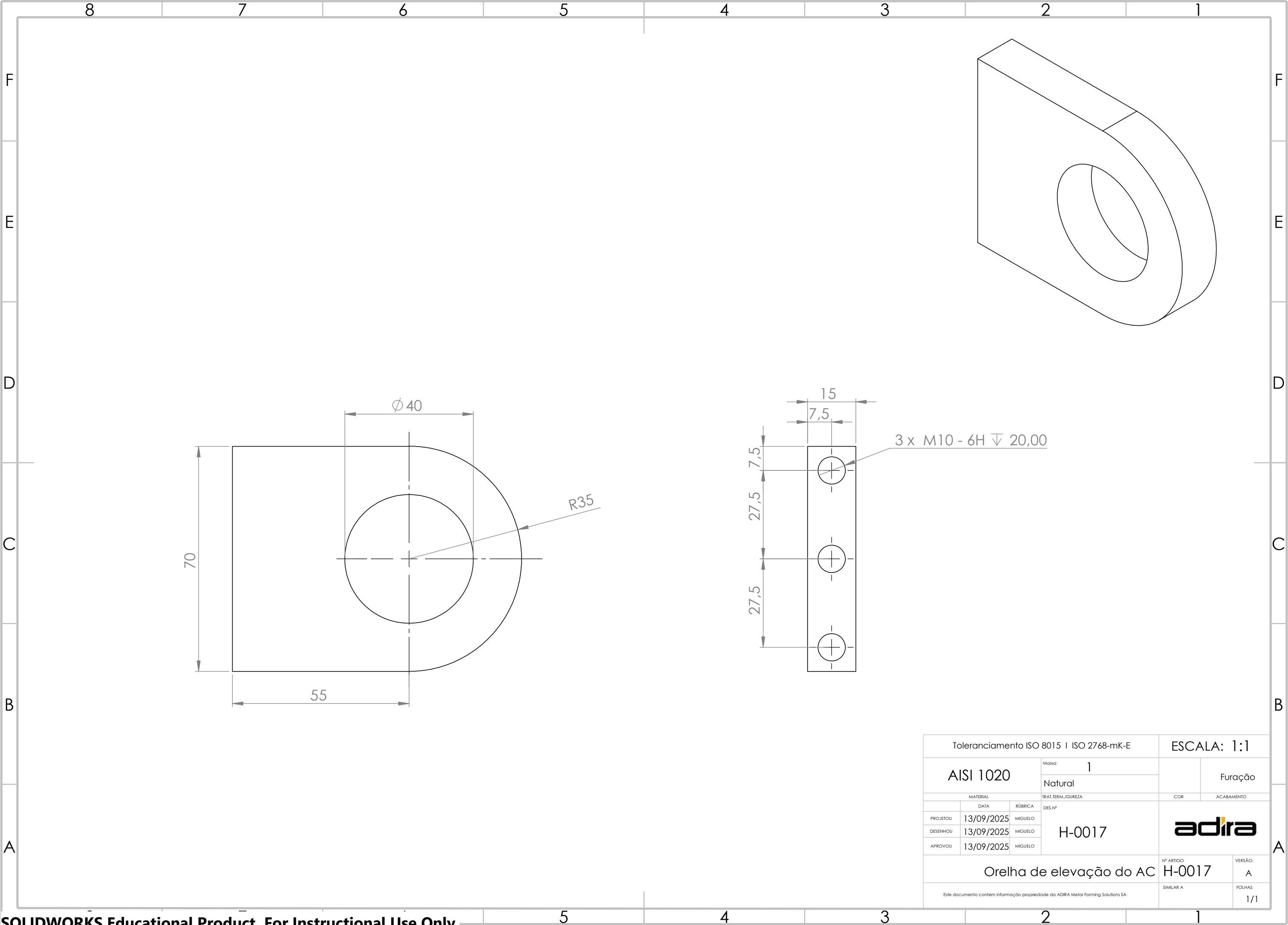


Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:5		
AISI 1020			Módulo: 3			Furação
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Tampa lateral					Nº ARTIGO	VERSÃO:
					H-0014	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS
						1/1

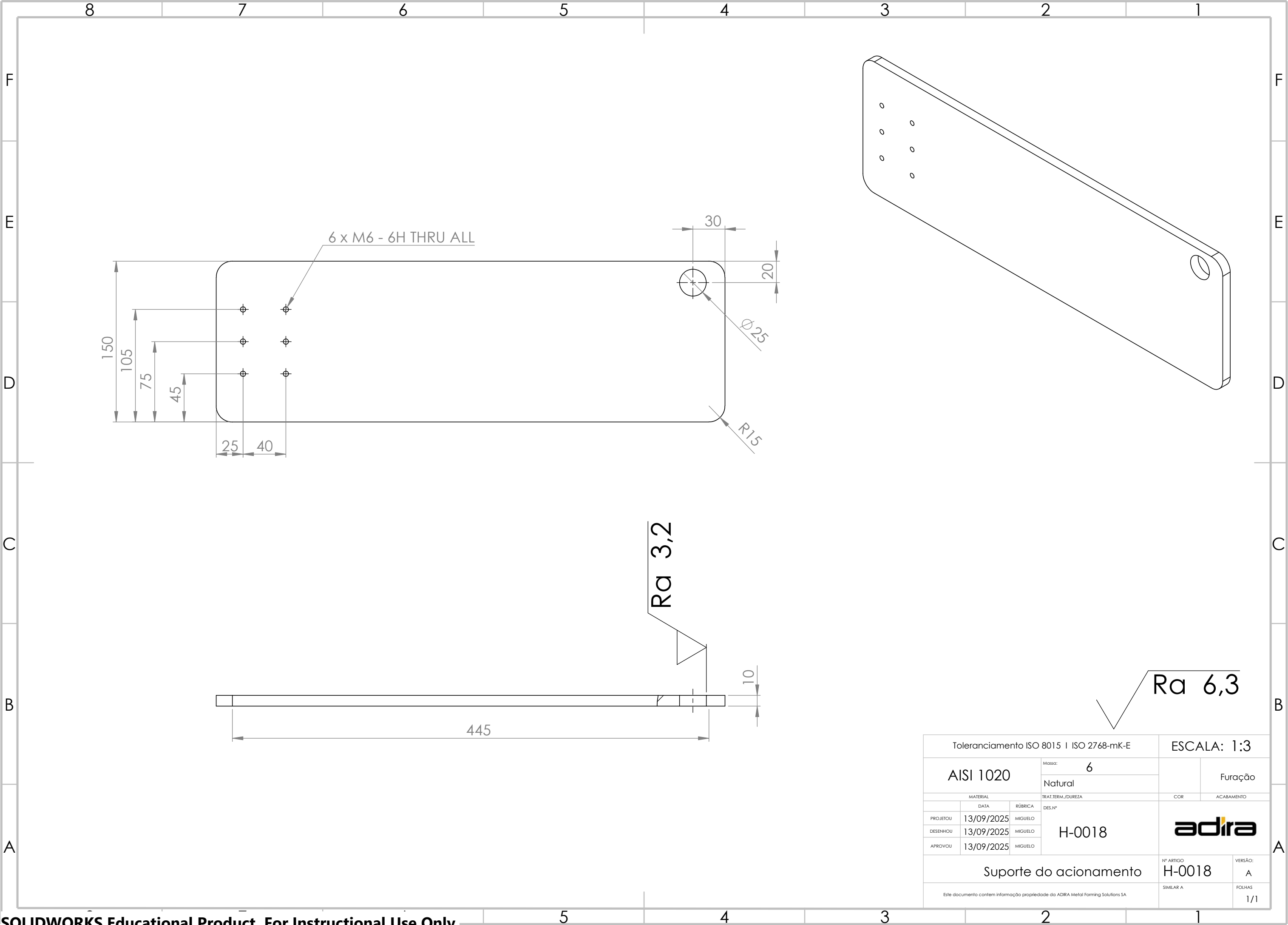




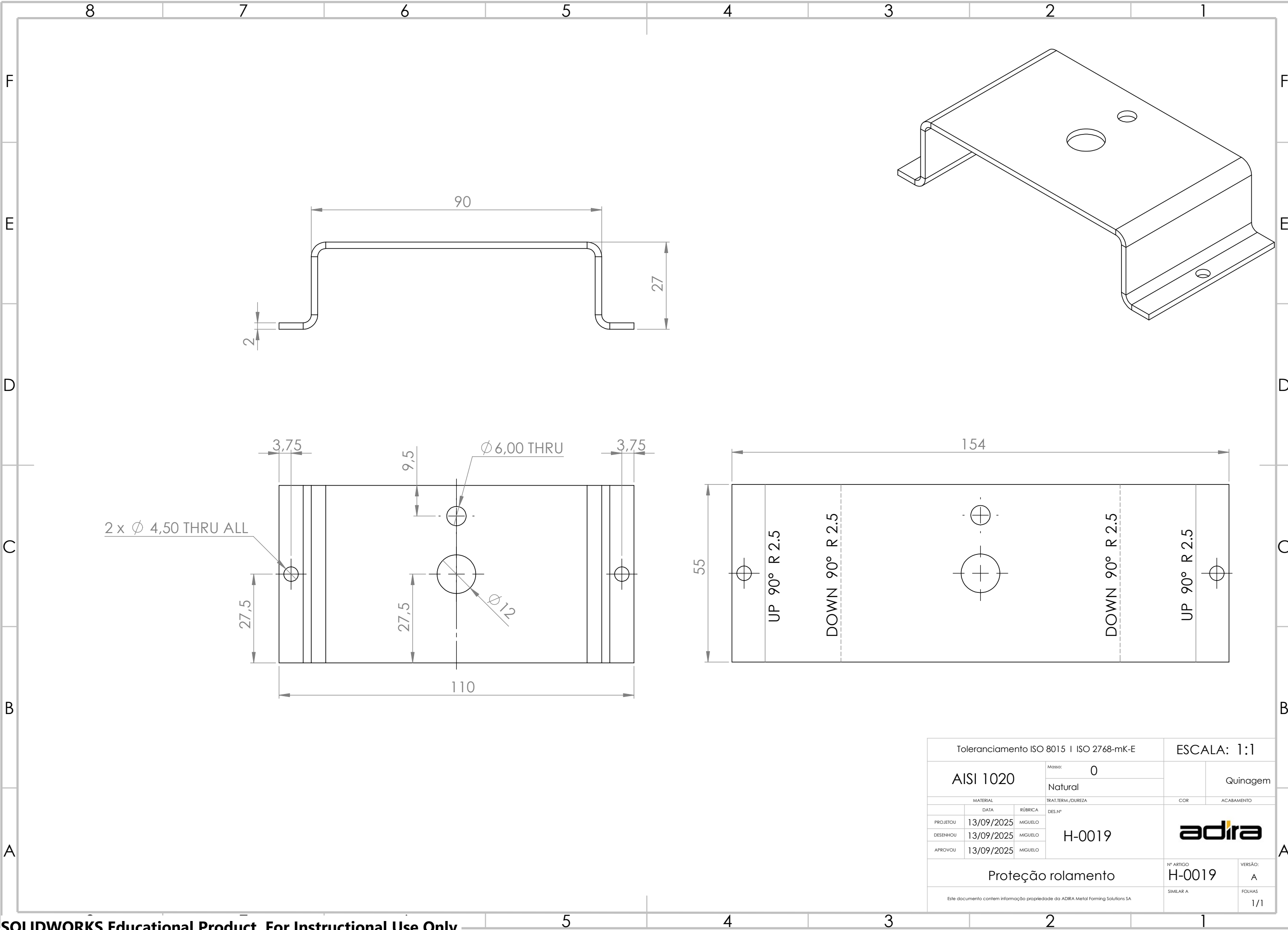
Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:2		
AISI 1020			Módulo: 5			Furação
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Placa de ligação ajuste x					Nº ARTIGO	VERSÃO:
					H-0016	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS
						1/1



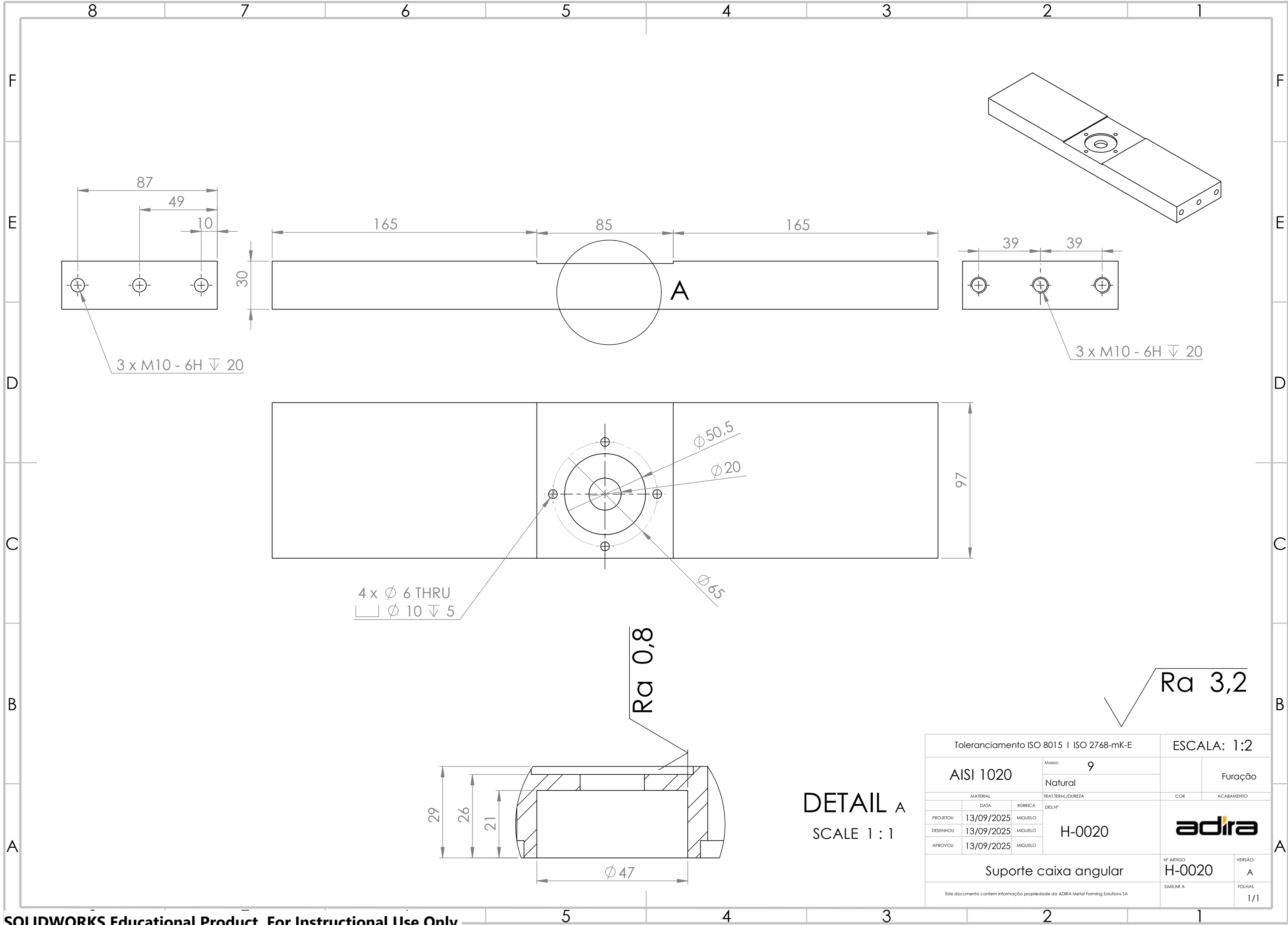
Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:1		
AISI 1020			Módio: 1			Furação
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Orelha de elevação do AC					Nº ARTIGO	VERSÃO:
					H-0017	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS
						1/1



Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:3		
AISI 1020			Módulo: 6			Furação
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUEL				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUEL				
APROVOU	13/09/2025	MIGUEL				
Suporte do acionamento			Nº ARTIGO		VERSÃO:	
			H-0018		A	
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA			SIMILAR A		FOLHAS	
					1/1	

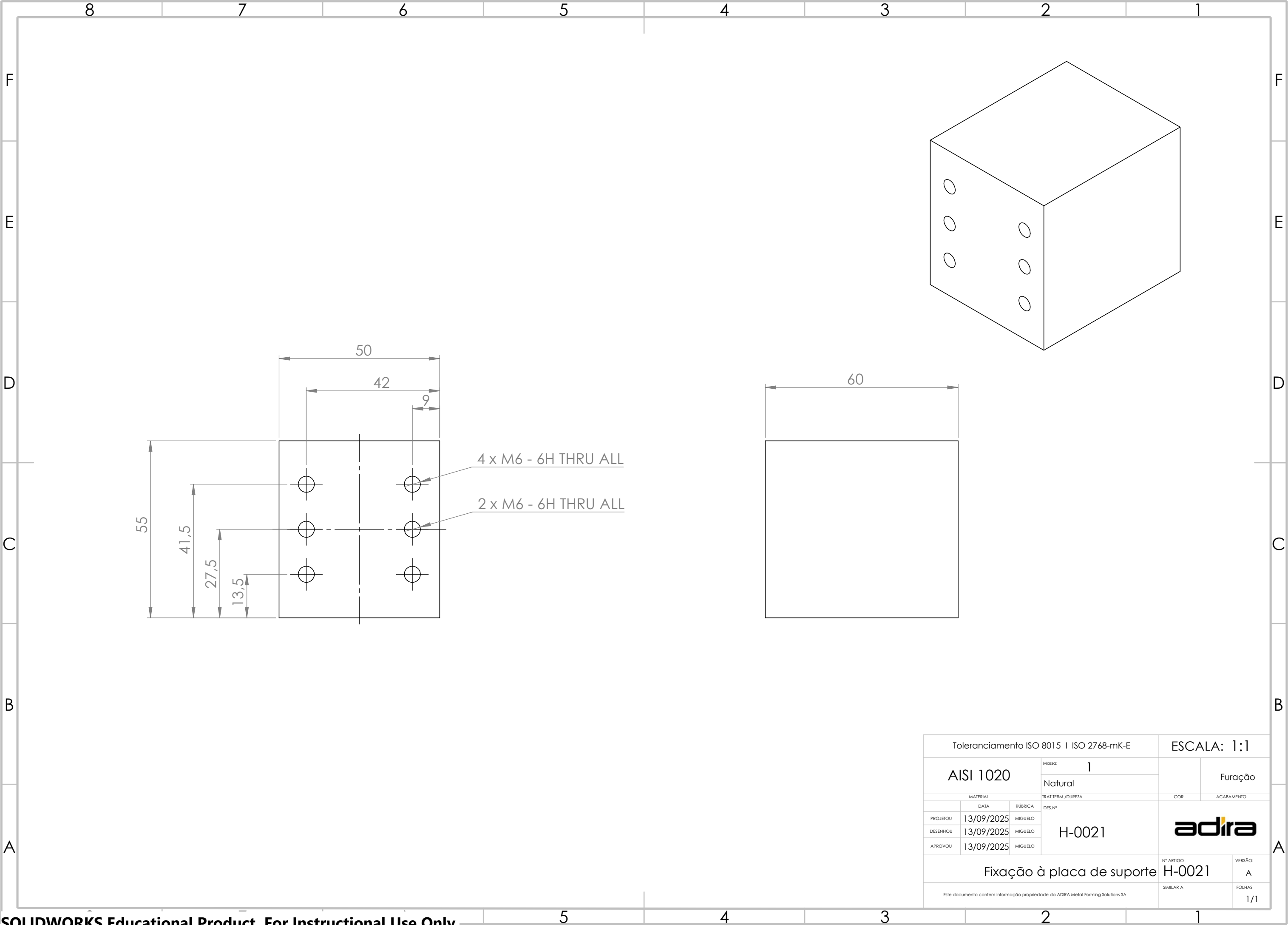


Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:1		
AISI 1020			Módulo: 0			Quinagem
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Proteção rolamento					Nº ARTIGO	VERSÃO:
					H-0019	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS
						1/1

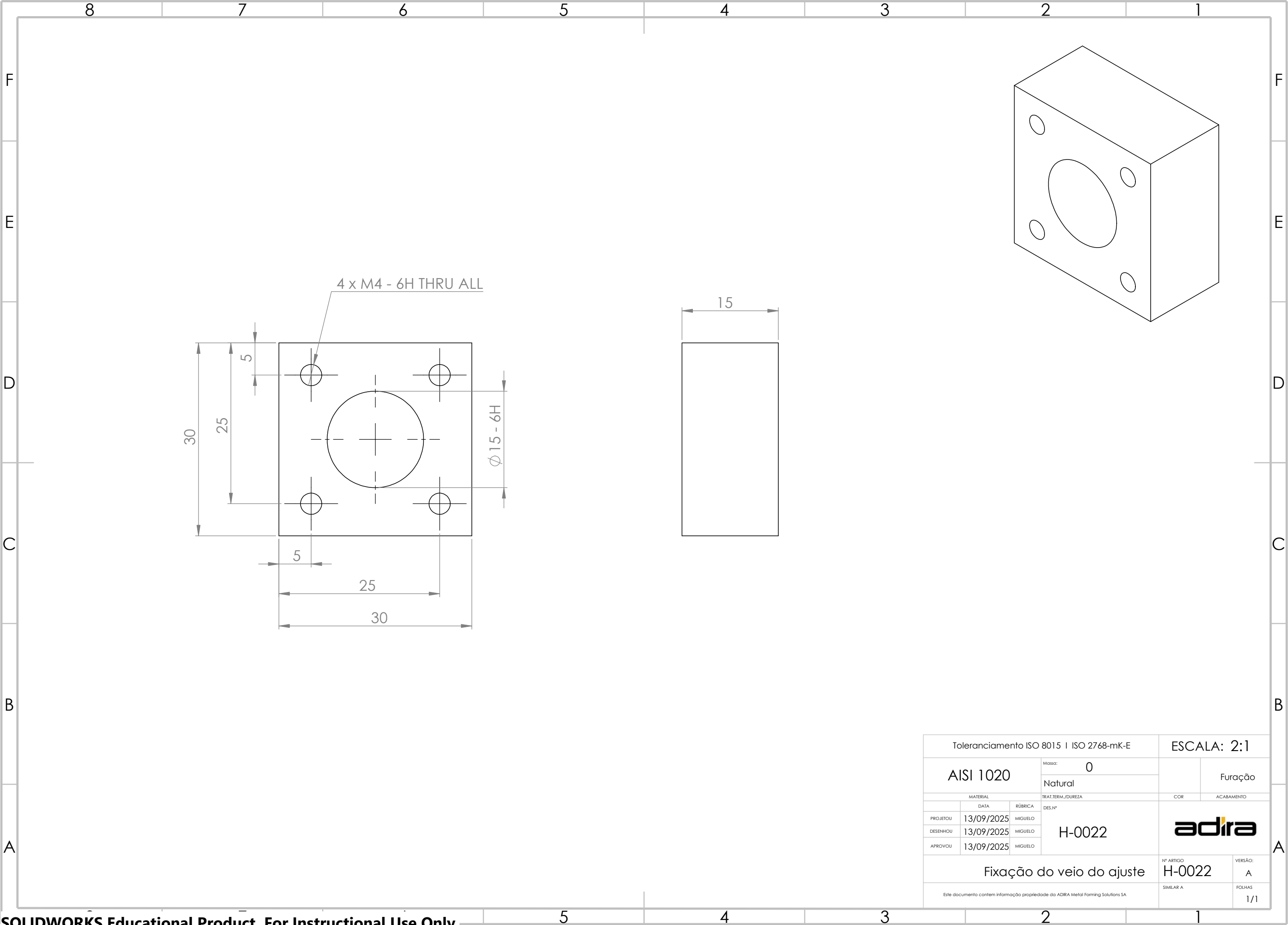


DETAIL A
SCALE 1 : 1

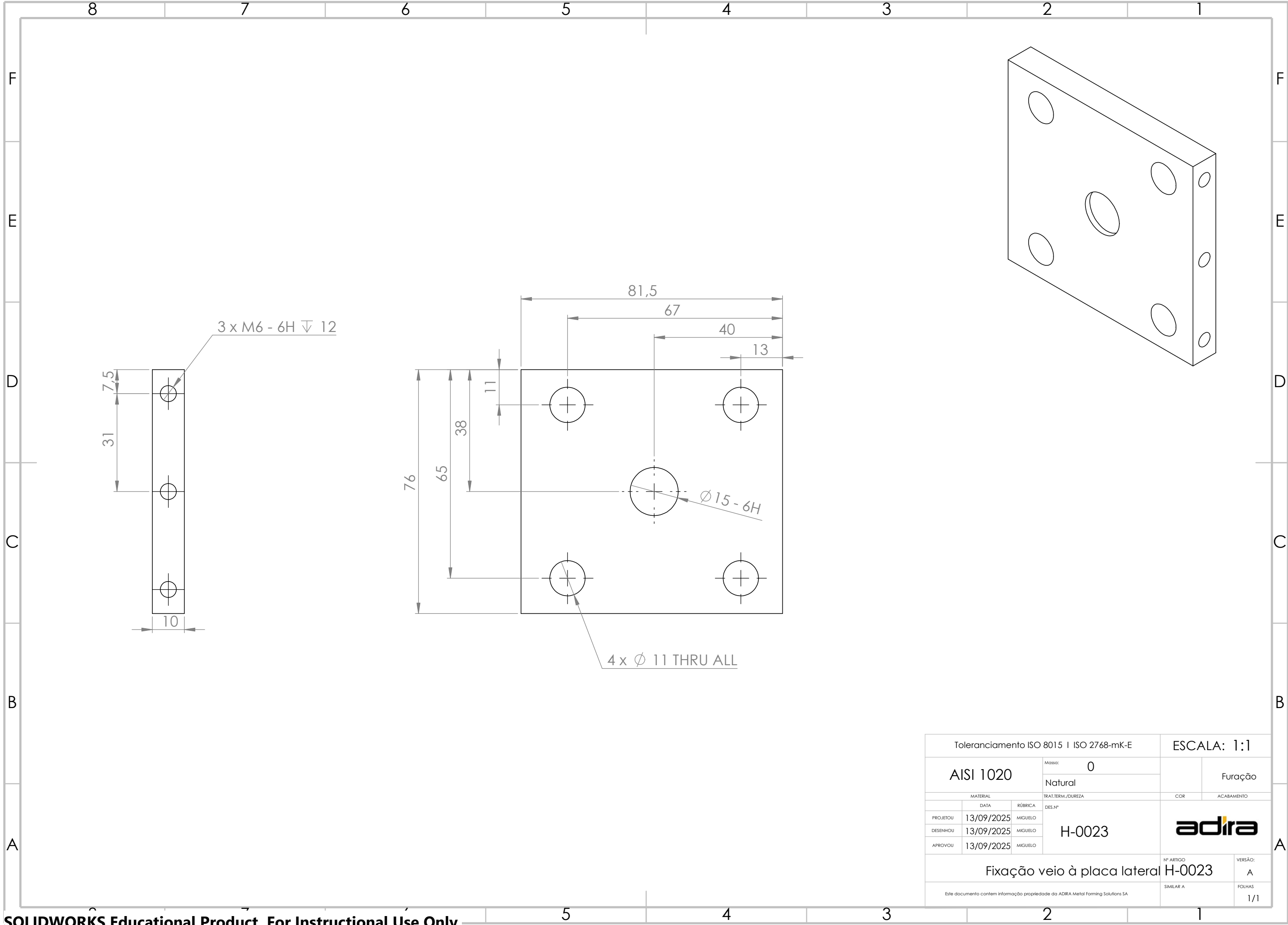
Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:2		
AISI 1020			Módulo: 9			Furação
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Suporte caixa angular					Nº ARTIGO	VERSÃO:
					H-0020	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS
						1/1



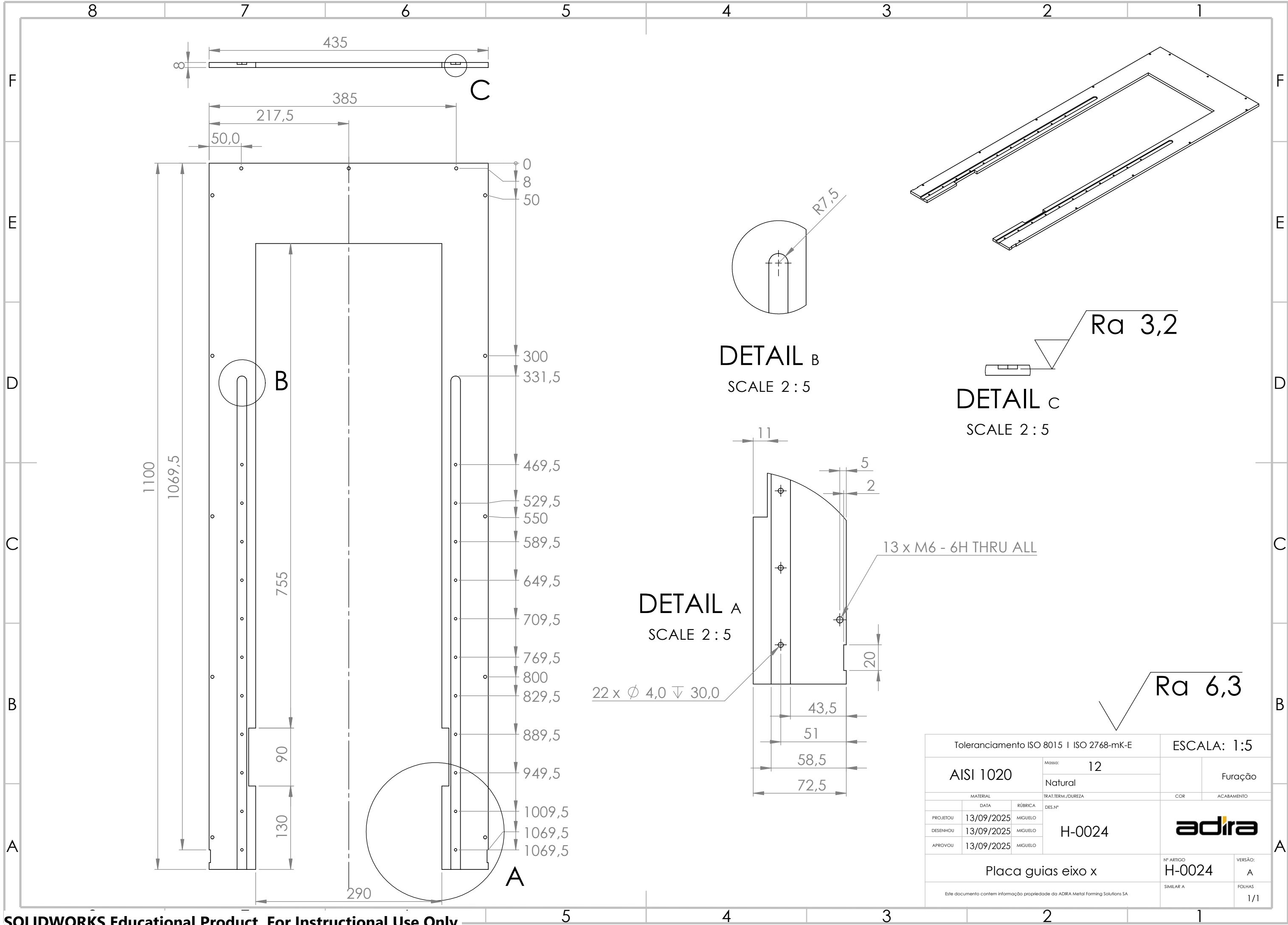
Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:1			
AISI 1020			Módio: 1			Furação	
			Natural				
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO	
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº				
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO					
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO					
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO					
H-0021							
Fixação à placa de suporte					Nº ARTIGO		VERSÃO:
					H-0021		A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A		FOLHAS
							1/1

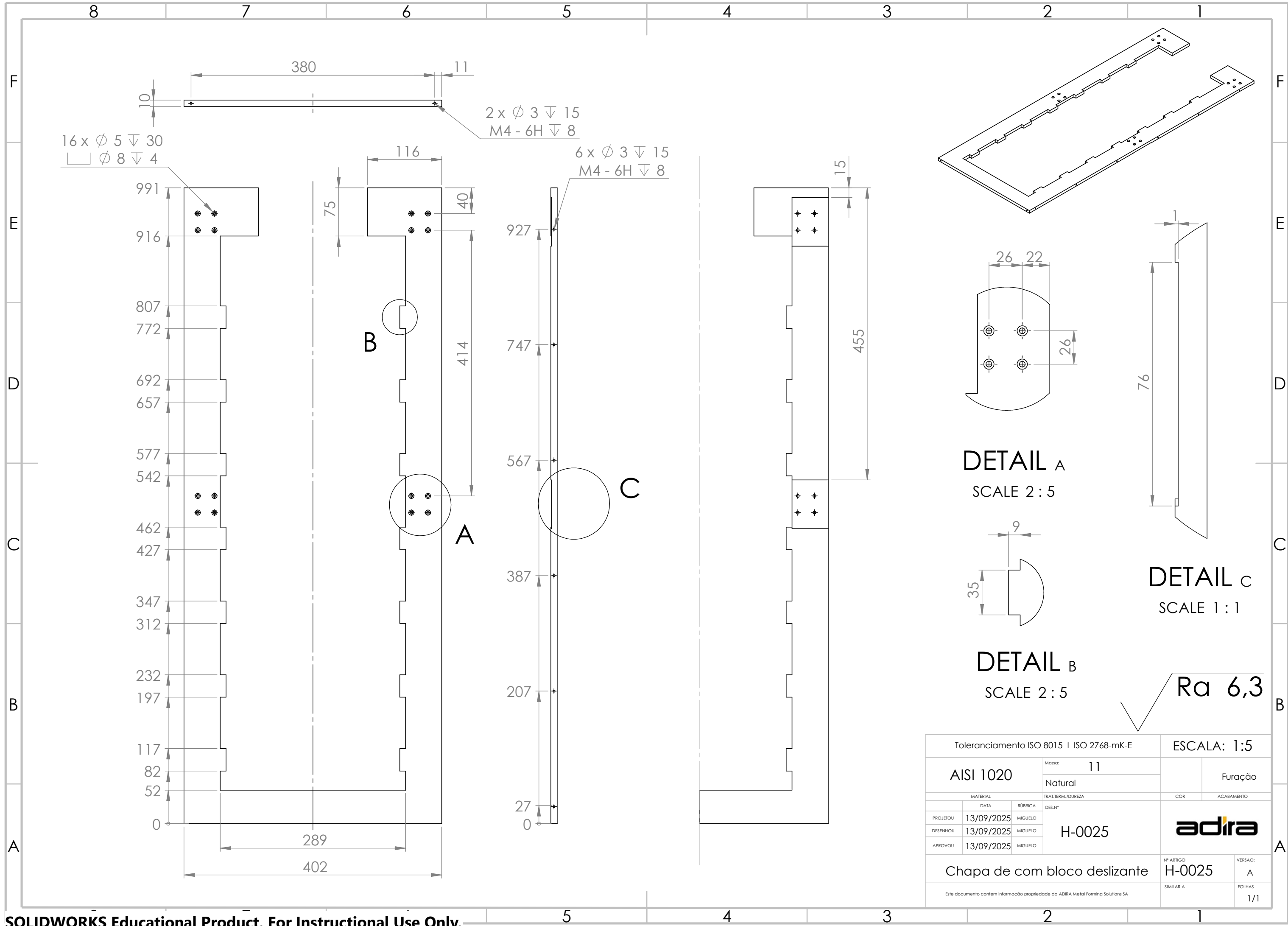


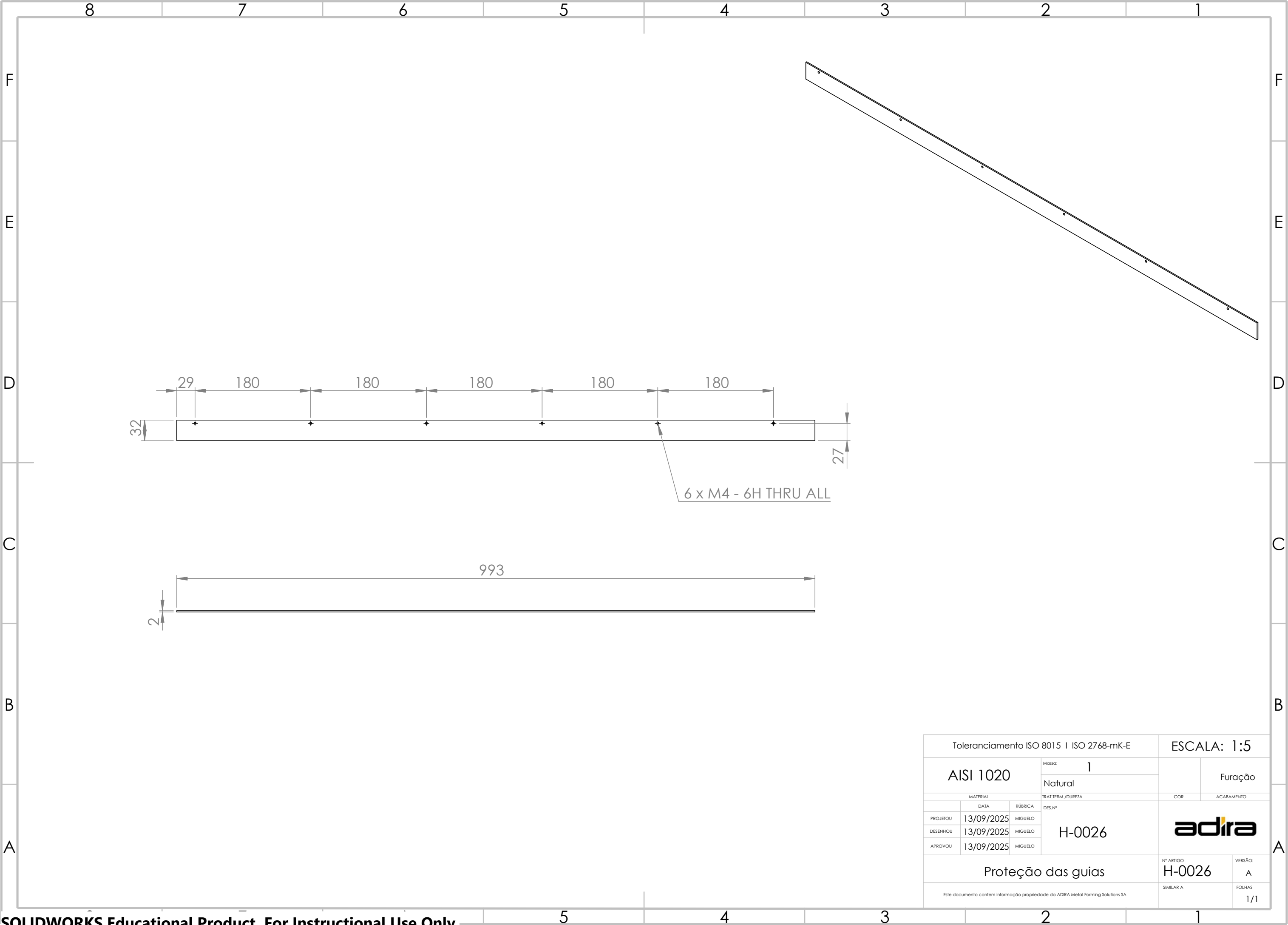
Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 2:1		
AISI 1020			Módulo: 0			Furação
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº H-0022			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Fixação do veio do ajuste					Nº ARTIGO H-0022	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS 1/1

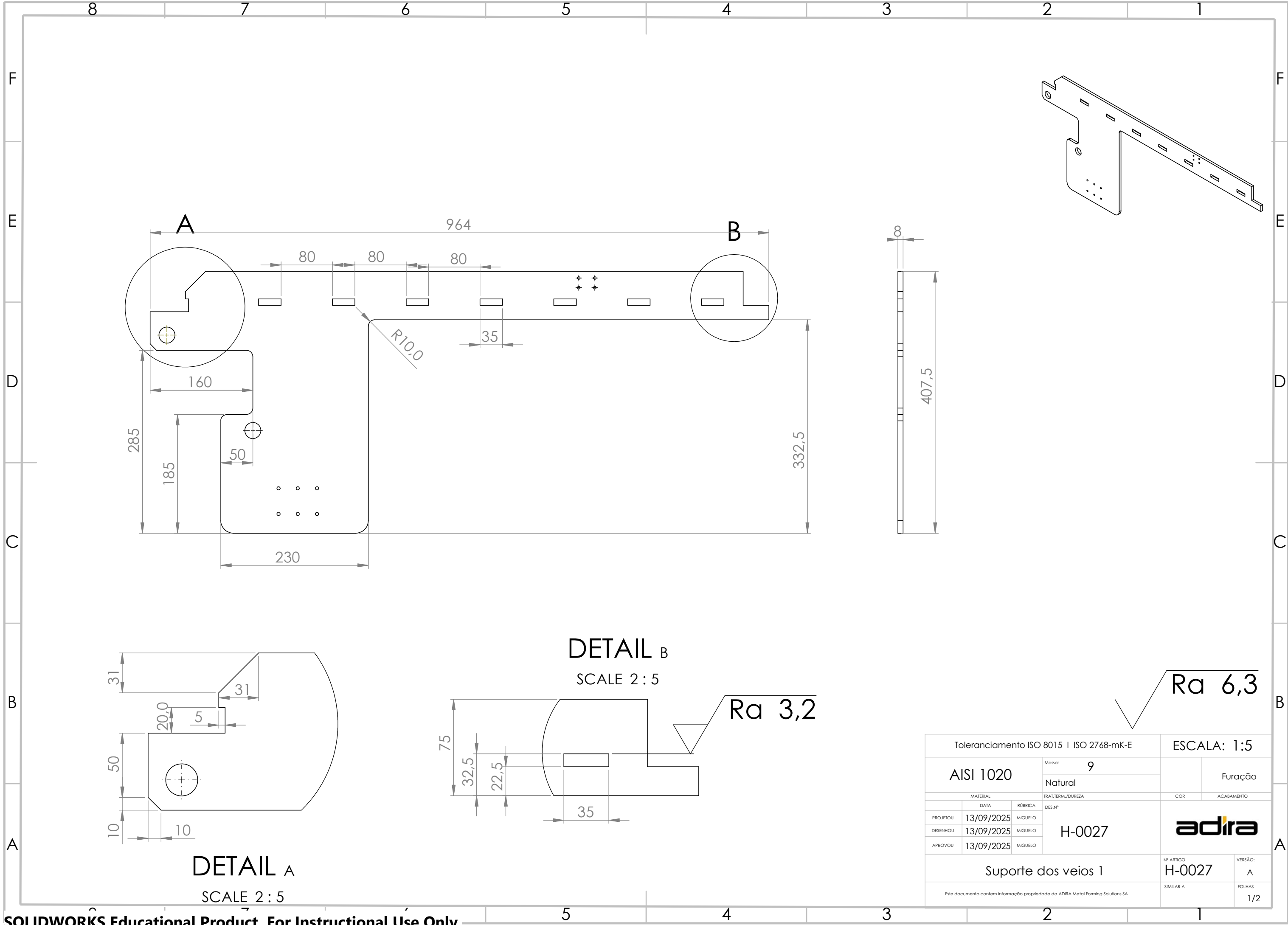


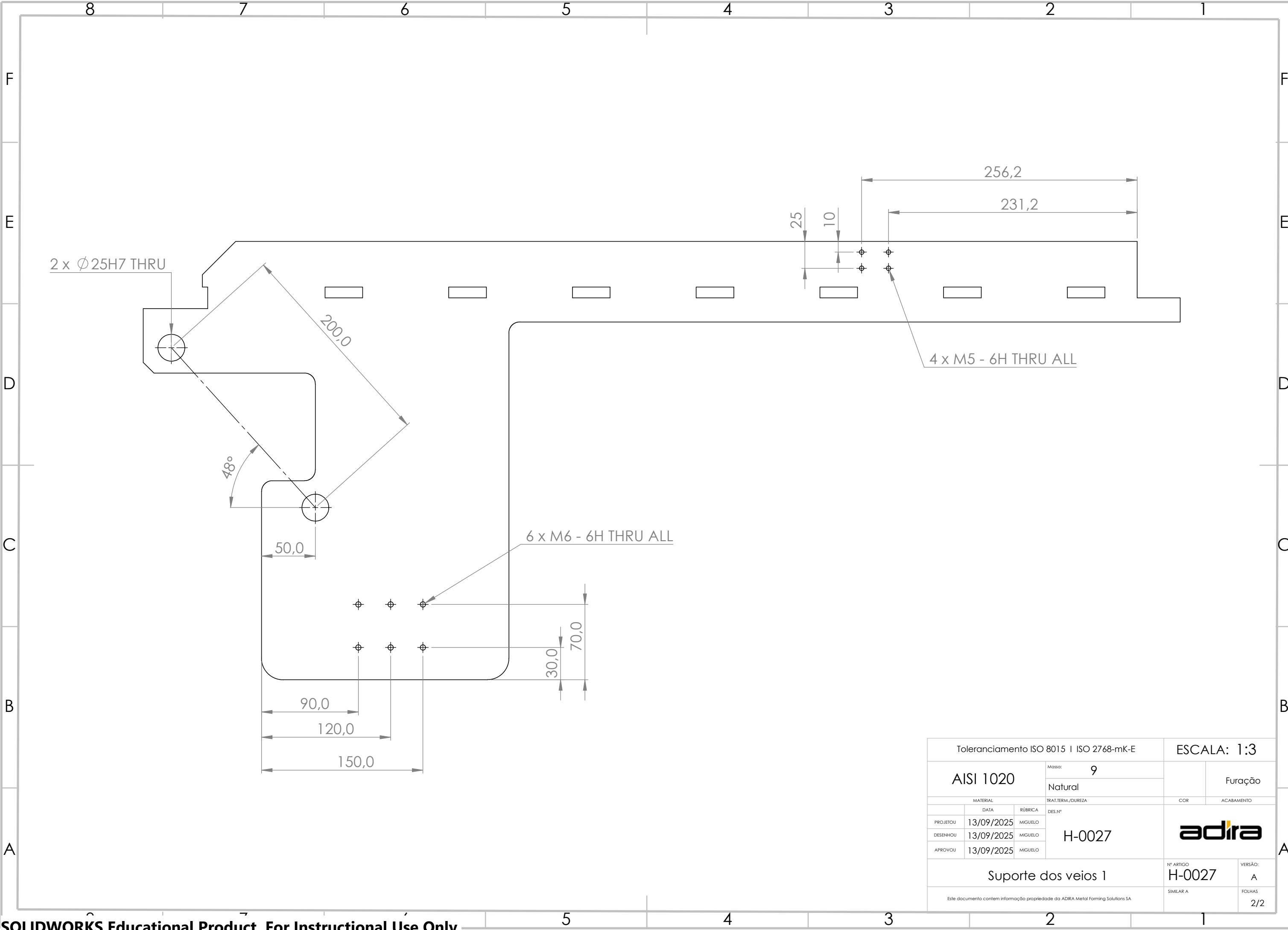
Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:1	
AISI 1020			Massa: 0		Furação
			Natural		
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA	COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº		
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO	H-0023		
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO			
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO			
Fixação veio à placa lateral				Nº ARTIGO	VERSÃO:
				H-0023	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA				SIMILAR A	FOLHAS
					1/1



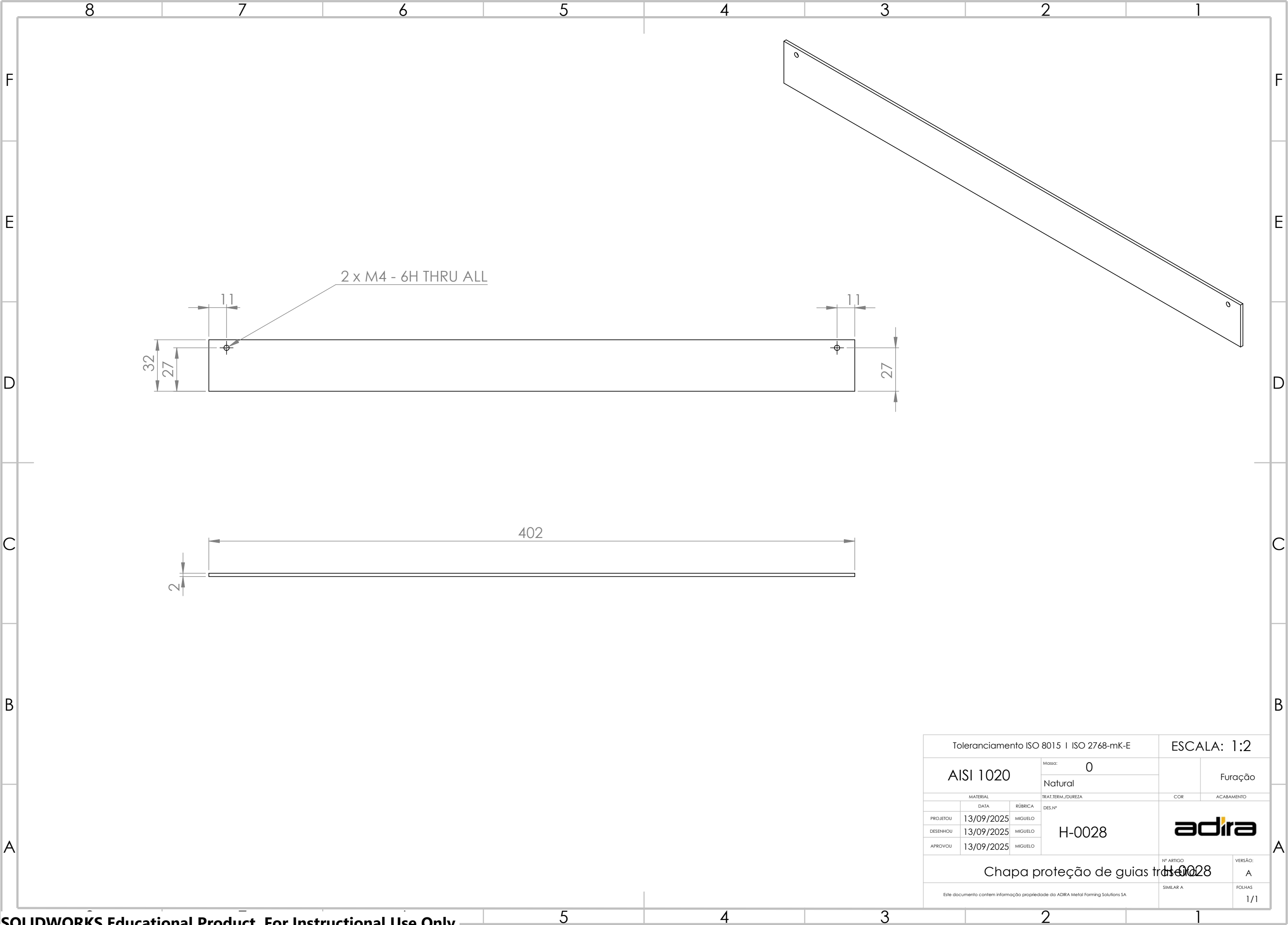


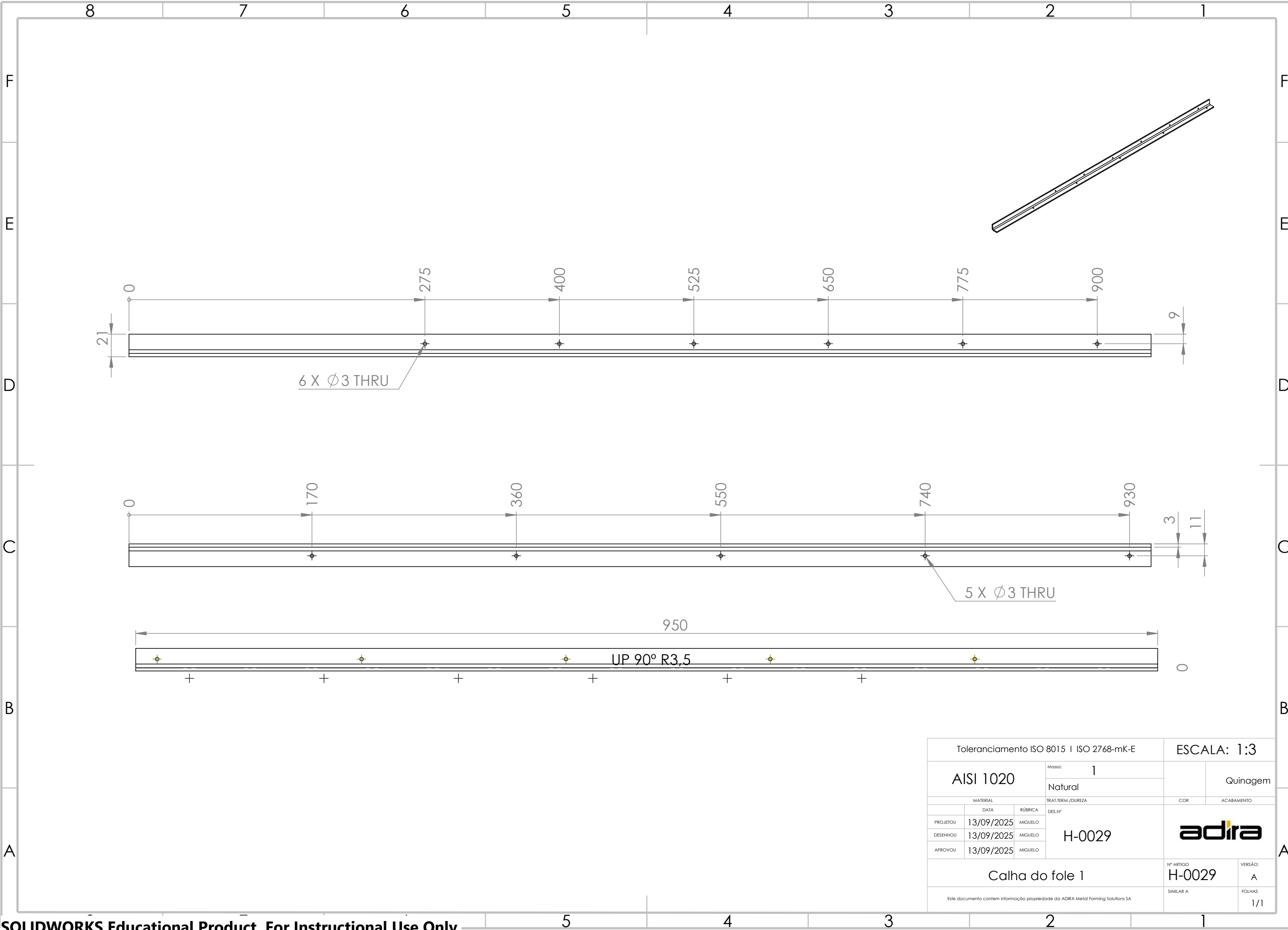






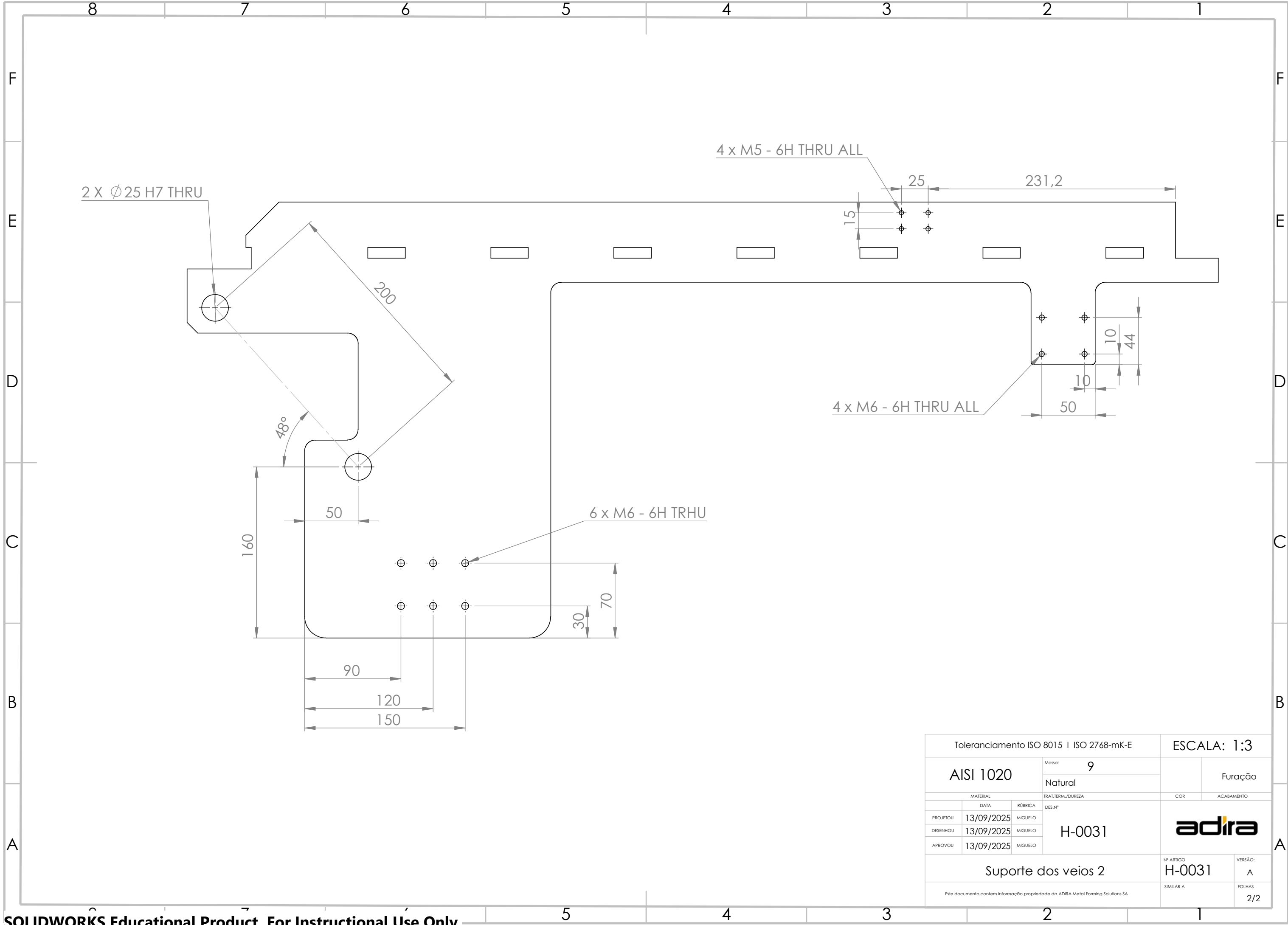
Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:3		
AISI 1020			Módulo: 9			Furação
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº H-0027			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Suporte dos veios 1					Nº ARTIGO H-0027	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS 2/2



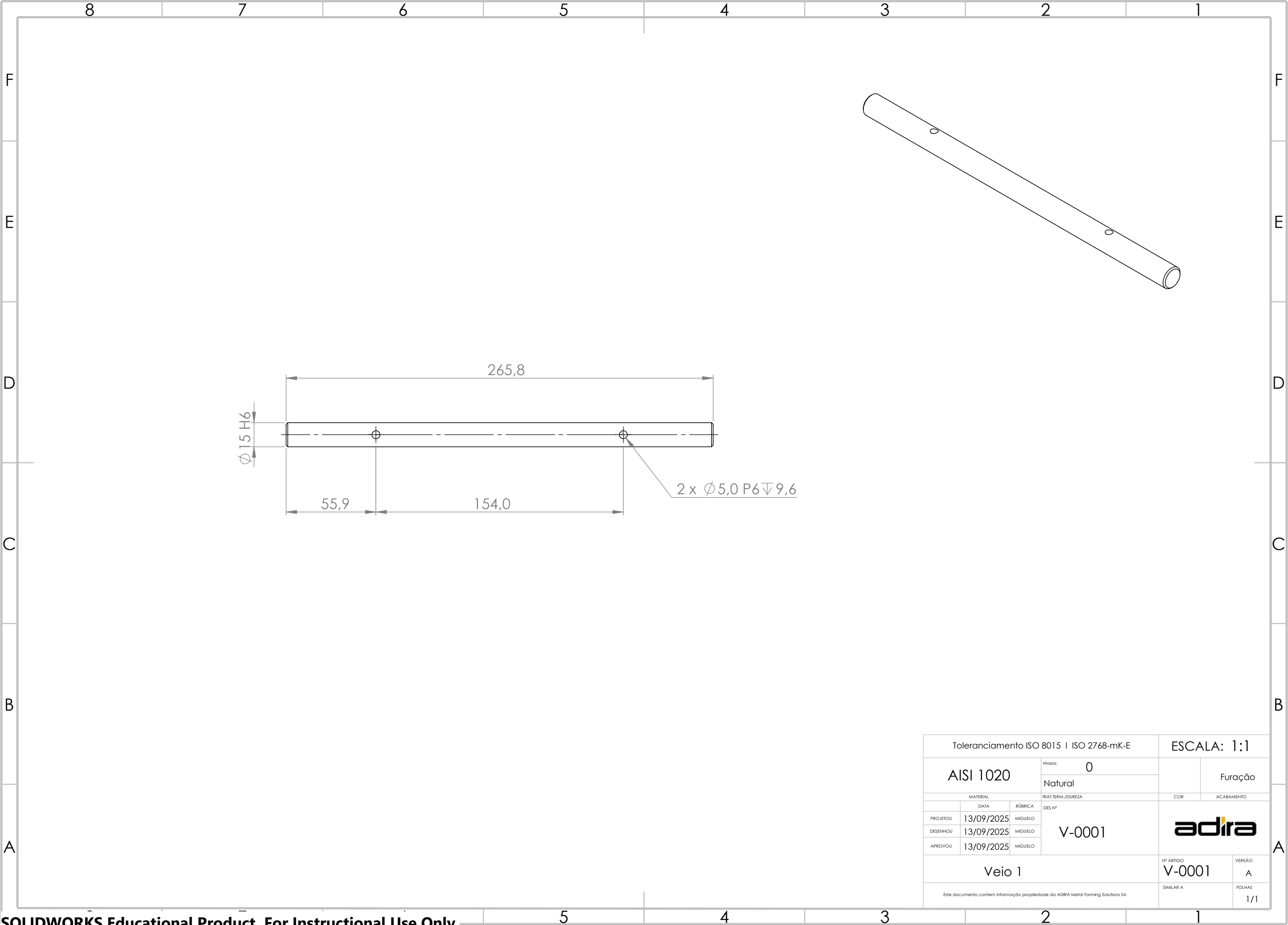


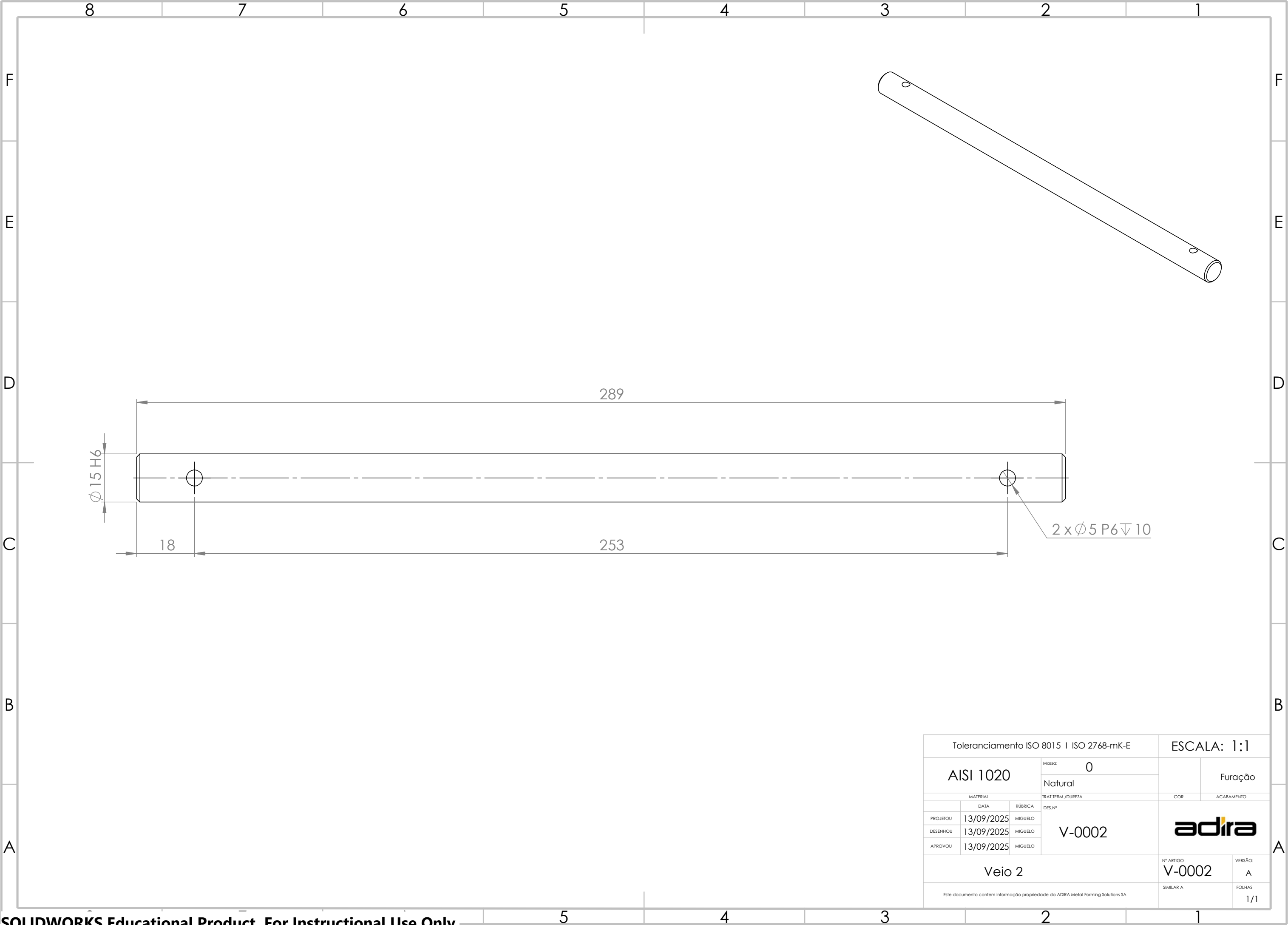
Toleranciamento ISO 8015 I ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:3		
AISI 1020		Módulo: 1			Quinagem	
		Natural				
MATERIAL		TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO	
DATA	RÚBRICA	DES.Nº				
PROJETOU	13/09/2025					MIGUEL
DESENHOU	13/09/2025					MIGUEL
APROVOU	13/09/2025					MIGUEL
Calha do fole 1				Nº ARTIGO	VERSÃO:	
				H-0029	A	
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA				SIMILAR A	FOLHAS	
					1/1	



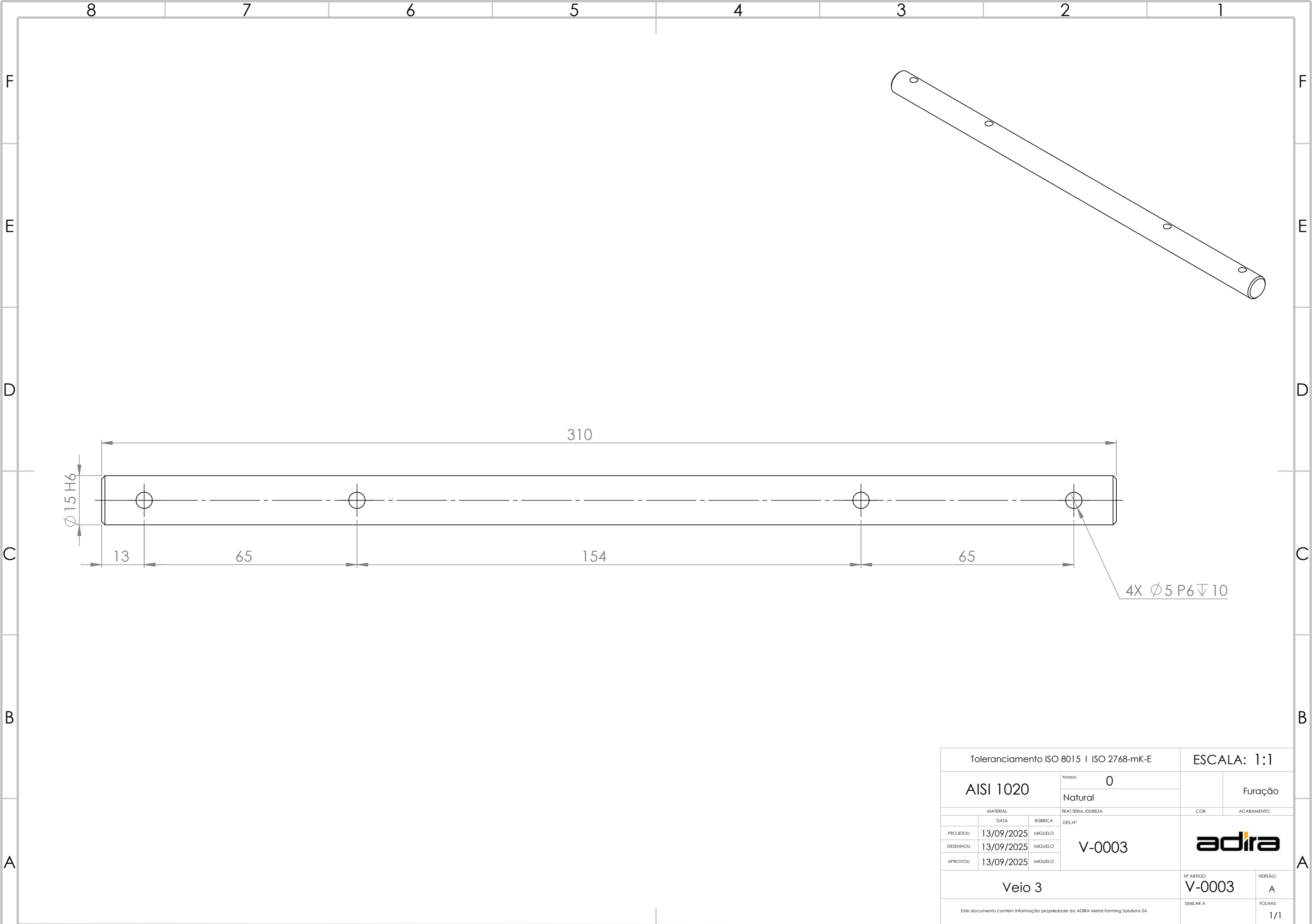


Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:3		
AISI 1020			Módulo: 9			Furação
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº H-0031			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Suporte dos veios 2					Nº ARTIGO H-0031	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS 2/2

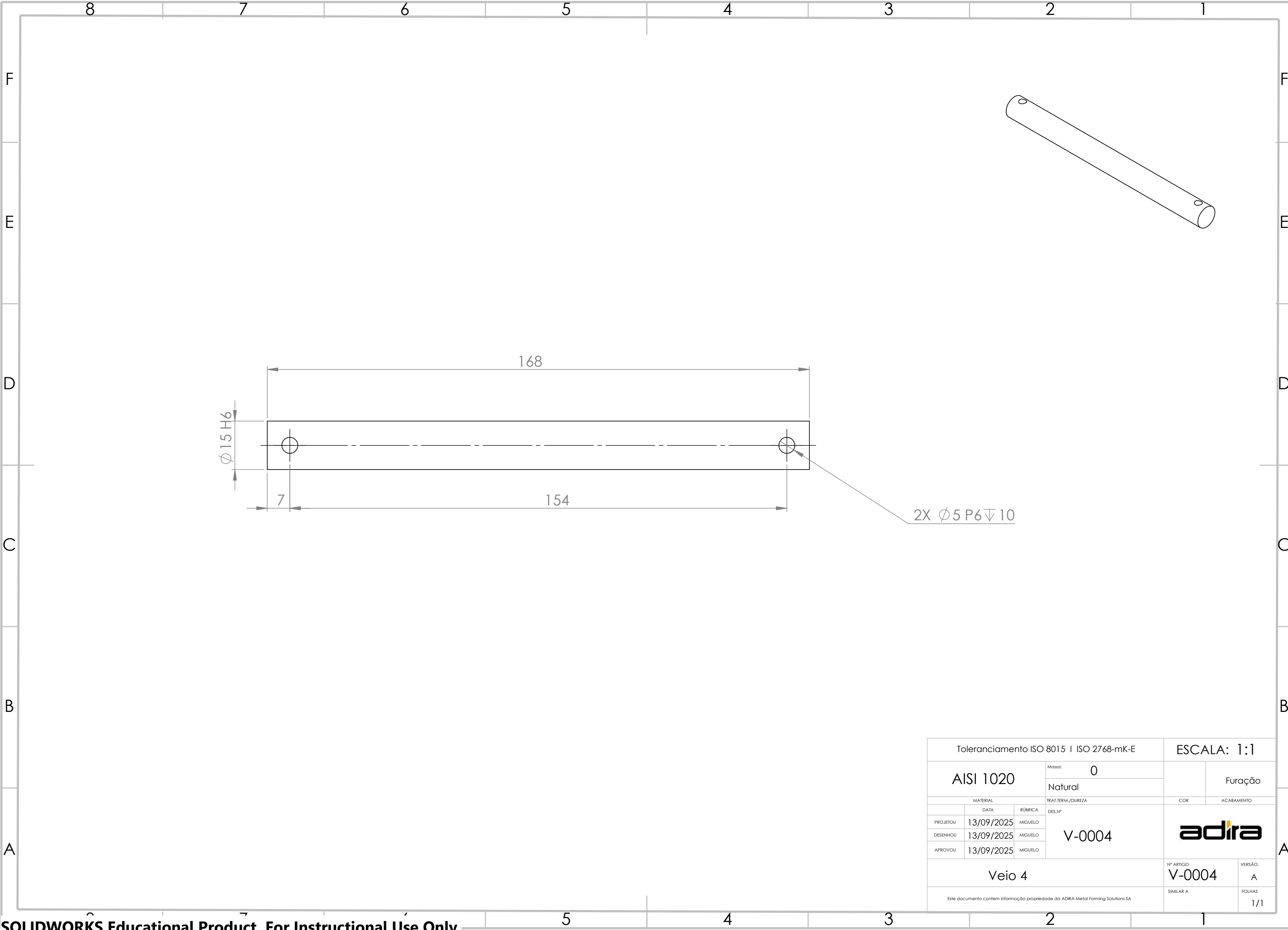




Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:1		
AISI 1020			Módulo: 0			Furação
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Veio 2					Nº ARTIGO	VERSÃO:
					V-0002	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS
						1/1

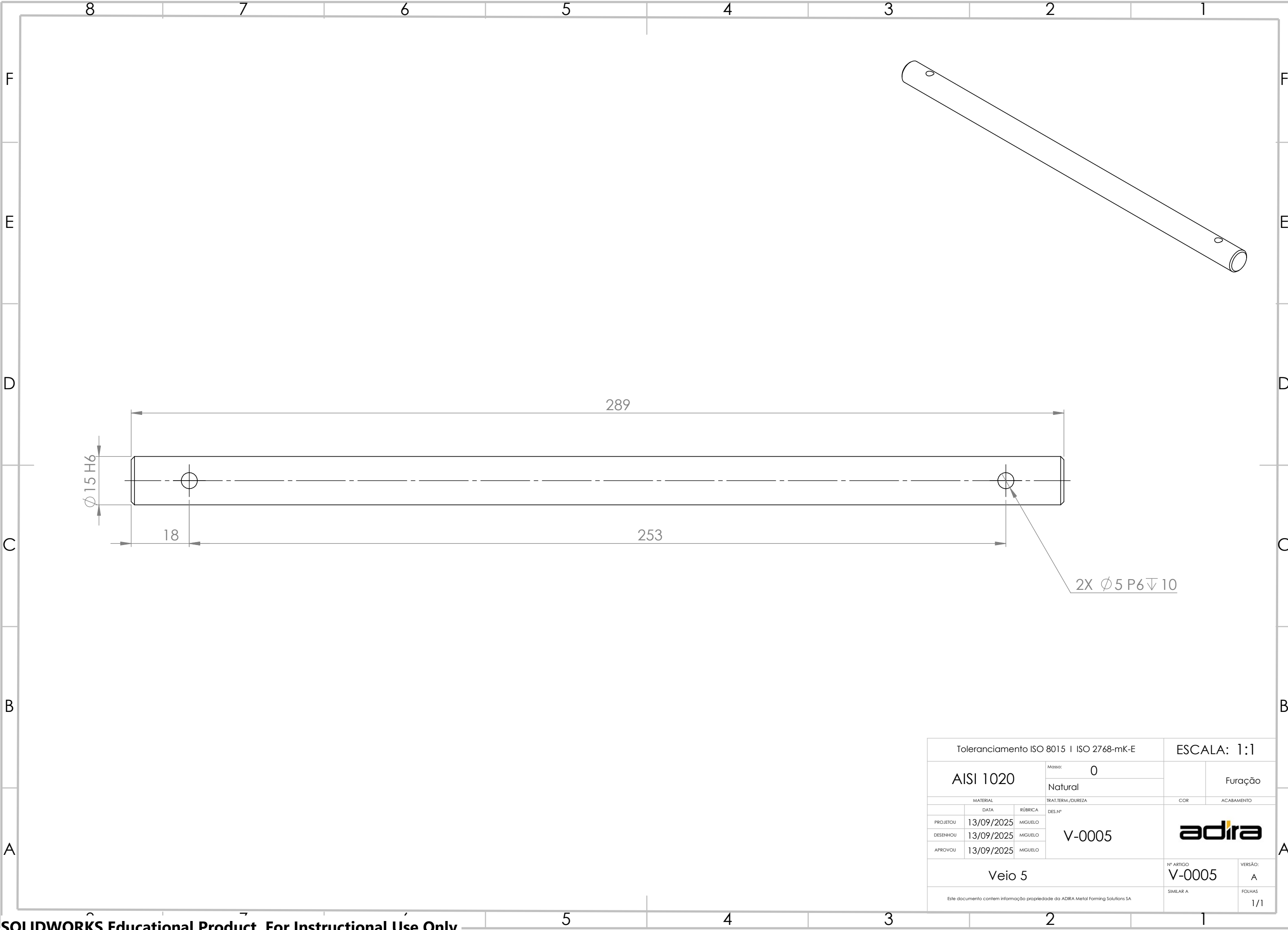


Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:1		
AISI 1020			Módulo: 0			Furação
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Veio 3					Nº ARTIGO	VERSÃO:
					V-0003	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS
						1/1

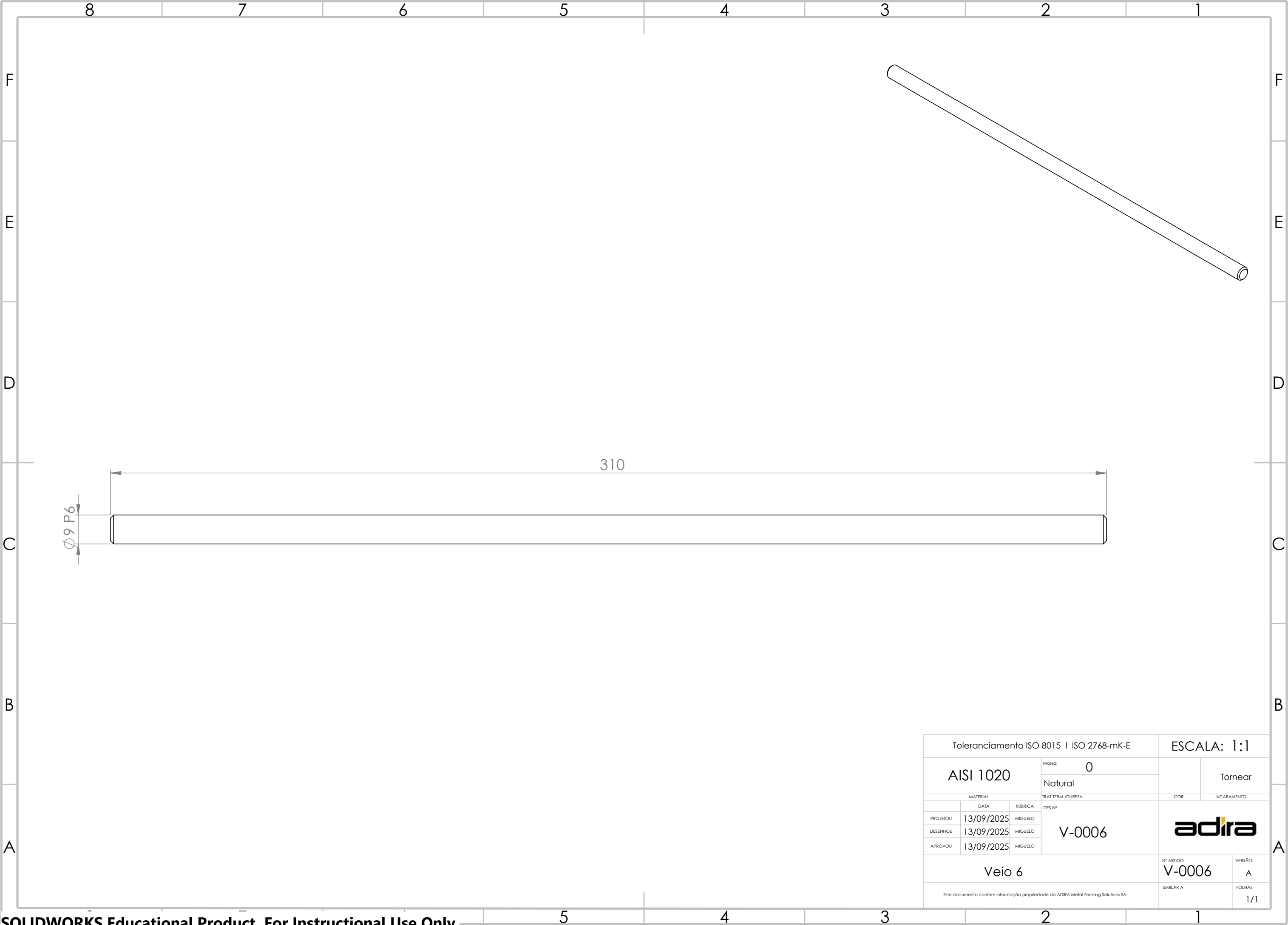


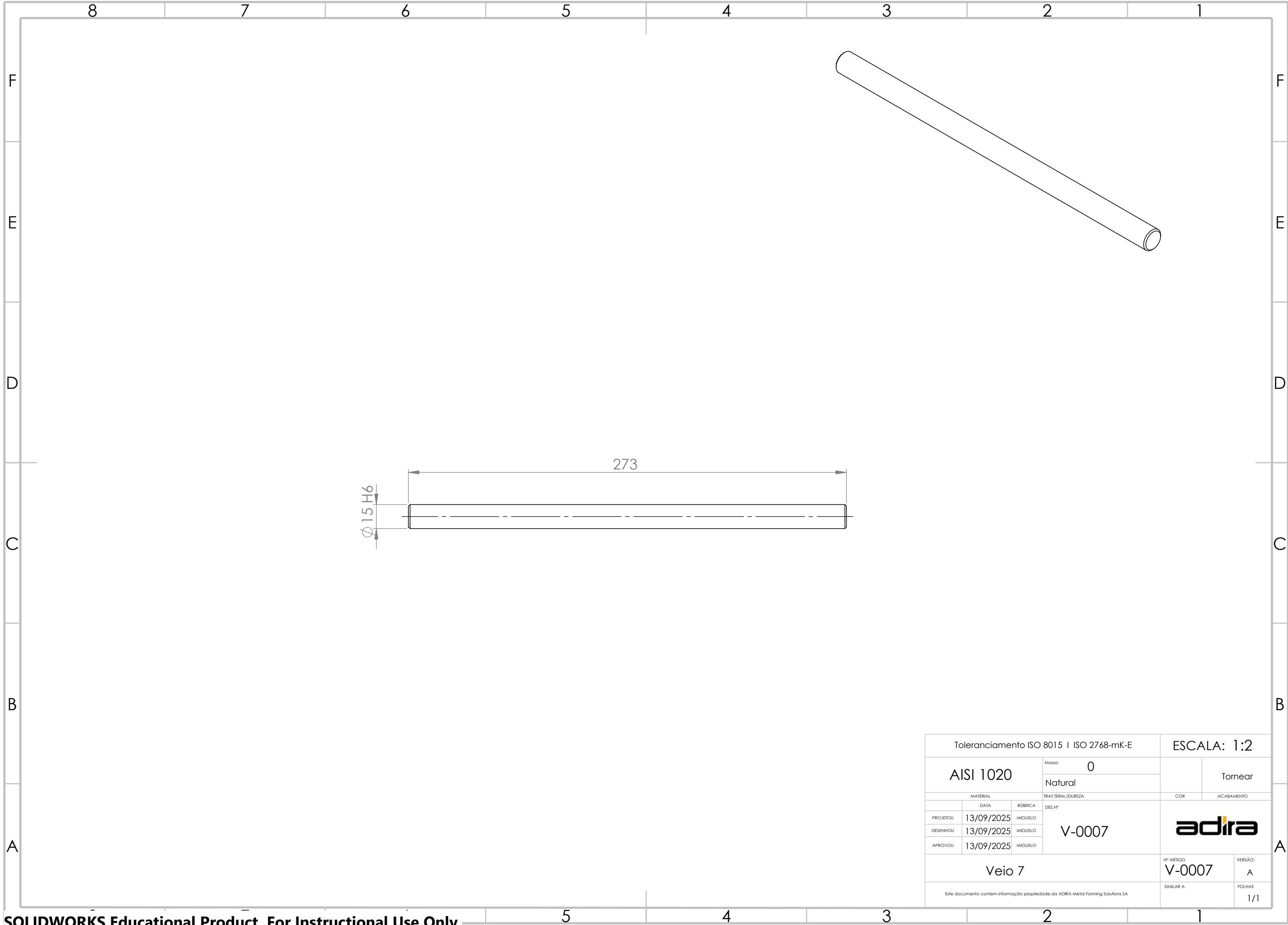
2X $\varnothing 5 P6 \nabla 10$

Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:1		
AISI 1020			Módulo: 0			Furação
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº V-0004			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Veio 4					Nº ARTIGO V-0004	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS 1/1

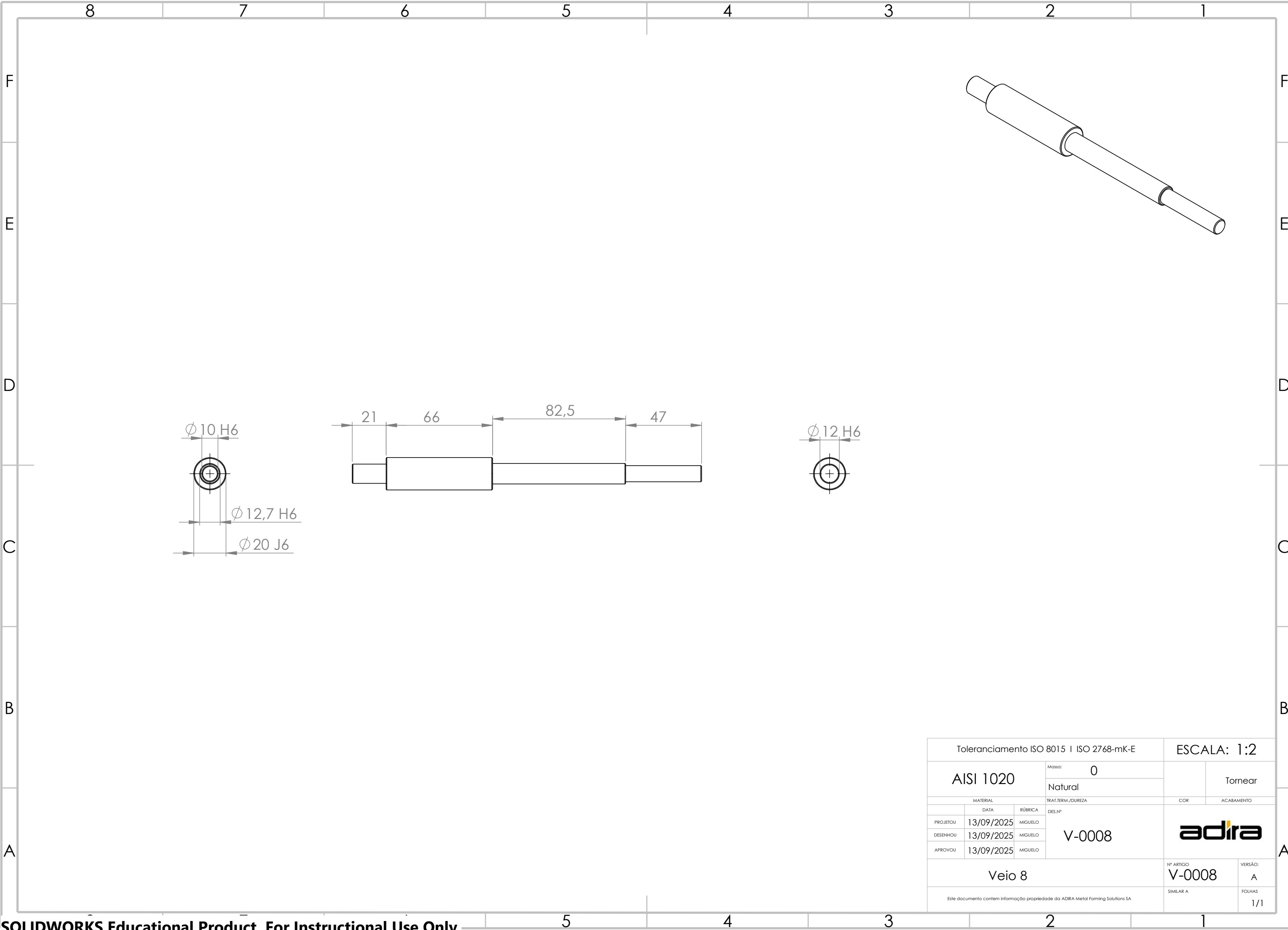


Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:1		
AISI 1020			Módulo: 0			Furação
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº V-0005			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Veio 5					Nº ARTIGO V-0005	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS 1/1

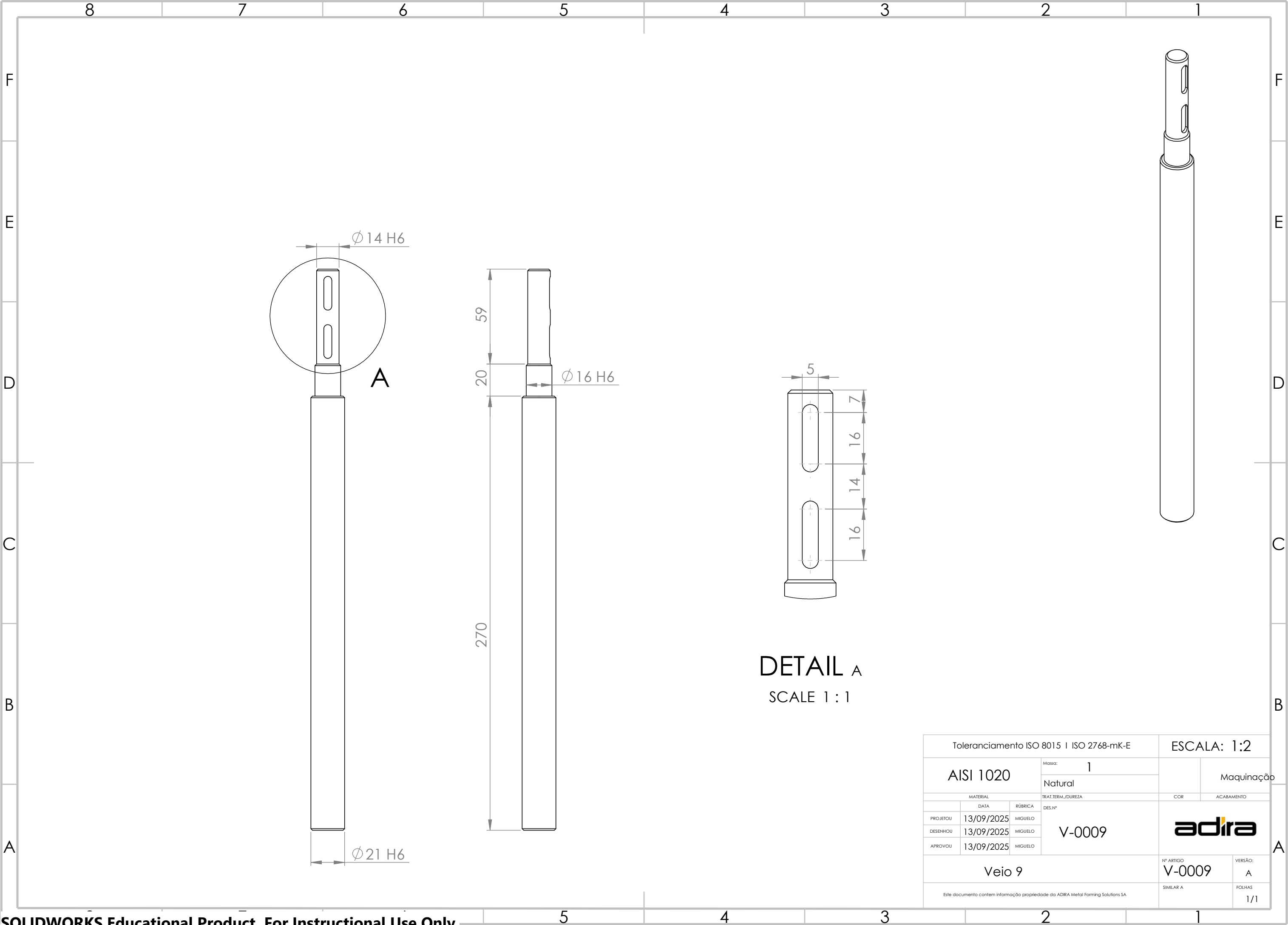


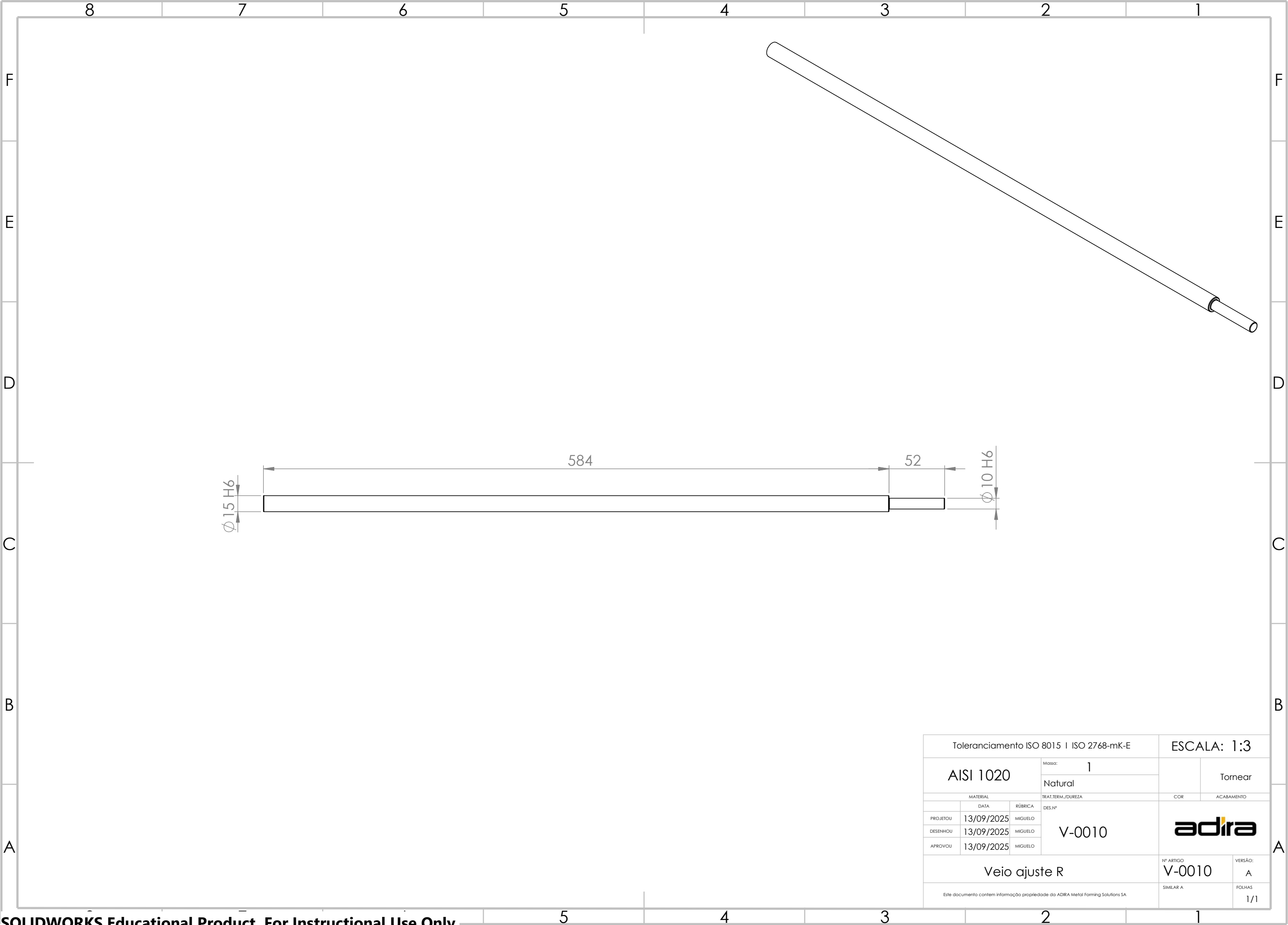


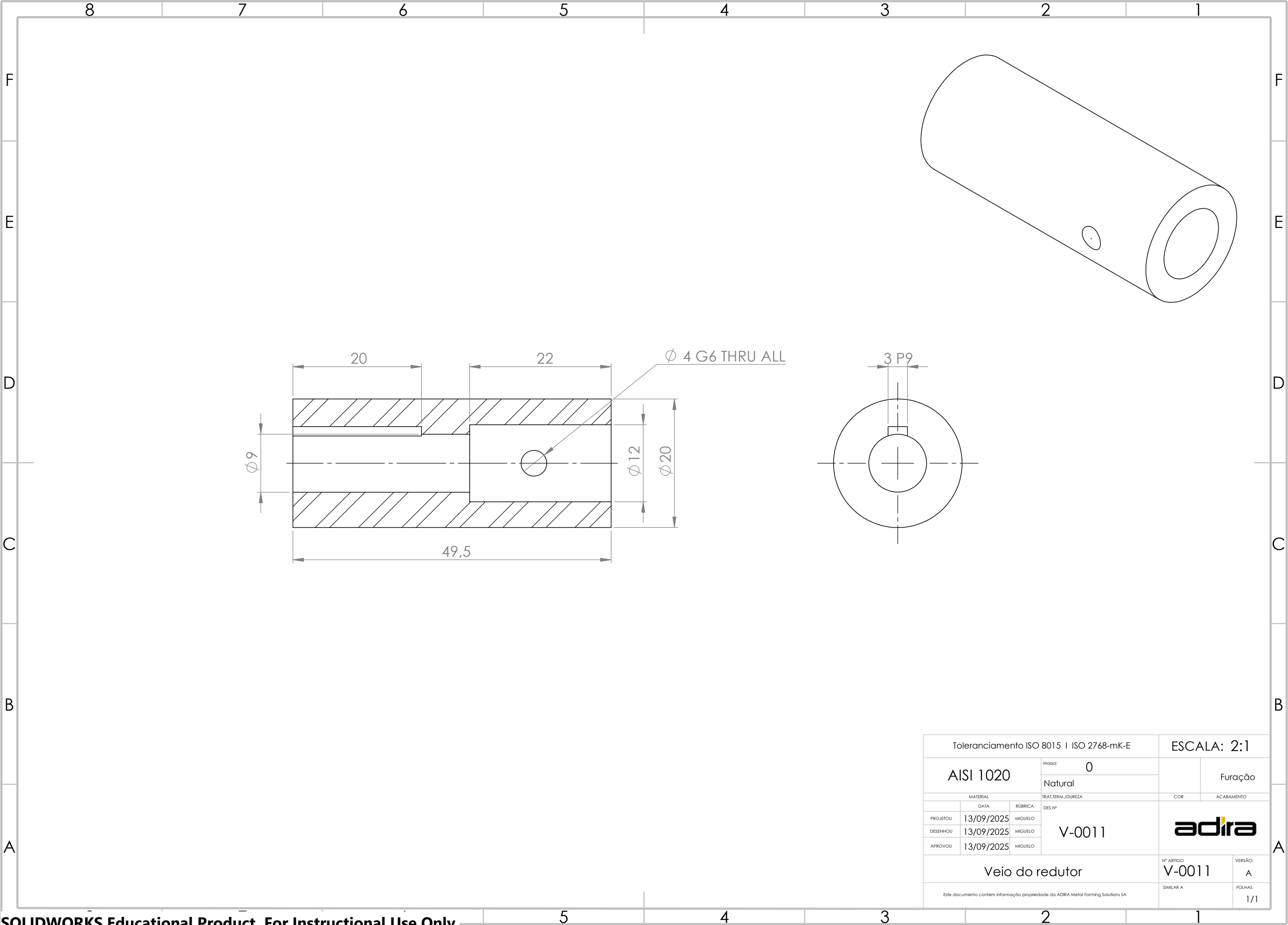
Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:2		
AISI 1020			Módulo: 0			Tornear
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº V-0007 			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Veio 7					Nº ARTIGO	VERSÃO:
					V-0007	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS
						1/1



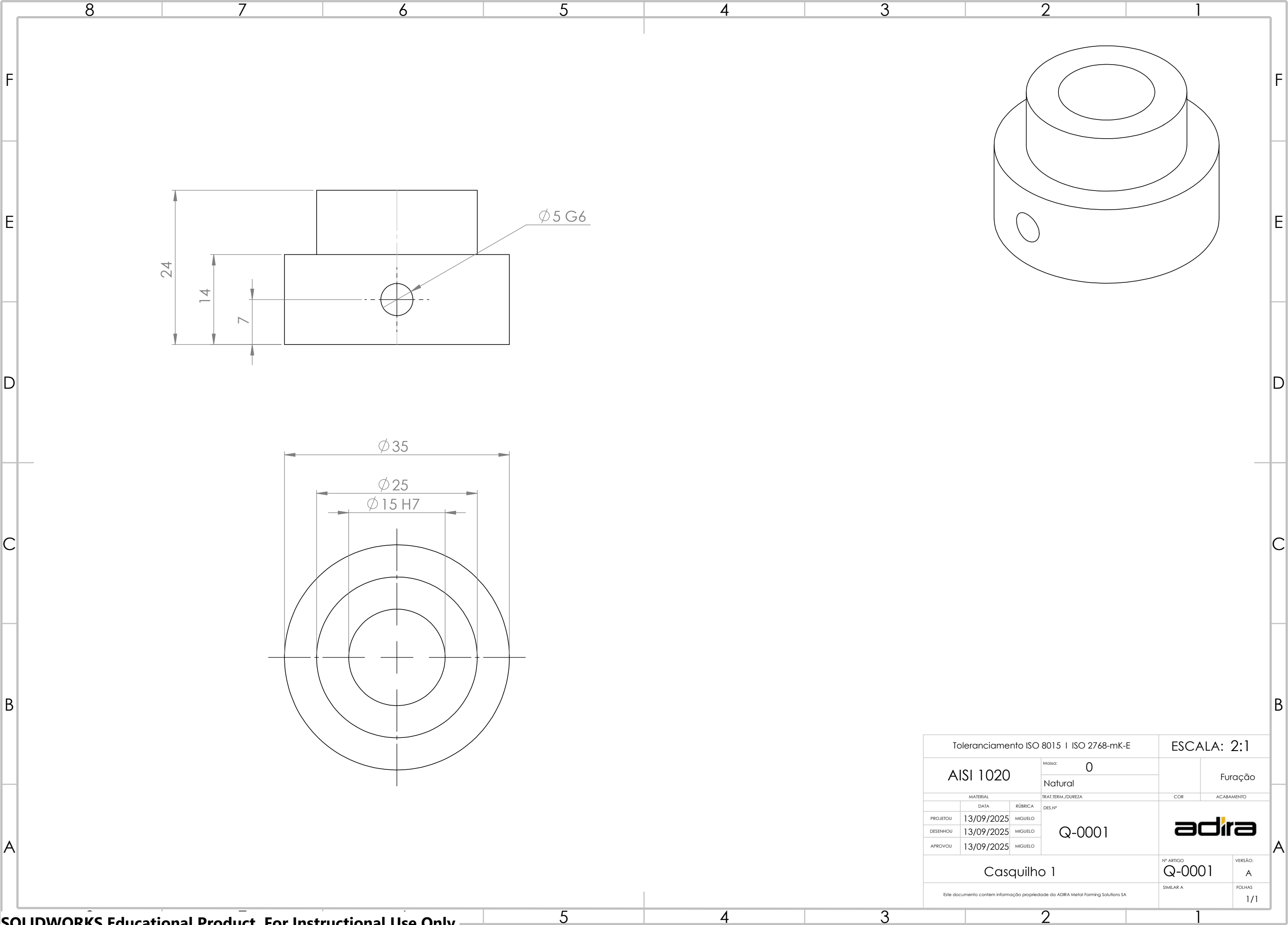
Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:2		
AISI 1020			Módulo: 0			Tornear
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº V-0008			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Veio 8					Nº ARTIGO V-0008	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS 1/1

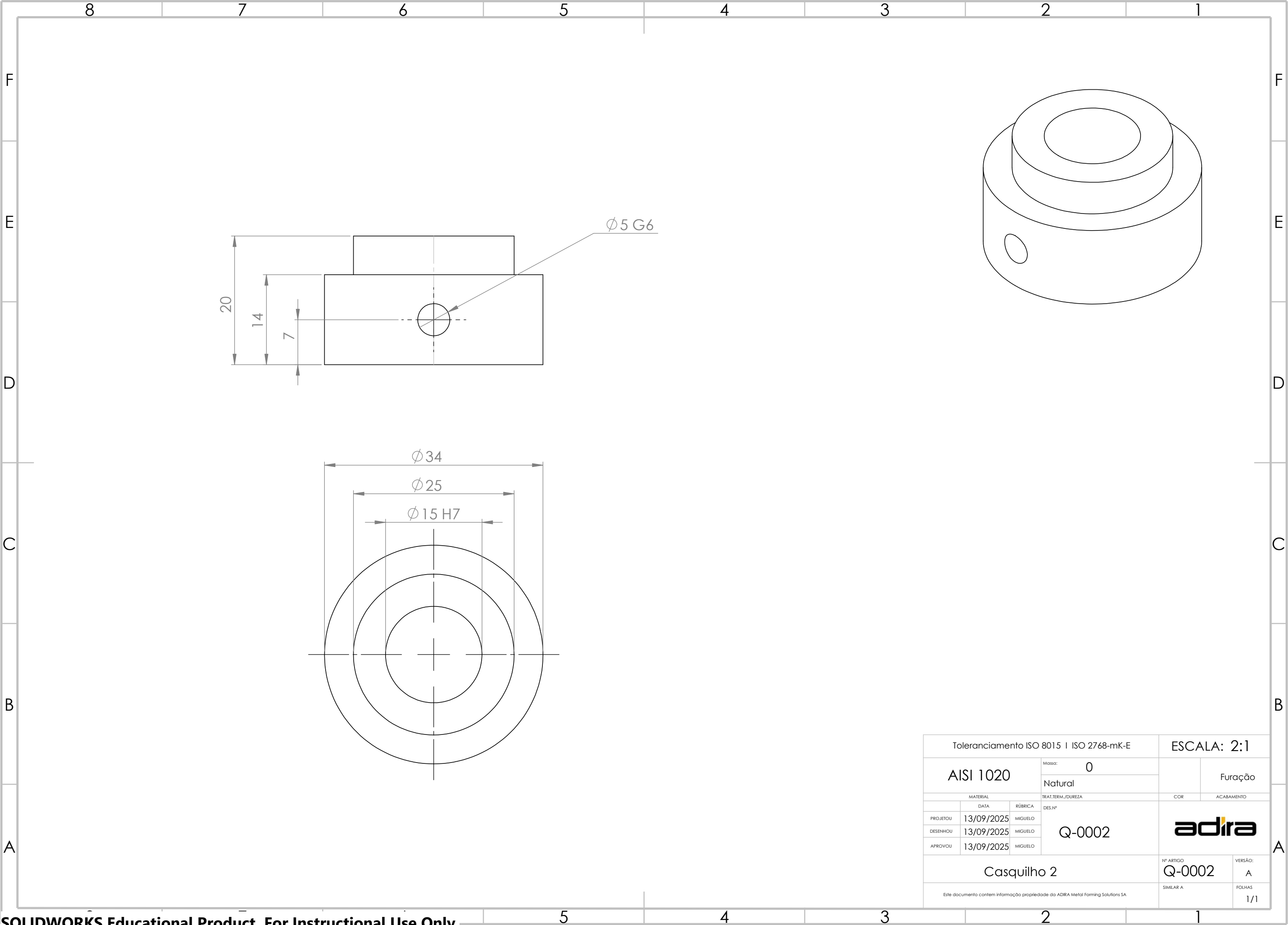




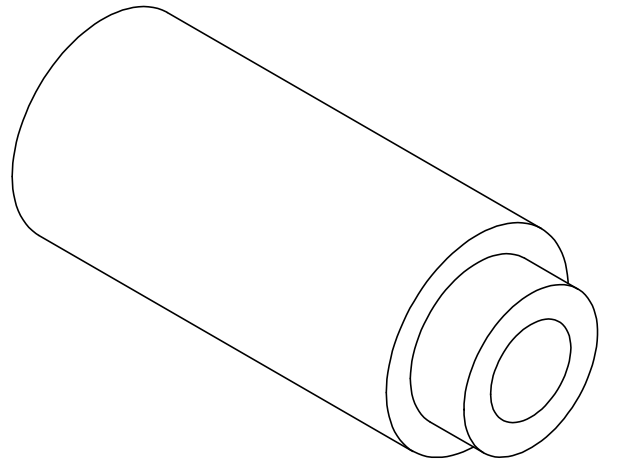
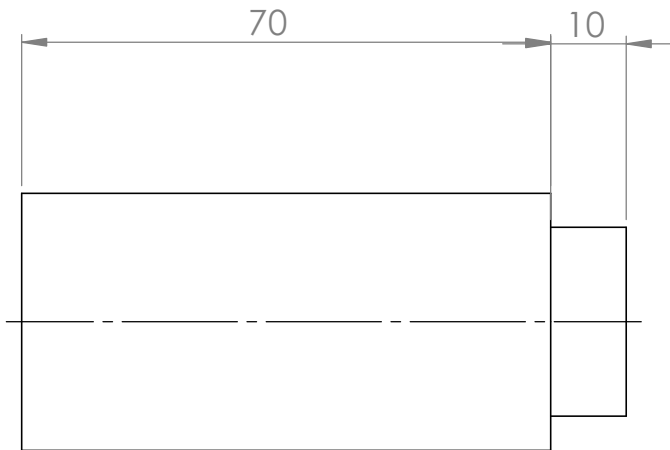
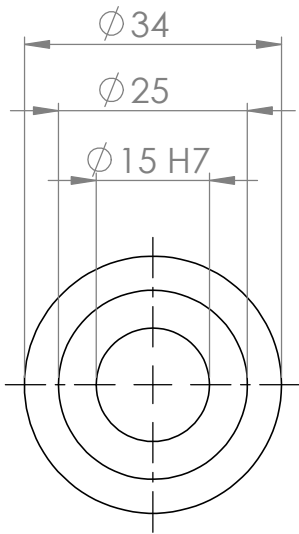
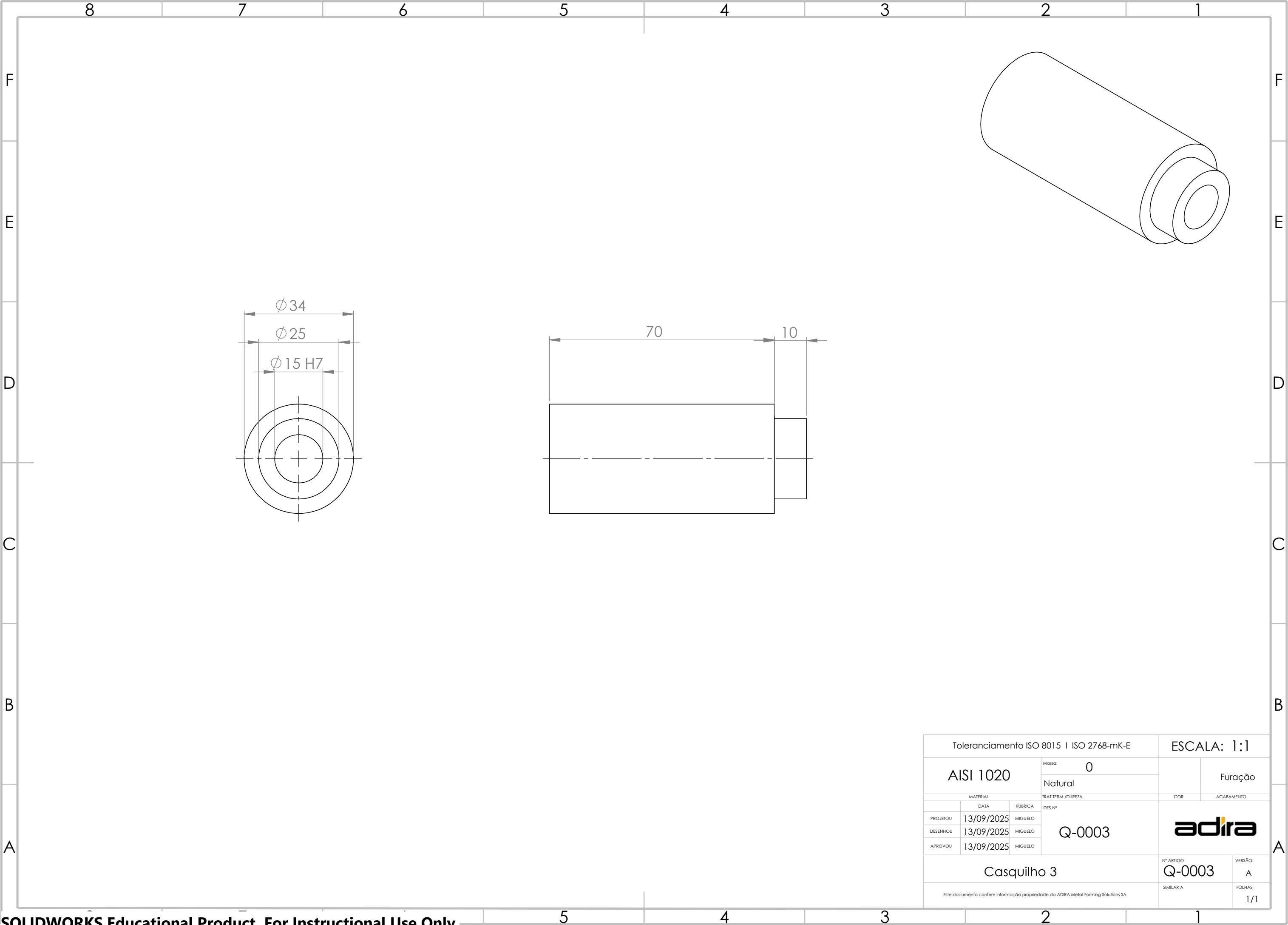


Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 2:1		
AISI 1020			Módulo: 0			Furação
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº V-0011			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Veio do redutor					Nº ARTIGO V-0011	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS 1/1

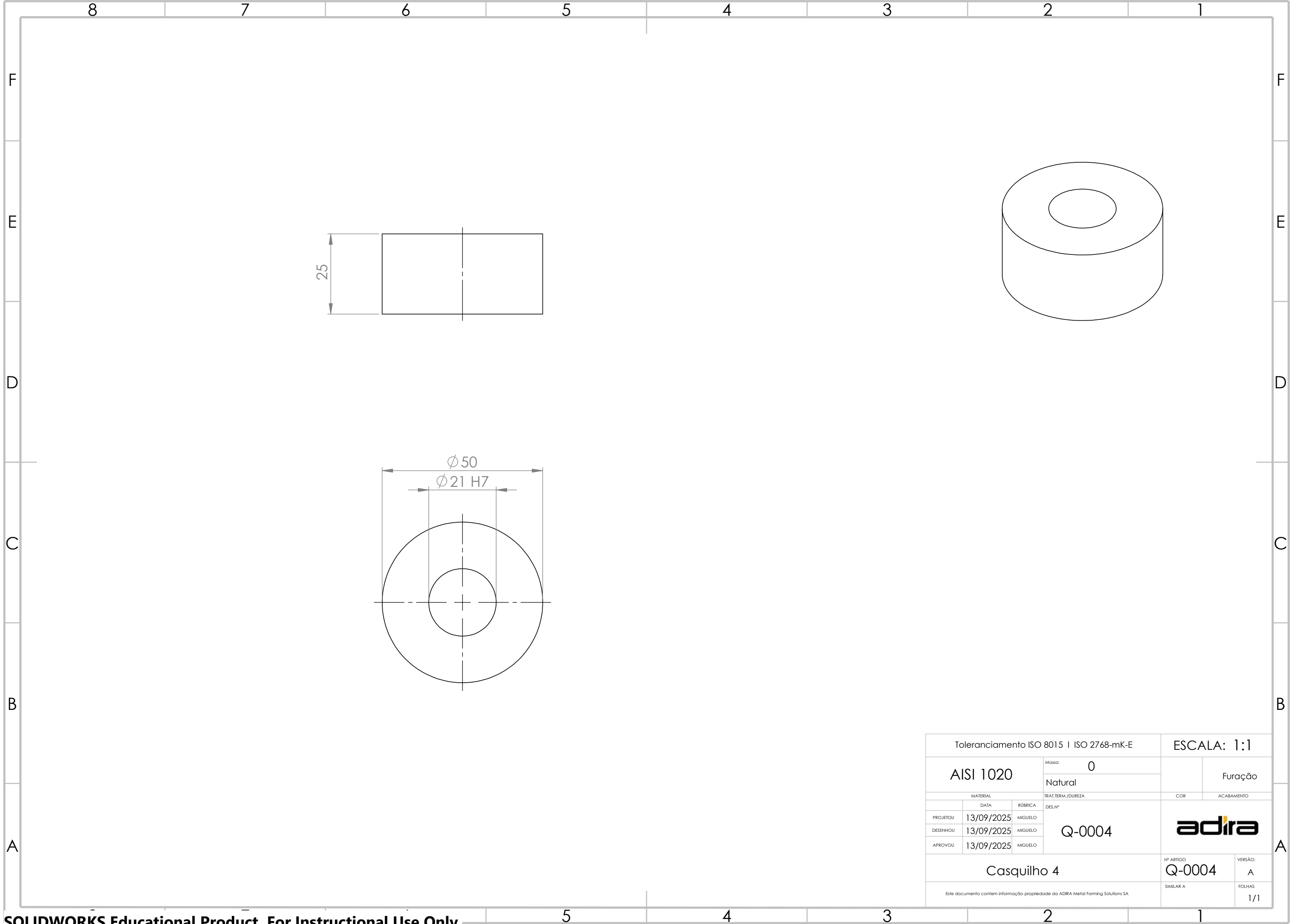




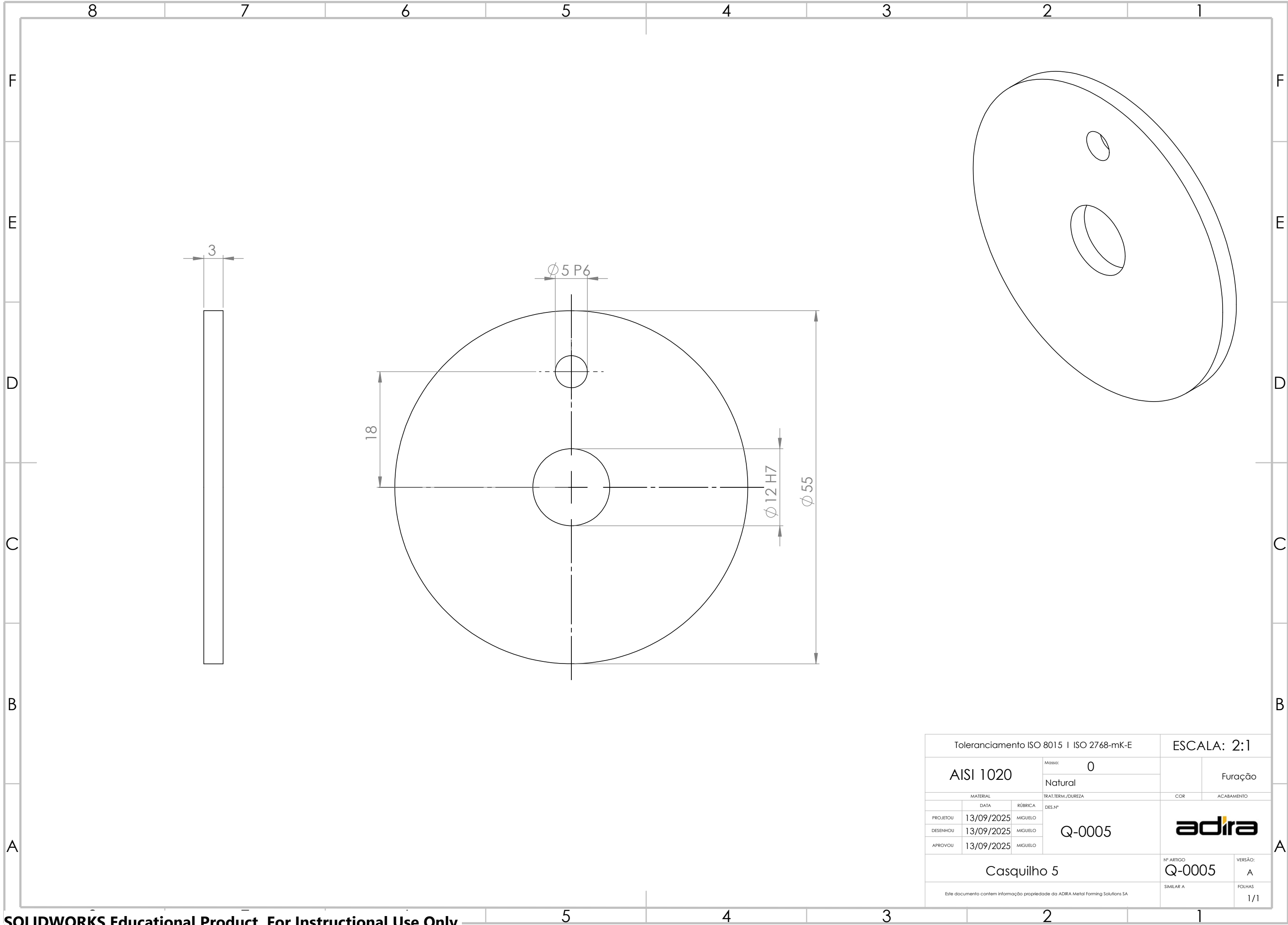
Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 2:1		
AISI 1020			Módulo: 0			Furação
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº Q-0002			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Casquilho 2					Nº ARTIGO Q-0002	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS 1/1



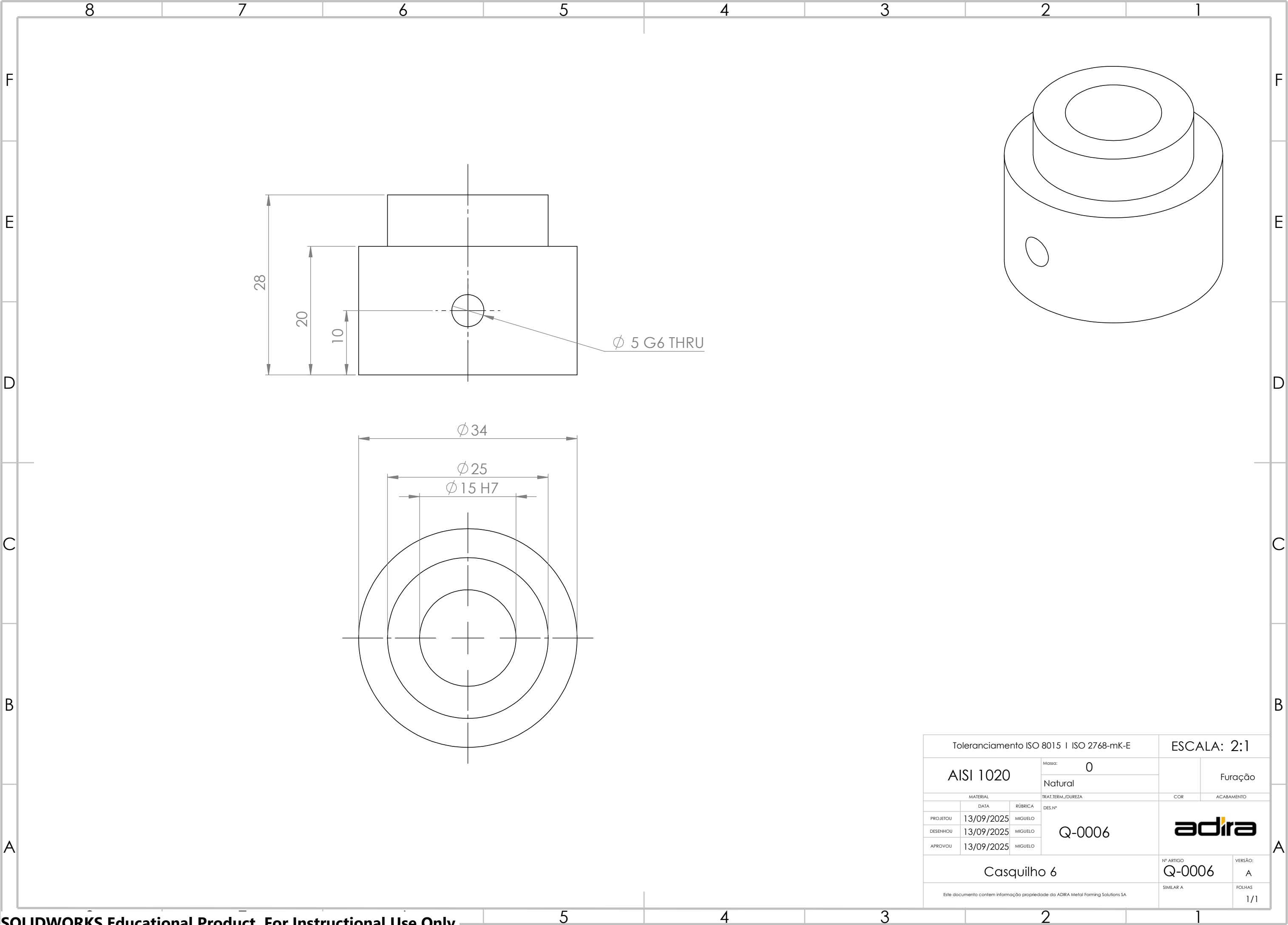
Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:1		
AISI 1020			Módulo: 0			Furação
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº Q-0003			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Casquilho 3					Nº ARTIGO Q-0003	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS 1/1

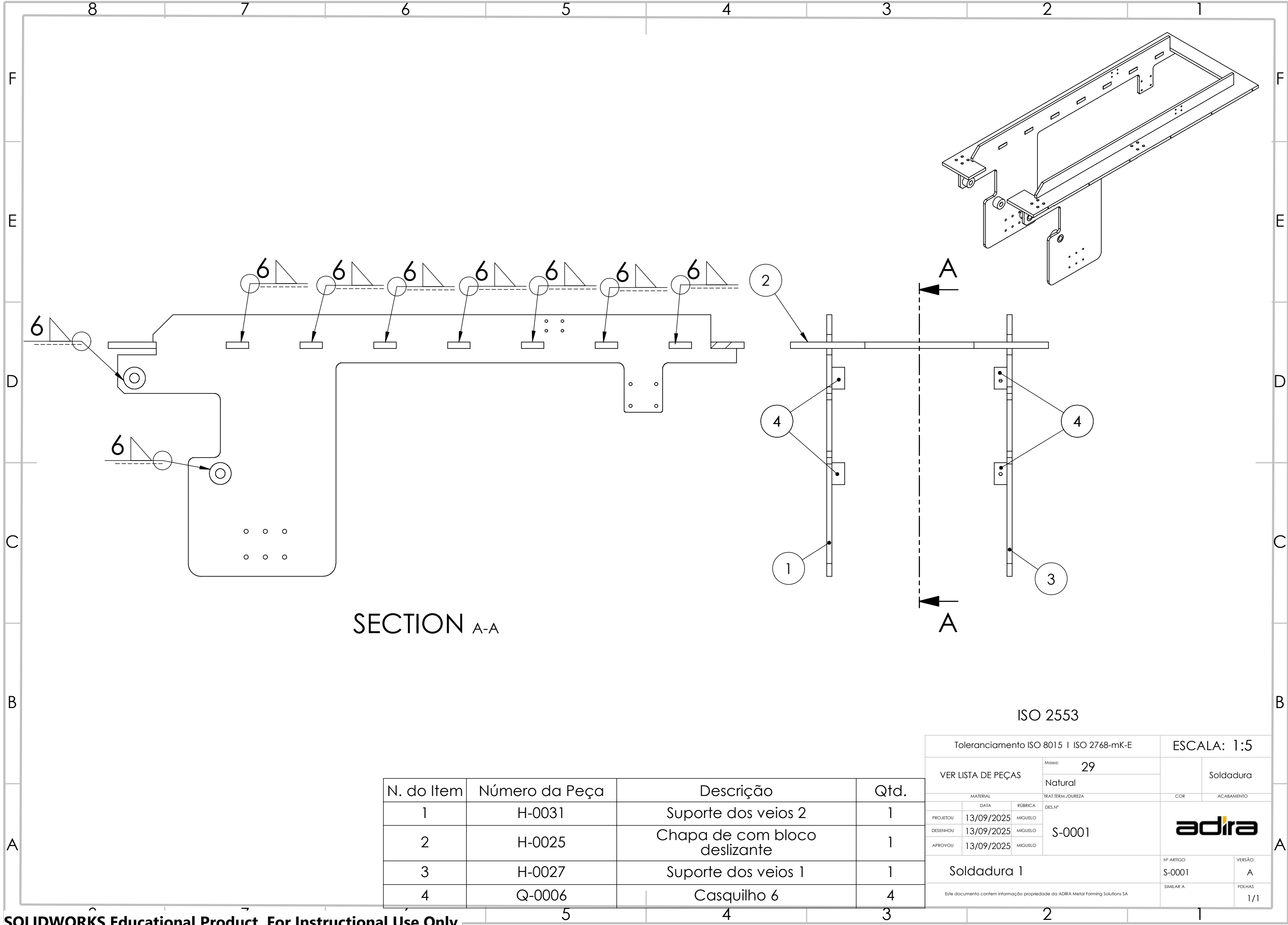


Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:1		
AISI 1020			Módulo: 0			Furação
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº Q-0004			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Casquilho 4					Nº ARTIGO Q-0004	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS 1/1



Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E				ESCALA: 2:1		
AISI 1020			Módulo: 0			Furação
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº Q-0005			
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO				
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO				
Casquilho 5					Nº ARTIGO Q-0005	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS 1/1



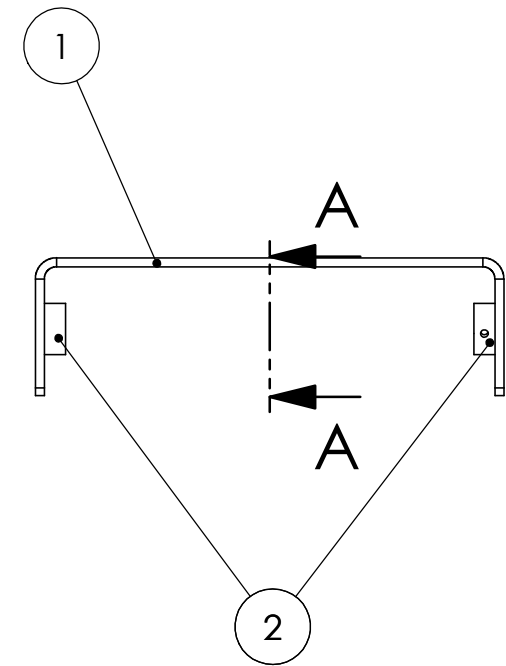
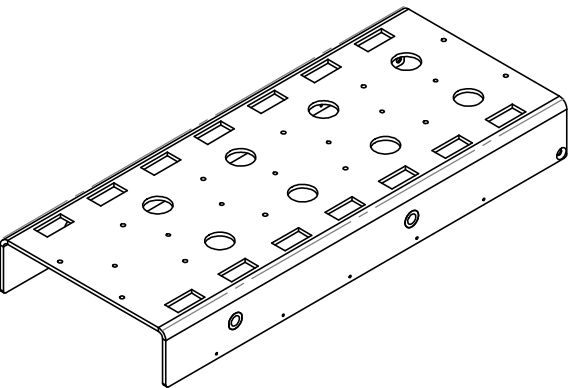
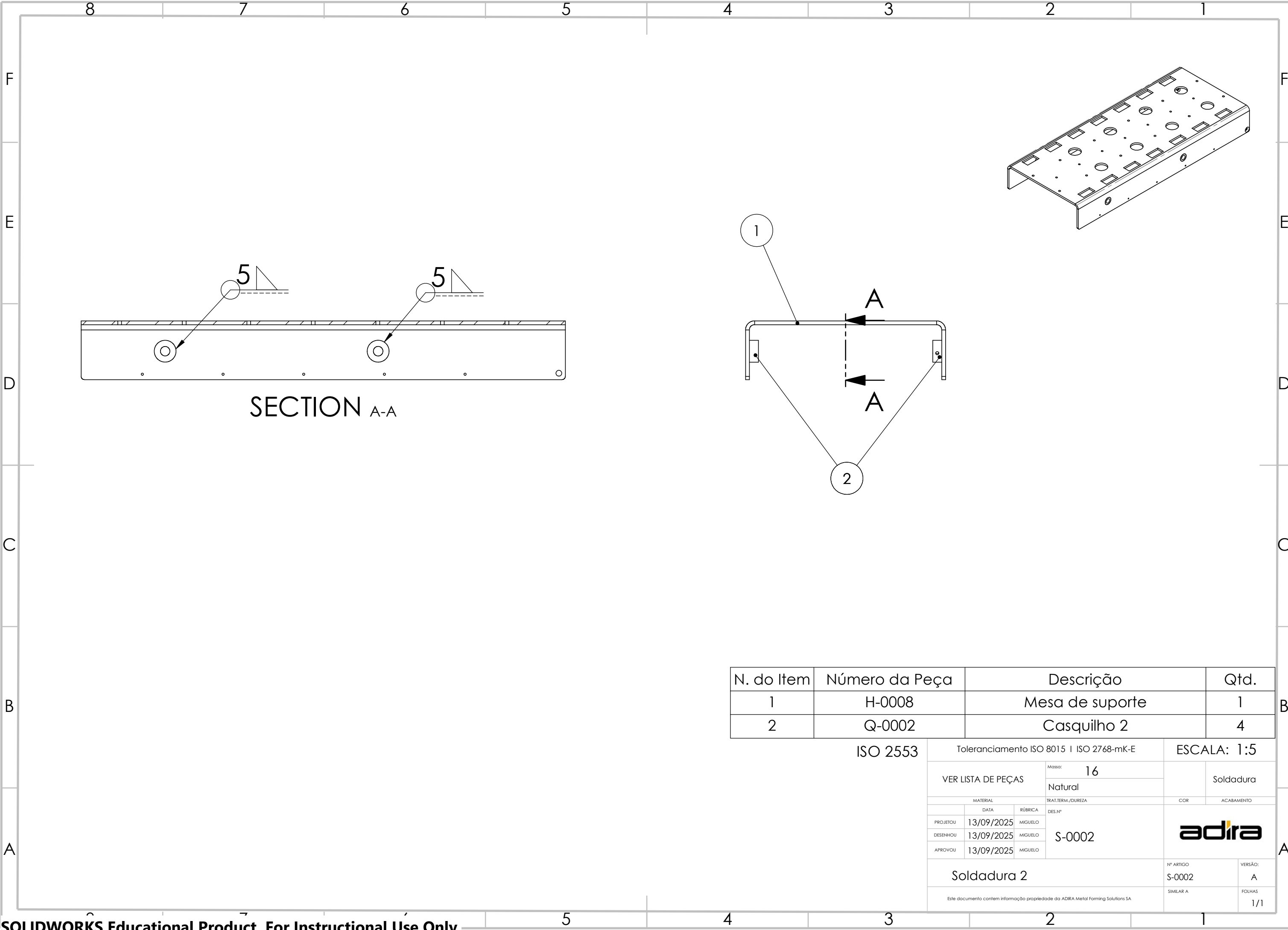


SECTION A-A

ISO 2553

N. do Item	Número da Peça	Descrição	Qtd.
1	H-0031	Suporte dos veios 2	1
2	H-0025	Chapa de com bloco deslizante	1
3	H-0027	Suporte dos veios 1	1
4	Q-0006	Casquilho 6	4

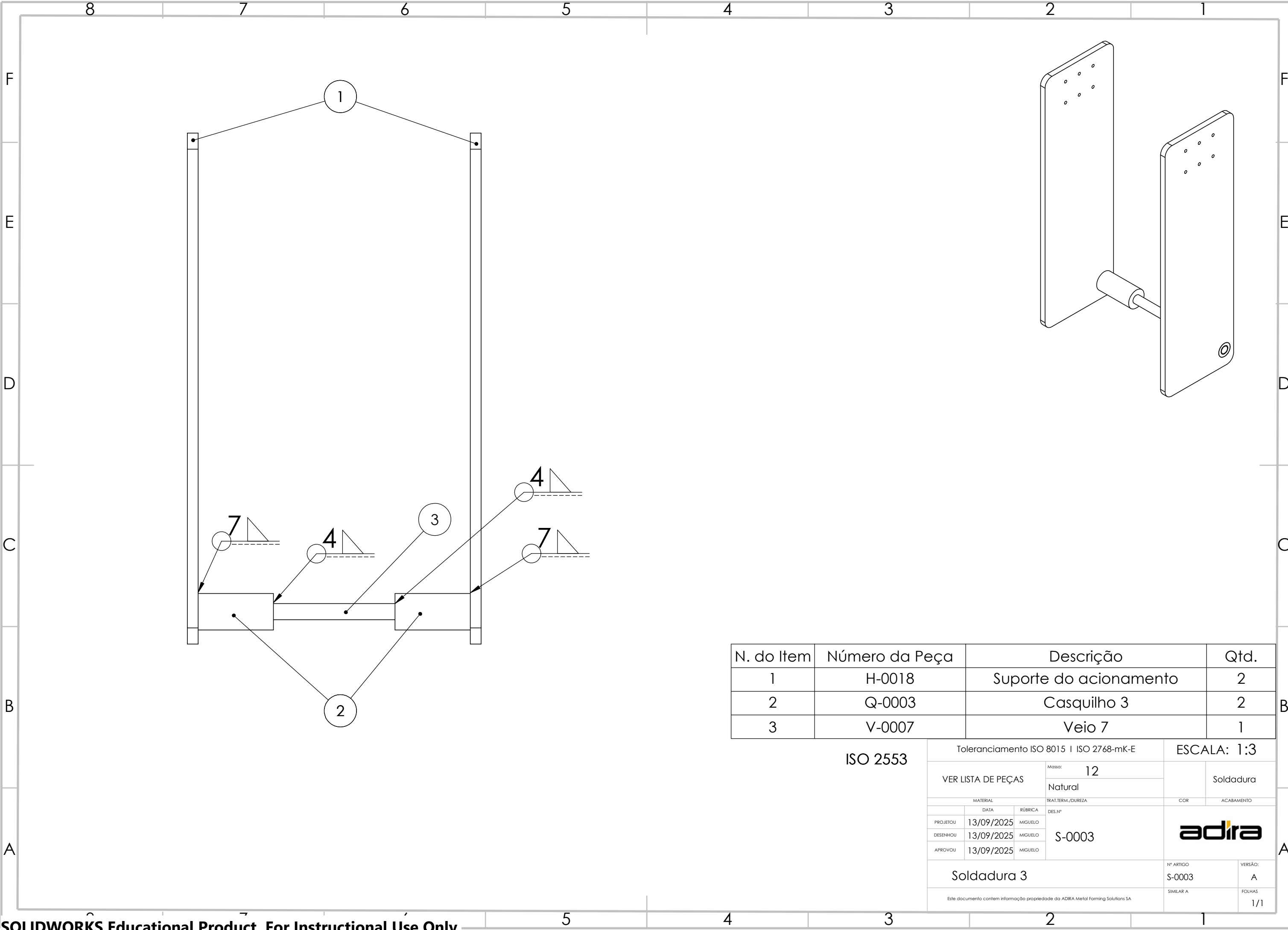
Toleranciamento ISO 8015 I ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:5	
VER LISTA DE PEÇAS			Massa: 29		Soldadura
			Natural		
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA	COR	ACABAMENTO
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº		
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO	S-0001		
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO			
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO			
Soldadura 1				Nº ARTIGO S-0001	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA				SIMILAR A	FOLHAS 1/1



N. do Item	Número da Peça	Descrição	Qtd.
1	H-0008	Mesa de suporte	1
2	Q-0002	Casquilho 2	4

ISO 2553 Toleranciamento ISO 8015 I ISO 2768-mK-E ESCALA: 1:5

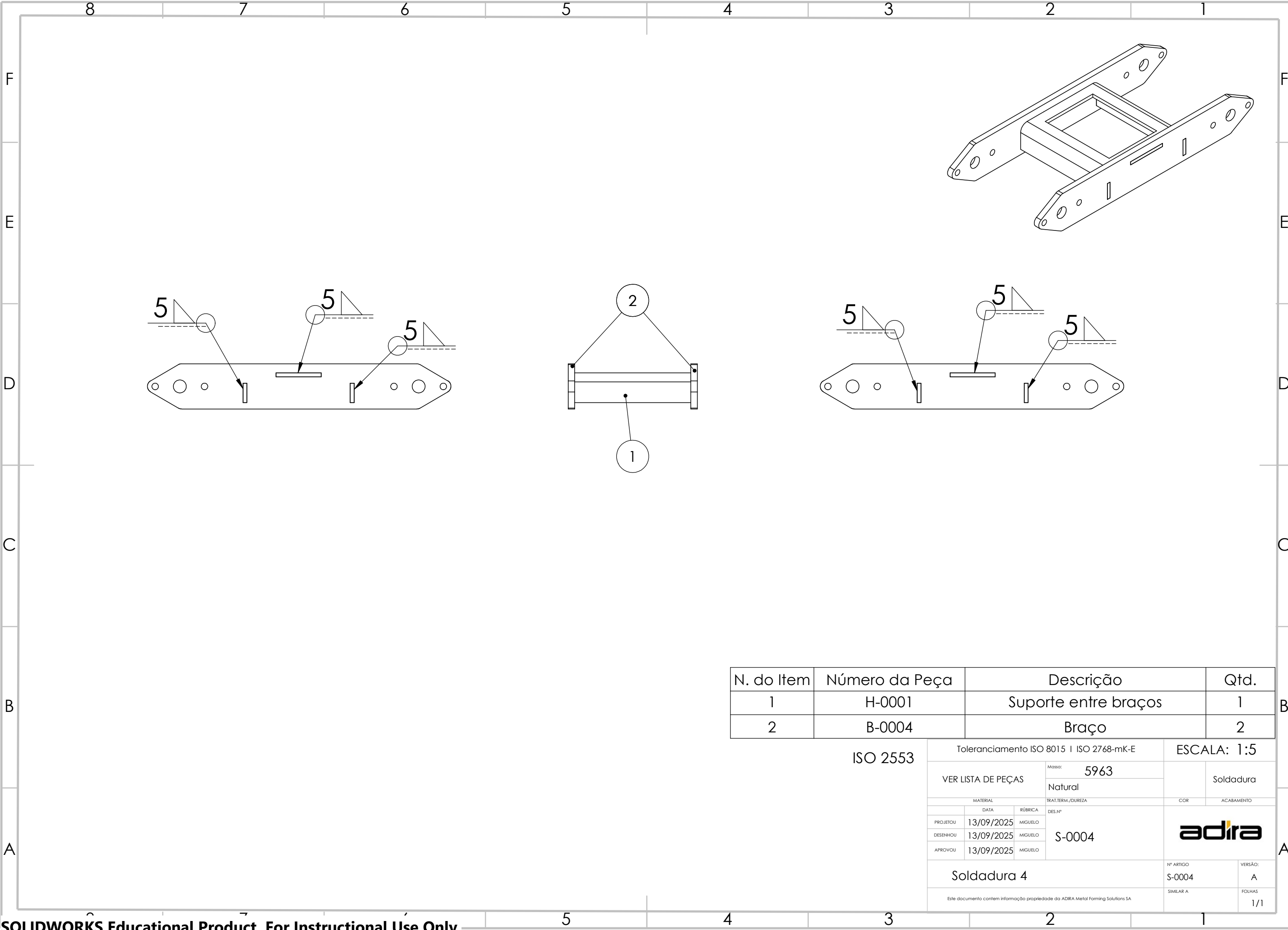
VER LISTA DE PEÇAS		Massa: 16	Soldadura
		Natural	
MATERIAL		TRAT.TERM./DUREZA	COR
DATA	RÚBRICA	DES.Nº	ACABAMENTO
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO	adira
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO	
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO	
Soldadura 2		Nº ARTIGO	VERSÃO:
		S-0002	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA		SIMILAR A	FOLHAS
			1/1



N. do Item	Número da Peça	Descrição	Qtd.
1	H-0018	Suporte do acionamento	2
2	Q-0003	Casquilho 3	2
3	V-0007	Veio 7	1

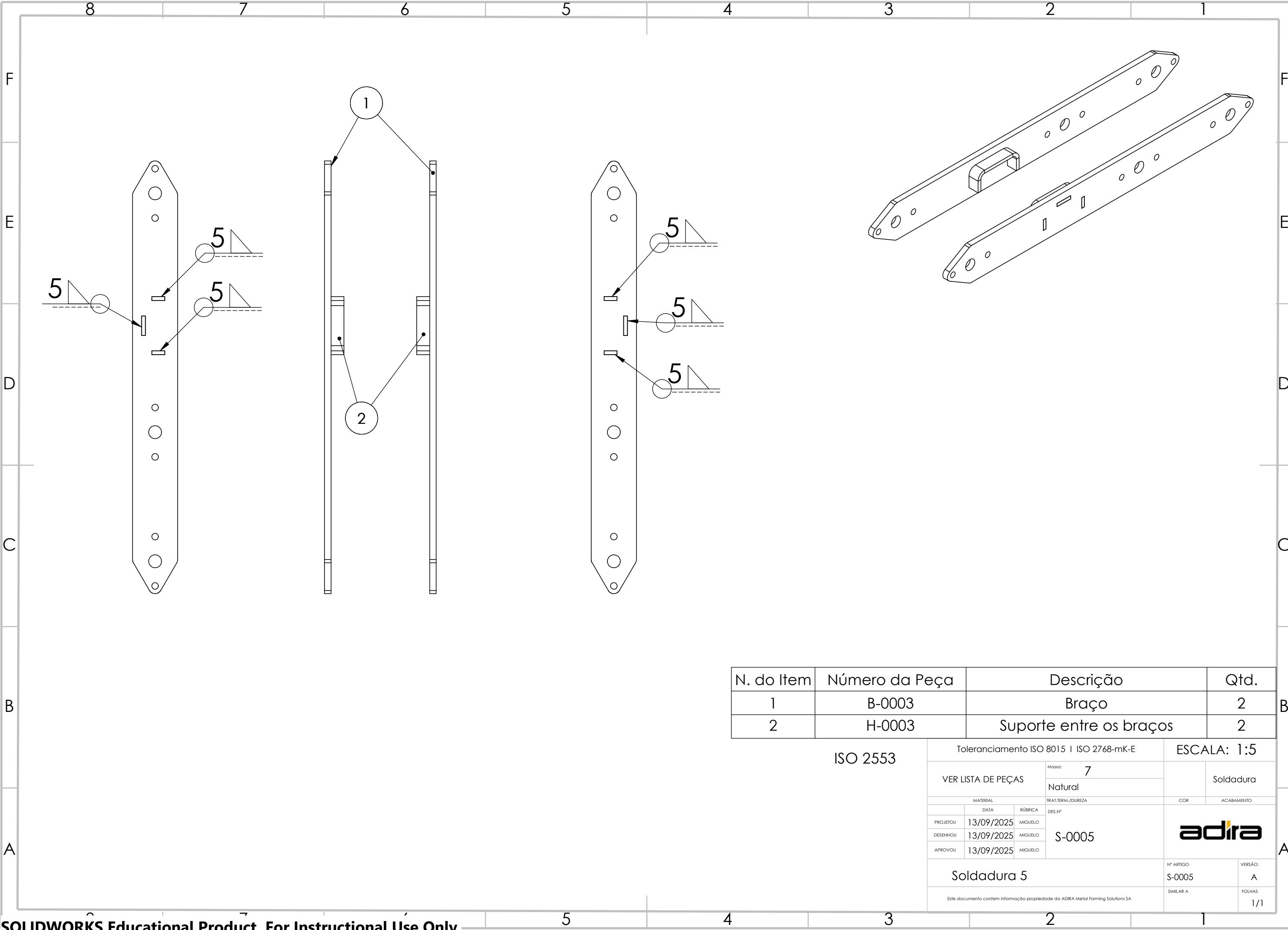
ISO 2553

Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E			ESCALA: 1:3	
VER LISTA DE PEÇAS			Massa: 12	Soldadura
			Natural	
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA	COR
DATA	RÚBRICA	DES.Nº		
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO		
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO		
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO		
S-0003				
Soldadura 3			Nº ARTIGO	VERSÃO:
			S-0003	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA			SIMILAR A	FOLHAS
				1/1



N. do Item	Número da Peça	Descrição	Qtd.
1	H-0001	Suporte entre braços	1
2	B-0004	Braço	2

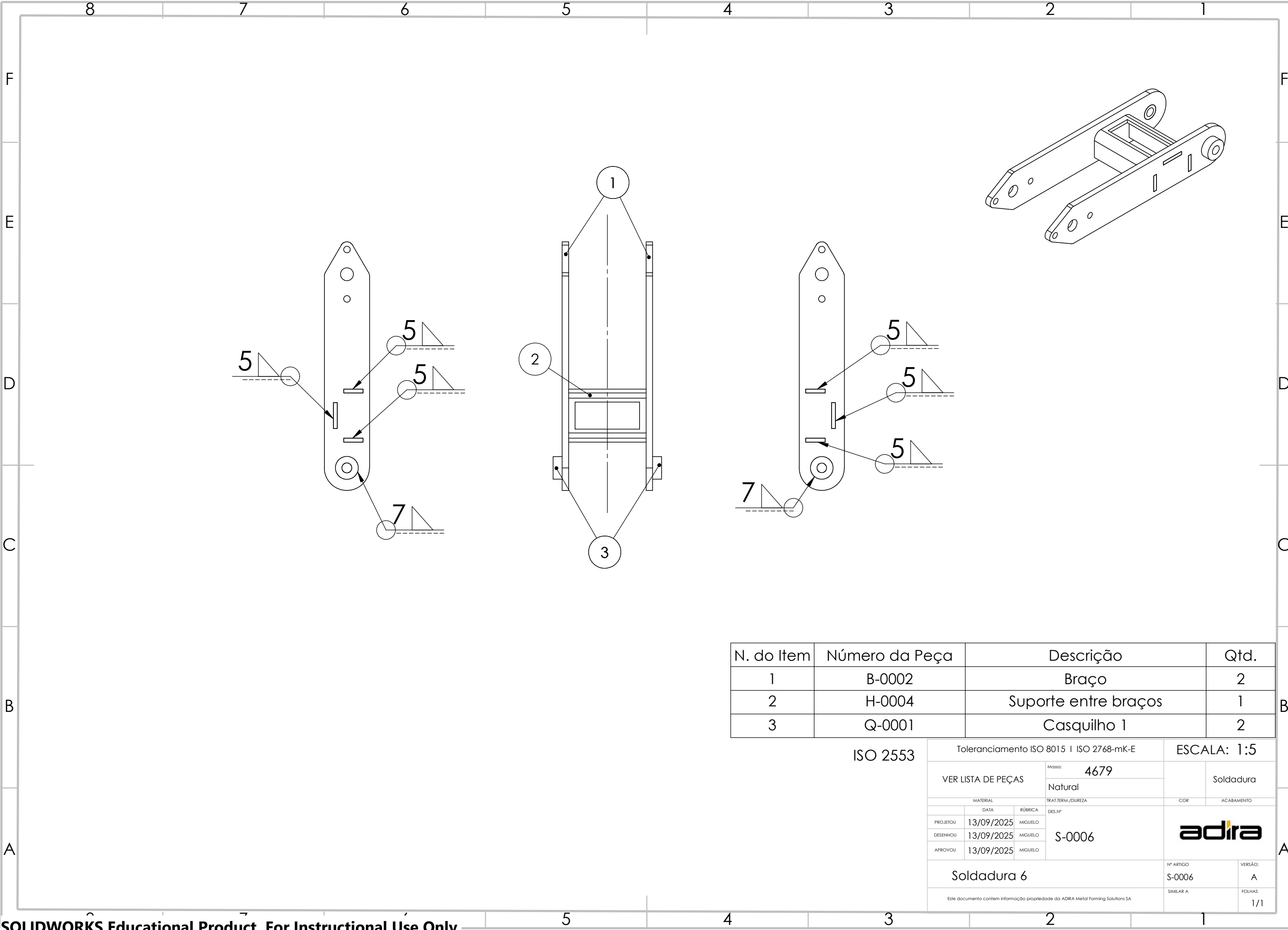
ISO 2553			Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E			ESCALA: 1:5	
VER LISTA DE PEÇAS			Massa: 5963			Soldadura	
			Natural				
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA		COR	ACABAMENTO	
	DATA	RÚBRICA	DES.Nº				
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO	S-0004				
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO					
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO					
Soldadura 4					Nº ARTIGO	VERSÃO:	
					S-0004	A	
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA					SIMILAR A	FOLHAS	
						1/1	



N. do Item	Número da Peça	Descrição	Qtd.
1	B-0003	Braço	2
2	H-0003	Suporte entre os braços	2

ISO 2553

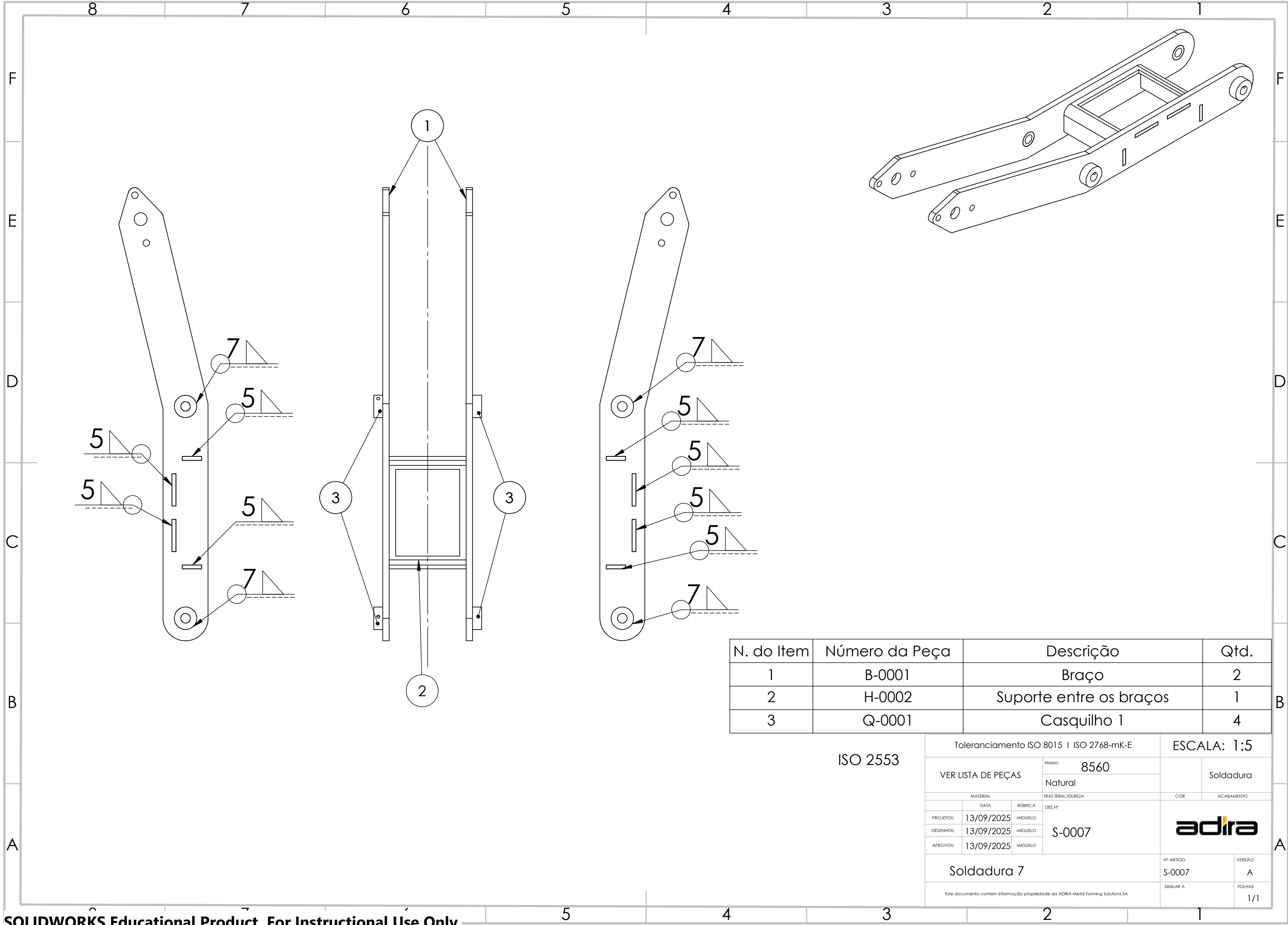
Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E			ESCALA: 1:5	
VER LISTA DE PEÇAS			Massa: 7	Soldadura
			Natural	
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA	COR
DATA	RÚBRICA	DES.Nº		
PROJETOU	13/09/2025	MIGUELO		
DESENHOU	13/09/2025	MIGUELO		
APROVOU	13/09/2025	MIGUELO		
S-0005				
Soldadura 5			Nº ARTIGO	VERSÃO:
			S-0005	A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA			SIMILAR A	FOLHAS
				1/1



N. do Item	Número da Peça	Descrição	Qtd.
1	B-0002	Braço	2
2	H-0004	Suporte entre braços	1
3	Q-0001	Casquilho 1	2

ISO 2553

Toleranciamento ISO 8015 I ISO 2768-mK-E				ESCALA: 1:5		
VER LISTA DE PEÇAS			Massa: 4679		Soldadura	
			Natural			
MATERIAL			TRAT.TERM./DUREZA	COR	ACABAMENTO	
DATA	RÚBRICA	DES.Nº	S-0006			
PROJETOU	13/09/2025					MIGUELO
DESENHOU	13/09/2025					MIGUELO
APROVOU	13/09/2025					MIGUELO
Soldadura 6				Nº ARTIGO	VERSÃO:	
				S-0006	A	
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA				SIMILAR A	FOLHAS	
					1/1	



N. do Item	Número da Peça	Descrição	Qtd.
1	B-0001	Braço	2
2	H-0002	Suporte entre os braços	1
3	Q-0001	Casquilho 1	4

ISO 2553

Toleranciamento ISO 8015 ISO 2768-mK-E		ESCALA: 1:5	
VER LISTA DE PEÇAS		Massa: 8560	Soldadura
		Natural	
MATERIAL		TRAT.TERM./DUREZA	COR
DATA	RÚBRICA	DES.Nº	ACABAMENTO
PROJETOU 13/09/2025	MIGUELO	S-0007	
DESENHOU 13/09/2025	MIGUELO		
APROVOU 13/09/2025	MIGUELO		
Soldadura 7		Nº ARTIGO S-0007	VERSÃO: A
Este documento contém informação propriedade da ADIRA Metal Forming Solutions SA		SIMILAR A	FOLHAS 1/1

Anexo A

AC Servo Motor

Motorless Type

Electric Actuator Rod Type



- Max. force: 12000 N, Work load: 1200 kg, Max. stroke: 1000 mm
- Can be mounted in accordance with ISO 15552
- Modify the force/speed specifications
(Change specifications by changing or removing the reducer)
- Motorless type
- An auto switch can be mounted



Motorless Type

Can be used with your current motor and driver!

Manufacturers of compatible motors: 7 companies

- Mitsubishi Electric Corporation
- SANYO DENKI CO., LTD.
- KEYENCE CORPORATION
- Delta Electronics, Inc.
- YASKAWA Electric Corporation
- NIDEC SANKYO CORPORATION
- FUJI ELECTRIC CO., LTD.



LEY100 Series



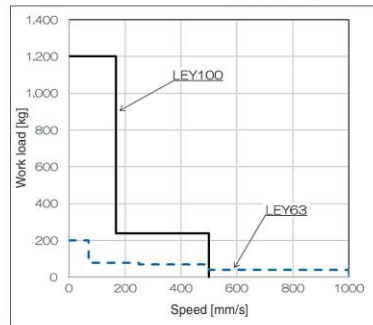
P-EU21-3-UK

Electric Actuator *LEY100 Series*

Work load

Max. work load (Horizontal)

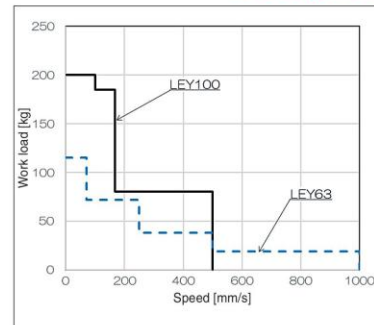
LEY100DT9L (Lead 2) **1200 kg (6 times)**



Compared with the existing model LEY63□L
(Max. horizontal work load 200 kg)

Max. work load (Vertical)

LEY100DT9L (Lead 2) **200 kg (1.7 times)**



Compared with the existing model LEY63□L
(Max. vertical work load 115 kg)

Max. force

LEY100DT9L (Lead 2) **12000 N (3.5 times)**

Compared with the existing model LEY63□L (Max. 3343 N)

Applicable stroke

LEY100D **100 to 1000 mm (1.2 times)**

Compared with the existing model LEY63□ (Stroke 100 to 800 mm)

AC Servo Motor *Rod Type Series Variations*

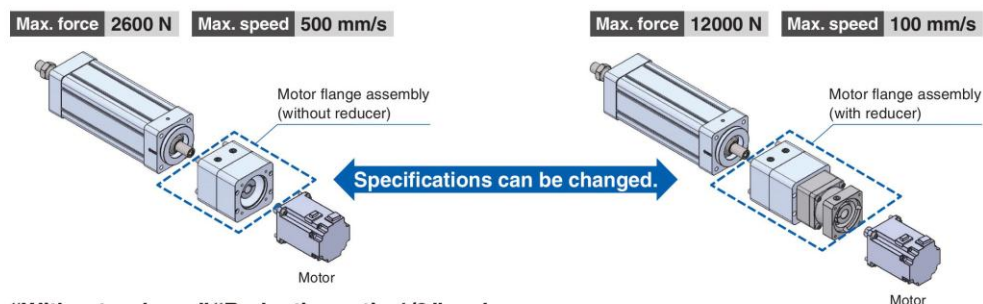


Electric Actuator *LEY100 Series***Can be mounted in accordance with ISO 15552**

The ISO cylinder (C96 Ø 80) and flange mounting bracket are now standardized.

**Modify the force/speed specifications**

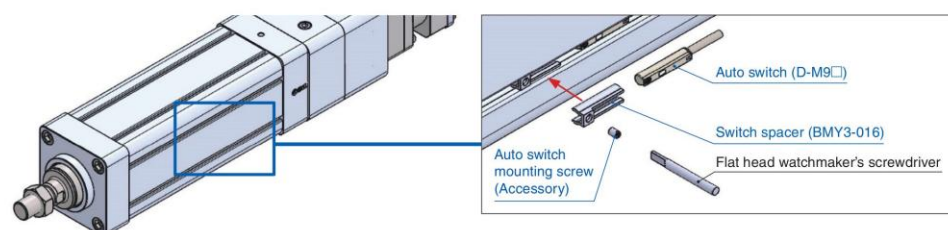
The max. force and max. speed settings can be changed by changing the reducer.



“Without reducer,” “Reduction ratio 1/3,” and
“Reduction ratio 1/5” can be selected.

An auto switch can be mounted

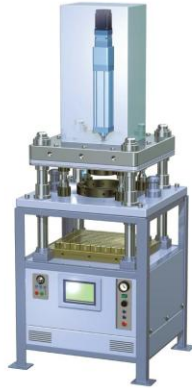
An auto switch can be mounted from the front of the groove.



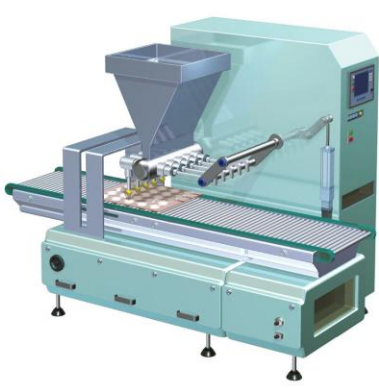
Electric Actuator *LEY100 Series*

Application examples

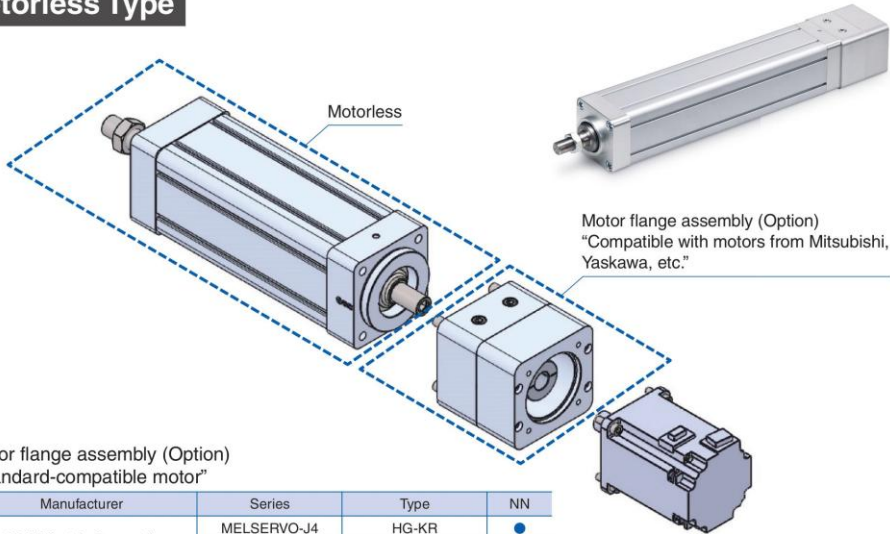
Servo-driven press machine



Replenishment unit (spring extended piston control)



Motorless Type



Motor flange assembly (Option)
"Standard-compatible motor"

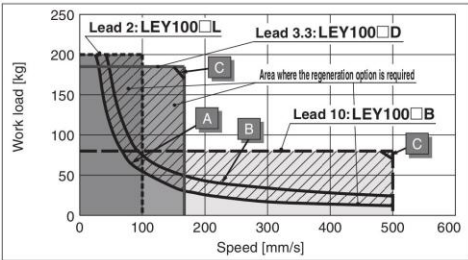
Manufacturer	Series	Type	NN
Mitsubishi Electric Corporation	MELSERVO-J4	HG-KR	●
	MELSERVO-J5	HK-KT	●
YASKAWA Electric Corporation	Σ-V	SGMJV	●
	Σ-7	SGM7J	●
SANYO DENKI CO., LTD.	SANMOTION R	R2	●
NIDEC SANKYO CORPORATION	S-FLAG	MX	●
KEYENCE CORPORATION	SV	SV-M/SV-B	●
FUJI ELECTRIC CO., LTD.	ALPHA5/7	GYS/GYB/GYG	●
Delta Electronics, Inc.	ASDA-A2	ECMA	●

(Motor: Provided by the customer)

AC Servo Motor Motorless Type
LEY100 Series
Model Selection

* Motorless specification is lead 10 only

Speed-Vertical Work Load Graph/Required Conditions for the Regeneration Option



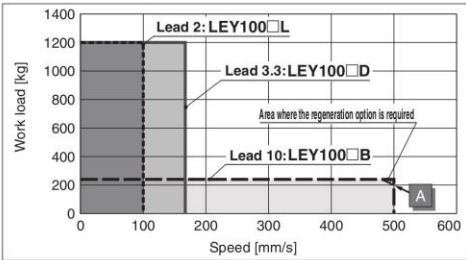
Required conditions for the regeneration option

* The regeneration option is required when using the product above the regeneration line in the graph. (It must be ordered separately.)

Regeneration Option Models

Size	Model	Duty ratio	Note
LEY100□	LEC-MR-RB-032	100	A area
	LEC-MR-RB-12	90	B area

Speed-Horizontal Work Load Graph/Required Conditions for the Regeneration Option



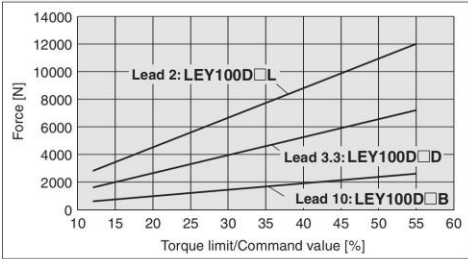
Required conditions for the regeneration option

* The regeneration option is required when using the product above the regeneration line in the graph. (It must be ordered separately.)

Regeneration Option Models

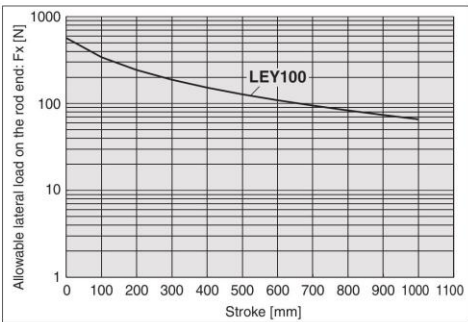
Size	Model	Note
LEY100□	LEC-MR-RB-032	A area

Force Conversion Graph (Guide) For the LECSS-T (/LECSB-T)

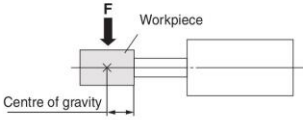


Torque limit/Command value [%]	Duty ratio [%]	Continuous pushing time [min]
25 or less	100	—
30	90	6.00 or less
40	50	1.23 or less
50	30	0.57 or less
55	20	0.25 or less

Graph of Allowable Lateral Load on the Rod End (Guide)



[Stroke] = [Product stroke] + [Distance from the rod end to the centre of gravity of the workpiece]



LEY100 Series

AC Servo Motor Size 100

Load–Acceleration/Deceleration Chart

Max. acceleration/deceleration (Horizontal) [mm/s²]

Lead		Work load [kg]											
Symbol	[mm]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
B	10	3000	2000 ^{*1}						—				
D	3.3	2370	2250	2120	2000	1870	1750	1620	1500	1370	1250	1120	1000
L	2	1900	1800	1700	1600	1500	1420	1350	1280	1210	1140	1070	1000

*1 The max. work load can be set to any weight up to 240 kilograms.

Max. acceleration/deceleration (Vertical) [mm/s²]

Lead		Work load [kg]									
Symbol	[mm]	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
B	10	2500	2000	1500	1000				—		
D	3.3	2370	2200	2020	1850	1680	1510	1340	1170	1000 ^{*2}	—
L	2	1880	1770	1660	1550	1450	1360	1270	1180	1090	1000

*2 The max. work load can be set to any weight up to 185 kilograms.

Force–Stroke Table

	Stroke [mm]										
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Force [N]	12000	12000	12000	12000	12000	12000	11000	8900	6900	5600	4600

AC Servo Motor **LECS** Series

Electric Actuator/ Rod Type

LEY100 Series

Size **100**



CE RoHS

How to Order

Driver LECS Series **LEY 100 D T9 B - 200 - S 2 B2**

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

1 Size

100

2 Motor mounting position

D In-line

3 Motor type

Symbol	Type	Output [W]	Actuator size	Compatible drivers
T9	AC servo motor (Absolute encoder)	750	100	LECSB2-T9 LECS2-T9 LECSS2-T9 LECSN2-T9(-□)

4 Lead [mm]

Symbol	LEY100
B	10
D	3.33 ^{*1}
L	2 ^{*2}

*1 Screw lead 10 mm, reducer ratio [1:3]
*2 Screw lead 10 mm, reducer ratio [1:5]

5 Stroke [mm]

Symbol	Stroke [mm]
100	100
to	to
1000	1000

* For details, refer to the applicable stroke table below.

6 Motor option

Symbol	Option
—	Without option
B	With lock

7 Rod end thread

Symbol	Thread
—	Rod end female thread
M	Rod end male thread (1 rod end nut is included.)

8 Mounting^{*3} ^{*4}

Symbol	Type
—	Ends tapped
L	Foot
F	Flange

*3 The mounting bracket is shipped together with the product but does not come assembled.
*4 Do not mount using the "flange" or "ends tapped" options for the horizontal type with one end secured.

9 Cable type^{*5} ^{*6}

Symbol	Cable type
—	Without cable
S	Standard cable
R	Robotic cable (Flexible)

*5 A motor cable and encoder cable are included with the product. (A lock cable is also included if motor option "B: With lock" is selected.)
*6 Standard cable entry direction is "(B) Counter axis side."

10 Cable length [m]^{*7}

Symbol	Cable length [m]
—	Without cable
2	2
5	5
A	10

*7 The length of the encoder, motor, and lock cables are the same.

11 Driver type^{*8}

Symbol	Compatible drivers	Power supply voltage [V]
—	Without driver	
B2	LECSB2-T9/Pulse input (Absolute encoder)	200 to 240
C2	LECS2-T9/CC-Link (Absolute encoder)	200 to 230
S2	LECSS2-T9/SSCNET/H (Absolute encoder)	200 to 240
92	LECSN2-T9-9/EtherNet/IP (Absolute encoder)	200 to 240
E2	LECSN2-T9-E/EtherCAT (Absolute encoder)	200 to 240
P2	LECSN2-T9-P/PROFINET (Absolute encoder)	200 to 240
N2	LECSN2-T9/Without network card (Absolute encoder)	200 to 240

*8 When a driver type is selected, a cable is included. Select the cable type and cable length.
Example)
S2S2: Standard cable (2 m) + Driver (LECSS2)
S2: Standard cable (2 m)
—: Without cable and driver

12 I/O cable length [m]^{*9}

Symbol	I/O cable length [m]
—	Without cable
H	Without cable (Connector only)
1	1.5

*9 When "—: Without driver" is selected for the driver type, only "—: Without cable" can be selected. Refer to the **Catalogue on www.smc.eu** if an I/O cable is required.

Applicable Stroke Table

Size	Stroke [mm]										Manufacturable stroke range
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
100	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	100 to 1000

* Please contact SMC for non-standard strokes as they are produced as special orders.



LEY100 Series

AC Servo Motor Size 100

Specifications

Model			LEY100D□L	LEY100D□D	LEY100D□B	
Actuator specifications	Stroke [mm]		100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000			
	Work load [kg]	Horizontal ^{*1}	1200	1200	240	
		Vertical	200	185	80	
	Rated force [N]/Set value ^{*2} : 25 % ^{*3}		5500	3300	1100	
	Max. force [N]/Set value ^{*2} : 55 % ^{*3} ^{*4}		12000	7200	2600	
	Max. speed [mm/s] ^{*5}	Stroke range	Up to 500	100	167	500
			600	74	123	370
			700	57	95	285
			800	45	75	225
			900	36	60	180
			1000	30	50	150
	Pushing speed [mm/s] ^{*6}		20 or less			
	Max. acceleration/deceleration [mm/s ²] ^{*7}		2000	3000		
	Positioning repeatability [mm]		0.02			
	Lost motion [mm] ^{*8}		0.10			
	Screw lead [mm]		10			
	Reduction ratio		1/5	1/3	—	
	Lead [mm]		2	3.3	10	
Impact/Vibration resistance [m/s ²] ^{*9}		50/20				
Actuation type		Ball screw				
Guide type		Sliding bushing (Piston rod)				
Operating temperature range [°C]		5 to 40				
Operating humidity range [%RH]		90 or less (No condensation)				
Motor output [W]/Size [mm]		750/□80				
Motor type		AC servo motor (200 VAC)				
Electric specifications	Encoder		Absolute 22-bit encoder (Resolution: 4194304 p/rev) Absolute 18-bit encoder (Resolution: 262144 p/rev) (For LECSC-T□ only)			
	Power ^{*10}		Max. power 1100			
Lock unit specifications	Type ^{*11}		Non-magnetizing lock			
	Holding force [N]		5700	3400	1200	
	Power consumption [W] at 20°C ^{*12}		10			
	Rated voltage [V]		24 VDC ⁰ / _{-10%}			

*1 This is the max. value of the horizontal work load. An external guide is necessary to support the load. The actual work load changes according to the condition of the external guide. Confirm the load using the actual device.

*2 Set values for the driver

*3 The force setting range (set values for the driver) for the force control with the torque control mode. The force and duty ratio change according to the set value. Set it while referencing the "Force Conversion Graph" and "Speed-Work Load Graph" on page 4.
The driver applicable to the pushing operation is "LECSB-T", and "LECSS-T."

· The LECSB-T is only applicable when the control method is positioning. The point table is used to set the pushing operation settings.

To set the pushing operation settings, an additional dedicated file (pushing operation extension file) must be downloaded separately to be used with the setup software (MR Configurator2™: LEC-MRC2□).

Please download this dedicated file from the SMC website: <https://www.smc.eu/>

· When selecting the LECSB-T, combine it with a master station (such as the Simple Motion module manufactured by Mitsubishi Electric Corporation) which has a pushing operation function.

*4 The max. force changes according to the stroke. Check the "Force-Stroke Table" on page 5.

*5 The allowable speed changes according to the stroke. Set the number of rotations according to speed.

*6 The allowable collision speed for collision with the workpiece with the torque control mode

*7 The max. acceleration/deceleration changes according to the work load. Check the "Load-Acceleration/Deceleration Chart" on page 5.

*8 A reference value for correcting errors in reciprocal operation

*9 Impact resistance: No malfunction occurred when the actuator was tested with a drop tester in both an axial direction and a perpendicular direction to the lead screw. (The test was performed with the actuator in the initial state.)
Vibration resistance: No malfunction occurred in a test ranging between 4 5 to 2 0 0 0 Hz. The test was performed in both an axial direction and a perpendicular direction to the lead screw. (The test was performed with the actuator in the initial state.)

*10 Indicates the max. power during operation (including the driver) When selecting the power supply capacity, refer to the power supply capacity in the operation manual of each driver.

*11 Only when motor option "With lock" is selected

*12 For an actuator with lock, add the power consumption for the lock.

Electric Actuator/Rod Type

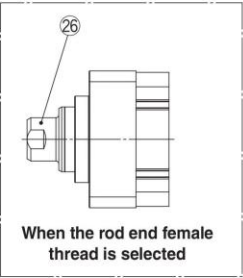
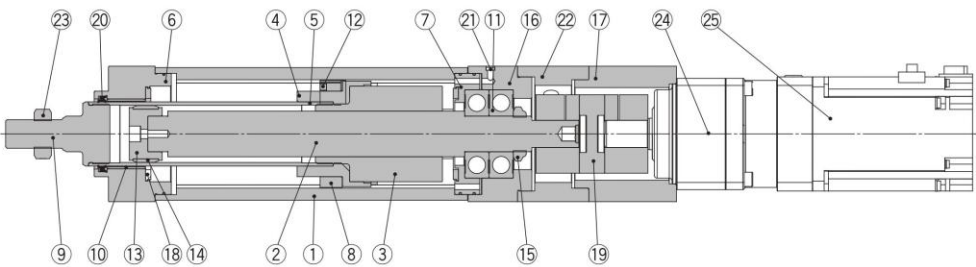
LEY100 Series

AC Servo Motor

Size 100

Construction

In-line motor type: LEY100



Component Parts

No.	Description	Material	Note
1	Body	Aluminium alloy	Anodised
2	Screw shaft	Alloy steel	
3	Ball screw nut	Alloy steel	
4	Piston	Aluminium alloy	
5	Piston rod	Alloy steel	Hard chrome plating
6	Rod cover	Aluminium alloy	Anodised
7	Bearing holder	Aluminium alloy	
8	Rotation stopper	Synthetic resin	
9	Socket (Male thread)	Alloy steel	Nickel plating
10	Bushing	Bearing alloy	
11	Bearing	—	
12	Magnet	—	
13	Wear ring holder	Aluminium alloy	

No.	Description	Material	Note
14	Wear ring	Synthetic resin	
15	Lock nut	Alloy steel	
16	Motor block	Aluminium alloy	Anodised
17	Motor flange	Aluminium alloy	Anodised
18	Bumper	Urethane	
19	Coupling	—	
20	Scraper	NBR	
21	Sintered element	Stainless steel	
22	Motor adapter	Aluminium alloy	Anodised
23	Nut	Alloy steel	Zinc chromating
24	Reducer	—	
25	Motor	—	
26	Socket (Female thread)	Alloy steel	Nickel plating

Replacement Parts/Grease Pack

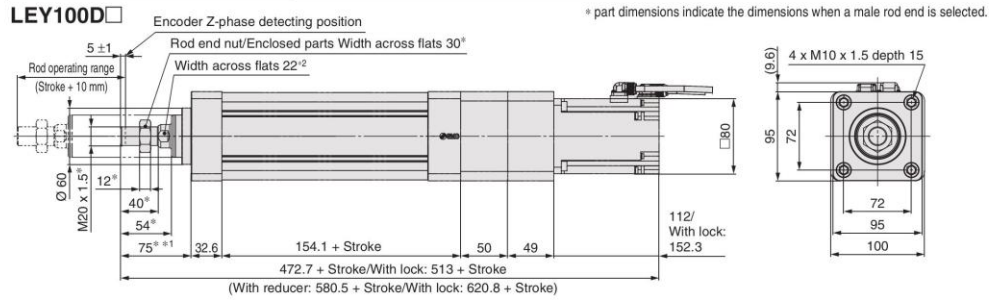
Applied portion	Order no.
Piston rod	GR-S-010 (10 g)
	GR-S-020 (20 g)



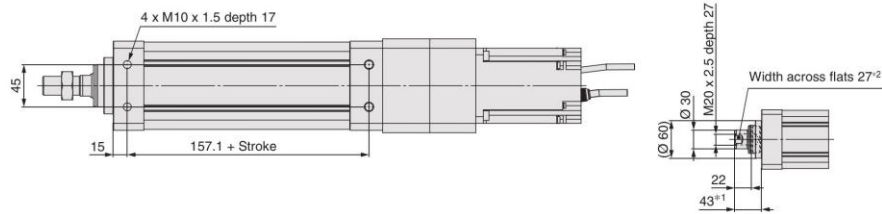
LEY100 Series

AC Servo Motor Size 100

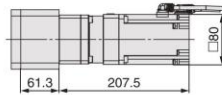
Dimensions: In-line Motor



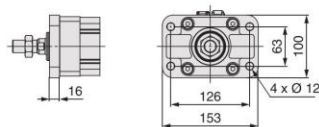
Rod end female thread: LLEY100DT9-□□□□



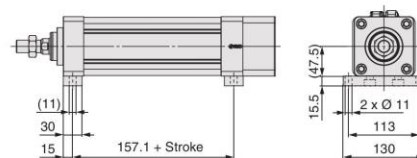
With reducer: LLEY100DT9(D/L)-□□□□



Rod flange shape: LLEY100DT9-□□□□F



Foot: LLEY100DT9-□□□□L



*1 The dimension in the figure is the first Z-phase detecting position.

*2 The orientation of the width across flats at the end of the rod differs for each product.

Stroke and Product Weight

Stroke	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Product weight	12.7	14.4	16.0	17.7	19.3	21.0	22.6	24.2	25.9	27.5

Additional Weight

With reducer		[kg]
Motor option	With lock	2.4
Rod end thread	Male thread	1.0
	Nut	0.11
	Foot	0.05
Mounting	Foot	1.1
	Flange	0.8

Motorless Type

Electric Actuator/
Rod Type

LEY100 Series

Size 100

RoHS



How to Order

Motorless Type

LEY 100 D NN B - 200

1

2

3

4

5

6

7

1 Size

100

2 Motor mounting position

D In-line

3 Motor type

Symbol	Type
NN	Motorless*1

*1 A motor adapter and motor flange are not included.

4 Lead [mm]

Symbol	LEY100
B	10

5 Stroke [mm]

100	100
to	to
1000	1000

* For details, refer to the applicable stroke table below.

6 Rod end thread

—	Rod end female thread
M	Rod end male thread (1 rod end nut is included.)

7 Mounting*2 *3

Symbol	Type
—	Ends tapped
L	Foot
F	Flange

*2 The mounting bracket is shipped together with the product but does not come assembled.
*3 Do not mount using the "flange" or "ends tapped" options for the horizontal type with one end secured.

Applicable Stroke Table

Size	Stroke [mm]										Manufacturable stroke range
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
100	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	100 to 1000

* Please contact SMC for non-standard strokes as they are produced as special orders.

Compatible Motors

Manufacturer	Series	Type	NN
Mitsubishi Electric Corporation	MELSERVO-J4	HG-KR	●
	MELSERVO-J5	HK-KT	●
YASKAWA Electric Corporation	Σ-V	SGMJV	●
	Σ-7	SGM7J	●
SANYO DENKI CO., LTD.	SANMOTION R	R2	●
NIDEC SANKYO CORPORATION	S-FLAG	MX	●
KEYENCE CORPORATION	SV	SV-M/SV-B	●
FUJI ELECTRIC CO., LTD.	ALPHA5/ALPHA7	GYS/GYB/GYG	●
Delta Electronics, Inc.	ASDA-A2	ECMA	●



LEY100 Series

Motorless Type Size 100

Specifications

- * The values in this specifications table are the allowable values of the actuator body with the standard motor mounted.
* Do not use the actuator so that it exceeds these values.

Model		LEY100DNNB
Actuator specifications	Stroke [mm]	100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000
	Work load [kg]	Horizontal ^{*1}
		240/1200 [When equipped with reducer (reduction ratio 1/5)]
		Vertical
		80/200 [When equipped with reducer (reduction ratio 1/5)]
	Rated force [N]/Set value: Rated torque 87% ^{*2}	
	1100/5500 [When equipped with reducer (reduction ratio 1/5)]	
	Max. force [N]/Set value: Max. torque 192% ^{*2} ^{*3}	
	2600/12000 [When equipped with reducer (reduction ratio 1/5)]	
	Max. speed [mm/s] ^{*4}	Up to 500
		500
		600
		370
		700
		285
		800
		225
		900
		180
		1000
		150
	Pushing speed [mm/s] ^{*5}	20 or less
	Max. acceleration/deceleration [mm/s ²]	3000/2000 [When equipped with reducer (reduction ratio 1/5)]
	Positioning repeatability [mm]	±0.02
	Lost motion [mm] ^{*6}	0.1 or less
Ball screw specifications	Thread size [mm]	
	Ø 32	
	Lead [mm]	
	10	
Screw lead [mm]	Shaft length [mm]	
	Stroke + 202	
	10	
	Impact/Vibration resistance [m/s ²] ^{*7}	
	50/20	
Guide type	Actuation type	
	Ball screw	
	Operating temperature range [°C]	
	5 to 40	
Operating humidity range [%RH]	90 or less (No condensation)	
	Actuation unit weight [kg] (* [ST]: Stroke)	
	2.80 + (7.50 x 10 ⁻³) x [ST]	
	Other inertia [kg·cm]	
Other specifications ^{*8}	0.047	
	Friction coefficient	
	0.05	
	Mechanical efficiency	
	0.9	
Reference motor spec.	Motor shape	
	□80	
	Motor type	
	AC servo motor	
	Rated output capacity [W]	
	750	
	Rated torque [N·m]	
	2.4	
	Rated rotation [rpm]	
	3000	

*1 This is the max. value of the horizontal work load. An external guide is necessary to support the load (Friction coefficient of guide: 0.1 or less).

The actual work load changes according to the condition of the external guide. Confirm the load using the actual device.

*2 The force setting range for the force control (Speed control mode, Torque control mode)

The force changes according to the set value. The set value is the ratio [%] in relation to the rated torque of the reference motor.

*3 The max. force changes according to the stroke. Check the "Force-Stroke Table" on page 5.

*4 The allowable speed changes according to the stroke.

*5 The allowable collision speed for collision with the workpiece

*6 A reference value for correcting errors in reciprocal operation

*7 Impact resistance: No malfunction occurred when the actuator was tested with a drop tester in both an axial direction and a perpendicular direction to the lead screw. (The test was performed with the actuator in the initial state.)

Vibration resistance: No malfunction occurred in a test ranging between 4.5 to 2000 Hz. The test was performed in both an axial direction and a perpendicular direction to the lead screw. (The test was performed with the actuator in the initial state.)

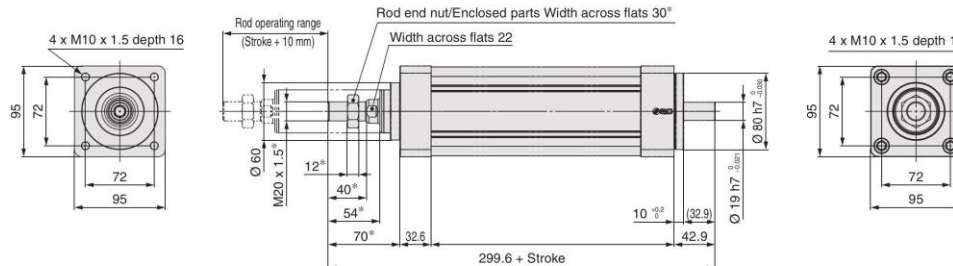
*8 Each value is only to be used as a guide to select a motor of the appropriate capacity.

Electric Actuator/Rod Type **LEY100 Series**
 Motorless Type Size **100**

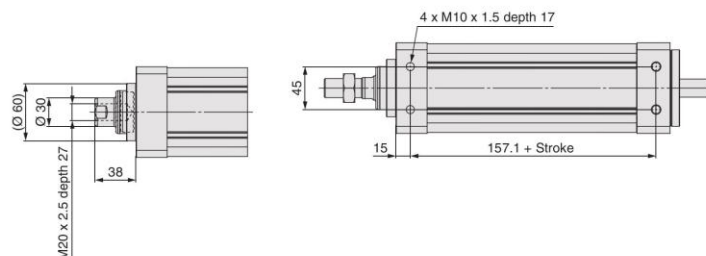
Dimensions: In-line Motor

LEY100

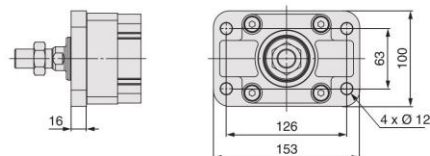
* part dimensions indicate the dimensions when a male rod end is selected.



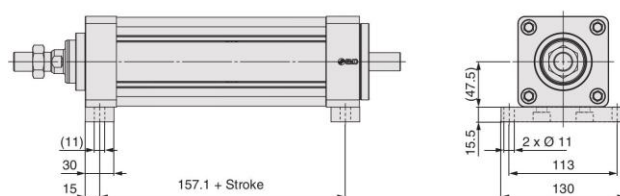
Rod end female thread: LEY100DNNB-□□□



Rod flange shape: LEY100DNNB-□□□F



Foot: LEY100DNNB-□□□L



LEY100 Series Option

Motor Flange Assembly

Motor flange LEY - MF 100 D - NZ

1

1 Motor flange type

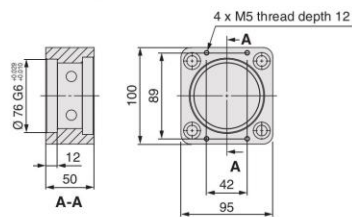
Symbol	Motor type	(Note)	A Motor adapter	B Motor flange	C Coupling (O.D. Ø 40)	C Coupling (O.D. Ø 55)	D Reducer
NZ	Mounting type Z	Mitsubishi and others	●	●	—	—	—
NZC	Mounting type Z + Coupling included	O.D. Ø 40	●	●	●	—	—
NG	Mounting type G	For reducers	●	●	—	—	—
NGC	Mounting type G + Coupling included	O.D. Ø 55	●	●	—	●	—
NGC3	Mounting type G + With reducer*1	Reduction ratio 1/3	●	●	—	●	●
NGC5	Mounting type G + With reducer*1	Reduction ratio 1/5	●	●	—	●	●
N	Without motor flange	Motor adapter only	●	—	—	—	—

*1 A coupling (O.D. Ø 55) is also included.

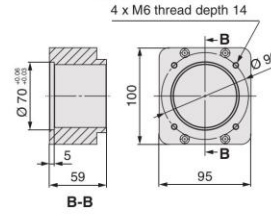
Compatible Motors

Manufacturer	Series	Type	NZC/ NGC3/ NGC5
Mitsubishi Electric Corporation	MELSERVO-J4	HG-KR	●
	MELSERVO-J5	HK-KT	●
YASKAWA Electric Corporation	Σ-V	SGMJV	●
	Σ-7	SGM7J	●
SANYO DENKI CO., LTD.	SANMOTION R	DXF	●
	SANMOTION R	R2	●
NIDEC SANKYO CORPORATION	S-FLAG	MX	●
KEYENCE CORPORATION	SV	SV-M/SV-B	●
FUJII ELECTRIC CO., LTD.	ALPHA5/ALPHA7	GY5/GYB/GYG	●
Delta Electronics, Inc.	ASDA-A2	ECMA	●

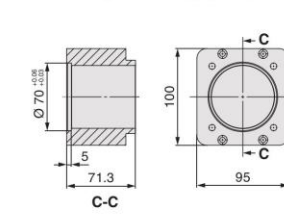
A Motor adapter



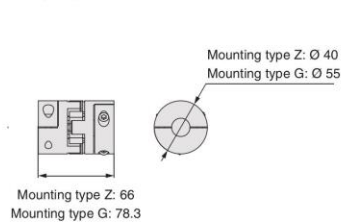
B Motor flange (Mounting type Z)



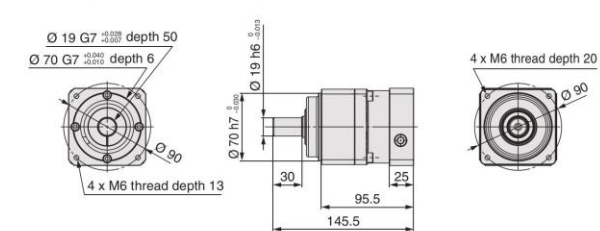
C Motor flange (Mounting type G)



D Coupling



E Reducer (Reduction ratio 1:3/1:5)



Mounting Bracket

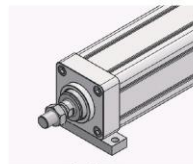
LEY - L 100

1

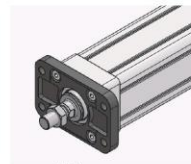
1 Mounting bracket

Symbol	Mounting bracket
L	Foot
F	Flange

13



L: Foot



F: Flange



LEY100 Series

Specific Product Precautions

Be sure to read this before handling the products.

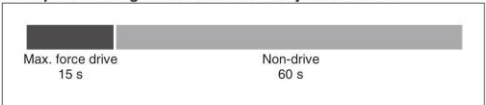
Handling

 Caution

Continuous use at max. force is prohibited.

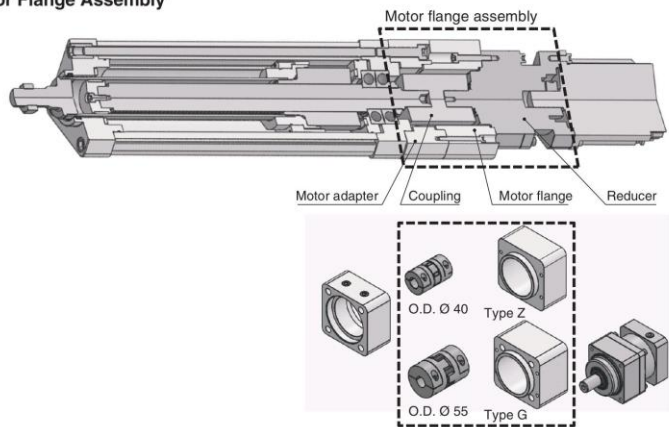
When using the product at max. force, be sure to use the product within 15 s and with a duty ratio of 20% or less. (With motor)

Example of driving conditions with a duty ratio of 20 %



For the motorless type, be sure to check the specifications of the motor and driver to be used in combination before use.
The force should be within the rated force when using continuously.

Motor Flange Assembly

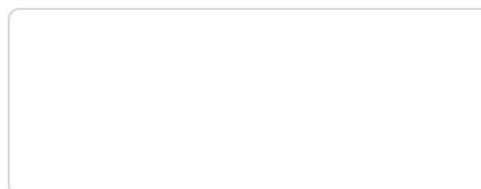


Products from other companies and self-produced products can be used instead.

Symbol	Motor adapter	Motor flange (Type)	Coupling (Ø 40)	Coupling (Ø 55)	Reducer (Reduction ratio)
NZ	●	● (Z)	—	—	—
NZC	●	● (Z)	●	—	—
NG	●	● (G)	—	—	—
NGC	●	● (G)	—	●	—
NGC3	●	● (G)	—	●	● (1/3)
NGC5	●	● (G)	—	●	● (1/5)
N	●	—	—	—	—

- 1) ISO 4414: Pneumatic fluid power – General rules relating to systems.
ISO 4413: Hydraulic fluid power – General rules relating to systems.
IEC 60204-1: Safety of machinery – Electrical equipment of machines.
(Part 1: General requirements)
ISO 10218-1: Manipulating industrial robots - Safety.
etc.

Be sure to read "Handling Precautions for SMC Products" (M-E03-3) before using.



SMC Corporation (Europe)

Austria	+43 (0)2262622800	www.smc.at	office@smc.at	Lithuania	+370 5 2308118	www.smc.lt	info@smc.lt
Belgium	+32 (0)33551464	www.smc.be	info@smc.be	Netherlands	+31 (0)205318888	www.smc.nl	info@smc.nl
Bulgaria	+359 (0)2807670	www.smc.bg	office@smc.bg	Norway	+47 67129020	www.smc-norge.no	post@smc-norge.no
Croatia	+385 (0)13707288	www.smc.hr	office@smc.hr	Poland	+48 222119600	www.smc.pl	office@smc.pl
Czech Republic	+420 541424611	www.smc.cz	office@smc.cz	Portugal	+351 214724500	www.smc.eu	apoioclientepl@smc.smces.es
Denmark	+45 70252900	www.smc.dk	smc@smcdk.com	Romania	+40 213205111	www.smcromania.ro	smcromania@smcromania.ro
Estonia	+372 6510370	www.smcpeumatics.ee	smc@info@smcee.ee	Russia	+7 (812)3036600	www.smc.eu	sales@smcru.com
Finland	+358 207513513	www.smc.fi	smc@smc.fi	Slovakia	+421 (0)413213212	www.smc.sk	office@smc.sk
France	+33 (0)164761000	www.smc-france.fr	supportclient@smc-france.fr	Slovenia	+386 (0)73885412	www.smc.si	office@smc.si
Germany	+49 (0)61034020	www.smc.de	info@smc.de	Spain	+34 945184100	www.smc.eu	post@smc.smces.es
Greece	+30 210 2717265	www.smchellas.gr	sales@smchellas.gr	Sweden	+46 (0)86031240	www.smc.nu	smc@smc.nu
Hungary	+36 23513000	www.smc.hu	office@smc.hu	Switzerland	+41 (0)523963131	www.smc.ch	info@smc.ch
Ireland	+353 (0)14039000	www.smcautomation.ie	sales@smcautomation.ie	Turkey	+90 212 489 0 440	www.smcpcnomatic.com.tr	info@smcpcnomatic.com.tr
Italy	+39 03990691	www.smcitalia.it	mailbox@smcitalia.it	UK	+44 (0)845 121 5122	www.smc.uk	sales@smc.uk
Latvia	+371 67817700	www.smc.lv	info@smc.lv				
				South Africa	+27 10 900 1233	www.smcza.co.za	zasales@smcza.co.za