



**Rúben
Chaves Pedrinho**

**Estudo de retorno elástico em ligas de alumínio
para indústria automóvel**



Rúben
Chaves Pedrinho

Estudo de retorno elástico em ligas de alumínio para indústria automóvel

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica da Doutora Gabriela Tamara Vincze, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Este trabalho teve o apoio dos projetos:

- POCI-01-0145-FEDER-032362(PTDC/EME-ESP/32362/2017) - Programa Operacional Competitividade e Internacionalização, na sua componente FEDER, e da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P./MCTES, na sua componente do Orçamento de Estado;
- UIDB/EMS/00481/2020 e UIDP/00481/2020-FCT-Fundação para a Ciência e a Tecnologia;
- CENTRO-01-0145-FEDER-022083-Programa Operacional Regional do Centro (Centro2020), no âmbito do Acordo de Parceria Portugal 2020 através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional.

o júri
presidente

Prof. Doutora Isabel Maria Alexandrino Duarte
Investigadora Auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutora Marta Cristina Cardoso de Oliveira
Professora Associada da Universidade de Coimbra

Prof. Doutora Gabriela Tamara Vincze
Professora Auxiliar em regime laboral da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Agradeço à Professora Doutora Gabriela Vincze pela disponibilidade e orientação dada ao longo do projeto, que permitiram a realização deste.

Ao Eng. António Festas pelos conselhos e trabalhos de maquinagem CNC.

À minha família pelo permanente incentivo e preocupação com que sempre me acompanharam.

Aos meus amigos que me acompanharam durante todo o percurso académico pelos bons momentos.

palavras-chave

Indústria Automóvel, Ligas de Alumínio, Anisotropia, Ensaio de Tração, Ensaio de Flexão, *Springback*, *Spring-go*

resumo

Num mundo em que as alterações climáticas são uma preocupação diária a redução da emissão dos gases de efeito estufa torna-se obrigatória. Nesse sentido a indústria automóvel evolui no sentido de aumentar a eficiência energética dos veículos e uma das soluções encontradas foi a redução da sua massa. É nesta tentativa de redução de massa que as ligas de alumínio ganham importância, sendo cada vez mais aplicadas e, por conseguinte, mais investigadas de forma a conhecer o seu comportamento. Assim, surge o propósito deste trabalho, o estudo do retorno elástico das ligas de alumínio. O presente trabalho incide sobre duas ligas de alumínio, a AA6022-T4 e a AA6061-T6, que foram caracterizadas por meio de ensaios de tração para várias orientações de laminagem. Realizada a caracterização das ligas, seguiu-se a execução dos ensaios de flexão recorrendo a ferramentas em forma de V e U. Foram estes ensaios que permitiram o estudo do *springback*, onde foi possível concluir que quanto menor for o ângulo e maior o raio do punção maior será o valor do *springback*. Outra conclusão retirada foi que a liga AA6061-T6 apresenta maiores valores de *springback* do que a AA6022-T4, sendo que esta última é mais propensa á ocorrência de *spring-go*.

keywords

Automotive Industry, Aluminum Alloys, Anisotropy, Tensile Test, Bending Test, Springback, Spring-go

abstract

In a world where climate changes are a daily concern, reducing the emission of greenhouse gases becomes mandatory. In this regard, the automotive industry is evolving towards increasing energy efficiency of vehicles and one of the solutions found was the reduction of their mass. The aluminum alloys gain importance in the attempt of reducing mass, being increasingly applied and, therefore, more investigated in order to know their behavior. In this context, the purpose of this work arises, the study of the springback of aluminum alloys. The present work focuses on two aluminum alloys, AA6022-T4 and AA6061-T6, and they were characterized by tensile tests for various rolling directions. After the characterization of the alloys, the V-bending and U-bending tests were carried out. These tests allowed the study of springback, where it was possible to conclude that a small angle and a large punch radius, result in a large springback value. Another conclusion drawn was that the AA6061-T6 alloy has higher springback values than the AA6022-T4, being the latter more prone to spring-go occurrence.

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos do Projeto	1
1.3	Estrutura do Documento	2
2	Revisão Bibliográfica.....	3
2.1	Alumínio	3
2.2	Ligas de Alumínio	5
2.2.1	Ligas de Trabalho Mecânico	6
2.3	Ligas de Alumínio na Indústria Automóvel	8
2.4	Ensaio de Tração Uniaxial	11
2.5	Ensaio de Flexão em Três Pontos	13
2.5.1	Flexão em V	13
2.5.2	Flexão em U	15
2.5.3	Tensões no Provette	16
2.5.4	<i>Springback</i> (Retorno Elástico).....	16
2.5.5	<i>Spring-go</i>	19
2.5.6	Fatores de influência no <i>springback</i> e no <i>spring-go</i>	20
2.5.7	Anisotropia	21
3	Ensaio Experimentais	25
3.1	Ensaio de Tração	25
3.1.1	Dimensionamento do provete.....	25
3.1.2	Procedimento Experimental	27
3.2	Ensaio de Flexão	32
3.2.1	Dimensionamento das Ferramentas.....	32
3.2.2	Dimensionamento dos Provetes.....	37
3.2.3	Montagem das Ferramentas.....	38
3.2.4	Procedimento Experimental	39
4	Análise e Discussão dos Resultados.....	47
4.1	Caraterização do Material	47
4.1.1	AA6022-T4.....	47
4.1.2	AA6061-T6.....	49
4.2	Estudo do <i>Springback</i> / <i>Spring-go</i>	51
4.2.1	Deformação na Zona de Curvatura em V	62
5	Conclusão.....	65

5.1	Considerações Finais	65
5.2	Limitações.....	66
5.3	Trabalho Futuro	66
	Bibliografia.....	67
	Anexos A – Certificado de Conformidade	71
	Anexos B – GOM ARAMIS 3D 5M.....	72
	Anexo B.1- Tabela da Lente 50mm.....	72
	Anexo B.2 – Calibrador MV90X72.....	73
	Anexos C – Desenhos técnicos das ferramentas	74
	Anexo C.1 – Matriz em V de 60°.....	74
	Anexo C.2 – Matriz em V de 90°.....	75
	Anexo C.3 – Punção em V de 60° e raio de 5mm.....	76
	Anexo C.4 – Punção em V de 60° e raio de 10mm.....	77
	Anexo C.5 – Punção em V de 90° e raio de 5mm.....	78
	Anexo C.6 – Punção em V de 90° e raio de 10mm.....	79
	Anexo C.7– Matriz em U.....	80
	Anexo C.8 – Punção em U.....	81
	Anexos D - Tabelas das espessuras dos provetes para os ensaios de tração	82
	Anexos D.1 – AA6061-T6.....	82
	Anexos D.2 – AA6022-T4.....	83
	Anexos E – Gráficos de Tensão-Deformação Nominal	84
	Anexo E.1 - AA6022-T4	84
	Anexo E.2 - AA6061-T6	85
	Anexos F– Gráficos de Tensão-Deformação Real	86
	Anexo F.1 - AA6022-T4.....	86
	Anexo F.2 - AA6061-T6.....	87
	Anexos G – Valores de <i>Springback / Spring-go</i>	88
	Anexo G.1 – Comparação dos Conjuntos de Ferramentas	88
	Anexo G.2 – Repetibilidade – P60R10.....	90
	Anexo G.3 - P60R5.....	92
	Anexo G.4 – P90R10	93
	Anexo G.5 – U.....	94

Índice de Figuras

Figura 2.1. Ciclo de vida do alumínio (Adaptado de [5]).....	4
Figura 2.2. Carroçaria em alumínio (Adaptado [3]).....	9
Figura 2.3. Formato do provete para ensaio de tração uniaxial (Adaptado de [15])......	11
Figura 2.4. Flexão em Três Pontos em matriz de forma V (Adaptado de [16]).....	14
Figura 2.5. Ângulos de dobragem e raios de curvatura (Adaptado de [22]).	14
Figura 2.6. Diferentes fases da flexão com e sem encostador (Adaptado de [21]).	15
Figura 2.7. Tensões na zona de curvatura (Adaptado de [23]).....	16
Figura 2.8. a) Antes à flexão; b) Flexão Máxima; c) <i>Springback</i> após a remoção do punção (Adaptado de [27]).....	17
Figura 2.9. Relação entre o ângulo de flexão imposto pelo punção e o ângulo de flexão após o springback em V (Adaptado de [29]).....	18
Figura 2.10. Relação entre o ângulo de flexão imposto pelo punção e o ângulo de flexão após o springback em V (Adaptado de [30]).....	18
Figura 2.11. Comparação entre o springback e o spring-go (Adaptado de [24]).	19
Figura 2.12. Ângulos envolvidos no ensaio de flexão em V (Adaptado de [32]).	19
Figura 2.13. Provete retirado da chapa segundo a direção de laminagem, para a realização de um ensaio de tração uniaxial (Adaptado de [14]).	22
Figura 3.1. Orientações em relação ao sentido de laminagem	26
Figura 3.2. a) Guilhotina Guifil; b) MIKRON VCE 500	26
Figura 3.3. Dimensões do provete para ensaios de tração.....	26
Figura 3.4. Os equipamento utilizados nos ensaios de tração	27
Figura 3.5. a) Provete para tração com zona assinalada a vermelho para pintura. b) Padrão de referência.	28
Figura 3.6. Shimadzu AG-X plus 100kN com as maxilas de amarração.	29
Figura 3.7. a) Dispositivos da GOM ARAMIS 3D 5M; b) Posição das câmaras	30
Figura 3.8. Área de análise (Verde) e Start Point (Ponto vermelho).....	31
Figura 3.9. a) Imagem virtual com "buracos"; b) Após a interpolação	31

Figura 3.10. Valores retirados do ARAMIS para a caracterização do material.....	32
Figura 3.11. Ranhura que possibilita a utilização dos dois punções de 90° na mesma matriz.	33
Figura 3.12. a) Sistema de fixação dos punções; b) Sistema de fixação das matrizes	34
Figura 3.13. Adaptação feita aos punções para possibilitar a fixação do punção à Shimadzu.....	34
Figura 3.14. a) Adaptações efetuadas em todas as matrizes; b) Parafuso CHC M8 e porca para ranhuras em T M8.....	35
Figura 3.15. Punção montado no suporte.	36
Figura 3.16. Montagem da matriz. a) Colocação dos parafusos e porcas; b) Colocação lateral da matriz no suporte; c) Aperto da matriz no lugar desejado.....	36
Figura 3.17. a) Desenhos 3D dos punções e matrizes; b) Punções e matrizes produzidas.	37
Figura 3.18. Dimensões dos provetes para o ensaio de flexão.....	37
Figura 3.19. Aspetto inicial de cada ensaio de flexão	39
Figura 3.20. Disposição dos equipamentos após as suas configurações.	42
Figura 3.21. Área de análise (Verde) e Start Point (Ponto vermelho).....	43
Figura 3.22. Processamento das imagens captadas	43
Figura 3.23. a) Máxima flexão do provete; b) Flexão após a retirada do provete.....	44
Figura 3.24. Medição dos ângulos na flexão em V. a) Ângulo de flexão máxima; b) Ângulo final de flexão.....	44
Figura 3.25. Medição dos ângulos na flexão em U. a) Ângulo de flexão máxima; b) Ângulo final de flexão.....	45
Figura 4.1. Gráfico de tensão-deformação nominal AA6022-T4.....	48
Figura 4.2. Gráfico de tensão-deformação real AA6022-T4.....	48
Figura 4.3. Gráfico de tensão-deformação nominal AA6061-T6.....	49
Figura 4.4. Gráfico de tensão-deformação real AA6022-T4.....	50
Figura 4.5. Sequência do ensaio de flexão com o punção P60R10.....	52
Figura 4.6. Sequência do ensaio de flexão com o punção U.....	53

Figura 4.7. Comparação do springback / spring-go na utilização de cada ferramenta nos provetes da liga AA6022-T4 cortados a 0° e 90°.....	53
Figura 4.8. Comparação do springback / spring-go na utilização de cada ferramenta nos provete da liga AA6061-T6 cortados a 0° e 90°.....	54
Figura 4.9. Repetibilidade dos ensaios para a mesma orientação do mesmo material.....	55
Figura 4.10. Repetibilidade. Comparação dos ensaios com as mesmas características.....	55
Figura 4.11. Provetes do punção P60R10 em todas as orientações da liga AA6022-T4. ...	56
Figura 4.12. Provetes do punção P60R10 nas orientações 0°, 45° e 90 ° da liga AA6061-T6.	56
Figura 4.13. Provetes do punção P60R5 em todas as orientações da liga AA6022-T4.	57
Figura 4.14. Provetes do punção P60R5 nas orientações 0°, 45° e 90 ° da liga AA6061-T6.	57
Figura 4.15. Provetes do punção P90R10 em todas as orientações da liga AA6022-T4. ...	57
Figura 4.16. Provetes do punção P90R10 nas orientações 0°, 45° e 90 ° da liga AA6061-T6.	58
Figura 4.17. Provetes do punção P90R5 nas orientações 0° e 90 ° das duas ligas.	58
Figura 4.18. Comparação dos valores de springback em percentagem da liga AA6022-T4.	59
Figura 4.19. Comparação dos valores de springback em percentagem da liga AA6061-T6.	60
Figura 4.20. Provetes do punção U em todas as orientações da liga AA6022-T4.	61
Figura 4.21. Provetes do punção U nas orientações 0°, 45° e 90 ° da liga AA6061-T6.	61
Figura 4.22. Comparação dos valores de springback no punção de U em ambos os materiais.	62
Figura 4.23. Deformação na zona de curvatura. a) Punção P90R10 da liga AA6061-T6 com orientação de 90°; b) Punção P60R5 da liga AA6022-T4 com orientação de 60°.....	63

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 Propriedades do alumínio [6].....	5
Tabela 2.2. Correspondência do elemento de liga à sua serie e às series que podem ser tratadas termicamente [6], [8].....	6
Tabela 2.3. Correspondência da letra com a respetiva condição metalúrgica [6], [9].....	7
Tabela 2.4. Composição química em peso das ligas de alumínio AA6022 e AA6061 [12] [13].	10
Tabela 2.5. Valores tabelados das propriedade das ligas de alumínio AA6022-T4 e AA6061-T6 [1].....	10
Tabela 3.1. Dimensões dos punções em V e as suas designações.....	33
Tabela 3.2. Dados dos métodos elaborados no TRAPEXIUM X	41
Tabela 4.1. Propriedades da liga AA6022-T4 nas diversas orientações.	49
Tabela 4.2. Propriedades da liga AA6061-T6 nas diversas orientações.	51
Tabela 4.3. Valores médios das cargas máximas em kN.....	60

Lista de Acrónimos e Abreviaturas

AA *Aluminum Association system*

Al Alumínio

Co Cobalto

Cr Crómio

Cu Cobre

DEM Departamento de Engenharia Mecânica

EN *European Norm*

Fe Ferro

GEE Gases de Efeitos Estufa

ISO *International Standard Organization*

LEM Laboratório de Ensaios Mecânicos

Li Lítio

Mg Magnésio

Mn Manganês

Ni Níquel

NP Norma Portuguesa

Pb Chumbo

Si Silício

Sn Estanho

Ti Titânio

Zn Zinco

1 Introdução

Neste capítulo inicial é realizada uma contextualização do projeto, assim como os seus objetivos. Para além disso, é apresentada a estrutura do presente documento.

1.1 Enquadramento

Numa sociedade cada vez mais preocupada com as alterações climáticas e a subsistência das gerações futuras, a redução da emissão dos gases de efeito estufa (dióxido de carbono e metano) torna-se obrigatória. Neste seguimento surgiram acordos entre os diversos países do mundo, como o Protocolo de Quioto ou o Acordo de Paris, com o intuito de monitorizar e estabelecer metas para todos de forma a reduzir a emissão dos gases de efeito de estufa, GEE.

Sendo o setor da mobilidade um dos principais produtores dos GEE, as indústrias automóveis viram-se obrigadas a encontrar soluções de forma a diminuir a emissão dos mesmos. A principal solução é a procura do aumento da eficiência energética dos veículos, com o intuito de reduzir o consumo de combustível através da redução da sua massa. É nesta tentativa de redução de massa do automóvel que as ligas de alumínio ganham preponderância, visto que estas conseguem substituir o aço sem comprometer a utilização e segurança, e, para além disso, são mais leves do que o aço. Adicionalmente, apresentam elevada resistência mecânica, boa conformação e soldabilidade [1], [2].

Com a crescente intenção de redução de massa, o estudo sobre as ligas de alumínio intensificou-se, sendo o retorno elástico um dos casos mais investigado. Um melhor planeamento das operações de produção evita desperdícios da matéria-prima e otimiza as propriedades do componente produzido. Nesse sentido, a conformação mecânica de chapas de alumínio é umas das operações sobre a qual recai mais atenção, e à qual se dedica este projeto.

1.2 Objetivos do Projeto

O objetivo principal deste projeto é o estudo do comportamento de duas ligas de alumínio magnésio-silício, série 6XXX, aquando da conformação. Por outras palavras, o objetivo centra-se na caracterização do retorno elástico da liga AA6022-T4 e da AA6061-T6.

1.3 Estrutura do Documento

O presente documento encontra-se estruturado em cinco capítulos.

O primeiro capítulo, corresponde ao atual capítulo, sendo este dedicado à introdução do tema do projeto tratado, onde é elaborada um enquadramento do trabalho, assim como dos seus objetivos.

O segundo capítulo destina-se à exposição dos conceitos teóricos, conceitos esses que são o ponto de partida para a realização dos ensaios experimentais.

No terceiro capítulo é exposto todo o procedimento experimental para a realização dos ensaios de tração e flexão, incluindo também toda a configuração de *hardware* e *software* dos dispositivos necessários para a realização dos ensaio.

O quarto capítulo está destinado à exposição, comparação e análise dos resultados obtidos nos ensaios de tração e flexão.

Por fim, no quinto capítulo são apresentadas as considerações finais do projeto, além disso é apontada uma perspectiva para trabalhos futuros, assim como as limitações encontradas ao longo da realização do projeto.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é feita uma abordagem aos vários conceitos teóricos que se perspectivaram ser abordados no decorrer do estudo. Inicia-se com uma abordagem à história, ao processo de obtenção e ainda às características do alumínio. Segue-se uma exposição conceptual das ligas de alumínio e das suas propriedades, as quais podem ser alteradas por meio de tratamentos térmicos, que são também abordados. Apresentadas as ligas de alumínio, é feito o seu enquadramento na indústria automóvel, bem como do seu crescimento de utilização nesta.

De seguida, é retratado o ensaio de tração uniaxial com o intuito de demonstrar como é efetuada a caracterização das ligas de alumínio em estudo. Terminado este, é tratado, o tópico que dá sentido ao estudo, o ensaio de flexão em três pontos. Aqui são abordados os tipos de ensaios de flexão mais utilizados. Posto isto, segue-se o estudo do fenómeno de *springback* e de *spring-go*, da forma como estes ocorrem e o porquê da sua ocorrência. E por fim, é dada ênfase aos vários aspetos que influenciam os valores de *springback* e de *spring-go*, desde os aspetos tecnológicos aos geométricos, e ainda, passando pelas características do material. Destes últimos, é destacada a anisotropia, e a sua influência nos valores de *springback* e *spring-go*.

2.1 Alumínio

O alumínio (Al) é o elemento metálico mais abundante na crosta terrestre, representando de 8,5% da sua massa. No entanto, o alumínio é um metal, relativamente, recente na indústria, tendo sido descoberto apenas em 1825. Isto deve-se ao facto do alumínio se encontrar raramente no seu estado puro, estando disseminado na natureza combinado com outros elementos. A bauxite é o mineral mais comum na obtenção do alumínio puro [3].

A produção de alumínio requer elevadas quantidades de energia, visto que esta consiste em dois processos, o Processo *Bayer* e o Processo *Hall-Héroult*. O Processo *Bayer* corresponde à primeira fase de produção de alumínio puro, em que se extrai a alumina da bauxite através de três estágios: extração, precipitação e calcinação. A seguir a alumina sofre uma redução eletrolítica, de forma a obter o alumínio puro, Processo *Hall-Héroult*. O alumínio obtido desta forma é também denominado alumínio primário.

Uma característica que torna o alumínio muito apetecível para a indústria é o facto de ser 100% reciclável e poder ser reciclado infinitas vezes. O alumínio obtido da reciclagem é denominado alumínio secundário e necessita apenas de 5% da energia necessária na obtenção do alumínio primário [4]. Na Figura 2.1 está esquematizado o ciclo de vida do alumínio.

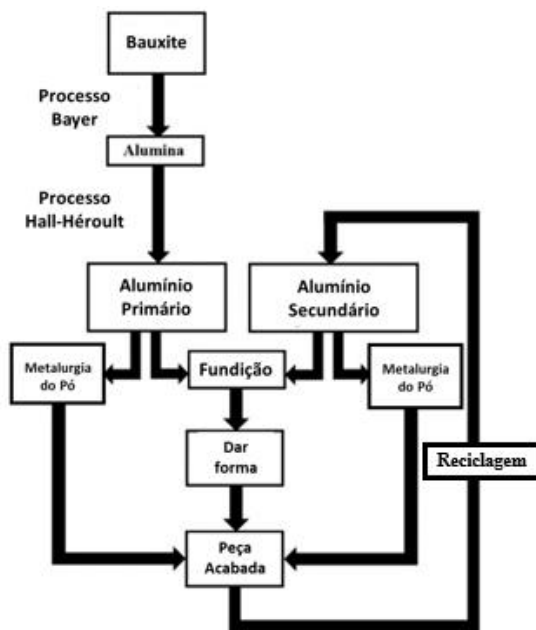


Figura 2.1. Ciclo de vida do alumínio (Adaptado de [5]).

O consumo do alumínio cresce rapidamente devido à combinação das suas propriedades, tornando-o num dos mais versáteis materiais de engenharia e construção. O alumínio é leve, tem um peso específico de $2,7 \text{ g/cm}^3$, representa um terço do peso do ferro e 30% do peso do cobre. Além disso, possui uma boa condutividade elétrica e térmica, não é tóxico e é altamente resistente à corrosão. Pode ainda receber vários tipos de acabamento superficial. Na Tabela 2.1 estão exposta algumas propriedades do alumínio puro.

Tabela 2.1 Propriedades do alumínio [6]

Densidade (g/cm ³)	2,7
Módulo Elástico (GPa)	69
Ponto de Fusão (°C)	657
Calor Específico (J/kg.K)	930
Constante de <i>Poison</i>	0,33
Condutividade Térmica (W/m.K)	150-180
Tensão de Cedência (MPa)	215-505
Tensão de Rotura (MPa)	230-570

Aliando estas propriedades à flexibilidade e à versatilidade, o alumínio tornou-se no metal não ferroso mais consumido no mundo. A sua utilização estende-se a todo o tipo de indústrias, desde a indústria automóvel à construção, passando também por elementos decorativos.

No entanto, o alumínio no estado puro apresenta uma baixa resistência mecânica. Daí a necessidade da formação ligas de alumínio com propriedades adequadas à conveniência da sua empregabilidade [7].

2.2 Ligas de Alumínio

A grande aptidão do alumínio para se associar com outros elementos permite a formação de ligas de alumínio com características variadas e, com isso, capacidade para concorrer com outros produtos das múltiplas áreas de utilização.

O termo “liga de alumínio” aplica-se à combinação do alumínio com um ou mais elementos (denominados elementos de liga), que afetam as propriedades deste metal. Naturalmente, uma só liga não pode combinar todas as propriedades ótimas de cada aplicação, sendo necessário averiguar quais as vantagens e limitações de cada uma delas para que se possa fazer uma melhor seleção. As ligas oferecem à indústria uma grande variedade de combinações de resistência mecânica, resistência à corrosão, condutividade elétrica e térmica, ductilidade, entre outras.

Os principais elementos de liga são Cu, Mg, Si, Zn, Fe, Mn, Ni, Ti, Cr, Co, Pb e Sn. Cada elemento de liga tem um propósito específico para a sua combinação com o alumínio:

- Aumentar a resistência mecânica - Mg, Fe;

- Aumentar resistência à corrosão – Si;
- Aumentar a fluidez da fundição – Mn, Si.
- Aumentar a maquinabilidade – Cu [6].

As ligas de alumínio podem ser divididas em duas categorias: ligas de fundição e ligas de trabalho mecânico [7].

Neste trabalho são apenas abordadas as ligas de trabalho mecânico, que se subdividem em ligas tratáveis termicamente e ligas não tratáveis termicamente.

2.2.1 Ligas de Trabalho Mecânico

2.2.1.1 Nomenclatura

A classificação das ligas de alumínio é feita de acordo com os elementos de liga em maior concentração na sua composição. Nas ligas para trabalho mecânico existem oito séries diferentes, sendo que cada série é identificada por quatro dígitos, onde o primeiro dígito diferencia os principais elementos de liga, como mostra a Tabela 2.2. O segundo algarismo indica a existência de eventuais modificações na liga, sendo que os restantes dígitos são arbitrários e identificam a liga na respectiva série [7], [8].

Tabela 2.2. Correspondência do elemento de liga à sua série e às séries que podem ser tratadas termicamente [6], [8].

Série	Elemento de liga	Tratáveis termicamente
1XXX	Alumínio Puro	
2XXX	Cu	X
3XXX	Mn	
4XXX	Si	
5XXX	Mg	
6XXX	Mg, Si	X
7XXX	Zn	X
8XXX	Sn, Li, Fe, Cu, Mg	X

2.2.1.2 Condições metalúrgicas

As condições metalúrgicas são aplicadas a uma liga, através de deformação plástica a frio ou de tratamento térmico, proporcionando-lhe uma estrutura e propriedades mecânicas características.

Apesar da resistência original do alumínio poder ser aumentada agregando elementos de liga, as propriedades mecânicas das ligas não dependem apenas da sua composição química. Tal como, noutros metais, o alumínio e as suas ligas endurecem e aumentam a sua resistência quando trabalhadas a frio. Além disso, algumas ligas do alumínio reagem ao tratamento térmico, adquirindo resistências maiores do que as que podem ser obtidas pelo trabalho a frio.

De forma a classificar as condições metalúrgicas que as ligas sofrem, são associadas letras que indicam as respetivas condições metalúrgicas, como apresenta a Tabela 2.3 [6], [7], [9].

Tabela 2.3. Correspondência da letra com a respetiva condição metalúrgica [6], [9].

Letra	Condição Metalúrgica
F	Bruto de Fabricação
W	Solubilizado
O	Recozido
H	Encruado
T	Tratada termicamente

De destacar o tratamento térmico pois é esta a condição metalúrgica em que se encontram as ligas de alumínio que servem como objeto de estudo.

Os tratamentos térmicos, T, têm como objetivo remover ou reduzir as segregações, produzir estruturas estáveis e controlar as características metalúrgicas, tais como: propriedades mecânicas, tamanho do grão, entre outros.

Esta condição metalúrgica é dividida em 10 subestados, pelo que na nomenclatura da liga a letra T é sempre seguida de um algarismo de 1 a 10 que representa a sequência de tratamento à qual a liga foi sujeita. As diferentes nomenclaturas estão descritas em seguida:

- **T1** - Arrefecimento desde uma temperatura elevada de conformação, seguido de envelhecimento natural até uma condição consideravelmente estável.
- **T2** -Arrefecimento desde a temperatura elevada de conformação, seguido de trabalho a frio e envelhecimento natural até uma condição consideravelmente estável
- **T3** – Solubilização, seguida de trabalho a frio e envelhecimento natural até uma condição consideravelmente estável.
- **T4** – Solubilização, seguida de envelhecimento natural. Estado estável.
- **T5** – Arrefecimento, desde uma temperatura elevada de conformação, seguido de envelhecimento artificial.
- **T6** – Solubilização, seguida de envelhecimento artificial.
- **T7** – Solubilização, seguida de sobre envelhecimento ou estabilização.
- **T8** – Solubilização, seguida de trabalho a frio e envelhecimento artificial.
- **T9** – Solubilização, seguida de envelhecimento artificial e trabalho a frio.
- **T10** - Arrefecimento desde uma temperatura elevada de conformação, seguido de trabalho a frio e envelhecimento artificial [6], [10].

2.3 Ligas de Alumínio na Indústria Automóvel

O setor automóvel é um dos maiores consumidores de materiais de construção do mundo. O aumento da durabilidade e da confiabilidade dos componentes que compõem o veículo é um fator de importância tanto para os produtores como para os consumidores. O desenvolvimento da indústria automóvel impõe um aumento da qualidade e segurança dos materiais utilizados, o que leva à criação e aplicação de novos conceitos. Sendo este um setor muito competitivo entre fabricantes, torna-o num setor de vanguarda no desenvolvimento de novas tecnologias.

O desempenho dos automóveis está a melhorar constantemente, pois os motores tornaram-se mais eficientes, a carroçaria mais aerodinâmica, a transmissão melhorada, etc. Ao criar um carro, um aspeto muito importante é a massa deste, quanto menor for maior benefícios, uma vez que isto permite manter as características base de um carro, usando motores menos potentes que por sua vez, consomem menos combustível e emitem menos substâncias nocivas para a atmosfera. Além disso, a inércia do carro diminui o que reduz a

energia gasta na aceleração como na travagem. É nesta linha de pensamento que o alumínio vai ganhando preponderância [2].

O automóvel é o meio de transporte mais utilizado no mundo. O material dominante na produção dos automóveis tem sido o aço, pois este é relativamente barato quando comparado com os outros materiais. No entanto, à medida que a indústria automóvel começa a prestar, cada vez, mais atenção à eficiência do combustível, à redução das emissões de CO₂ e ao design, o alumínio começa a ganhar espaço na produção dos veículos modernos [2], [11].

O aumento da utilização do alumínio na produção de veículos não está apenas relacionado com as questões ambientais, visto que este tem também a capacidade de absorver duas vezes mais a energia de impacto numa colisão e oferecer o dobro da resistência quando comparado com o aço. Não é ao acaso que os veículos com elementos de segurança em alumínio, como os para-choques, são considerados mais seguros [3].

Em média, por cada quilo de alumínio utilizado num carro, reduz-se um quilo no peso total do automóvel.

Segundo a UC RUSAL, a segunda maior empresa do mundo na produção de alumínio primário, em 2014, a indústria automóvel global (excluindo a China) consumiu 2,87 milhões de toneladas de alumínio. A participação do alumínio no peso total de um carro tem aumentado constantemente, desde 35 kg na década de 1970 para os atuais 152 kg. Os especialistas projetam que, em 2025, o conteúdo médio de alumínio em um carro chegará a 250 kg [11].

O alumínio é o parceiro ideal quando se procura aliar segurança, economia e performance à sofisticação e conforto [3]. Na Figura 2.2 está exibida uma carroçaria de um automóvel em alumínio.



Figura 2.2. Carroçaria em alumínio (Adaptado [3]).

O maior crescimento na aplicação do alumínio nos automóveis ocorreu nas estruturas e painéis da carroçaria, como para-choques, rodas, capôs e painéis das portas. As ligas de alumínio comumente utilizadas para essas aplicações são as ligas da série 5000, como AA5754 e AA5182, e as ligas da série 6000, como AA6111, AA6061 e AA6022. As ligas da série 5000 não são tratáveis termicamente, ou seja, não podem ser reforçadas por tratamento térmico, enquanto as ligas da série 6000 são tratáveis termicamente [1]. Destas destacam-se a AA6022-T4 e a AA6061-T6, uma vez que são a ligas de alumínio em objeto de estudo.

Assim sendo, a liga AA6022-T4 é uma liga da série 6XXX tratada termicamente por solubilização seguida de envelhecimento natural. A liga AA6061-T6 pertencente também à série 6XXX, no entanto esta após a solubilização, foi realizado o envelhecimento artificial.

Na Tabela 2.4 é apresentada a composição química em peso de cada uma das ligas estudadas e na Tabela 2.5 as suas propriedades mecânicas.

Tabela 2.4. Composição química em peso das ligas de alumínio AA6022 e AA6061 [12] [13].

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
AA6022	0.90	0.10	0.045	0.053	0.57	0.027	0.016	0.025	eq.
AA6061	0.4-0.8	0.70	0.15-0.4	0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	0.25	0.015	eq.

Tabela 2.5. Valores teóricos das propriedade das ligas de alumínio AA6022-T4 e AA6061-T6 [1].

Material	Tensão de Cedência (MPa)	Tensão de rotura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Alongamento (%)
AA6022-T4	150	255	70	22
AA6061-T6	275	310	69	14

2.4 Ensaio de Tração Uniaxial

Antes de qualquer processo de conformação é importante efetuar a caracterização dos materiais que irão ser trabalhados, como o controlo de qualidade dos materiais, quer quando ainda a forma de matéria-prima, quer do produto acabado. Assim sendo realizam-se ensaios de tração uniaxial de modo a avaliar o comportamento mecânico dos materiais.

O ensaio de tração uniaxial é o teste mais comum para caracterização de materiais na área da engenharia mecânica. Tanto as dimensões do provete, obedecem a determinadas proporções geométricas, Figura 2.3. Também o próprio procedimento do ensaio de tração se encontra normalizado por instituições especializadas de cada país e descritas em normas, em Portugal, NP [14].

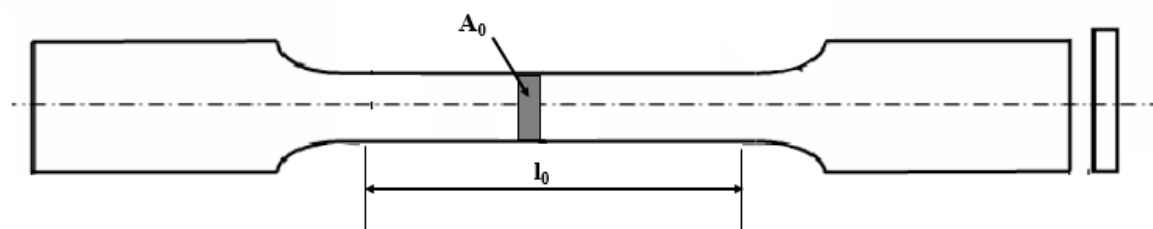


Figura 2.3. Formato do provete para ensaio de tração uniaxial (Adaptado de [15]).

O ensaio de tração consiste em submeter um provete a uma carga de tração, F , continuamente crescente até que se alcance a fratura, com o objetivo de determinar o comportamento mecânico do material. Durante o ensaio regista-se, simultaneamente, dois aspetos, a variação do comprimento de referência, através de extensómetros e a carga aplicada no provete. Por conseguinte, a força aplicada é convertida em valores de tensão nominal, permitindo construir um gráfico de tensão nominal em função da deformação nominal [14].

A tensão nominal, σ , consiste na tensão média que atua na zona de referência do provete, obtendo-se pela razão entre a carga aplicada, F , e a área inicial de secção transversal, A_0 , equação 2.1,

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

Já, a deformação nominal, ε , corresponde à extensão linear média que se obtém do quociente da variação de comprimento da zona de referência, Δl , pelo respetivo comprimento inicial, equação 2.2,

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2.2)$$

A partir do gráfico de tensão-deformação nominal são várias as propriedades mecânicas dos metais que se podem retirar a partir deste, como:

- o Módulo de Elasticidade;
- a Tensão de cedência;
- a Tensão de rotura;
- o Alongamento percentual até à fratura

Numa primeira fase do ensaio de tração, o provete deforma-se elasticamente, isto é, se a carga fosse removida o provete voltaria ao estado inicial. Nos materiais metálicos, a deformação elástica máxima não ultrapassa 0,5%. Na região elástica do gráfico de tensão-deformação nominal dos metais verifica-se uma relação linear entre a tensão nominal, σ , e a deformação nominal, ε , a qual é descrita pela lei de *Hooke* (equação 2.3):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{ou} \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.3)$$

Onde, E é o módulo de elasticidade ou módulo de *Young*.

A tensão de cedência é uma característica muito importante já que representa a tensão a partir da qual a deformação passa de elástica para plástica, a partir desta tensão a deformação torna-se irreversível.

A tensão de rotura ou resistência á tração é a tensão máxima da curva de tensão-deformação nominal [14].

2.5 Ensaio de Flexão em Três Pontos

A conformação de chapas metálicas possui uma ampla área de aplicação na indústria. Produz peças de geometria complexa para vários produtos com uma configuração económica e com capacidade para tamanhos e formas complexas. A flexão é um dos processos de conformação de chapas metálicas mais vastamente utilizados, especialmente em componentes de alumínio, como por exemplo os capôs dos automóveis [16],[17].

Erradamente o Ensaio de Flexão em Três pontos pode ser considerado como um processo de fácil compreensão sem complicações, no entanto isso não se verifica. Vários aspetos devem ser tidos em consideração de forma a evitar problemas de precisão, tais como: as propriedades do material e os parâmetros do processo. O fenómeno de *springback* é a principal causa para o elevado estudo dos ensaios de flexão em três pontos [18].

Este processo consiste na aplicação de uma carga crescente numa zona central de um provete apoiado em ambas as extremidades. Existem três tipos de ensaios de flexão em três pontos: flexão livre, flexão em matriz e flexão por rolos [19]. Apenas a flexão em matriz será objeto de estudo e esta pode ter duas configurações em V e em U. E esta consiste numa carga exercida pelo punção no provete até este ser comprimido contra a matriz e adquirir a forma desta [20].

2.5.1 Flexão em V

Neste tipo de ensaio o punção e a matriz são em forma de V. Numa fase inicial, ocorre flexão livre com o raio de curvatura do provete a variar constantemente. É apenas na última fase que o provete obtém a forma em V, aquando da ligeira compressão, como mostra o lado direito da Figura 2.4.

É um ensaio que apresenta a vantagem de não ser necessário cerra-chapas. Na conformação em V, a folga entre o punção e a matriz é constante e igual à espessura do provete. A folga, tem esta característica pois, uma vez que se houvesse ausência da folga haveria compressão no provete, esta alteraria a espessura do provete e, por conseguinte, alteraria também as propriedades do material em estudo [20].

A utilização da matriz impõe uma flexão mais precisa do que a flexão livre e as espessuras das chapas podem variar entre os 0,5 e os 25mm [21].

O ângulo e o raio de curvatura do punção podem também ser variados, de forma estudar a sua influência no ensaio de flexão [19].

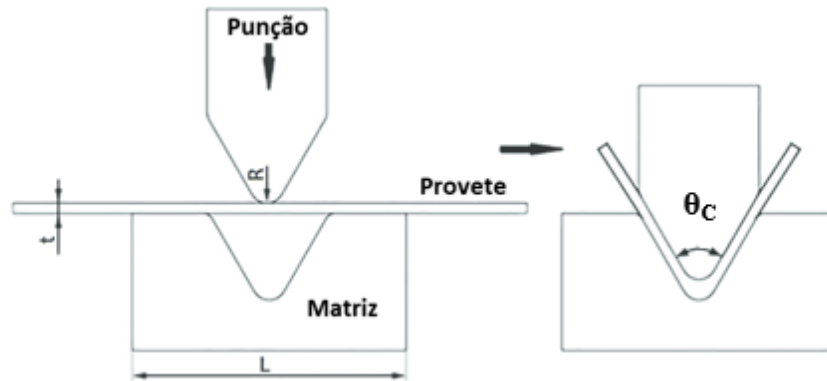


Figura 2.4. Flexão em Três Pontos em matriz de forma V (Adaptado de [16]).

Neste processo surgem dois ângulos que podem ser tidos em conta para cálculo futuros, o ângulo de flexão imposto pelo punção (indicado com θ_C na Figura 2.4) e o ângulo de dobragem, Figura 2.5. Estes estão interligados entre si, uma vez que que o ângulo de dobragem resulta dos 180° que a chapa apresenta no estado inicial do ensaio menos o ângulo de flexão imposto pelo punção.

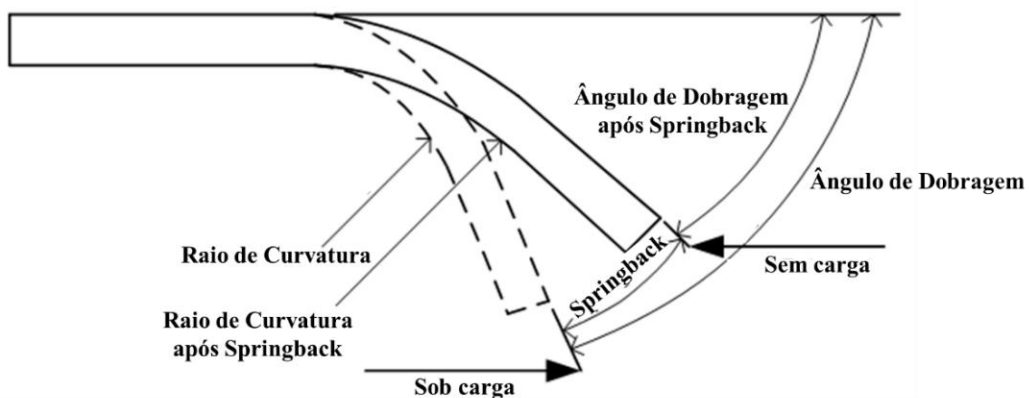


Figura 2.5. Ângulos de dobragem e raios de curvatura (Adaptado de [22]).

2.5.2 Flexão em U

Na flexão em U, efetuada numa só operação, as chapas apresentam duas abas, geralmente paralelas entre si, ligadas por uma alma. Esta operação pode ser realizada em dois modos, dobragem em U com ou sem encostador.

Na dobragem em U sem encostador, após o punção entrar em contacto com a chapa a zona da alma deforma-se, adquirindo uma geometria circular devido à distribuição contante do momento fletor nessa zona. À medida que o punção avança, as abas vão encaminhando-se em direção à parede lateral do punção, enquanto a curvatura na zona da alma se vai acentuando. Este movimento continua a dar-se sem haver alterações significativas na deformação da chapa até que a alma toque no fundo da matriz, e aí se inicie uma nova fase de deformação. Nesta última fase de deformação a curvatura da alma passa de convexa a côncava, tornando-se difícil a planificação da alma, devido ao excesso de material existente para preencher o espaço vago na folga da matriz.

A utilização do encostador prende-se com a última fase de deformação, uma vez que ao ser utilizado o encostador a alma da chapa mantém-se sempre plana, como representado na Figura 2.6 [21].

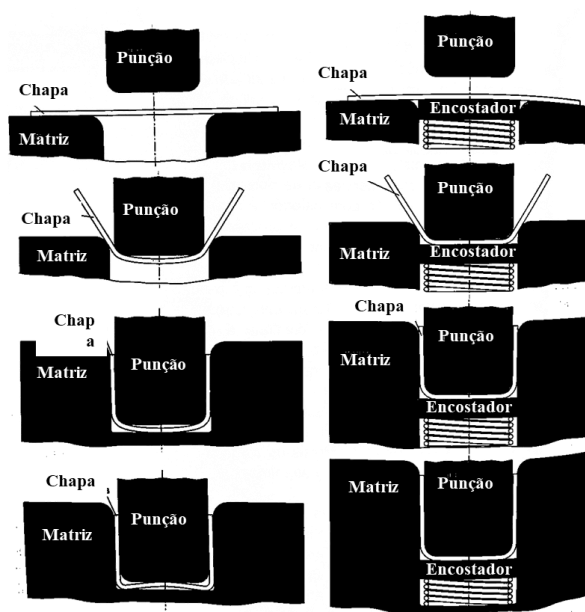


Figura 2.6. Diferentes fases da flexão com e sem encostador (Adaptado de [21]).

A folga entre a matriz deverá compreendida entre 1,00 e 1,10 da espessura chapa metálica.

2.5.3 Tensões no Provelte

Durante o ensaio de flexão, na secção transversal do provete, as tensões na zona de curvatura não são uniformes. No lado interno do provete surgem tensões de compressão, enquanto no lado externo surgem tensões de tração. Isto, leva a um alongamento do lado exterior e um encurtamento do lado interior. No entanto, existe um eixo neutro que separa estas duas zonas, que no caso da espessura do provete não ser alterada, este se encontra na zona central do provete, como mostra a Figura 2.7 [17], [23], [24].

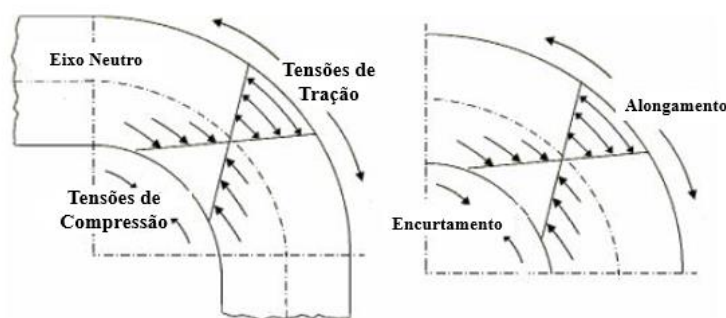


Figura 2.7. Tensões na zona de curvatura (Adaptado de [23]).

2.5.4 *Springback* (Retorno Elástico)

Springback, que em português se traduz para retorno elástico, é o responsável pelos problemas dimensionais na conformação de chapas metálicas. A precisão e a uniformidade das dimensões dos produtos é alterada, pois no processo de conformação, após a retirada das cargas externas, as chapas metálicas tendem a recuperar a sua forma original [20], [25]. Esta recuperação leva a uma diminuição do ângulo de dobragem e a um aumento do raio de curvatura [21]. Isto deve-se ao alívio do momento fletor elástico, conferido à chapa durante a conformação, aquando da remoção das cargas externas [26], Figura 2.8.

No ensaio de flexão, os limites de elasticidade têm de ser excedidos ao contrário da tensão de rotura. Deste modo, o material mantém parte da sua flexibilidade original [20].

O retorno elástico desempenha um papel importante na planificação de ferramentas e processos em diversas indústrias, como por exemplo na indústria automóvel e aeroespacial. Esta recuperação elástica causa desvios na forma final desejada de um produto, o que faz com que as dimensões pretendidas fiquem fora dos limites de tolerância,

deixando de ser adequado para a aplicação para a qual foi projetada [18], [25]. A Figura 2.8 mostra esses desvios na forma final, estágio “c”.

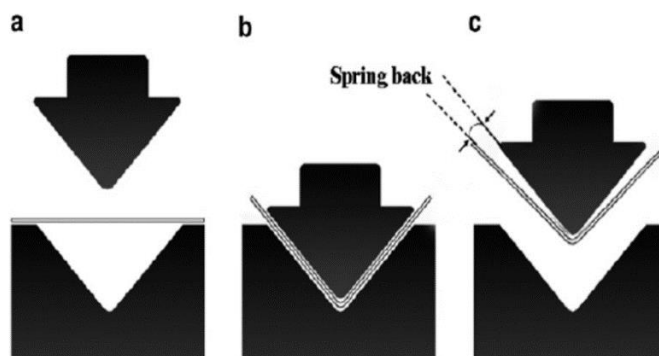


Figura 2.8. a) Antes à flexão; b) Flexão Máxima; c) *Springback* após a remoção do punção (Adaptado de [27]).

Devido ao elevado impacto do retorno elástico nas várias indústrias, a pesquisa sobre este efeito tem vindo a aumentar, com vista a estimar ou determinar o *springback* com antecedência, e conseqüentemente projetar a matriz que elimine ou contorne o efeito de *springback*. Este estudo pode ser efetuado não só através de ensaios experimentais como também por modelos matemáticos que servem para prever o retorno elástico. Sabendo o valor de *springback* do material com antecedência, haverá uma poupança do tempo gasto na tentativa-erro e do consumo de material para se obter a forma pretendida [20], [23].

De acordo com Zhang et al., [28] o *springback* é causado pela redistribuição das tensões na chapa metálica após a remoção da ferramenta. Uma previsão precisa do retorno elástico da chapa é muito importante no projeto do conjunto de ferramentas punção-matriz.

Para o cálculo do *springback*, através dos ângulos, pode-se ter em conta o ângulo imposto pelo punção ou o ângulo de dobragem. O valor do *springback* é o mesmo, podendo haver um conflito na escrita, isto se não for bem identificado o ângulo escolhido para o cálculo. Uma vez que se for considerado o ângulo imposto pelo punção o efeito de *springback* leva a um aumento do ângulo de flexão, no entanto se for considerado o ângulo de dobragem o efeito de *springback* leva à diminuição do ângulo de flexão.

No ensaio de flexão, tanto em V como em U, o ângulo final da flexão é determinado pela soma de dois ângulos: o ângulo da flexão imposto pelo punção e o

ângulo de *springback*. O primeiro corresponde ao ângulo submetido ao provete na posição mais baixa do punção, θ_c , e o segundo é o ângulo de recuperação elástica do provete após a remoção do punção, θ_s [29].

Assim sendo, o ângulo de *springback*, $\Delta\theta$, é definido pela equação 2.4 e as Figuras 2.9 e 2.10 servem de apoio visual de como se obtém esses ângulos.

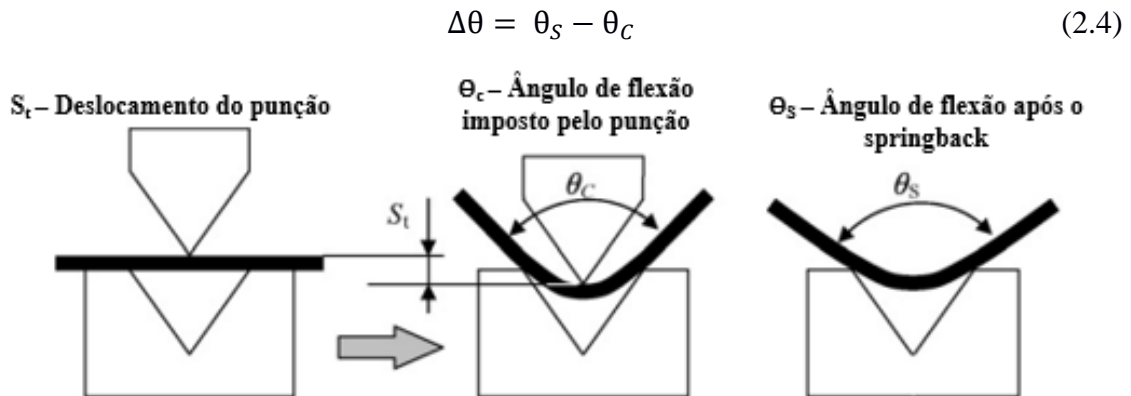


Figura 2.9. Relação entre o ângulo de flexão imposto pelo punção e o ângulo de flexão após o *springback* em V (Adaptado de [29])

O cálculo do *springback* também pode ser efetuado tendo em atenção o raio de curvatura da chapa metálica. Este segue a mesma linha de pensamento dos ângulos, no entanto a obtenção dos seus valores é mais complicada.

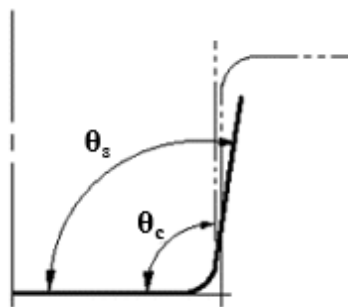


Figura 2.10. Relação entre o ângulo de flexão imposto pelo punção e o ângulo de flexão após o *springback* em V (Adaptado de [30]).

2.5.5 Spring-go

Para além do *springback* no processo de conformação, um outro fenómeno pode surgir, o *spring-go* ou também designado *springback* negativo. Este acontecimento é pouco abordado em comparação com o *springback*, consiste num fecho do ângulo de flexão imposto pelo punção na chapa metálica, ou seja, o ângulo de flexão final apresentado pela chapa metálica é inferior ao ângulo de flexão imposto pelo punção no estágio máximo de avanço. Em suma, o ângulo final da dobragem aumenta e o raio de curvatura diminui com o *springback* [31].

Para melhor compreensão é apresentada a Figura 2.11, onde é explicado a diferença entre o *springback* e o *spring-go*.

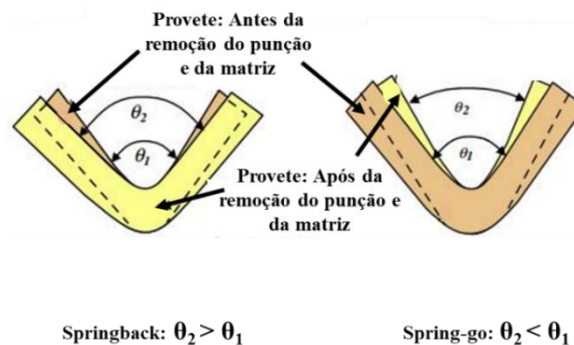


Figura 2.11. Comparação entre o *springback* e o *spring-go* (Adaptado de [24]).

O cálculo do ângulo de *spring-go* é efetuado de forma igual ao cálculo do ângulo de *springback*, no entanto como o ângulo final é menor que o ângulo de flexão imposto pelo punção esta diferença será negativa, daí o termo de *springback* negativo ser aplicado por vezes ao invés de *spring-go*. Na Figura 2.12 estão identificados todos os ângulos envolvidos no ensaio de flexão em V.

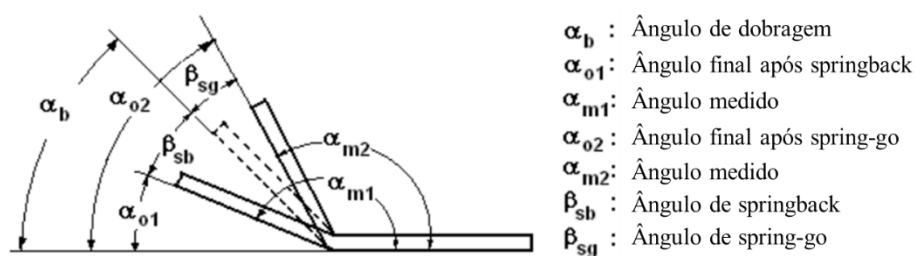


Figura 2.12. Ângulos envolvidos no ensaio de flexão em V (Adaptado de [32]).

2.5.6 Fatores de influência no *springback* e no *spring-go*

Ao longo dos anos são imensos os artigos publicados sobre o *springback*, com o objetivo comum de descobrir os parâmetros que afetam o valor de retorno elástico. Assim que foram desenvolvidos os estudos foram surgindo modelos matemáticos e equações que caracterizavam o *springback*, sendo introduzidos na literatura. Por sua vez, o *spring-go* não é tão estudado, não havendo tanta literatura.

Da pesquisa elaborada destacam-se algumas, Tekaslan et al., averiguaram o efeito do tempo de retenção do punção, da espessura da chapa metálica e os parâmetros do ângulo de flexão no *springback*, projetando uma matriz modular em V [20], [33].

Leu e Zhuang, investigaram o efeito do raio do punção, espessura da chapa e resistência do material no *springback* no ensaio de flexão em V, com o qual puderam concluir que um pequeno raio do punção diminui o ângulo de *springback* [34].

Leu e Hsieh, simularam a influência da força de esmagamento na redução do retorno elástico no processo de flexão numa matriz em V, no qual concluíram que o *springback* diminui com o aumento: do ângulo do punção, do expoente de endurecimento, da razão da espessura com o raio do punção e da razão da distância entre apoios (abertura da matriz) com a espessura [35].

Wang et al. estudaram o controle do retorno elástico no processo de flexão livre numa chapa de metal através de um ciclo de cargas e descargas, no qual conseguiram concluir que com três ciclos o ângulo de dobra é muito preciso [36].

Yu investigou a variação do módulo de elasticidade em aços durante a deformação plástica e a sua influência no *springback* em ensaios com matriz com forma em U, onde conclui que a recuperação de tensões durante o processo de descarga é uma combinação da recuperação elástica e inelástica [37].

Shukla e Gautam utilizaram chapas de aço de baixo carbono com diferentes direções de laminagem, com o intuito de investigar o efeito da anisotropia da chapa. No entanto no processo de flexão, foi determinado um ângulo de *spring-go* ao invés, de ocorrer o *springback* [38].

Bakhshi-Jooybari et al., examinaram numericamente e experimentalmente o efeito de vários aspetos na flexão em V e em U, tais como o raio do punção, anisotropia e a espessura das chapas. De acordo com os resultados obtidos, concluiu-se que conforme a espessura da chapa metálica aumenta os valores de *springback* e *spring-go* diminuem. Para

além disso, observou-se também que, com o aumento do raio do punção o *spring-go* diminui e o *springback* aumenta. Na flexão em U, em nenhum caso ocorreu *spring-go*. Além disso, notaram que a anisotropia influencia ambos os valores de *springback* e *spring-go* [39].

Özdin et al., investigaram o *springback* e o *spring-go* de chapas de metal, AISI 400 S, em ensaios de flexão com matriz em V variando o ângulo e o raio do punção. Deste estudo retiraram que com a diminuição do ângulo de dobragem o *springback* aumentava e com o aumento do raio do punção o *spring-go* sofria também um aumento. Além disso, observaram que o *springback* diminui com o aumento do raio e que quando chega aos 6mm o *springback* dá lugar ao *spring-go*. Conclui-se que com maior ângulos de dobragem e menor raio de punção é onde se pode obter *spring-go* [32].

A quantidade de *springback/spring-go* que ocorre durante o descarregamento do punção é influenciada por vários fatores que podem ser agrupados em três grupos principais:

- Tecnológicos: Velocidade do punção, lubrificação, tempo de retenção do punção, raio do punção, flexão repetida e temperatura.
- Geométricos: Raio de Curvatura, espessura e largura da chapa
- Propriedades do material: Tipo de material, módulo de elasticidade, tensão de cedência, microestrutura do material, anisotropia [18].

2.5.7 Anisotropia

Em engenharia é utilizada uma grande variedade de materiais metálicos, dos quais as propriedades mecânicas variam em função da direção da solicitação considerada. A estas variações de propriedades dá-se o nome de anisotropia, e esta deve-se à estrutura metalográfica, ao teor dos elementos de liga e à natureza dos tratamentos mecânicos e térmicos a que o material foi anteriormente sujeito. Também nos casos em que o material apresente uma organização isotrópica, isto é, as propriedades são iguais em todas as orientações, com o desenvolvimento da deformação plástica e com o aparecimento de direções preferenciais de deformação, as características mecânicas do material vão se tornando, gradualmente, anisotrópicas.

Nos produtos planos laminados há dois tipos de anisotropia: anisotropia planar e anisotropia normal. A anisotropia planar advém da variação das características mecânicas

no plano da chapa com a direção a que são medidas, ao passo que a anisotropia normal provém quando as propriedades, segundo a espessura, são distintas das que se obtêm no plano da chapa.

Como já foi referido anteriormente, o estado de anisotropia de uma chapa pode ser caracterizado por meio de ensaios de tração uniaxial efetuados sobre provetes extraídos segundo várias direções do plano da chapa. Neste sentido, para descrever o estado de anisotropia, realizam-se ensaios segundo três direções diferentes, Figura 2.13:

- direção de laminagem,
- direção perpendicular à de laminagem;
- direção a 45° com a de laminagem [14].

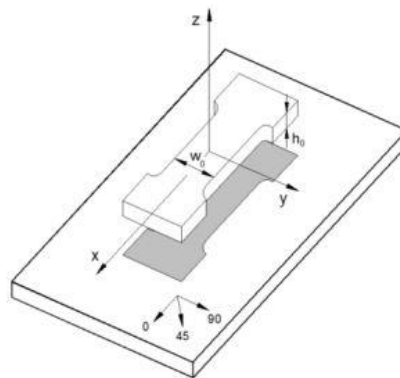


Figura 2.13. Provette retirado da chapa segundo a direção de laminagem, para a realização de um ensaio de tração uniaxial (Adaptado de [14]).

O coeficiente de anisotropia ou coeficiente de *Lankford*, r , define-se pelo quociente entre as deformações verdadeiras segundo a largura, ϵ_w , e segunda a espessura, ϵ_h , como se apresenta na equação (2.5),

$$r = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{h}{h_0}\right)} = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_h} \quad (2.5)$$

Em que, h_0 e w_0 representam a espessura e a largura iniciais, respetivamente, e h e w a espessura e a largura num determinado instante.

Assim sendo, constata-se que um material isotrópico apresenta um coeficiente de anisotropia igual a 1. Se o valor do coeficiente de anisotropia for elevado indica que o material apresenta uma elevada resistência à deformação ao longo da sua espessura.

No que concerne, ao coeficiente de anisotropia planar (Δr) este indica quantitativamente a diferença entre as propriedades na direção a 45° e as propriedades a 0° e 90° , definindo-se através da expressão 2.6.

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ} - 2r_{45^\circ}}{2} \quad (2.6)$$

Onde, r_{0° , r_{45° e r_{90° correspondem ao valor do coeficiente de anisotropia nas direções a 0° , 45° e 90° com a direção de laminagem, respetivamente.

Desta maneira, quando não existir anisotropia planar ($\Delta r = 0$), significa que no plano da chapa o coeficiente de anisotropia é igual para qualquer que seja a direção considerada. Contudo, tal condição não significa que segundo a espessura não exista anisotropia. Assim, para que se possa quantificar a anisotropia segundo a direção da espessura define-se o coeficiente de anisotropia normal médio (\bar{r}), considerando igualmente os coeficientes de anisotropia segundo as direções de 0° , 45° e 90° , através da seguinte equação 2.7:

$$\bar{r} = \frac{r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} \quad (2.7)$$

Constata-se assim que quanto maior for o coeficiente de anisotropia, \bar{r} , evidencia-se maior resistência ao adelgaçamento da chapa, enquanto os valores reduzidos de \bar{r} denunciam adelgaçamento mais facilitado e, conseqüentemente uma menor resistência mecânica [14].

3 Ensaaios Experimentais

Os ensaios experimentais desenvolvidos são compostos por duas fases principais em que ambas foram de encontro ao que foi abordado na Revisão Bibliográfica. Primeiramente, é feita a caracterização dos dois materiais para as diferentes orientações de laminagem, por meio de ensaios de tração uniaxial. Em seguida, o estudo do *springback* no qual foram realizados ensaios de flexão para os vários provetes dos mesmos dois materiais e orientações. Tanto os ensaios de tração como os de flexão foram realizados no Departamento de Engenharia Mecânica, mais propriamente no Laboratório de Ensaios Mecânico, onde este cumpre a norma NP EN ISO 9001:2015 para o sistema de gestão de qualidade, apresentada no Anexo A, que garante a conformidade da máquina universal para a realização dos ensaios de tração e flexão .

3.1 Ensaaios de Tração

A fim de caracterizar os materiais realizaram-se duas etapas preparatórias, a preparação dos provetes e a preparação dos equipamentos para a monitorização do ensaio de tração. Finalizadas estas etapas realizaram-se os ensaios de tração, seguidos do processamento das imagens obtidas pelas GOM ARAMIS 3D 5M, com o propósito de obter as deformações para posteriormente ser possível estabelecer a relação com a carga aplicada registada pela máquina de ensaios universal Shimadzu AG-X plus 100kN, e assim obter os gráficos de tensão-deformação.

3.1.1 Dimensionamento do provete

De forma a determinar as propriedades dos materiais e a anisotropia são necessários provetes. Nesse sentido foram cortadas chapas retangulares com as dimensões de 180x24x2mm das ligas AA6022-T4 e AA6061-T6 com diferentes orientações, em relação à direção do laminagem. Essas direções foram 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90°, Figura 3.1. Para esse efeito utilizou-se a guilhotina Guifil (Figura 3.2.a).

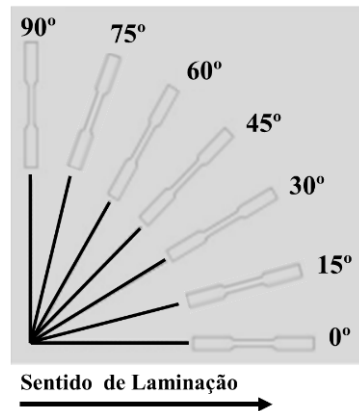


Figura 3.1. Orientações em relação ao sentido de laminação

Obtidas as chapas retangulares, estas seguiram para o centro de maquinagem CNC (Figura 3.2.b).



Figura 3.2. a) Guilhotina Guifil; b) MIKRON VCE 500

Os provetes para os ensaios de tração foram maquinados de acordo com a norma NP EN ISO 6892-1:2016, apresentando as dimensões descritas na Figura 3.3.

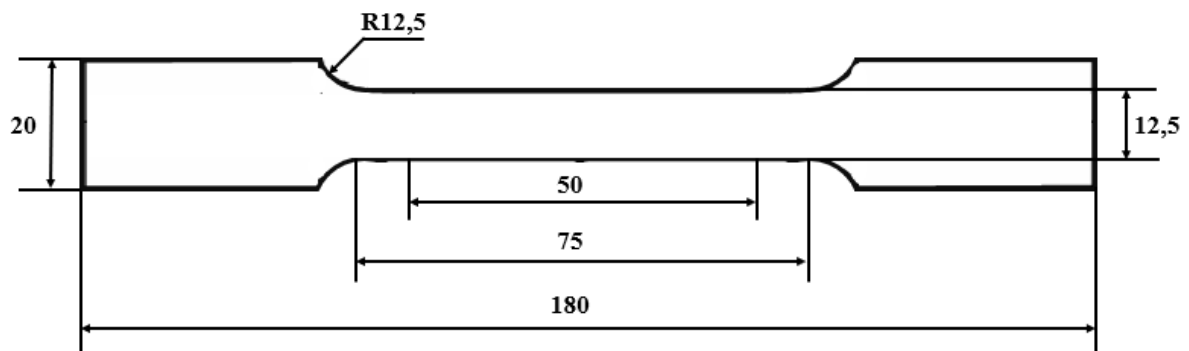


Figura 3.3. Dimensões do provete para ensaios de tração.

3.1.2 Procedimento Experimental

Nos ensaios de tração foram testados 43 provetes, ou seja, 3 testes de tração para cada orientação, sendo 7 orientações de 2 materiais. Além disso realizou-se um teste piloto de forma a conferir fiabilidade ao processo. Os ensaios de tração foram realizados a uma temperatura ambiente de 20,2°C e uma humidade de 50%.

Estes testes efetuaram-se com intuito de determinar as curvas de tensão-deformação e os coeficientes de anisotropia, r . Foram realizados numa máquina universal, Shimadzu AG-X plus 100 kN, cuja célula de carga tem capacidade até 100 kN. O ensaio é, também, apoiado por um sistema de correlação de imagem digital (DIC) e o *software* ARAMIS 5M do fabricante GOM. Este consiste num sistema de medição 3D de deformação ótica sem contacto, ou seja, a partir de imagens 3D são definidos deslocamentos e deformações da superfície local utilizando técnicas de correlação. Com base na informação obtida, é calculado o tensor de deformação. Na Figura 3.4 estão expostos os equipamentos anteriormente referidos

Para a realização dos ensaios foi necessário configurar ambos os equipamentos.

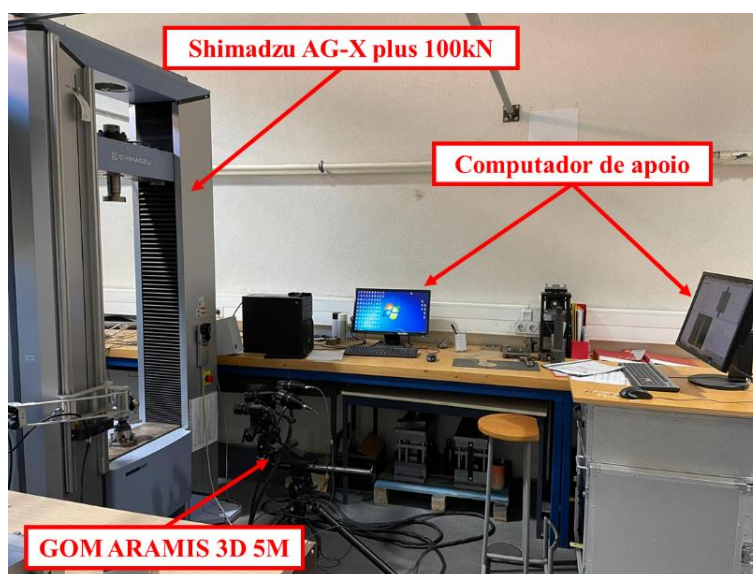


Figura 3.4. Os equipamento utilizados nos ensaios de tração

3.1.2.1 Configuração da Shimadzu AG-X plus 100kN

1º - Pintaram-se os provetes (Figura 3.5.a) de branco e depois, com tinta preta, deixaram-se alguns salpicos de forma que a pintura tivesse um padrão semelhante ao da Figura 3.5.b. O provete foi pintado para que a GOM ARAMIS 3D 5M reconhecesse e acompanhasse apenas esta superfície.



Figura 3.5. a) Provette para tração com zona assinalada a vermelho para pintura. b) Padrão de referência.

2º - Colocou-se o provete nas maxilas de amarração da máquina universal, Figura 3.6.

3º - Criou-se o método, no *software*, que controlou a Shimadzu, TRAPEZIUM X, durante o ensaio de tração.

4º - Após isto, e a configuração da GOM ARAMIS 3D 5M, realizou-se o ensaio de tração com o método criado.

5º - Repetiu-se este procedimento para todos os provetes, sempre com o mesmo método.



Figura 3.6. Shimadzu AG-X plus 100kN com as maxilas de amarração.

3.1.2.2 Configuração da GOM ARAMIS 3D 5M

A configuração da GOM ARAMIS 3D 5M foi um processo moroso e minucioso. Esta só pôde ser realizada após a preparação do provete e a sua fixação na máquina de tração pois estava dependente do provete de ensaio. Seguiu-se os seguintes passos:

1° - Definiu-se a janela de captura, dentro das possibilidades da lente de 50mm. A janela definida foi 100x85mm (consultar Anexo B.1, retângulo vermelho).

2° - Colocou-se o tripé das câmaras de forma a distância do laser ao provete fosse de 695mm, devido às dimensões da janela de captura, Figura 3.6.a. e que o laser estivesse a apontar para o centro do provete.

3° - Retiraram-se os 4 filtros do equipamento, dois das câmaras e outros dois dos projetores.

4° - Ajustou-se a posição de ambas as câmaras, na régua graduada, onde indicava 270mm (Figura 3.7.b) e estas apontaram-se para o provete. Este passo foi auxiliado pela imagem captada pelas câmaras e transmitida no monitor do computador. A partir deste ponto todas as etapas seguintes foram auxiliadas pelo *software*.

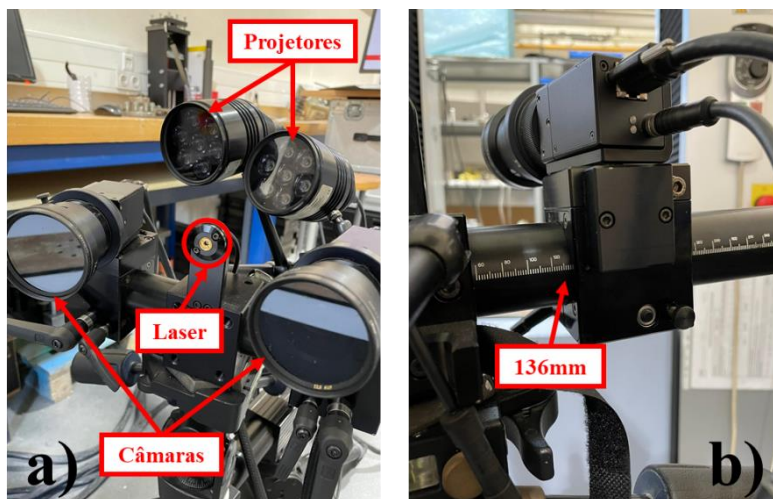


Figura 3.7. a) Dispositivos da GOM ARAMIS 3D 5M; b) Posição das câmaras

5° - Focaram-se as duas câmaras para de seguida se centrar o laser com a mira do *software*.

6° - Ajustaram-se os projetores de forma a iluminação ser homogénea em ambas as câmaras.

7° - Colocaram-se os filtros nos respetivos lugares.

8° - Já com os filtros, ajustou-se a intensidade dos projetores, com auxílio do *software*, e alterou-se o “*shutter time*” até ser possível uma imagem igual em ambas as câmaras.

9° - Por fim, calibrou-se a GOM ARAMIS 3D 5M com o calibrador MV90x72 (consultar no anexo B.2), seguindo as etapas do manual. Ultrapassada esta etapa os equipamentos estavam prontos para a realização do ensaio de tração.

Estas etapas foram realizadas com apoio dos manuais de utilização e calibração presentes no LEM.

3.1.2.3 Processamento dos dados

Realizado o ensaio de tração, foi necessário o tratamento dos dados retirados por ambos os *softwares* de apoio dos respetivos equipamentos. No TRAPEZIUM esta operação foi simples, pois este monitorizou, diretamente, as cargas exercidas durante o ensaio. Pelo contrário, na ARAMIS foi necessário o tratamento das imagens captadas durante o ensaio de tração, que seguiu os seguintes passos:

1º - Definiu-se a área de análise, de forma que esta apanhasse todo o provete até à parte de amarração.

2º - Adicionou-se um “*Start Point*”. Este foi escolhido numa zona de pouca deformação, ou seja, perto da zona de amarração, como mostra a Figura 3.8.



Figura 3.8. Área de análise (Verde) e *Start Point* (Ponto vermelho)

3º - Calcularam-se as deformações. Esta foi a etapa mais demorada, uma vez que foram necessárias sub-etapas. A partir deste ponto passou-se de uma imagem real para uma imagem das deformações da zona de interesse. Por vezes, nessa zona apareciam “buracos” (falta de informação) e para preencher esses “buracos” foi necessário interpolar, Figura 3.9. Outra correção necessária foi a correção do sistema de coordenadas, pois as câmaras podem não estar alinhadas com o sistema da Shimadzu. Nesse sentido foi criado um plano, uma linha e um ponto para definir o eixo a partir da imagem real, para com isto evitar quaisquer desvios de coordenadas.

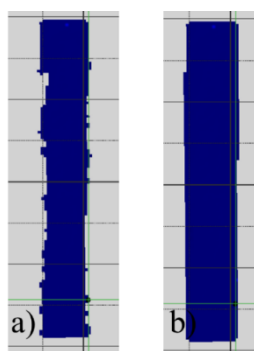


Figura 3.9. a) Imagem virtual com "buracos"; b) Após a interpolação

4º - Selecionaram-se e guardaram-se os dados de interesse. Foi nesta fase que se retiraram os valores de deformação para a construção dos gráficos de tensão-deformação. Os valores retirados foram: *Average Major Strain (Technical e Logarithm)*, *Average Minor Strain (Technical e Logarithm)* e o *Stage Time*, Figura 3.10, que correspondem à deformação nominal e real em comprimento e largura do provete e à taxa de aquisição, respetivamente.

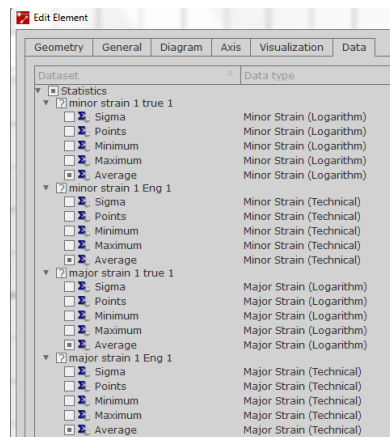


Figura 3.10. Valores retirados do ARAMIS para a caracterização do material

5º - Repetiu-se o procedimento para todos os ensaio de tração.

Estas etapas de processamento e obtenção de dados foram realizadas segundo o guião de tratamento de dados presente no LEM.

3.2 Ensaio de Flexão

Tal como nos ensaios de tração, os ensaios de flexão seguem o mesmo procedimento. No entanto, para a realização dos ensaios de flexão, para além dos provetes foi necessário também projetar e maquinar as ferramentas para o efeito.

3.2.1 Dimensionamento das Ferramentas

Foi nesta etapa que se decidiu quais os fatores, a nível das ferramentas, que influenciam o *springback* / *spring-go*. Assim sendo os fatores que se tiveram em consideração foram o tipo de flexão em U ou V, e dentro deste último alterou-se o raio e o ângulo do punção.

Pela revisão de literatura foi possível averiguar que o ângulo e o raio do punção são dois fatores com relevância no valor de *springback* / *spring-go*. Assim sendo, foram elaborados dois ângulos para o punção, um de 60° e outro de 90°, em que ainda havia a variação dos raios para cada ângulo, 5 e 10mm. Deste modo, foram elaborados quatro punções distintos em forma de V, cujas características principais são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Dimensões dos punções em V e as suas designações

	Designação	Ângulo (°)	Raio (mm)
Punção	P60R5	60	5
	P60R10	60	10
	P90R5	90	5
	P90R10	90	10
	U	-	5

Para o ensaio de flexão foram também necessárias matrizes para os respetivos punções. Por esse motivo, foram desenhadas duas matrizes, uma com o ângulo de 60° e outra de 90°. Apenas foram necessárias duas matrizes devido à ranhura sinalizada na Figura 3.11, caso contrário seria necessária uma matriz para cada punção. Com esta ranhura foi possível a realização dos ensaios de flexão para cada punção e a diminuição do custo de material e de mão de obra.

Na Figura 3.11 estão representados os dois punções de 90° (10 mm de raio à esquerda e 5mm à direita), sendo que a matriz é a mesma, tendo sido replicada para efeitos de ilustração. Para a matriz do punção de 60° também foi feita a ranhura.

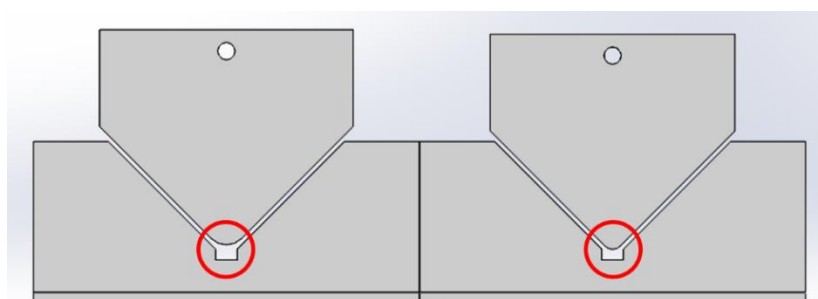


Figura 3.11. Ranhura que possibilita a utilização dos dois punções de 90° na mesma matriz.

Para além dos punções e matrizes em V, foram desenhados um punção e uma matriz em U.

A largura dos punções e matrizes foi condicionada pelas barras de aço Ck45, existente no DEM, pelo que a largura foi de 28mm.

Outra condicionante que se teve em consideração foi a forma de fixação dos punções e das matrizes na Shimadzu. As soluções encontradas no LEM para a fixação destes estão apresentadas na Figura 3.12.

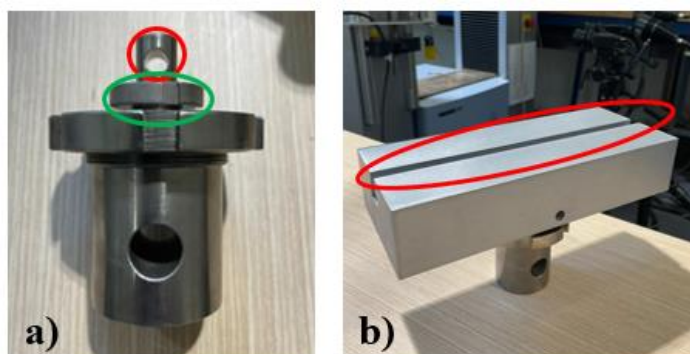


Figura 3.12. a) Sistema de fixação dos punções; b) Sistema de fixação das matrizes

No caso do punção foi necessário criar uma cavidade onde fosse possível a entrada do veio, sinalizada a vermelho na Figura 3.12.a. Esse acoplamento foi deslizante com tolerância H7. Além disso, foi preciso um furo de diâmetro 8mm passante perpendicular à cavidade, como mostra a Figura 3.13, de forma a haver o acoplamento de um pino cilíndrico que atravessasse o punção e o suporte. E assim, com a porca de fixação, presente no suporte (sinalizada a verde na Figura 3.12.a), garantiu-se a total fixação entre o punção e o suporte.

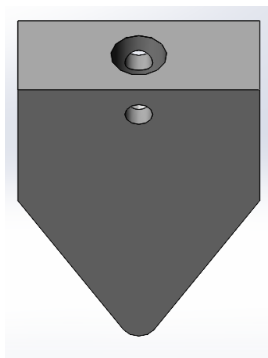


Figura 3.13. Adaptação feita aos punções para possibilitar a fixação do punção à Shimadzu.

Para a fixação das matrizes à máquina o sistema de fixação foi diferente, tendo consistido num suporte com uma ranhura em forma de T, Figura 3.12.b. Nesse sentido, foram feitas adaptações à matriz para garantir a fixação e, também, o correto posicionamento da matriz, uma vez que esta tinha de estar alinhada com o punção durante o ensaio de flexão.

Na Figura 3.14.a estão apresentadas as adaptações efetuadas, a vermelho está assinalado o “dente” que encaixa na ranhura do suporte, e a verde está assinalada o furo passante que irá permitir a fixação da matriz ao suporte. Esta fixação foi garantida por dois parafusos CHC M8 com 75mm de comprimento, que serviram para as duas matrizes em V. Para a matriz em U foi o mesmo tipo de parafuso só que com apenas 55mm de comprimento. Estes parafusos apertaram numa porca para ranhuras de forma em T, Figura 3.14.b.

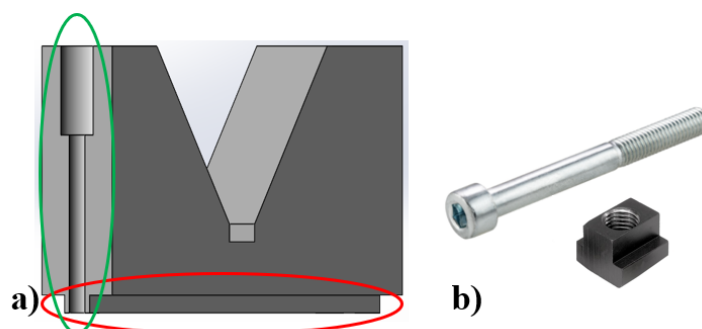


Figura 3.14. a) Adaptações efetuadas em todas as matrizes; b) Parafuso CHC M8 e porca para ranhuras em T M8.

Tanto para as matrizes como para os punções as adaptações explicadas anteriormente, foram aplicadas a todos os punções e matrizes. O punção montado no suporte de fixação é mostrado na Figura 3.15, e a matriz montada no respetivo suporte encontra-se na Figura 3.16.

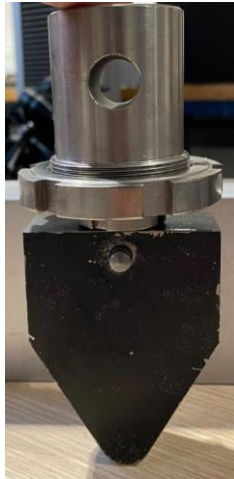


Figura 3.15. Punção montado no suporte.

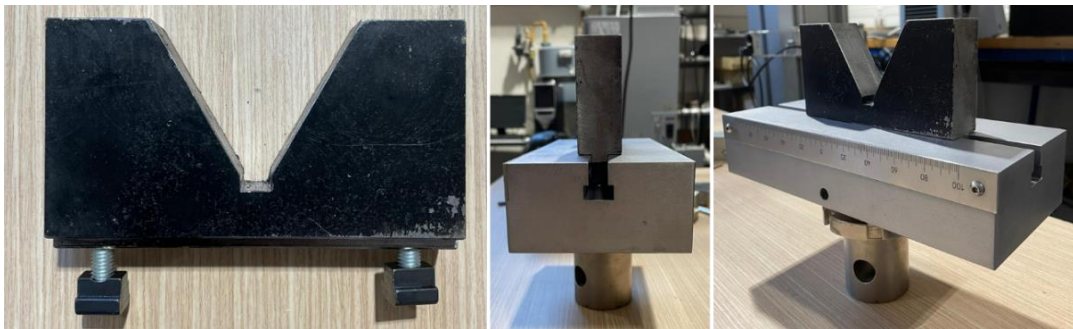


Figura 3.16. Montagem da matriz. *a)* Colocação dos parafusos e porcas; *b)* Colocação lateral da matriz no suporte; *c)* Aperto da matriz no lugar desejado.

Na Figura 3.17 é demonstrado como ficaram as ferramentas produzidas em comparação com as projetadas. As ferramentas foram maquinadas pela empresa RodriMaq devido à indisponibilidade de tempo de execução do trabalho na oficina do DEM. E ainda é possível fazer uma comparação visual entre as ferramentas projetadas com as ferramentas maquinadas.

Os desenhos técnicos de todas as ferramentas apresentam-se no Anexo C.

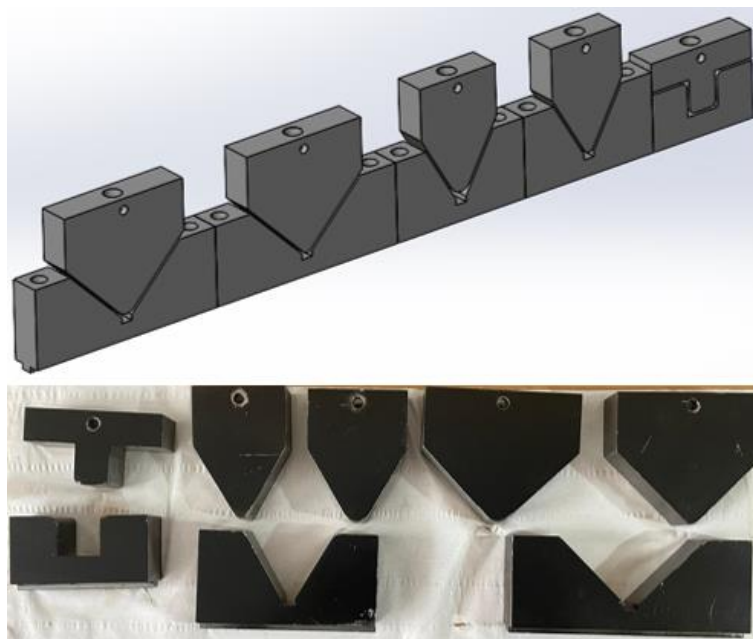


Figura 3.17. a) Desenhos 3D dos punções e matrizes; b) Punções e matrizes produzidas.

3.2.2 Dimensionamento dos Provetes

Assim como no ensaios de tração, no ensaio de flexão são necessários provetes, em vista disso foram cortadas chapas retangulares com as dimensões de 180x24x2mm da ligas AA6022-T4 com diferentes orientações, em relação à direção do laminagem, sendo que essas direções foram 0°,15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90°. Da liga AA6061-T6 apenas se cortaram provetes com orientações de 0°, 45° e 90°, devido a problemas com as chapas fornecidas. Para esse efeito utilizou-se novamente a guilhotina Guifil.

Obtidas chapas retangulares, estas seguiram para o centro de maquinagem CNC onde foram maquinadas com as dimensões apresentadas na Figura 3.18. Esta operação teve por objetivo a garantia da uniformidade da largura do provete.

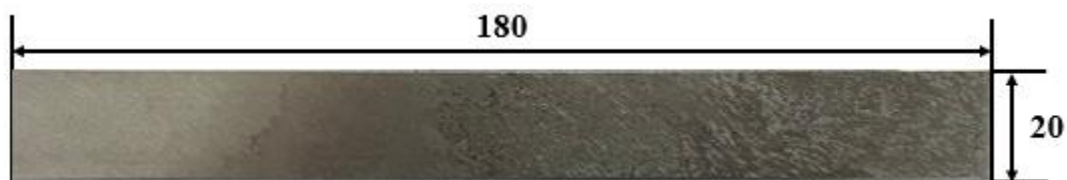


Figura 3.18. Dimensões dos provetes para o ensaio de flexão.

3.2.3 Montagem das Ferramentas

A montagem das ferramentas na Shimadzu AG-X plus 100kN, foi um processo que requereu alguma atenção pois se o punção e a matriz não ficassem alinhados, no caso de V levaria ao esmagamento de um dos lados e no caso de U não haver folga suficiente num dos lados U para a deformação do provete, e haver esmagamento do provete. Isto levaria a resultados falaciosos e para além disso poderia danificar a máquina por ultrapassar a capacidade de carga.

Para que isso não acontecesse, procederam-se as seguintes tarefas:

1^a – Fixou-se o punção à Shimadzu AG-X plus 100kN.

2^a – Fixou-se o suporte das matrizes na máquina com matriz solta, ou seja, a matriz estava presa na ranhura pelo parafuso CHC e pela porca em T, no entanto esta podia deslizar lateralmente. E assim podia se alinhar a matriz em função do punção.

3^a – Baixou-se o punção de forma a encaixar na matriz, mas deixando-se alguma folga.

4^a – Seguraram-se dois provetes, do mesmo material, em cada lado do V.

5^a – Baixou-se o punção até haver uma ligeira compressão e os dois provetes ficaram presos.

6^a – Verificou-se se a compressão era uniforme nos dois lados do V, tentando-se mover a matriz lateralmente. No caso de U, o procedimento foi igual, encostaram-se os provetes às paredes verticais do U, de forma a folga entre a matriz e o punção ser igual em ambos os lados e o provete estar entre eles. Relembrar que a folga está compreendida entre 1,00 e 1,10 da espessura do provete.

7^a – Caso a matriz não se movimentasse, ambos os parafusos CHC eram apertados com uma chave de sextavada.

8^a – Subiu-se o punção e colocou-se o provete de ensaio sobre a matriz de forma que estivesse centrado e à face desta. Depois da realização destas etapas as ferramentas e o provete encontravam-se como mostra a Figura 3.19.

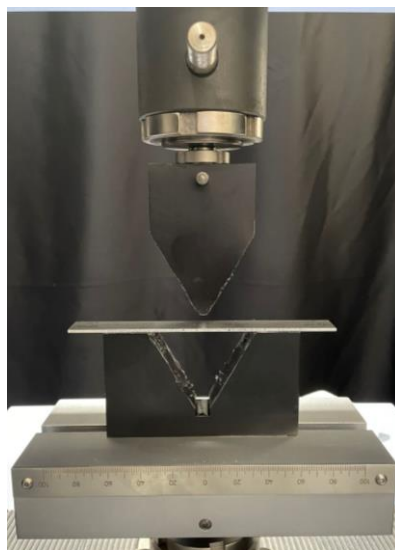


Figura 3.19. Aspetto inicial de cada ensaio de flexão

3.2.4 Procedimento Experimental

Nos ensaios de flexão, entre testes falhados e bem-sucedidos foram testados 106 provetes, uma vez que inicialmente realizaram-se duas repetições para cada orientação. Estes testes efetuaram-se com intuito de estudar o comportamento dos materiais quando sujeitos a uma carga que leva à sua deformação, que logo de seguida é retirada. Foram realizados, também, na máquina universal, Shimadzu AG-X plus 100kN, cuja célula de carga tem capacidade até 100 kN. O ensaio foi, novamente, apoiado pela GOM ARAMIS 3D 5M.

Esta etapa do projeto foi dividida em duas fases. A primeira fase destinou-se à seleção do conjunto de ferramentas em que se averiguava qual conjunto que apresentava maior valor de *springback*, para depois se escolherem mais dois conjuntos de ferramentas, uma com ângulo diferente e outra com raio diferente. Assim sendo, para esta fase de triagem foram cortados provetes apenas nas orientações de 0° e 90° e foram testados em todas as ferramentas da flexão em V. Visualmente, foi possível concluir que o *springback* tinha mais expressão quanto menor era o ângulo e maior raio do punção, ou seja, era nos provetes carregados pelo punção de ângulo 60° e raio 10mm onde ocorria maior *springback*. Posto isto, passou-se à segunda fase dos ensaios de flexão. Testaram-se os provetes de todas as direções, no entanto excluiu-se o punção de maior ângulo e menor raio, o P90R5, pois era onde havia menos variação do ângulo de flexão.

Durante os ensaios foi possível averiguar a repetibilidade dos ensaios de flexão em provetes com as mesmas características. Visto isto, ao invés de dois ensaios para provetes com as mesmas características passou-se a realizar apenas um. Este assunto será mais aprofundado no Capítulo da Análise e Discussão dos Resultados.

Antes da realização dos ensaios de flexão foi necessária a configuração da Shimadzu AG-X plus 100kN e da GOM ARAMIS 3D 5M. Esse procedimento encontra-se descrito de seguida.

3.2.4.1 Configuração da Shimadzu AG-X plus 100kN

A configuração da máquina universal, a nível das ferramentas já foi explicado no tópico da montagem da ferramenta. O resto do procedimento experimental foi idêntico ao efetuado para o ensaio de tração. De notar que também foi necessário pintar o provete com o padrão da Figura 3.5, só que neste caso a superfície pintada foi a superfície da espessura. Também foi necessário pintar o punção e a matriz de preto para que o brilho do aço CK45 não interferisse na captação de informação por parte da GOM ARAMIS 3D 5M.

A outra diferença foi que ao invés de ser preciso criar apenas um método no TRAPEZIUM X, nestes ensaios cada punção tinha um método diferente, Tabela 3.2. Uma vez que o método criado era em função do deslocamento e o deslocamento varia com o ângulo e raio do punção, este deslocamento era medido, para cada punção, aquando da realização da etapa nº6 da montagem das ferramentas. A medição era efetuada seguindo-se alguma etapas. Quando os provetes que mantinham a folga, entre a matriz e o punção, igual à espessura, ou seja, quando estes estavam “presos” por uma ligeira carga, era fixada a posição zero do curso da máquina usando o controlo manual. A seguir recolhia-se o punção até ser possível colocar o provete sobre a matriz. Colocado o provete, voltava-se a baixar o punção até este entrar em contacto com o provete, para que depois se pudesse marcar a posição em que se encontrava o punção. A esta posição correspondia o deslocamento necessário para o ensaio de flexão do respetivo punção. Registado o valor de deslocamento, era colocado no programa da máquina como sendo a nova posição zero, garantindo assim que para todos os ensaios daquele punção aquela era a posição inicial.

Tantos os valores de deslocamento obtidos como os valores das velocidades de avanço e recuo estão exposto na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Dados dos métodos elaborados no TRAPEXIUM X

Punção	Deslocamento (mm)	Velocidade de Avanço (mm/min)	Velocidade de recuo (mm/min)
P60R5	51	10,0	50,0
P60R10	46	10,0	50,0
P90R5	51,5	10,0	50,0
P90R10	49,7	10,0	50,0
U	30	10,0	50,0

Entre cada ensaio de flexão, o punção e a matriz eram lubrificadas de forma a aliviar o atrito, durante o ensaio, aquando do escorregamento do provete.

3.2.4.2 Configuração da GOM ARAMIS 3D 5M

Novamente, foi necessário a configuração da GOM ARAMIS 3D 5M para o acompanhamento do ensaio de flexão, e as etapas de configuração foram muito similares às etapas do ensaio de tração havendo algumas alterações.

Relembrar que esta configuração apenas pôde ser realizada após a configuração da Shimadzu AG-X plus 100kN, uma vez que estava dependente da posição dos provetes.

A janela de captura foi a principal das alterações, uma vez que para acompanhar o ensaio de flexão a janela 100X85mm era demasiado pequena e não dava para observar o ensaio na totalidade. Posto isto, teve que se aumentar a janela de captura, chegando às dimensões de 125X100mm onde já era possível observar todo o ensaio. Esta alteração desencadeou outras alterações, como a distância entre o laser e o provete passar a ser de 845mm e a distância entre câmaras de 336mm (consultar Anexo B.1, retângulo verde). A partir deste ponto o procedimento de configuração foi o mesmo utilizado nos ensaios de tração.

Esta configuração é a mesma tanto para os ensaios de V como para os ensaios de U, tendo havido apenas a necessidade de baixar o tripé da câmara na matriz em U, visto que esta é mais pequena que a matriz em V. Tanto o laser como a mira do *software* tinham de estar a apontar no provete quando este estava na fase inicial.

A Figura 3.20 demonstra a disposição dos equipamentos após as suas configurações.



Figura 3.20. Disposição dos equipamentos após as suas configurações.

3.2.4.3 Processamento dos dados

Realizado o ensaio de flexão, segundo todos os passos expostos anteriormente, tal como nos ensaios de tração foi necessário o tratamento dos dados retirados por ambos os *softwares* de apoio dos respetivos equipamentos. No TRAPEZIUM a tarefa foi simples, pois este monitorizou, diretamente, as cargas exercidas durante o ensaio. Pelo contrário, no ARAMIS foi necessário, novamente, o tratamento das imagens captadas durante o ensaio de flexão, sendo esse tratamento muito similar ao tratamento efetuado aquando do ensaios de tração. O procedimento foi o mesmo para o ensaio em V como para os ensaios em U., tendo sido o seguinte:

1º - Definiu-se a área de análise.

2º - Adicionou-se um “*Start Point*”. Este foi escolhido na zona de curvatura no ensaio em V e na zona da alma no ensaio em U, pois durante os ensaios de flexão estas foram as zonas de maior interesse, Figura 3.21.

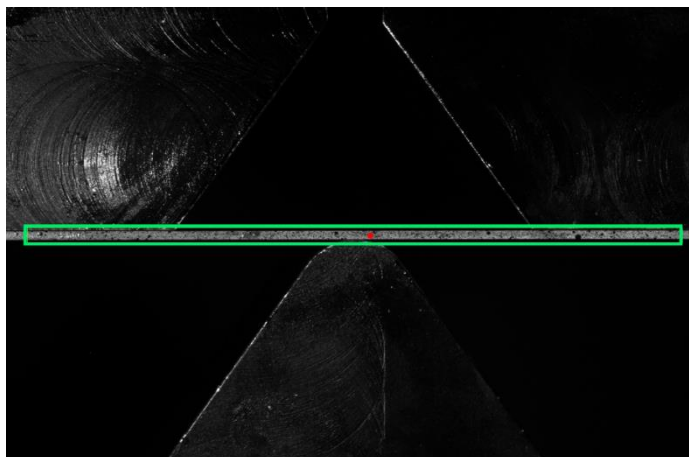


Figura 3.21. Área de análise (Verde) e *Start Point* (Ponto vermelho)

3º - Calcularam-se as deformações, Figura 3.22. Neste caso a interpolação tomou um papel importante pois, como a área de análise é uma área “fina”, por vezes esta era necessária para ligar elementos ou dar uma forma coerente com a real.

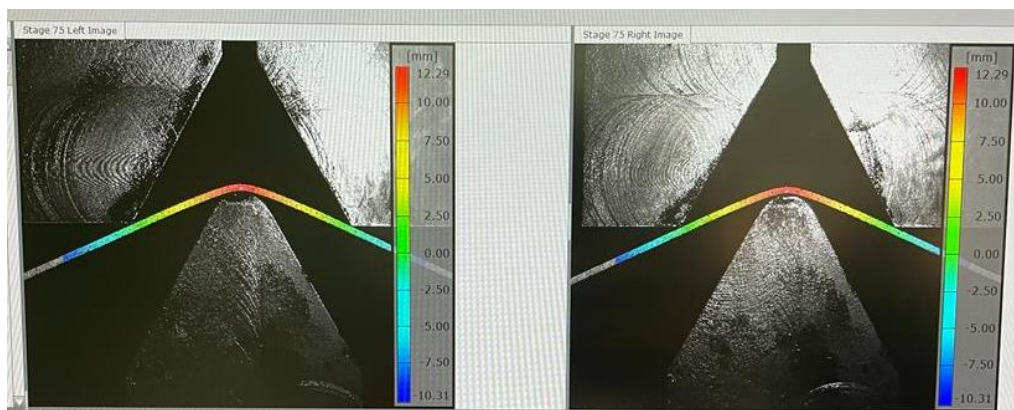


Figura 3.22. Processamento das imagens captadas

4º Retiraram-se os valores necessários. Neste caso não foram apenas os resultados, mas também duas fotografias de cada ensaio, uma aquando da máxima flexão e outra após a retirada do punção, Figura 3.23. Isto para efeitos de cálculo do *springback* / *spring-go*.

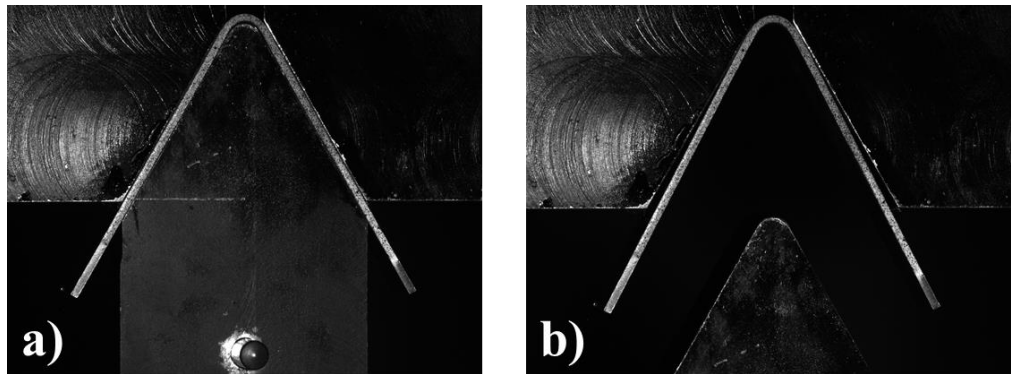


Figura 3.23. a) Máxima flexão do provete; b) Flexão após a retirada do provete

5° - Repetiu-se o procedimento para todos os ensaio de flexão.

Ainda de referir que os ensaios foram realizados numa cabine composta por um blackout preto, que abrangia a Shimadzu AG-X plus 100kN e a GOM ARAMIS 3D 5M, e assim não houve interferência da variação da luz solar ao longo do dia, podendo assim realizar ensaio de manhã e de tarde. A variância da luz solar podia ter influência no ensaios visto que podia afetar a calibração das câmaras e assim deturpar os resultados.

3.2.4.4 Cálculo do *Springback* / *Spring-go*

Para o cálculo do *springback* /*spring-go* recorreu-se ao *Solidworks*. Neste foram inseridas as imagens retiradas do ARAMIS, nas quais foram traçadas duas linhas sobre as arestas interiores do provete, e assim usando a *Smart Dimension* do *Solidworks* foi possível determinar o ângulo de flexão máxima e o ângulo final de flexão, como mostra a Figura 3.24.

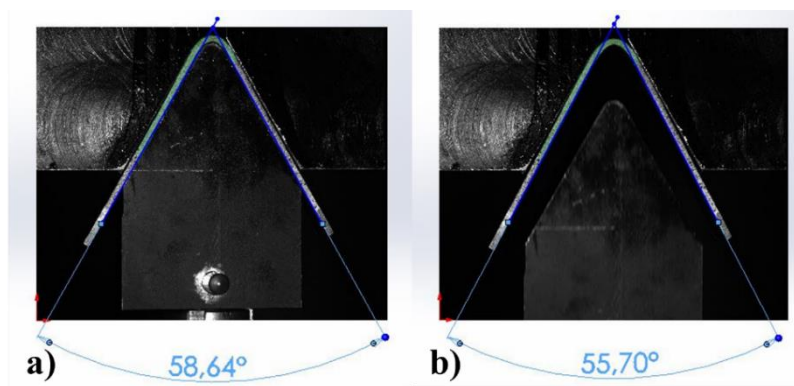


Figura 3.24. Medição dos ângulos na flexão em V. a) Ângulo de flexão máxima; b) Ângulo final de flexão.

No caso da flexão em U a determinação dos ângulos de flexão foi da forma apresentada na Figura 3.25. No entanto, como pode ser observado, neste caso foram retirados dois ângulos por imagem, o ângulo interno do U e o ângulo externo. De notar que estes ângulos foram retirados apenas de um dos lados do provete, uma vez que este é simétrico. Além disso, como será apresentado no Capítulo da Análise e Discussão de Resultados, estes dois ângulos variaram de forma diferente aquando do alívio da deformação elástica.

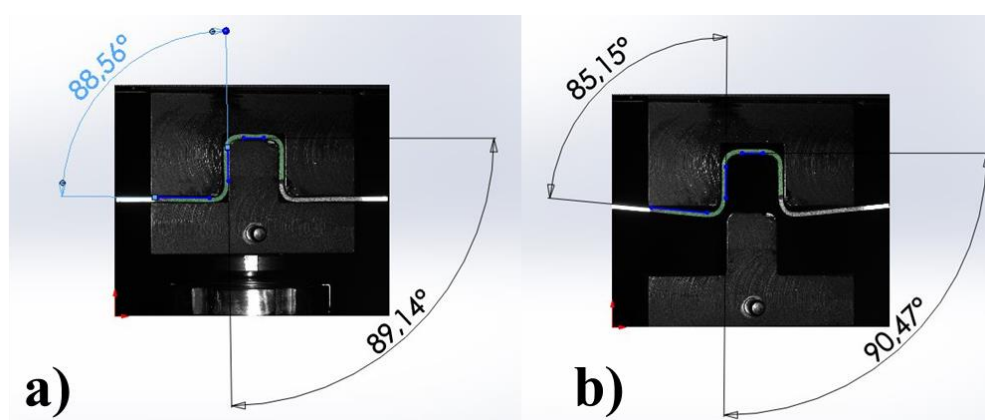


Figura 3.25. Medição dos ângulos na flexão em U. a) Ângulo de flexão máxima; b) Ângulo final de flexão.

De referir que a determinação do ângulo de flexão máximo é efetuada para que os valores de *springback* e *spring-go* sejam mais precisos porque, como será possível observar nos Anexos G, nenhum ensaio no momento de flexão máxima impôs o ângulo de 60° ou 90° do respetivo punção/matriz.

Obtidos os ângulos anteriores o *springback* foi calculado segundo a equação (2.4).

De referir que as imagens foram captadas pelas câmaras presentes no tripé que se manteve inalterado durante os ensaios de V, como também durante os ensaios de U. Deste modo garantiu-se que as imagens não têm desvios, em termos posição, entre elas, garantindo uma maior precisão.

4 Análise e Discussão dos Resultados

Neste capítulo estão apresentados os resultados que provêm dos ensaios anteriormente expostos. Para além disso, estão expostas as várias comparações elaboradas entres os punções, como também entre os materiais e as suas características, que são depois comentadas acerca das divergência encontradas.

4.1 Caracterização do Material

Para o cálculo das tensões aplicadas a cada provete foram medidas, a espessura e a largura de cada provete. De forma que a espessura e a largura fossem homogéneas para cada orientação no cálculo das tensões foram utilizadas as médias dos valores da espessura e da largura, as quais podem ser consultadas nos Anexos D.

A obtenção dos gráficos de tensão-deformação tiveram por detrás um demorado trabalho em *Excel*, uma vez que, como já é sabido, os valores de deformação e tensão advieram de dois dispositivos distintos. Para além disso a Shimadzu AG-X plus 100kN captava 10 valores de carga por segundo enquanto a GOM ARAMIS 3D 5M captava 1 imagem por segundo, ou seja, 1 valor de deformação por segundo. Assim sendo, foi necessário sincronizar o valor de deformação com o valor da carga num instante próximo.

Feita essa sincronização e calculada a tensão, chegou-se aos gráficos de tensão-deformação para cada orientação de cada material.

4.1.1 AA6022-T4

Na Figura 4.1 é apresentado o gráfico de tensão-deformação nominal da liga AA6022-T4 nas várias orientações, onde é possível observar a sua conformidade com os parâmetros teóricos. De notar que esta liga apesar de estar em conformidade com os valores característicos desta, apresenta uma pequena variação que pode ser explicada com o envelhecimento natural desta liga, uma vez que esta já tinha sido adquirida há algum tempo.

Na Figura 4.2 está apresentado o gráfico de tensão-deformação real para cada orientação da liga AA6022-T4. Se necessário para uma observação mais detalhada de cada orientação, nos Anexos E.1 e F.1 estão expostos os gráficos de tensão-deformação nominal e real de cada orientação, respetivamente.

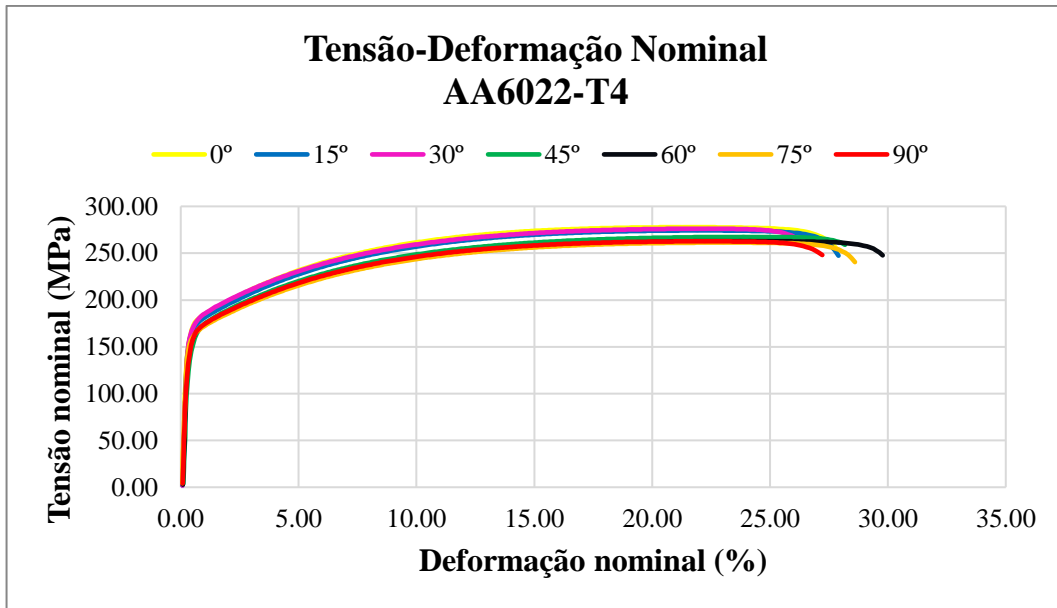


Figura 4.1. Gráfico de tensão-deformação nominal AA6022-T4

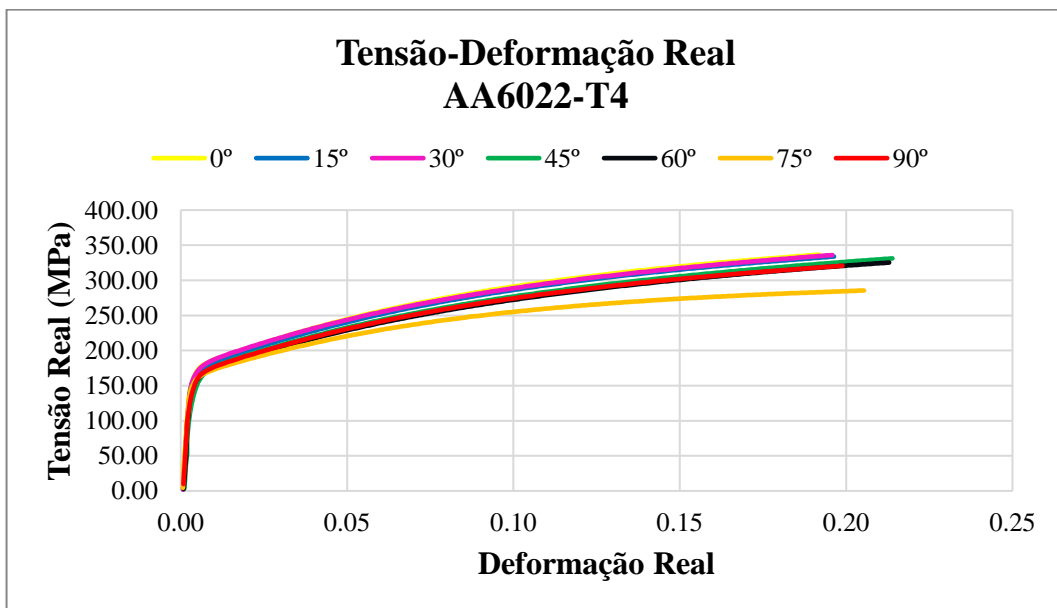


Figura 4.2. Gráfico de tensão-deformação real AA6022-T4

Na Tabela 4.1, estão presentes as propriedades retiradas do gráfico de tensão-deformação nominal e também o coeficiente de anisotropia para cada orientação obtido pelo declive entre a deformação real em largura e espessura do provete.

Tabela 4.1. Propriedades da liga AA6022-T4 nas diversas orientações.

Orientação	Módulo de Young (GPa)	Tensão de cedência (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)	Anisotropia
0°	65,9	179	277.8	27,9	0.885
15°	74,1	176	274.3	27,9	0.696
30°	72,4	178	276,2	26,3	0.540
45°	71,6	176	267.4	28,2	0.397
60°	78,2	170	262.9	29,8	0.421
75°	69,6	167	261.3	28,6	0.498
90°	77,8	170	262.7	27,2	0.544

4.1.2 AA6061-T6

Inesperadamente, e contrariamente ao que se sucedeu na liga AA6022-T4, na liga AA6061-T6 nas orientações de 15°, 30°, 60° e 75° as propriedades não estavam em conformidade com os valores característicos desta liga, como é possível observar nos gráficos de tensão-deformação nominal e real da Figura 4.3 e 4.4, respetivamente.

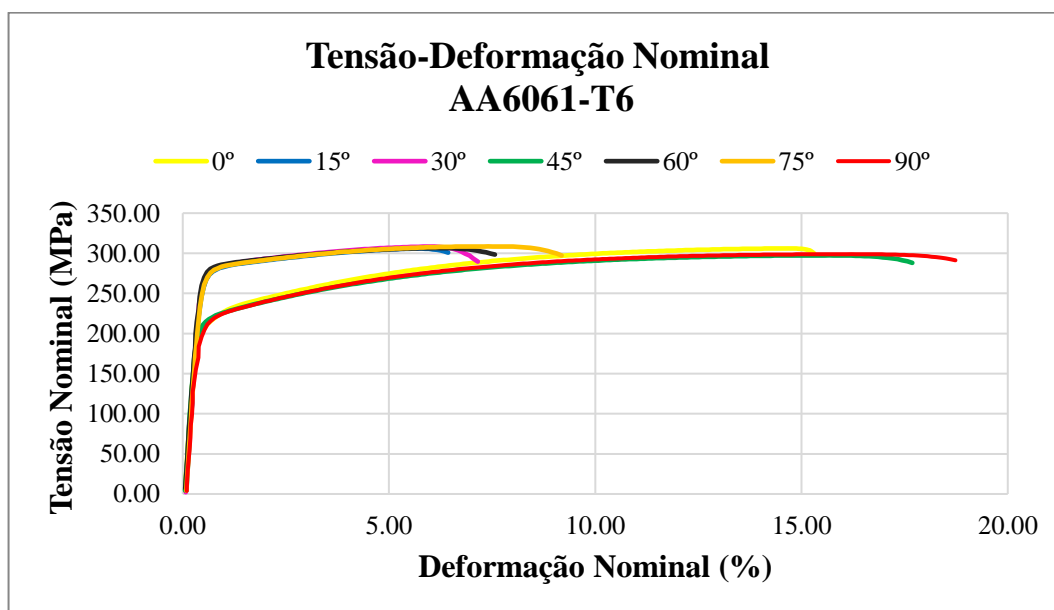


Figura 4.3. Gráfico de tensão-deformação nominal AA6061-T6

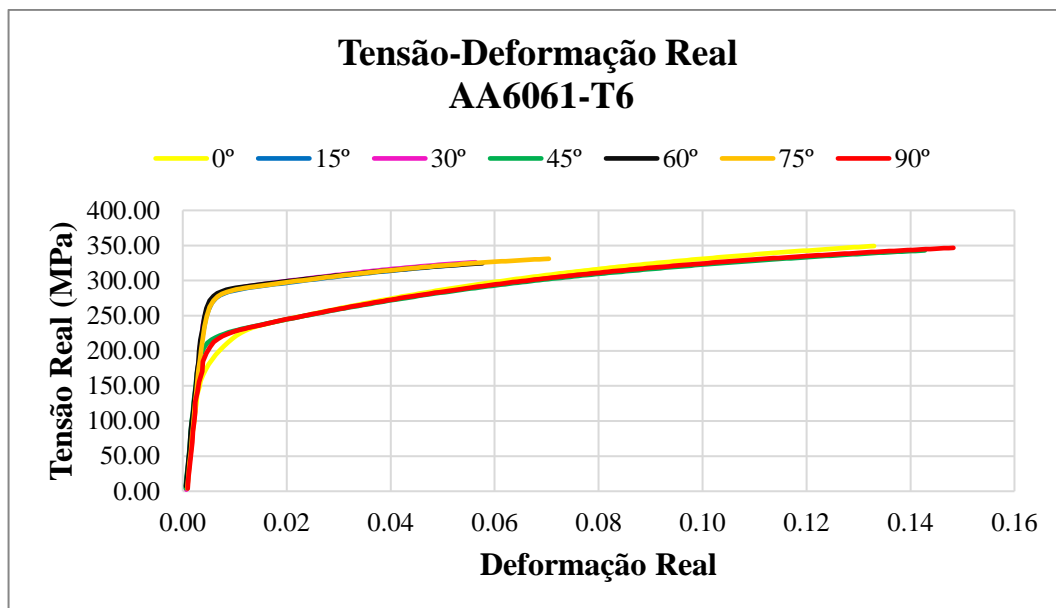


Figura 4.4. Gráfico de tensão-deformação real AA6022-T4

Tal como na liga AA6022-T4, nos Anexos E.2 e F.2 estão expostos os gráficos de tensão-deformação nominal e real de cada orientação, respetivamente, para uma observação mais detalhada da liga AA6062-T6.

Na Tabela 4.2, estão expostas as propriedades para cada orientação da liga AA6061-T6, onde é possível confirmar que para as orientações 0°, 45° e 90° estão em conformidade com os valores tabelados. Adicionalmente é também possível verificar que o material das orientações 15°, 30°, 60° e 75° não tem as características da liga AA6061-T6, uma vez que a tensão de cedência se situa na casa dos 270MPa e com uma taxa de alongamento de cerca de 7,5%. De referir que os valores padrão para esta liga são de uma tensão de cedência de cerca de 270MPa e uma taxa de alongamento de cerca de 14%. De forma a encontrar uma explicação para os resultados obtidos, foram efetuados teste adicionais nas chapas utilizadas, pois os provetes de 0°, 45° e 90° foram cortados de uma chapa, e os provetes para as restantes direções foram cortados de outra chapa que foi enviada pelo fornecedor na mesma encomenda e com a indicação de ser do mesmo material. Através destes testes adicionais confirmou-se que a chapa de onde foram cortadas as outras 4 direções apresentava propriedades diferentes da chapa utilizada para as direções de 0°, 45° e 90°.

Tabela 4.2. Propriedades da liga AA6061-T6 nas diversas orientações.

Orientação	Módulo de Young (GPa)	Tensão de cedência (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)	Anisotropia
0°	74,6	213	306,0	15,3	0.597
15°	72,7	272	305,9	6,4	0.598
30°	74,1	269	308,4	7,2	0.550
45°	75,6	220	297,4	17,7	0.553
60°	74,2	270	306,6	7,6	0.606
75°	75,2	270	308,6	9,2	0.712
90°	72,6	214	298,9	18,7	0.704

A caracterização do material é uma etapa muito importante, na medida em que se quer certificar com que material se está a trabalhar e em que estado este está. De notar que este estudo ficou comprometido uma vez que apenas se conseguiu realizar ensaios de flexão nas orientações de 0°, 45° e 90° e não em todas as orientações como se pretendia de início.

Tal como para este trabalho, na indústria automóvel é importante a realização da caracterização dos materiais em utilização, visto que pode acontecer no meio de uma encomenda haver materiais trocados ou com defeito. E assim realizando estes ensaios de controlo pode-se prevenir a utilização de materiais errados que não tem as características necessárias para assegurar o bom funcionamento do produto.

4.2 Estudo do *Springback* / *Spring-go*

Antes da apresentação dos valores de *springback* / *spring-go*, é interessante acompanhar os diferentes estágios do provete ao longo dos ensaios de flexão. Para esse efeito estão apresentadas a Figura 4.5, onde é possível observar alguns estágios do ensaio de flexão do punção P60R10 sobre o provete da liga AA6061-T6 com orientação 0°, e a Figura 4.6, onde estão os estágios de flexão do punção U sobre o provete da liga AA6022-T4 com orientação 15°.

Começando pela Figura 4.5, a imagem 1 corresponde à posição inicial onde o punção entrou em contacto com o provete com uma carga ligeira. Na segunda imagem já

se nota deformação, nesta fase o ângulo e o raio variaram constantemente, pois as abas aproximavam-se do punção à medida que este avançava. Na imagem 3, o provete já adquiriu uma forma similar à forma do punção e da matriz, estando perto da flexão máxima. Na imagem 4, o provete encontrava-se na flexão máxima sem ocorrência do esmagamento do mesmo. Na imagem 5, o punção encontrava-se numa fase de recolha e é possível observar que o provete acompanhava esse movimento, ou seja, estava a ocorrer o fenómeno de *springback*. A tentativa de voltar à sua forma inicial devido ao alívio elástico do momento fletor. Por fim, na imagem 6 encontra-se a forma final do provete após o *springback*.

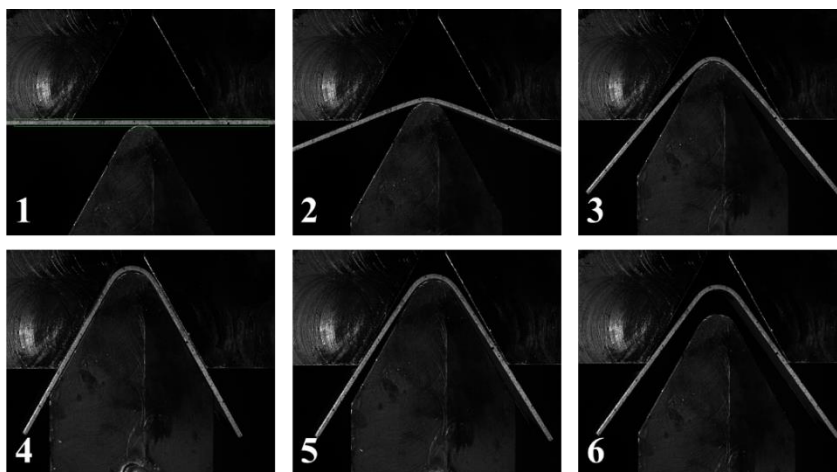


Figura 4.5. Sequência do ensaio de flexão com o punção P60R10.

Seguindo para o ensaio de flexão em U, na Figura 4.6, na imagem 1 está presente o estágio inicial do ensaio de flexão U. Na segunda imagem já há deformação, e nesta fase, esta é idêntica à da flexão em V. Na imagem 3 o provete começava a ganhar a forma de U e as abas já se encontravam em contacto com o punção, ponto este a partir do qual as abas começaram a deformar. Na imagem 4, o provete já tinha ganho quase a totalidade da forma do punção, no entanto o punção ainda não tinha chegado ao avanço máximo uma vez que a curvatura da alma ainda se encontrava convexa. A imagem 5 corresponde ao ponto de avanço máximo do punção onde a curvatura da alma passou de convexa a côncava. Já na imagem 6, com o punção a recuar nota-se que o provete acompanha esse recuo devido ao *springback* ocorrido nas abas. Por fim, na imagem 7, o punção já se encontra totalmente removido e provete encontra-se com a sua forma final.

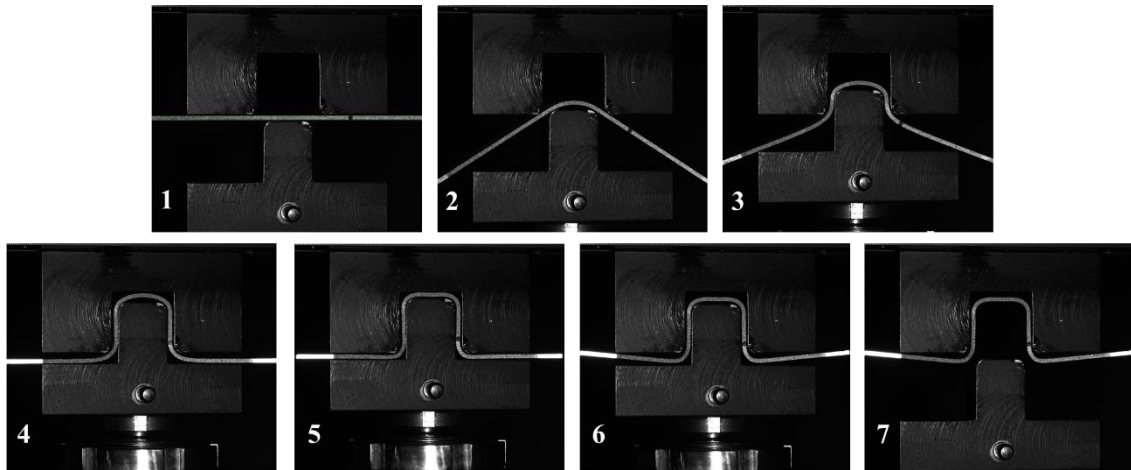


Figura 4.6. Sequência do ensaio de flexão com o punção U.

Analisada a evolução dos dois tipos de ensaios de flexão em estudo, segue-se a análise matemática dos valores que resultaram desses ensaios.

Numa primeira fase fez-se a triagem do conjunto de ferramentas, com intuito de determinar aquele onde acontecia maior *springback* para as orientações de 0° e 90° de cada material. Para esse efeito elaboraram-se os dois gráficos presentes nas Figura 4.7 e 4.8.

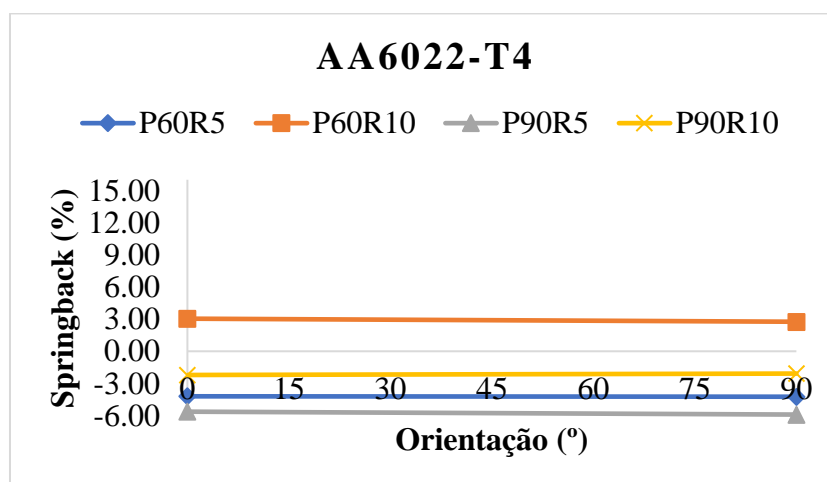


Figura 4.7. Comparação do *springback* / *spring-go* na utilização de cada ferramenta nos provetes da liga AA6022-T4 cortados a 0° e 90° , onde P representa o ângulo do punção e o R o raio do punção.

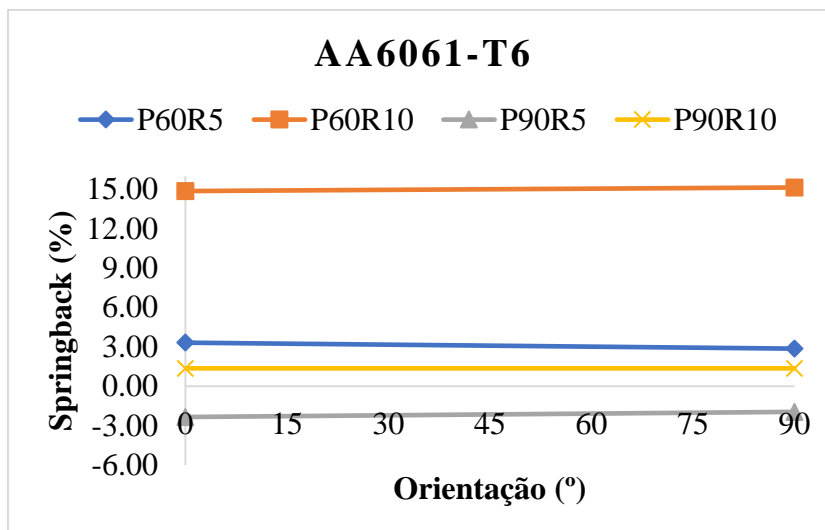


Figura 4.8. Comparação do *springback* / *spring-go* na utilização de cada ferramenta nos provete da liga AA6061-T6 cortados a 0° e 90°.

Com os dois gráficos presentes nas Figuras 4.7 e 4.8, comprovou-se o que já era visível durante a realização dos ensaios. Na utilização do punção P60R10 é onde se encontra maior valor de *springback*. No anexo G.1, encontram-se os valores que deram forma a estes gráficos. Como nestes ensaios de flexão eram realizados dois testes para cada orientação os gráficos foram elaborados através das suas médias.

Assim foi no punção P60R10 que se teve maior foco na fase seguinte, e assim as outras duas ferramentas utilizadas foram escolhidas em função desta, uma tinha a alteração do raio do punção, P60R5, e outra a alteração do ângulo do punção, P90R10, de forma a estudar a influência destas no *springback*.

Como foi dito anteriormente, durante a realização dos ensaios de flexão foi notória a boa repetibilidade entre os ensaios com as mesmas características, como mostra a Figura 4.9. Nesta figura encontram-se os ensaios onde foi utilizado o punção P60R10 com as orientações de 30°, 45° e 75° da liga AA6022-T4.

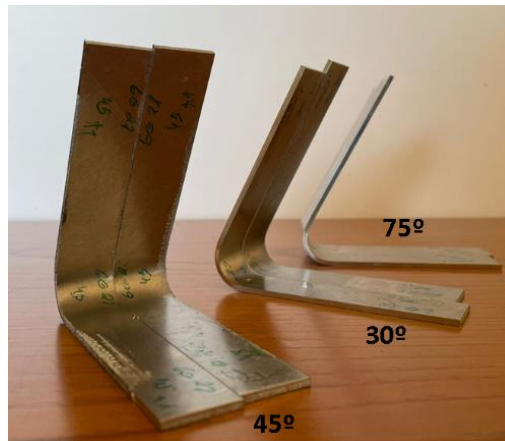


Figura 4.9. Repetibilidade dos ensaios para a mesma orientação do mesmo material.

Os seguintes gráficos vão de encontro ao que pode ser observado na Figura 4.9. Os valores que formam estes gráficos estão presentes no anexo G.2.

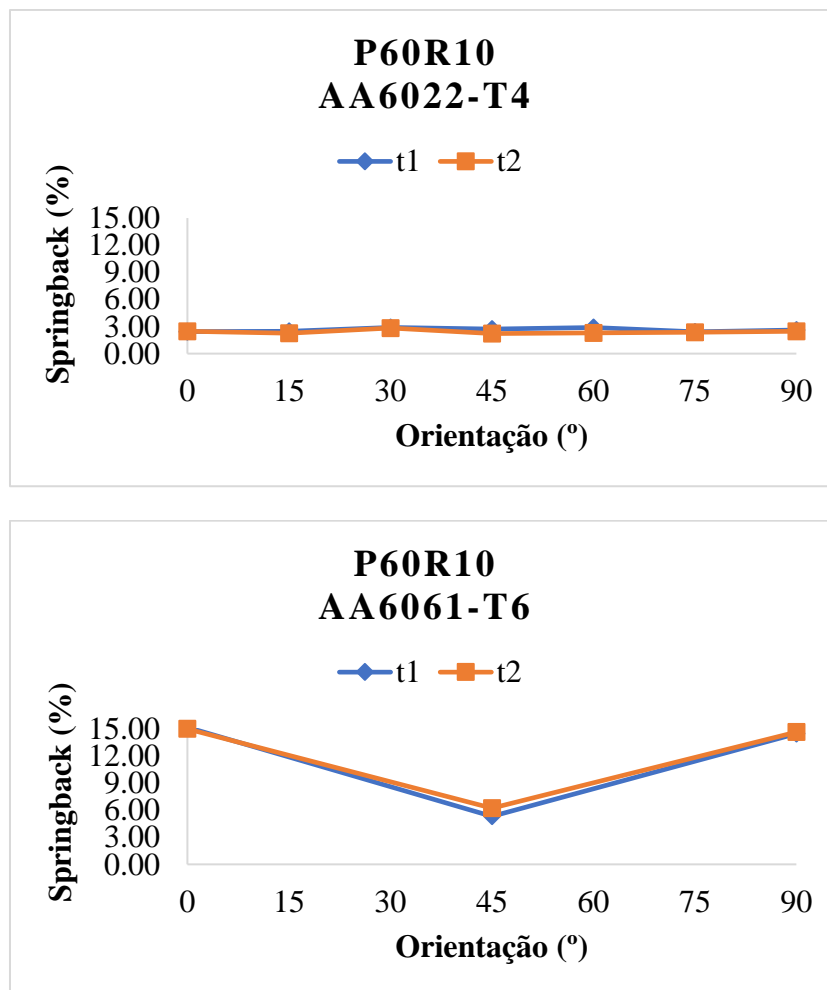


Figura 4.10. Repetibilidade. Comparação dos ensaios com as mesmas características.

De notar que os valores de *springback* em todos os gráficos estão expressos em percentagem para uma melhor comparação de valores entre os ângulo e os raios do punção diferentes e diferentes.

Comprovada esta repetibilidade nos ensaios dos punções seguintes apenas se realizou um ensaio para cada provete de uma característica.

Da Figura 4.11 à 4.17 encontram-se os provetes alinhados de forma a comparar visualmente o efeito do *springback* em cada orientação de cada material dos punções com forma em V. De notar que os provetes estão alinhado por ordem crescente de orientação, ou seja, o provete mais próximo é o de 0° e o mais distante o de 90°.



Figura 4.11. Provetes do punção P60R10 em todas as orientações da liga AA6022-T4.



Figura 4.12. Provetes do punção P60R10 nas orientações 0°, 45° e 90° da liga AA6061-T6.

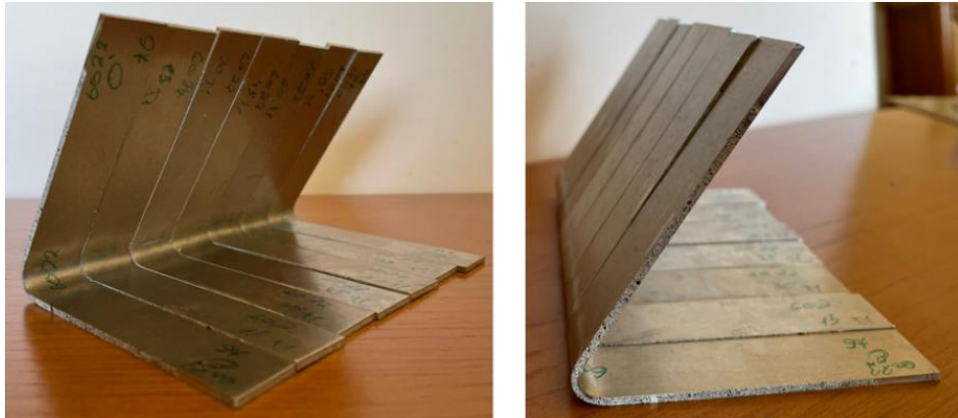


Figura 4.13. Provetes do punção P60R5 em todas as orientações da liga AA6022-T4.



Figura 4.14. Provetes do punção P60R5 nas orientações 0°, 45° e 90° da liga AA6061-T6.

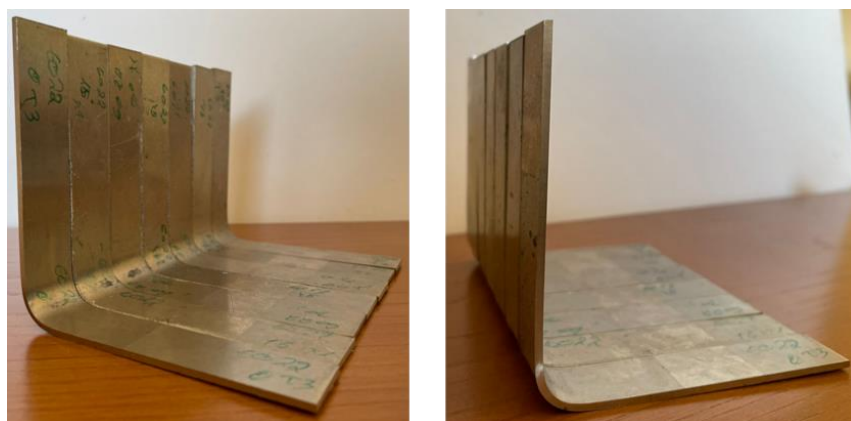


Figura 4.15. Provetes do punção P90R10 em todas as orientações da liga AA6022-T4.



Figura 4.16. Provetes do punção P90R10 nas orientações 0°, 45° e 90 ° da liga AA6061-T6.

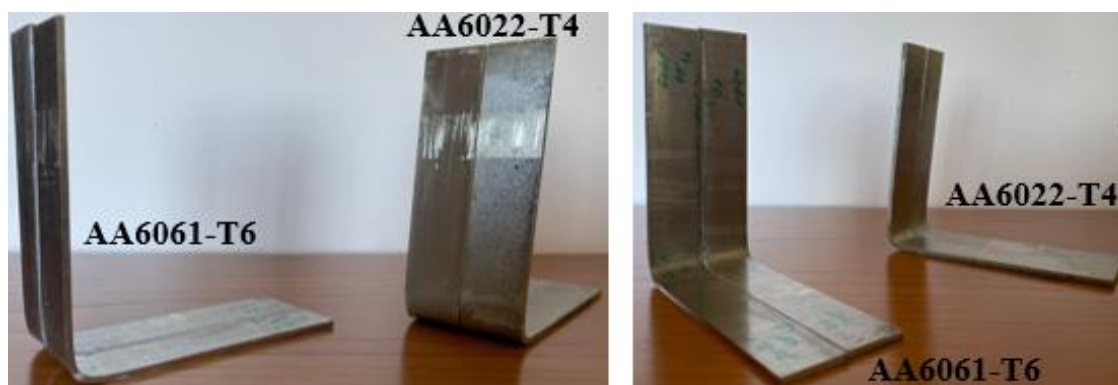


Figura 4.17. Provetes do punção P90R5 nas orientações 0° e 90 ° das duas ligas.

De referir que os provetes presentes na Figura 4.17 do punção P90R5, correspondem aos ensaios realizados na fase de triagem da ferramenta, daí a existência de apenas dois provetes para cada material.

Visualizados todos os provetes de estudo, apresentam-se os valores de *springback* obtidos em cada ensaio, faz-se a sua comparação e ainda a avaliação da mesma.

Na Figura 4.18, está exposto o gráfico dos valores de *springback* da liga AA6022-T4 para cada punção em função da orientação do provete.

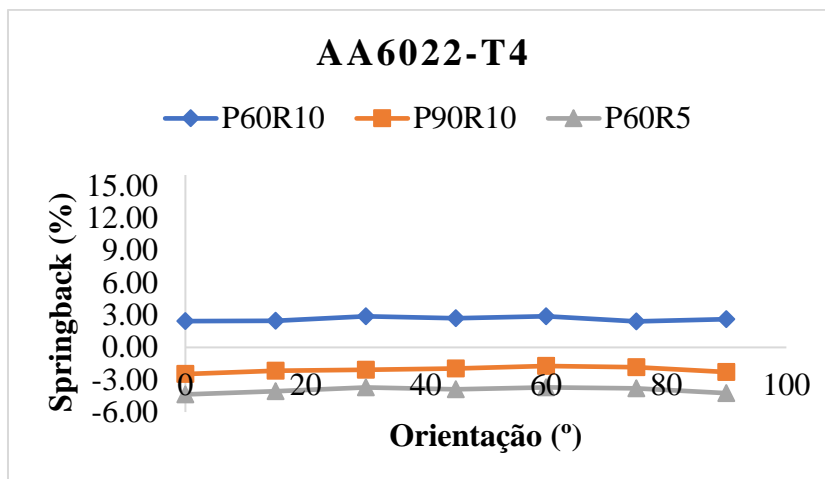


Figura 4.18. Comparação dos valores de *springback* em percentagem da liga AA6022-T4.

Da Figura 4.18, como já era esperado, é possível constatar que é nos ensaios com punção P60R10 onde ocorre maior *springback*. Para além disso, nota-se que a variação do ângulo do punção, P90R10, ou a variação do raio do punção P60R5, ocorreu o fenómeno de *spring-go* (caraterizado pelo valor negativo de *springback*), sendo de notar que este é maior com a variação do raio.

Uma outra nota a reter é a falta de influência da anisotropia nos valores de *springback*, visto que as linhas dos gráficos são praticamente contantes, o que vai ao encontro das Figuras 4.11, 4.13, 4.15 e 4.17.

Analisando o gráfico da Figura 4.18, mais atentamente constata-se que o valor de *springback* para o punção P60R10 ronda os 2,2%, enquanto no punção P90R10 e P60R5 surge o *spring-go*, que toma valores de cerca -2% e -4%, respetivamente.

Na Tabela 4.3, estão apresentados os valores médios das cargas máximas em cada ensaio de flexão. No entanto, em algumas situações, os valores de carga máxima desviam-se bastante da média. Um dos casos foi na orientação 45° do material AA6061-T6 do punção P60R5 em que a carga máxima foi 2,8kN. Um outro caso foi também na orientação 45° do material AA6061-T6 do punção P60R10 onde a carga máxima foi 5,6kN. O último caso foi na orientação 45° do material AA6022-T4 do punção P90R10, em que a carga máxima foi 5,2kN.

Tabela 4.3. Valores médios das cargas máximas em kN

	AA6022-T4	AA6061-T6
P60R5	6.0	3.3
P60R10	3.9	2.1
P90R10	3.9	5.7
U	14.5	16.3

Passando à análise da liga AA6061-T6, Figura 4.19, devido ao problema encontrado aquando da caracterização do material, apenas foi possível realizar os ensaios de flexão para as orientações 0°, 45° e 90°.

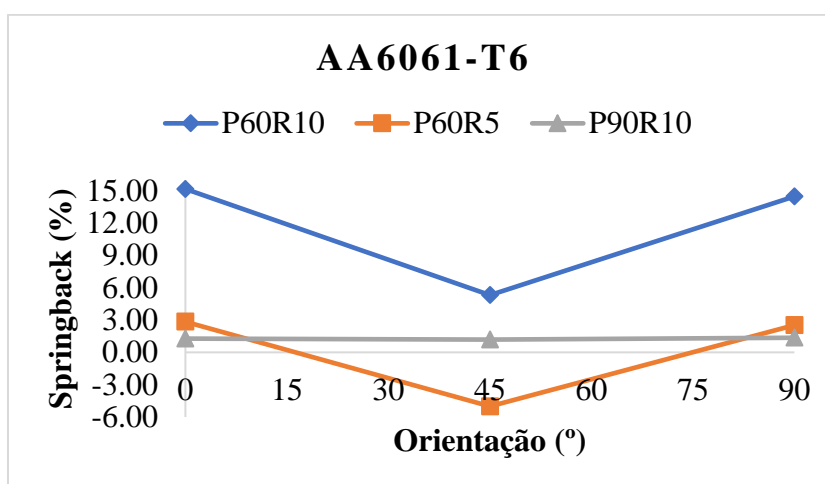


Figura 4.19. Comparação dos valores de *springback* em percentagem da liga AA6061-T6.

Assim, comprova-se novamente que o punção P60R10 é o que proporciona maior valor de *springback*. No entanto, observa-se que a anisotropia deste material pode ter influência nos valores de *springback* uma vez que para a orientação de 45° há uma oscilação no valores de *springback*, tanto para o ensaio do punção P60R10 como no do punção P60R5.

Analisando o gráfico da Figura 4.19 ao pormenor averigua-se que o valor de *springback* para o punção P60R10 ronda os 15% nas orientações 0° e 90° e 5% para 45°. Para os ensaios com o punção P60R5 o *springback* toma valores cerca dos 3% para 0° e 90°, ao passo que para 45° ocorre *spring-go* e este toma valores de cerca dos -5,0%. Por

fim para o punção P90R10 os valores de *springback* são constantes para as diferentes orientações e rondam o 1%.

Os valores nos quais os gráficos das Figuras 4.18 e 4.19 se baseiam estão expostos nos anexos G.2, G.3 e G.4, assim como os ângulos de flexão do antes e depois da ocorrência de *springback*.

Comparando os dois materiais, é notório que o *springback* é mais pronunciado na liga AA6061-T6, tomando nesta um valor o máximo de *springback* de cerca de 15%, ao contrário da liga AA6022-T4, que ronda os 2,2%.

Efetuada toda a análise dos ensaios de flexão em V, segue-se a análise da dos ensaio de flexão em U. Nas Figuras 4.20 e 4.21 é possível observar os resultados finais dos ensaios, e a partir das quais também se conclui rapidamente que a falta de influência da anisotropia em ambos os materiais.



Figura 4.20. Provetes do punção U em todas as orientações da liga AA6022-T4.



Figura 4.21. Provetes do punção U nas orientações 0°, 45° e 90 ° da liga AA6061-T6.

Na Figura 4.22 está exibido o gráfico do *springback* dos dois materiais nos ensaios de flexão em U. Como já foi referido anteriormente, nestes ensaios foram analisados dois ângulos de flexão, e estes têm comportamentos distintos. No ângulo interno do U ocorreu *springback*, ao passo que no ângulo externo surgiu o *spring-go*.

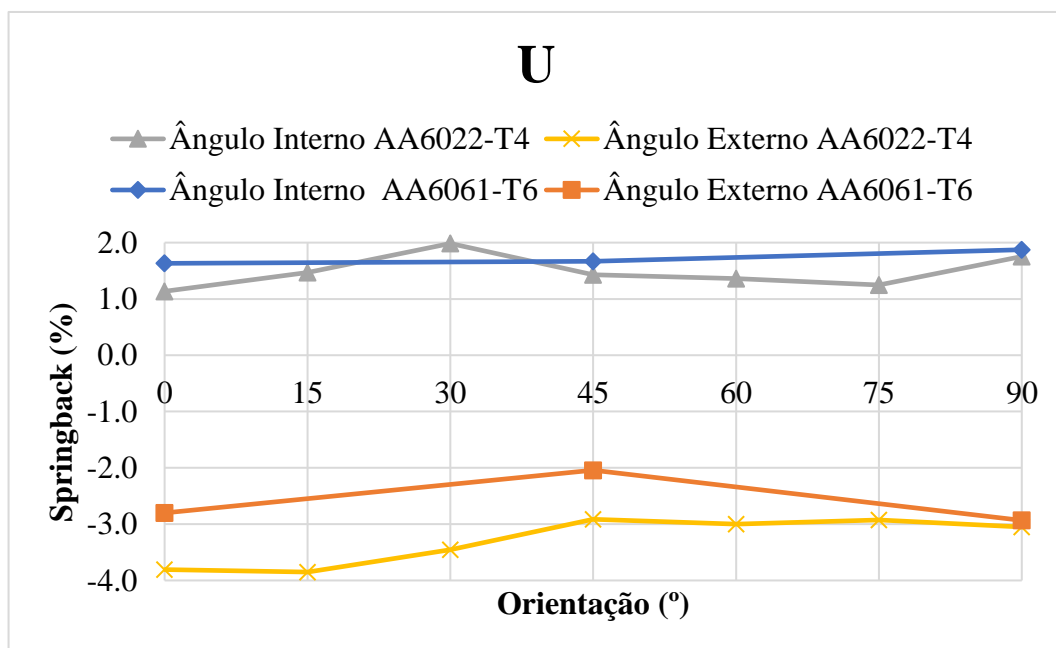


Figura 4.22. Comparação dos valores de *springback* no punção de U em ambos os materiais.

Destaca-se também a similaridade de comportamentos entre os materiais, ao contrário do que sucedeu nos ensaios de flexão em V. Daqui retira-se que os materiais se comportam de forma diferente perante diferentes formas de conformação.

Ainda de referir que os valores de *springback* podem ser consultados no anexo G.5, assim como os ângulos de flexão do antes e depois da ocorrência de *springback*.

4.2.1 Deformação na Zona de Curvatura em V

Nos ensaios de flexão em V a zona de curvatura foi a área de maior interesse do ensaio, visto que é nesta zona que ocorreu a deformação do provete. No entanto, esta deformação não foi uniforme ao longo da espessura. Destacam-se três zonas distintas, uma zona exterior da curvatura onde ocorreu alongamento do provete, deformação positiva, uma zona interior da curvatura onde ocorreu contração do provete, deformação negativa, e

ainda uma zona nula ao centro a separar as duas zonas mencionadas anteriormente, como se observa na Figura 4.23. Este comportamento é igual para os dois materiais o que difere da Figura 4.23a da Figura da 4.23b é a magnitude da deformação na zona de curvatura, uma vez que o punção P60R5 impôs uma deformação mais vincada do que o punção P90R10.

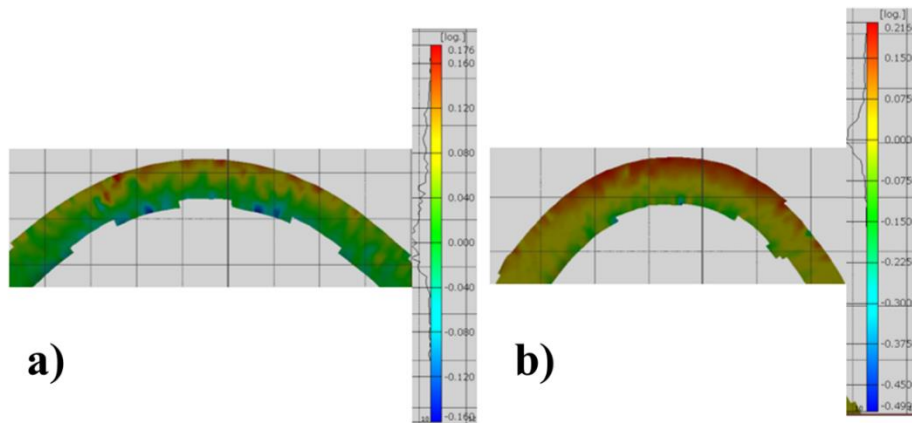


Figura 4.23. Deformação na zona de curvatura. a) Punção P90R10 da liga AA6061-T6 com orientação de 90°; b) Punção P60R5 da liga AA6022-T4 com orientação de 60°.

5 Conclusão

Por fim, neste capítulo são apresentadas as considerações finais do projeto, bem com as suas limitações e a perspectiva de um trabalho futuro.

5.1 Considerações Finais

Numa indústria em constante evolução e na procura de soluções ecológicas, o estudo das características e comportamentos dos materiais é um fator de elevado relevo. Nesse seguimento, o estudo do comportamento das ligas de alumínio, é cada vez mais intensificado, com a intenção de encontrar soluções que de alguma forma melhorem as características do produto, a utilização para o consumidor bem como a sua pegada ecológica.

O projeto desenvolvido centra-se no estudo do *springback* das ligas AA6022-T4 e AA6061-T6 aquando da conformação, tendo em conta algumas das características que influenciam esse comportamento.

Do estudo, foi possível concluir que as características do material em muito influenciaram o *springback* uma vez que os valores obtidos para as ligas na flexão em V, em nada são semelhantes. A liga AA6061-T6 tem maior tendência à ocorrência de *springback* enquanto a liga AA6022-T4 tem maior tendência à ocorrência de *spring-go*. No entanto para a flexão em U estes já foram similares, o que demonstra a influência da geometria do conjunto de ferramentas (punção / matriz) no comportamento dos materiais.

Relativamente aos ensaios em V, o valor de *springback* toma maior relevância quanto menor fosse o ângulo e maior fosse o raio do punção, tal como é evidenciado na literatura. A nível de anisotropia, a sua influência foi praticamente nula para a liga AA6022-T4, ao passo que na liga AA6061-T6 apresentou influência na orientação de 45°.

Nos ensaios em U, surgiram os fenómenos de *springback* e de *spring-go*, um no ângulo interno do U e o outro no ângulo externo, respetivamente. Neste caso a anisotropia foi nula em ambos os materiais.

Por fim, tendo em conta os objetivos pretendidos para o projeto, conclui-se que estes foram atingidos apesar das limitações encontradas, uma vez que foi possível caracterizar o comportamento das ligas perante diferentes circunstâncias. O estudo da liga AA6022-T4 acabou por ser o mais completo.

5.2 Limitações

Ao longo da realização foram surgindo algumas limitações de que alguma forma afetaram a realização do projeto, umas com maior dificuldade a serem ultrapassadas que outras.

A maior limitação encontrada foi a troca de material por parte dos fornecedores das chapas da liga AA6061-T6. Esta troca levou a uma falta de informação no estudo da influência da anisotropia nos ensaios de flexão desta liga.

Uma outra limitação foi a janela de captura do sistema GOM ARAMIS 3D 5M, uma vez que com a janela com as dimensões máximas, possíveis no LEM, não se conseguia acompanhar a totalidade do ensaio de flexão com as dimensões inicialmente pensadas. Isto obrigou a uma diminuição da altura das matrizes de V para o *software* ARAMIS acompanhar o ensaio na totalidade. As dimensões finais estão apresentadas nos Anexos C.1 e C.2.

Uma última limitação foi a falta de meios precisos para a determinação dos ângulos para o cálculo do ângulo de *springback*. Perante isto recorreu-se ao *solidworks* na tentativa de minimizar os erros.

5.3 Trabalho Futuro

Uma sugestão de trabalho futuro passa por completar o estudo da influência da anisotropia na liga AA6061-T6 nos ensaios de flexão em 3 pontos. Esta sugestão surge, uma vez que devido à limitação das chapas com características distintas não foi permitido finalizar o estudo para as orientações de 15°, 30°, 60° e 75°.

Bibliografia

- [1] P.K. Mallic, *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles / ScienceDirect*. 2020.
- [2] T. P. Hovorun, K. V. Berladir, V. I. Pererva, S. G. Rudenko, and A. I. Martynov, “Modern materials for automotive industry,” *J. Eng. Sci.*, vol. 4, no. 2, pp. f8–f18, 2017, doi: 10.21272/jes.2017.4(2).f8.
- [3] “APAL,” 2016. <http://www.apal.pt/> (accessed Sep. 29, 2021).
- [4] “The Aluminum Association,” 2021. <https://www.aluminum.org/> (accessed Sep. 29, 2021).
- [5] D. Ashkenazi, “How aluminum changed the world: A metallurgical revolution through technological and cultural perspectives,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 143, no. March, pp. 101–113, 2019, doi: 10.1016/j.techfore.2019.03.011.
- [6] D. S. Mackenzie, *Handbook of Aluminum*. 2003.
- [7] J. R. Davis, “Metals Handbook Desk Edition, 2nd Edition - ASM International,” 2nd ed., ASM International, 1998, p. 1521.
- [8] T. Wrought and A. Series, “Understanding Wrought and Cast Aluminum Alloys Designations,” in *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers*, 2000, pp. 23–37.
- [9] J. G. Kaufman, “Understanding the Aluminum Temper Designation System,” in *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers*, 2000, pp. 39–76.
- [10] Anon, “Alloy and Temper Designation Systems for Aluminum.,” *ANSI Stand*, vol. 2, pp. 15–28, 1974, doi: 10.31399/asm.hb.mhde2.a0003122.
- [11] RUSAL, “Aluminium applications – Transport,” 2015. <https://aluminiumleader.com/application/transport/> (accessed Sep. 29, 2021).
- [12] H. Tian, B. Brownell, M. Baral, and Y. P. Korkolis, “Earing in cup-drawing of anisotropic Al-6022-T4 sheets,” *Int. J. Mater. Form. 2016 103*, vol. 10, no. 3, pp. 329–343, Jan. 2016, doi: 10.1007/S12289-016-1282-Y.
- [13] R. Cao, Q. Huang, J. H. Chen, and P. C. Wang, “Cold metal transfer spot plug welding of AA6061-T6-to-galvanized steel for automotive applications,” *J. Alloys Compd.*, vol. 585, pp. 622–632, Feb. 2014, doi: 10.1016/J.JALLCOM.2013.09.197.
- [14] P. Martins and J. Rodrigues, *Tecnologia Mecânica, Tecnologia da Deformação Plástica, Vol. I, 2ª*. Escolar Editora, 2010.
- [15] R. Ganesh and G. Saravana, “Prediction of Tensile and Deep Drawing Behaviour of Aluminium Tailor-Welded Blanks,” *Recent Trends Process. Degrad. Alum. Alloy.*, no. August 2015, 2011, doi: 10.5772/22687.

- [16] M. E. Erdin and A. Atmaca, "Effects of holding force on the springback behavior of annealed aluminum plates," *Procedia Eng.*, vol. 149, no. June, pp. 56–61, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.638.
- [17] S. Thipprakmas and W. Phanitwong, "Process parameter design of spring-back and spring-go in V-bending process using Taguchi technique," *Mater. Des.*, vol. 32, no. 8–9, pp. 4430–4436, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2011.03.069.
- [18] M. L. Garcia-Romeu, J. Ciurana, and I. Ferrer, "Springback determination of sheet metals in an air bending process based on an experimental work," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 191, no. 1–3, pp. 174–177, 2007, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.03.019.
- [19] H. Tschätsch, *Metal Forming Practise*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [20] Ö. Tekaslan, N. Gerger, and U. Şeker, "Determination of spring-back of stainless steel sheet metal in 'V' bending dies," *Mater. Des.*, vol. 29, no. 5, pp. 1043–1050, 2008, doi: 10.1016/j.matdes.2007.04.004.
- [21] J. Rodrigues and P. Martins, *Tecnologia Mecânica, Tecnologia da Deformação Plástica, Vol. II, Aplicações Industriais, 2ª Edição*. Escola Editora, 2010.
- [22] A. Vishtal and E. Retulainen, "Deep-drawing of paperboard: The role of material properties," no. January, 2013, doi: 10.15376/biores.7.3.4424-4450.
- [23] M. Özdemir, "Mathematical Modeling of the Effect of Different Parameters on Spring Back in Sheet Metal Formability Process American Journal of Engineering Research (AJER)," *Am. J. Eng. Res.*, vol. 6, no. 10, pp. 198–205, 2017.
- [24] S. Thipprakmas and S. Rojananan, "Investigation of spring-go phenomenon using finite element method," *Mater. Des.*, vol. 29, no. 8, pp. 1526–1532, 2008, doi: 10.1016/j.matdes.2008.02.002.
- [25] R. H. Wagoner, H. Lim, and M. G. Lee, "Advanced issues in springback," *Int. J. Plast.*, vol. 45, pp. 3–20, 2013, doi: 10.1016/j.ijplas.2012.08.006.
- [26] T. Trzepiecinski and H. G. Lemu, "Prediction of springback in V-die air bending process by using finite element method," *MATEC Web Conf.*, vol. 121, pp. 1–8, 2017, doi: 10.1051/mateconf/201712103023.
- [27] S. Dhar Malingam *et al.*, "V-Bend Die Forming Performance of Oil Palm Fiber Composite," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 699, no. November, pp. 59–63, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.699.59.
- [28] D.-J. Zhang, Z.-S. Cui, Z.-Y. Chen, and R. Xue-Yu, "An analytical model for predicting sheet springback after V-bending," *J Zhejiang Univ Sci A*, vol. 8, no. 2, pp. 237–244, 2007, doi: 10.1631/jzus.2007.A0237.
- [29] K. Imai, J. Koyama, and Y. Jin, "High-accuracy V-bending system by real time identifying material property," 2008, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.11.132.

- [30] J. R. Cho, S. J. Moon, Y. H. Moon, and S. S. Kang, "Finite element investigation on spring-back characteristics in sheet metal U-bending process," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 141, no. 1, pp. 109–116, Oct. 2003, doi: 10.1016/S0924-0136(03)00163-8.
- [31] B. Rahmani, G. Alinejad, and A. Gorji, "An investigation on springback / negative springback phenomena using finite element method and experimental approach," vol. 223, pp. 841–850, 2009, doi: 10.1243/09544054JEM1321.
- [32] K. Özdin, E. Büyük, F. Abdalov, and H. Bayram, "Investigation of Spring-back and Spring-go of AISI 400 S Sheet Metal in ' V ' Bending Dies Depending on Bending Angle and Punch Radius," vol. 532, pp. 549–553, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.532.549.
- [33] Ö. Tekaslan, U. Şeker, and A. Özdemir, "Determining springback amount of steel sheet metal has 0.5 mm thickness in bending dies," *Mater. Des.*, vol. 27, no. 3, pp. 251–258, 2006, doi: 10.1016/j.matdes.2004.10.006.
- [34] D. K. Leu and Z. W. Zhuang, "Springback prediction of the vee bending process for high-strength steel sheets," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 3, pp. 1077–1084, 2016, doi: 10.1007/s12206-016-0212-8.
- [35] D. K. Leu and C. M. Hsieh, "The influence of coining force on spring-back reduction in V-die bending process," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 196, no. 1–3, pp. 230–235, 2008, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.05.033.
- [36] J. Wang, S. Verma, R. Alexander, and J. T. Gau, "Springback control of sheet metal air bending process," *J. Manuf. Process.*, vol. 10, no. 1, pp. 21–27, 2008, doi: 10.1016/j.manpro.2007.09.001.
- [37] H. Y. Yu, "Variation of elastic modulus during plastic deformation and its influence on springback," *Mater. Des.*, vol. 30, no. 3, pp. 846–850, 2009, doi: 10.1016/j.matdes.2008.05.064.
- [38] R. Shukla and V. Gautam, "Experimental and Numerical Analysis of Negative Spring back in Interstitial Free (IF) Steel," vol. 2, no. 1, pp. 232–236, 2014.
- [39] M. Bakhshi-Jooybari, B. Rahmani, V. Daezadeh, and A. Gorji, "The study of spring-back of CK67 steel sheet in V-die and U-die bending processes," *Mater. Des.*, vol. 30, no. 7, pp. 2410–2419, 2009, doi: 10.1016/j.matdes.2008.10.018.

Anexos A – Certificado de Conformidade



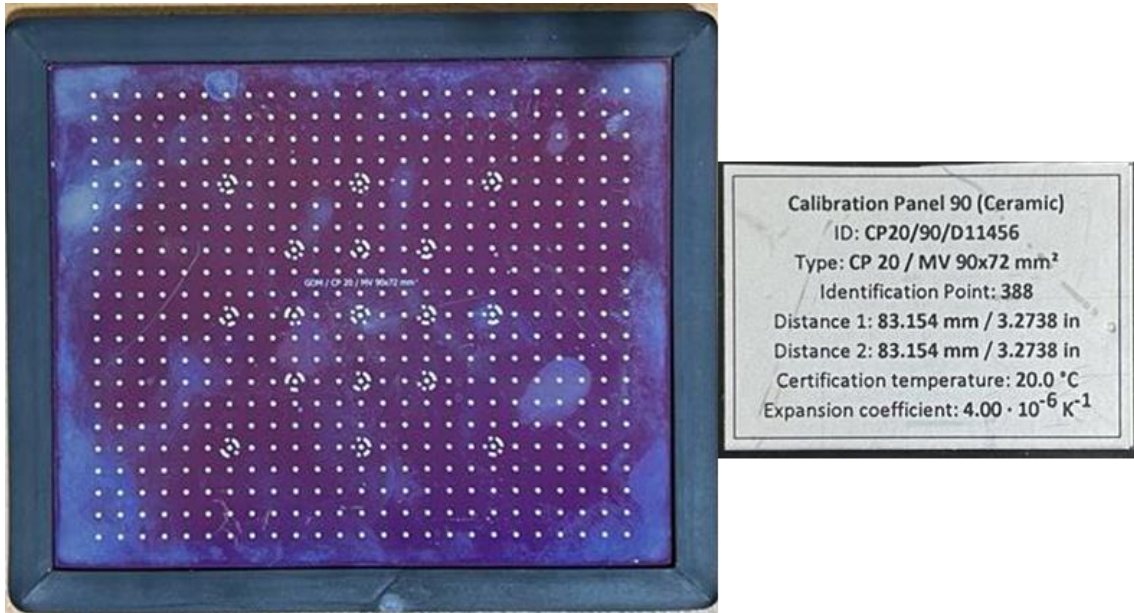
Anexos B – GOM ARAMIS 3D 5M

Anexo B.1- Tabela da Lente 50mm

3.6 50 mm Lens (ARAMIS 5M, 5M LT)

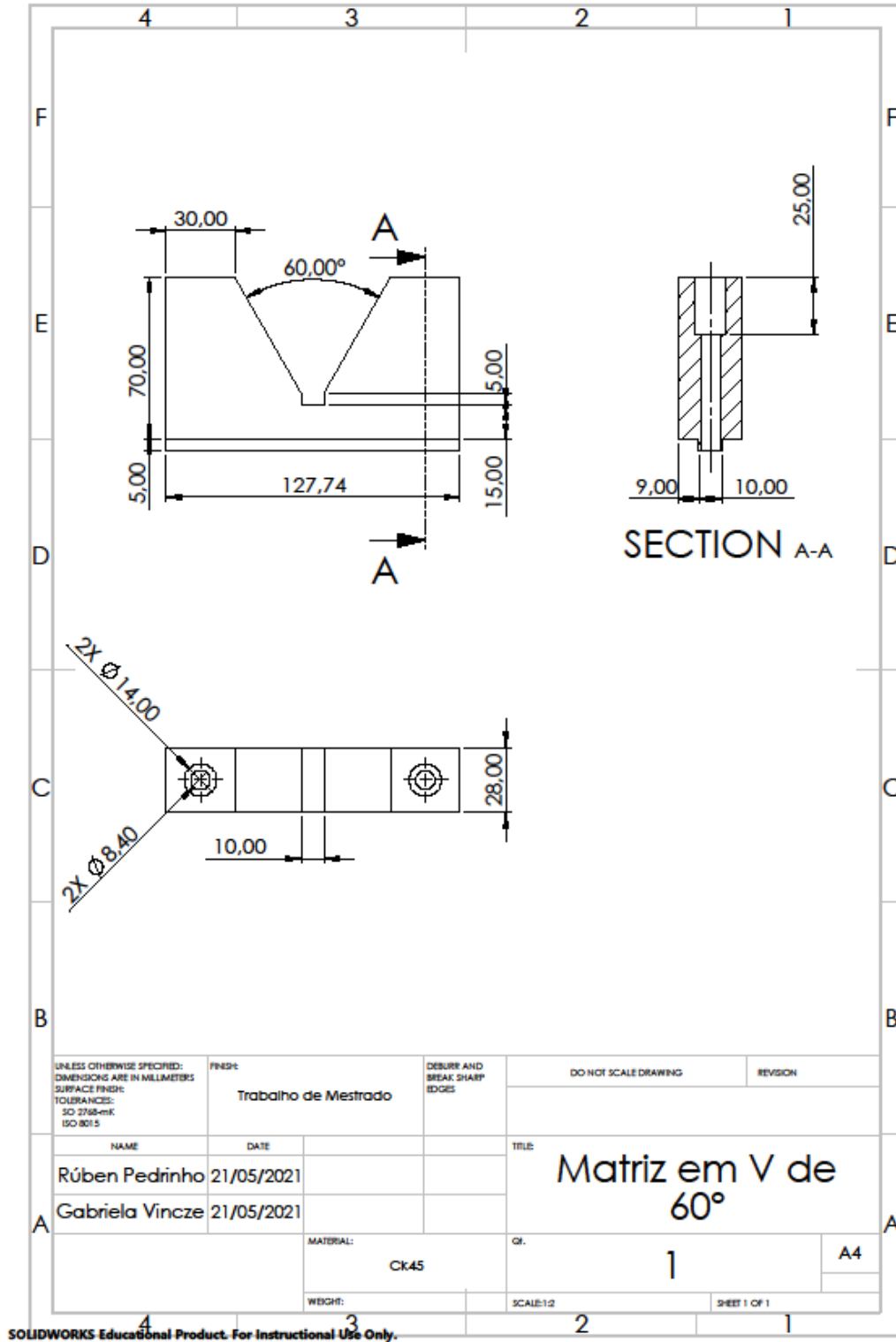
Sensor	Lens	Measuring volume [mmxmm]	Comment	Min. length camera support [mm]	Distance ring [mm]	Measuring distance [mm]	Slider distance [mm]	Camera angle [°]	Calibration Object	Aperture dependent depth of field [mm]											
										1,4	2	2,8	4	5,6	8	11	16	22	32		
ARAMIS 5M	Titanar 50mm	15 x 13	--	500	20	205	MS	26	CQ 15x12	--	--	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,9	--	--		
		20 x 17	--	500	10	230	64	25	CQ 23x18	--	--	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,4	2,7	--	--	
		25 x 21	--	500	10	250	74	25	CQ/CP20 30x24	--	--	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1,4	4,5	--	--	
		35 x 29	--	500	--	310	98	25	CQ/CP20 30x24	--	--	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1,5	5	11	--	--	
		50 x 42	--	500	--	395	136	25	CQ/CP20 55x44	--	--	n.a.	n.a.	n.a.	1,4	6,8	14	25	--	--	
		65 x 55	--	500	--	485	176	25	CQ/CP20 55x44	--	--	n.a.	0,3	6,1	15	26	45	--	--	--	
		80 x 65	--	500	--	575	216	25	CP20 90x72	--	--	n.a.	4,1	13	26	43	70	--	--	--	
		100 x 85	--	500	--	695	270	25	CP20 90x72	--	--	1,2	11	25	45	70	>100	--	--	--	
		125 x 100	--	500	--	845	336	25	CP20 90x72	--	--	8,3	24	45	76	120	>125	--	--	--	
		150 x 130	--	800	--	995	402	25	CP20 175x140	--	--	18	40	70	110	>150	>150	--	--	--	
		175 x 150	--	800	--	1150	472	25	CP20 175x140	--	--	31	61	100	160	>175	>175	--	--	--	
		200 x 170	--	800	--	1300	540	25	CP20 250x200	--	--	46	85	140	>200	>200	>200	--	--	--	
		250 x 210	--	800	--	1600	674	25	CP20 250x200	--	--	85	150	230	>250	>250	>250	--	--	--	
		300 x 250	--	800	--	1920	688	21	CP20 350x280	--	--	150	230	>300	>300	>300	>300	--	--	--	
		350 x 290	2)	1200 fix ed	--	2160	--	31	CP20 350x280	--	--	170	290	>350	>350	>350	>350	--	--	--	
		400 x 330	2)	1200 fix ed	--	2490	--	27	CP20 350x280	--	--	260	>400	>400	>400	>400	>400	--	--	--	
		500 x 420	2)	1200 fix ed	--	3140	--	21	CC20 500x400	--	--	470	>500	>500	>500	>500	>500	--	--	--	
750 x 630	2)	1600 fix ed	--	4685	--	19	CC20 1000x800	--	--	>750	>750	>750	>750	>750	>750	--	--	--			
		Legend	1)	without laser pointer						--	Lens cannot be adjusted to the aperture value.										
			2)	For further information please refer to the user information Hardware for ARAMIS (Fix ed Base).						n.a.	It is not possible to focus the complete measuring volume.										
		MS		Slider distance at Mech. Stop						*	Resolution limited by aperture.										

Anexo B.2 – Calibrador MV90X72

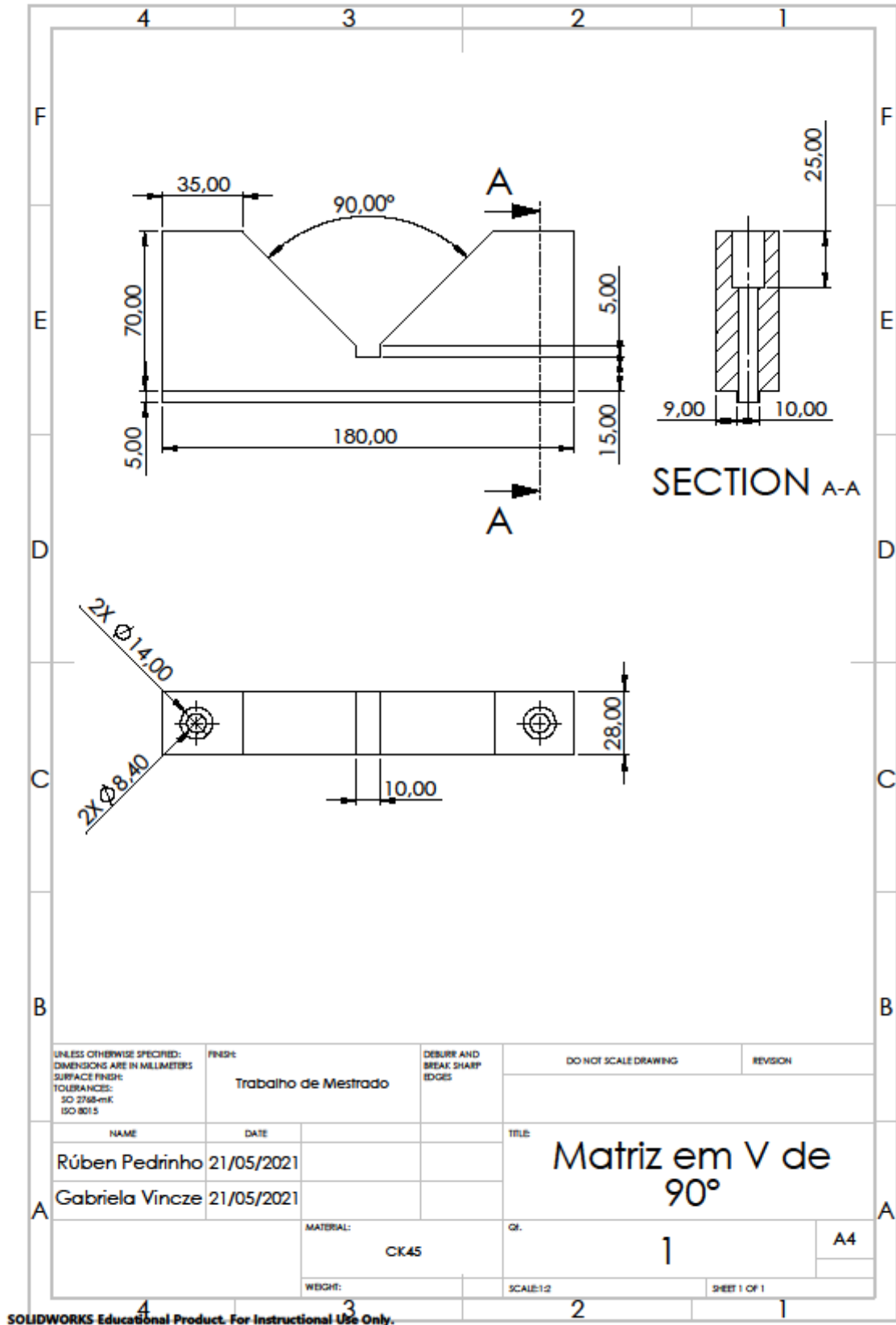


Anexos C – Desenhos técnicos das ferramentas

Anexo C.1 – Matriz em V de 60°

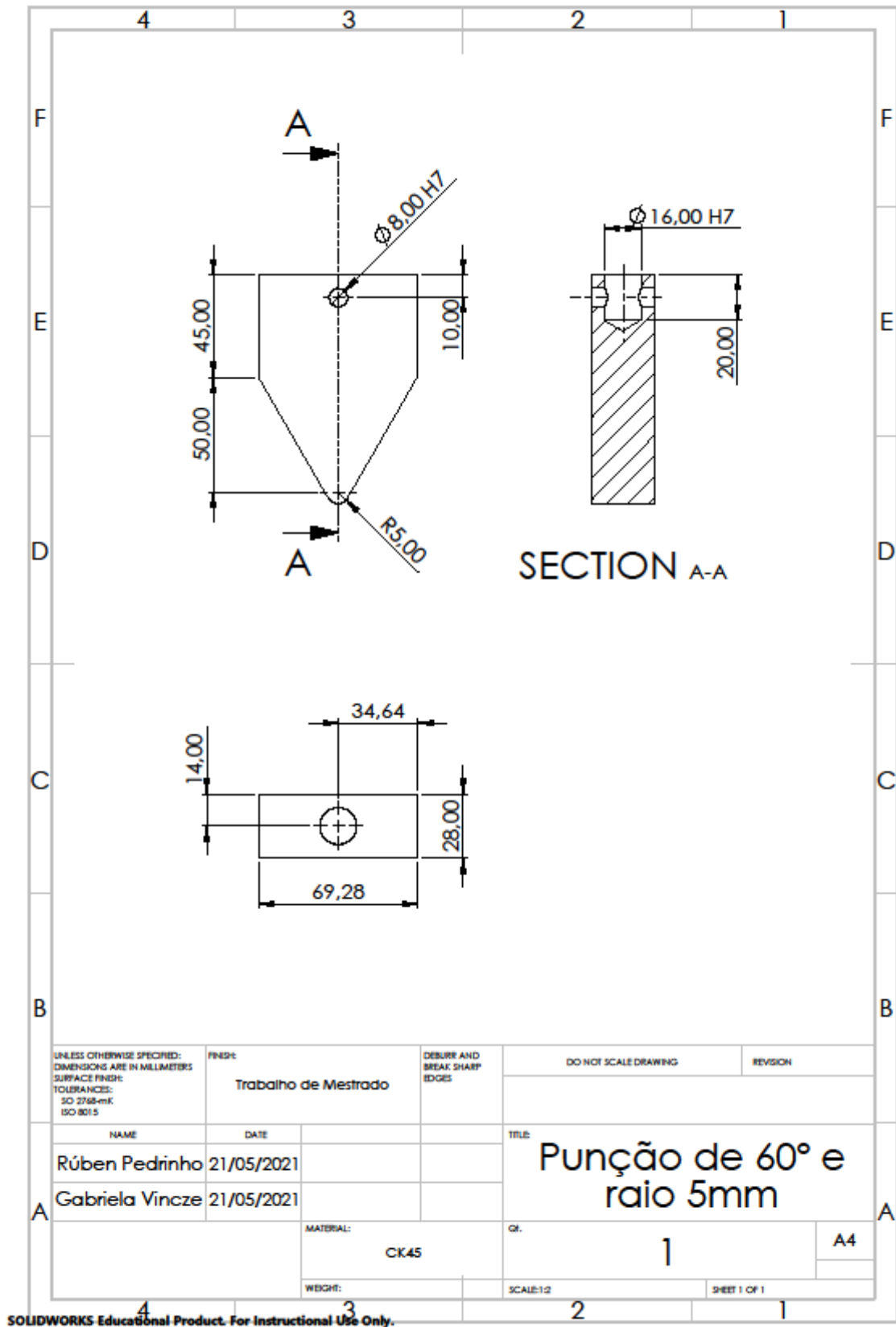


Anexo C.2 – Matriz em V de 90°

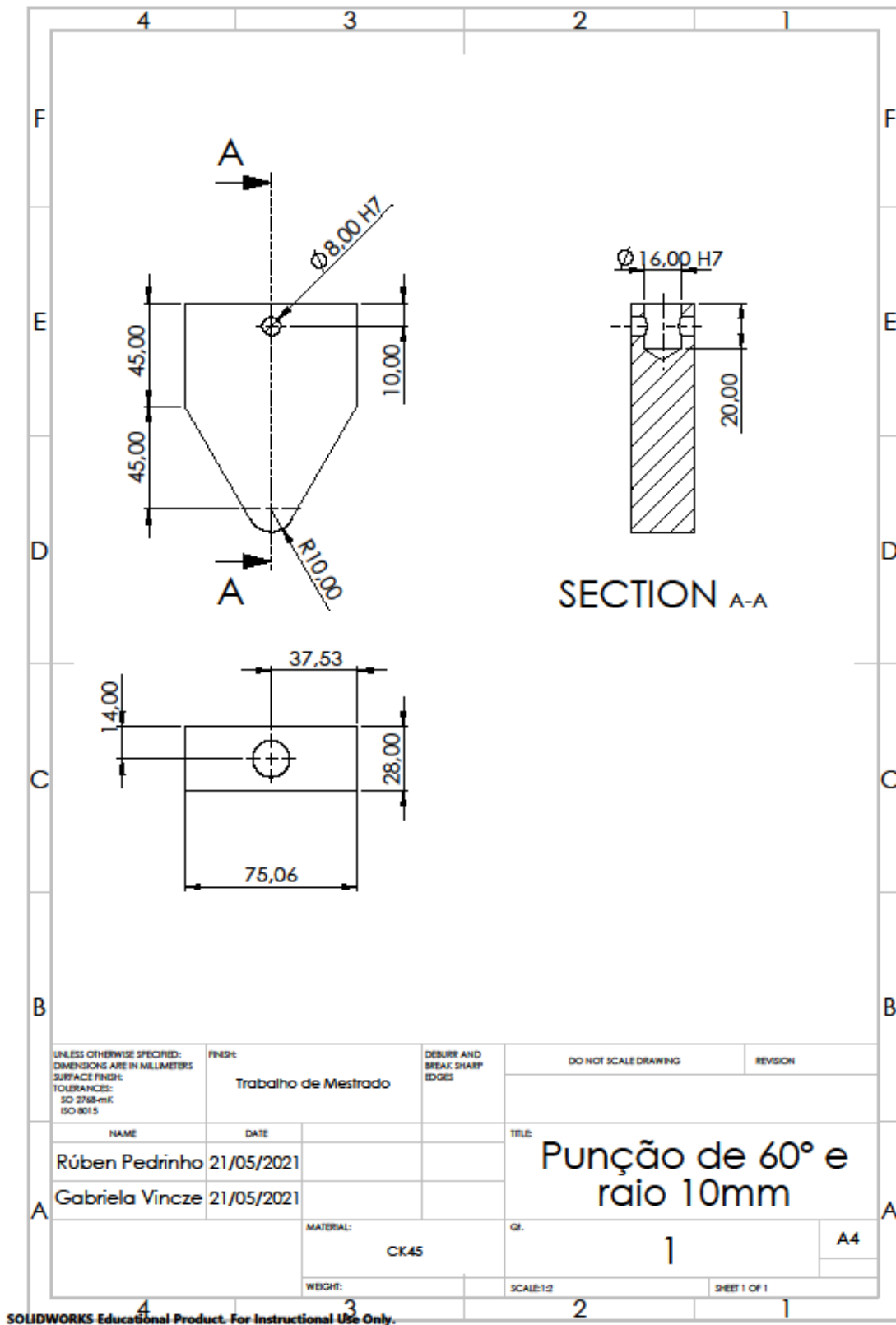


SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

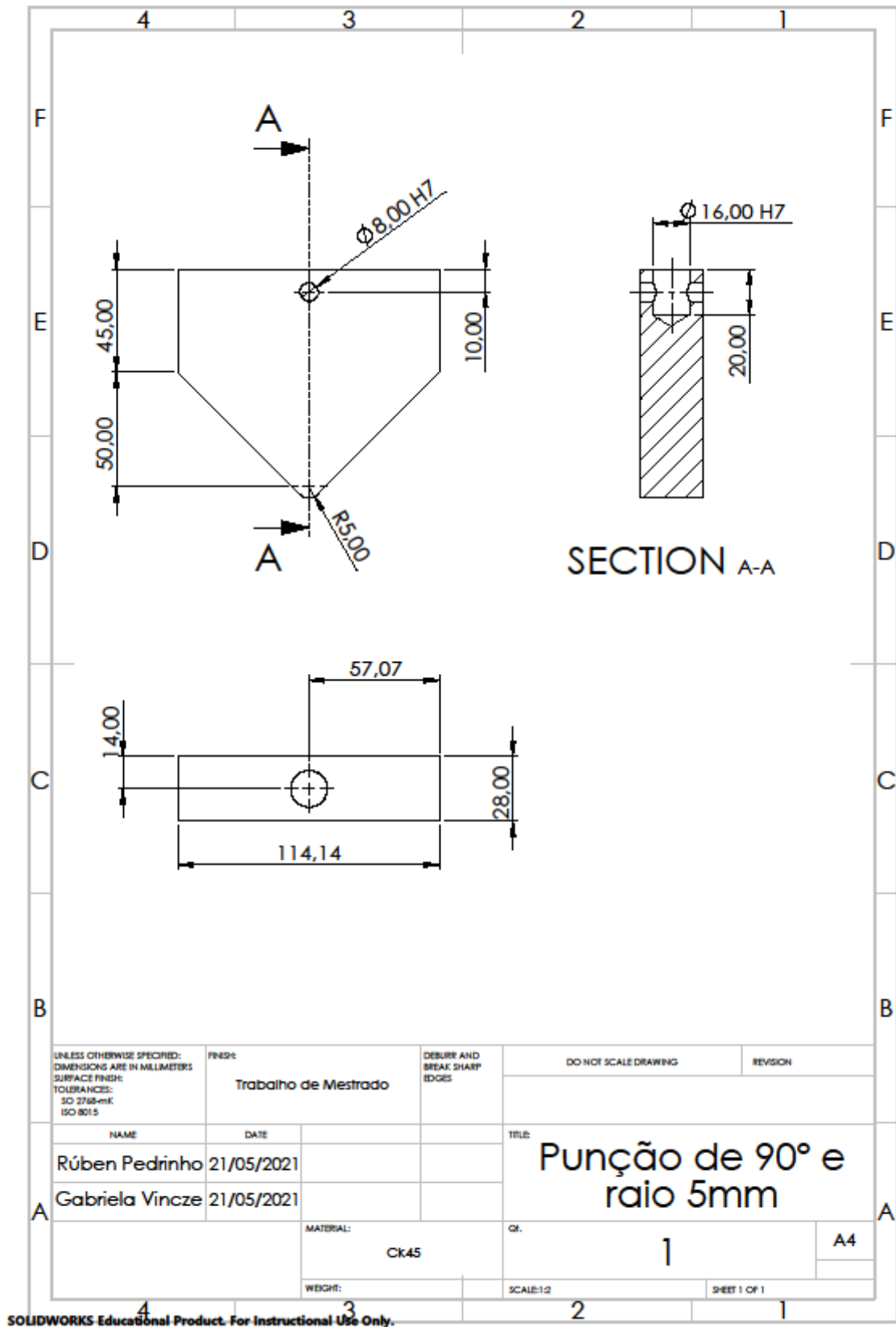
Anexo C.3 – Punção em V de 60° e raio de 5mm



Anexo C.4 – Punção em V de 60° e raio de 10mm

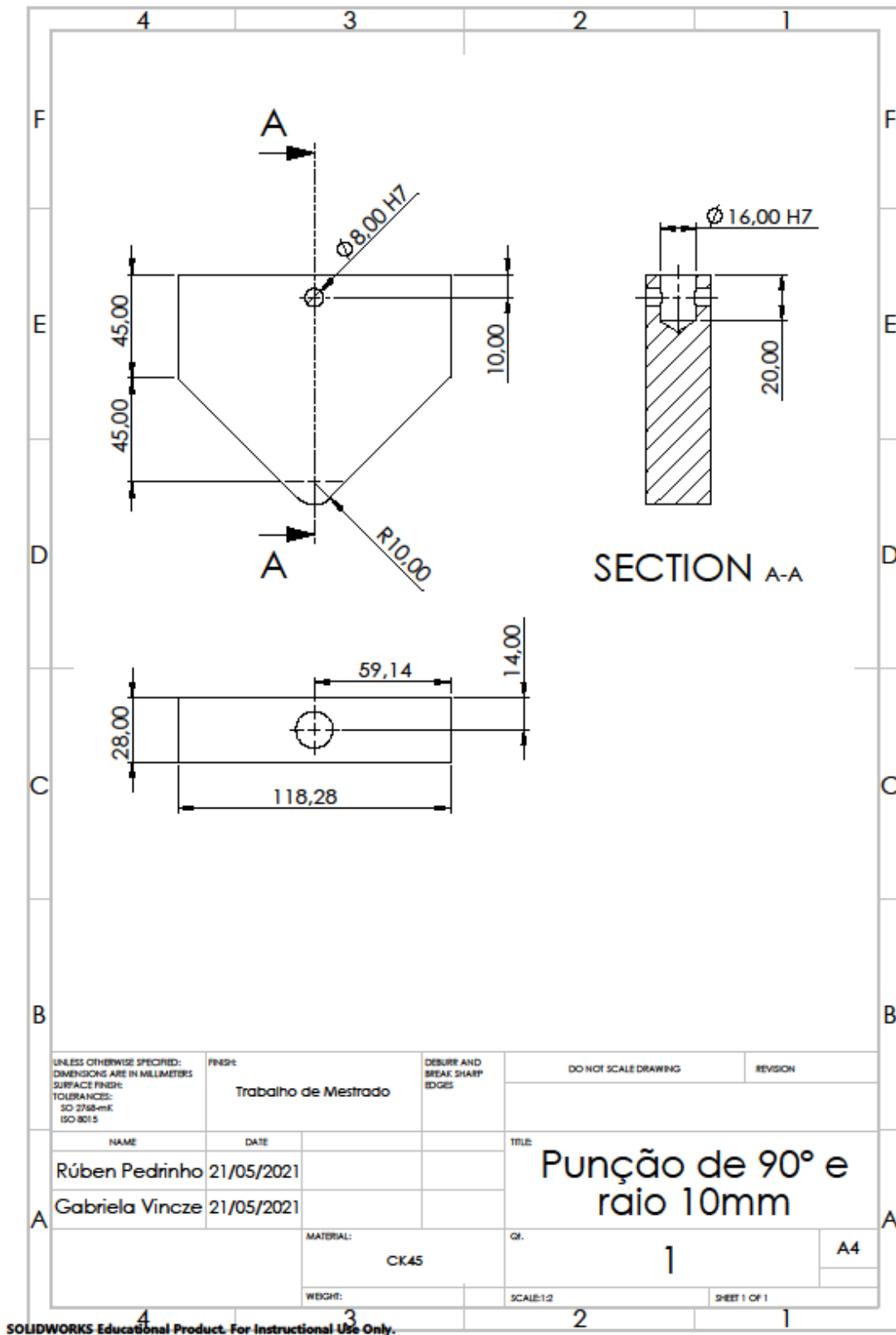


Anexo C.5 – Punção em V de 90° e raio de 5mm

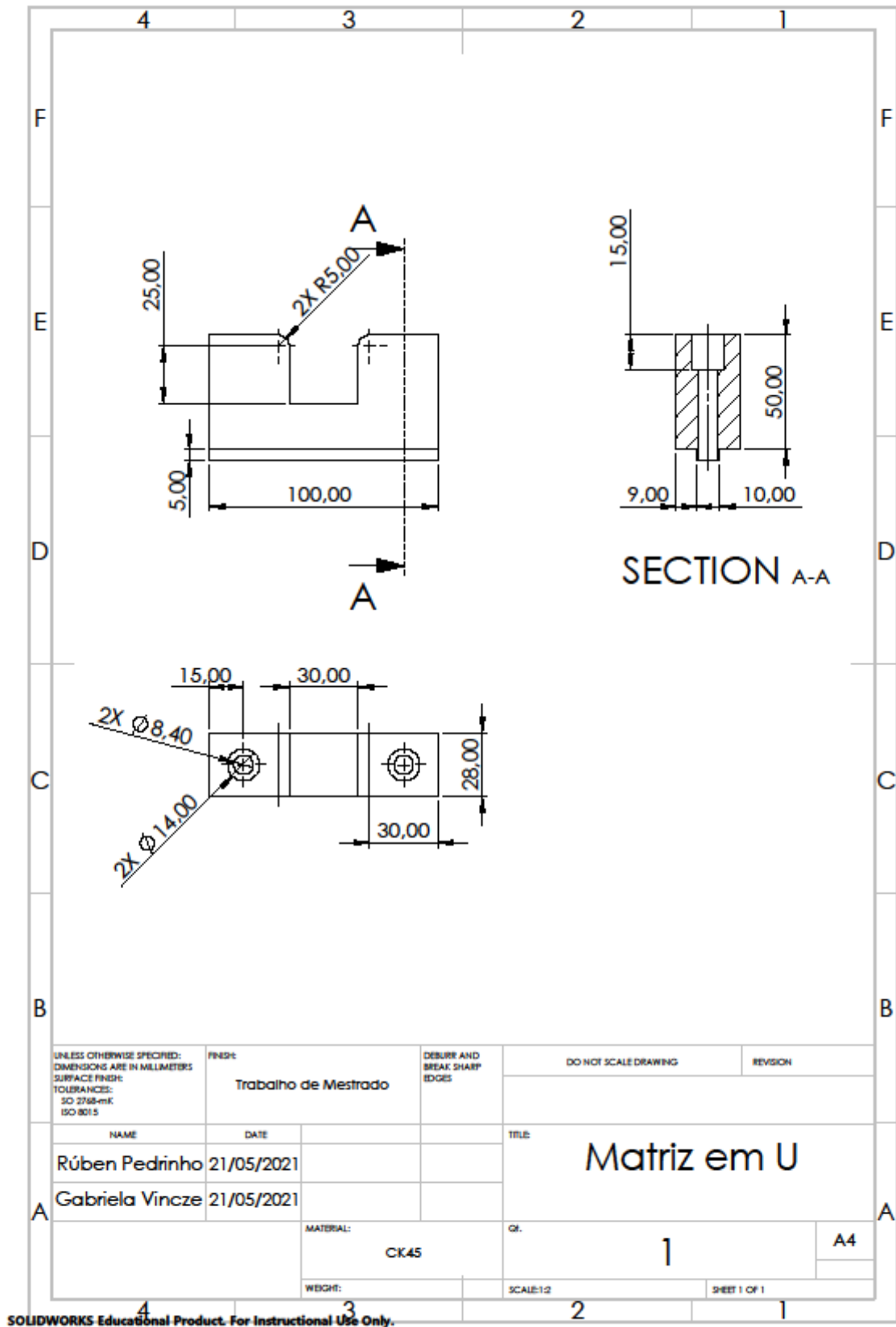


SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

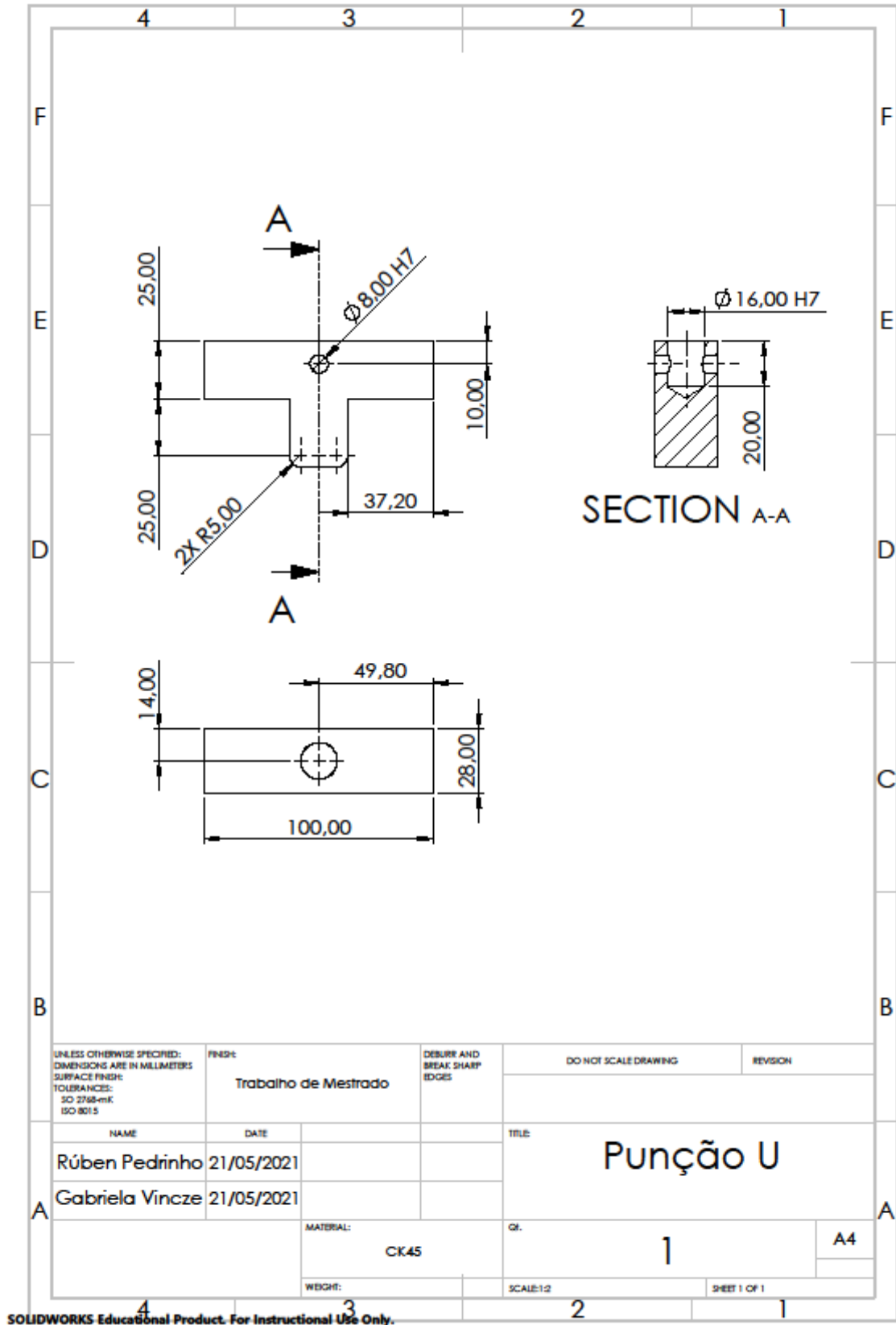
Anexo C.6 – Punção em V de 90° e raio de 10mm



Anexo C.7– Matriz em U



Anexo C.8 – Punção em U



Anexos D - Tabelas das espessuras dos provetes para os ensaios de tração

Anexos D.1 – AA6061-T6

AA6061-T6													
0°		15°		30°		45°		60°		75°		90°	
Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)
2.088	12.52	2.013	12.50	2.010	12.51	2.111	12.52	2.019	12.53	2.014	12.54	2.098	12.51
2.094	12.50	2.013	12.51	2.007	12.52	2.108	12.51	2.020	12.52	2.014	12.56	2.101	12.51
2.092	12.49	2.010	12.50	2.010	12.53	2.113	12.52	2.021	12.51	2.013	12.54	2.099	12.51
2.095	12.52	2.015	12.53	2.014	12.51	2.103	12.51	2.020	12.51	2.008	12.53	2.098	12.51
2.096	12.54	2.012	12.42	2.014	12.50	2.103	12.53	2.019	12.51	2.009	12.54	2.105	12.53
2.093	12.50	2.014	12.52	2.013	12.50	2.109	12.51	2.017	12.52	2.009	12.52	2.109	12.53
2.096	12.54	2.013	12.51	2.011	12.51	2.105	12.52	2.013	12.52	2.019	12.53	2.101	12.51
2.102	12.53	2.013	12.51	2.013	12.50	2.108	12.51	2.014	12.51	2.007	12.51	2.100	12.51
2.100	12.50	2.016	12.51	2.011	12.52	2.106	12.51	2.015	12.50	2.009	12.50	2.102	12.50
Média	2.095	2.013	12.50	2.011	12.51	2.107	12.52	2.018	12.51	2.011	12.53	2.101	12.51

Anexos D.2 – AA6022-T4

AA6022-T4														
0°		15°		30°		45°		60°		75°		90°		
Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	
2.100	12.50	2.100	12.48	2.096	12.52	2.107	12.50	2.107	12.52	2.103	12.53	2.099	12.50	
2.105	12.52	2.101	12.49	2.094	12.53	2.107	12.51	2.107	12.51	2.102	12.51	2.101	12.50	
2.102	12.51	2.096	12.49	2.094	12.51	2.105	12.50	2.105	12.53	2.100	12.51	2.100	12.49	
2.102	12.52	2.099	12.49	2.096	12.49	2.105	12.53	2.098	12.50	2.104	12.52	2.102	12.50	
2.103	12.51	2.102	12.50	2.092	12.51	2.104	12.53	2.099	12.50	2.105	12.50	2.102	12.51	
2.102	12.52	2.096	12.49	2.095	12.49	2.102	12.53	2.101	12.50	2.102	12.52	2.108	12.52	
2.102	12.52	2.100	12.49	2.092	12.51	2.107	12.51	2.100	12.51	2.090	12.53	2.100	12.52	
2.100	12.52	2.092	12.50	2.091	12.50	2.107	12.51	2.099	12.50	2.090	12.51	2.100	12.52	
2.100	12.50	2.099	12.49	2.095	12.50	2.105	12.50	2.101	12.50	2.095	12.52	2.102	12.52	
Média	2.102	12.51	2.098	12.49	2.094	12.51	2.105	12.51	2.102	12.51	2.099	12.52	2.102	12.51

Anexos E – Gráficos de Tensão-Deformação Nominal

Anexo E.1 - AA6022-T4

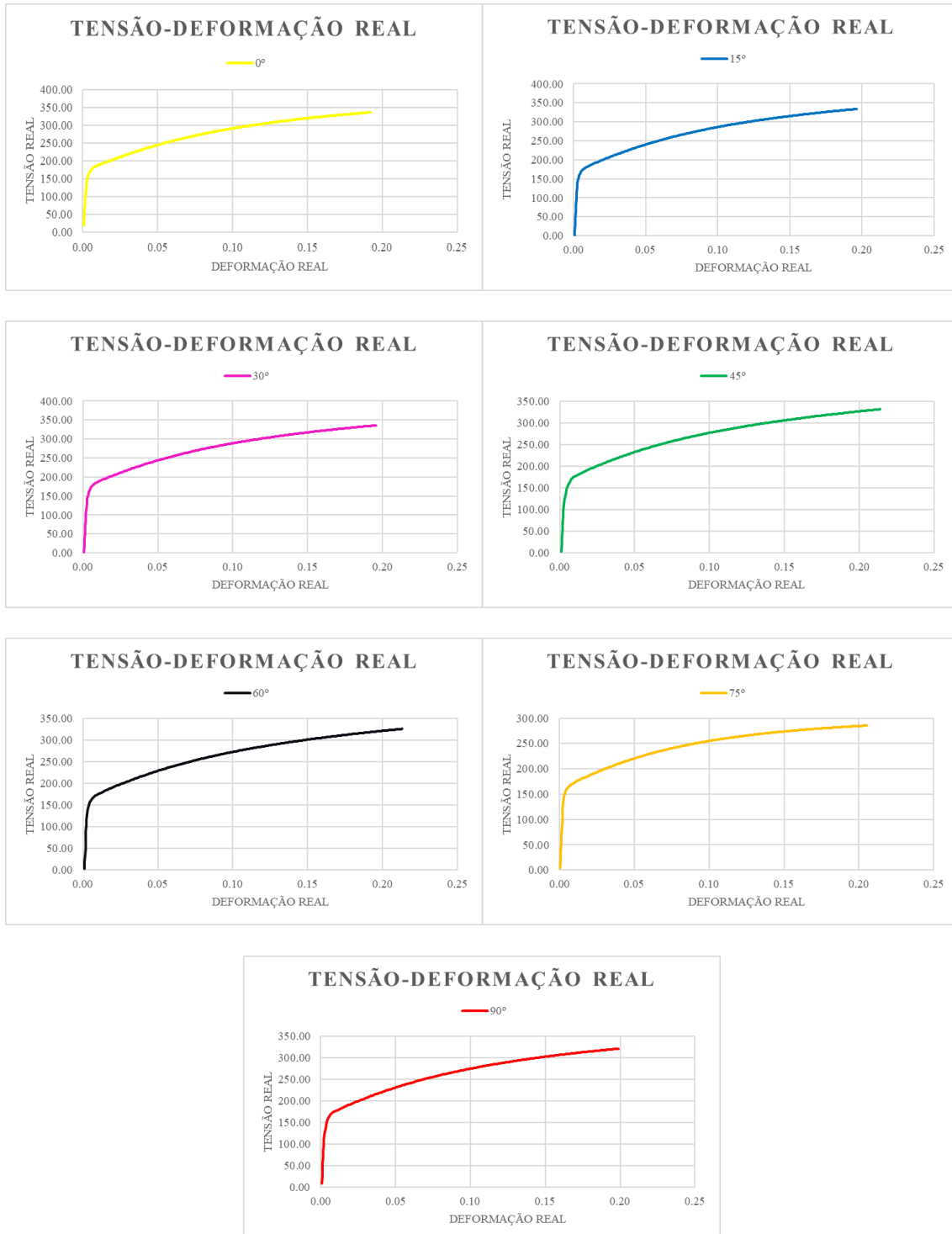


Anexo E.2 - AA6061-T6



Anexos F– Gráficos de Tensão-Deformação Real

Anexo F.1 - AA6022-T4



Anexo F.2 - AA6061-T6



Anexos G – Valores de *Springback* / *Spring-go*

Anexo G.1 – Comparação dos Conjuntos de Ferramentas

AA6022-T4					Springback / Spring-go		Média
					(°)	(%)	
P60R5	0°	t1	θ_c (°)	58.71	-2.37	-4.04	-4.20
			θ_s (°)	56.34			
		t2	θ_c (°)	58.86	-2.57	-4.37	
			θ_s (°)	56.29			
	90°	t1	θ_c (°)	58.84	-2.50	-4.25	
			θ_s (°)	56.34			
		t2	θ_c (°)	59.07	-2.50	-4.23	
			θ_s (°)	56.57			
AA6061-T6					Springback / Spring-go		Média
					(°)	(%)	
P60R5	0°	t1	θ_c (°)	58.58	1.90	3.24	3.32
			θ_s (°)	60.48			
		t2	θ_c (°)	58.63	1.99	3.39	
			θ_s (°)	60.62			
	90°	t1	θ_c (°)	58.62	1.60	2.73	2.87
			θ_s (°)	60.22			
		t2	θ_c (°)	58.61	1.76	3.00	
			θ_s (°)	60.37			
AA6022-T4					Springback / Spring-go		Média
					(°)	(%)	
P60R10	0°	t1	θ_c (°)	58.94	1.83	3.10	3.04
			θ_s (°)	60.77			
		t2	θ_c (°)	58.81	1.75	2.98	
			θ_s (°)	60.56			
	90°	t1	θ_c (°)	58.46	1.66	2.84	2.75
			θ_s (°)	60.12			
		t2	θ_c (°)	58.84	1.57	2.67	
			θ_s (°)	60.41			
AA6061-T6					Springback / Spring-go		Média
					(°)	(%)	
P60R10	0°	t1	θ_c (°)	58.9	8.58	14.57	14.87
			θ_s (°)	67.48			
		t2	θ_c (°)	58.84	8.93	15.18	
			θ_s (°)	67.77			
	90°	t1	θ_c (°)	58.76	8.85	15.06	15.14
			θ_s (°)	67.61			
		t2	θ_c (°)	58.59	8.92	15.22	
			θ_s (°)	67.51			

AA6022-T4					Springback / Spring-go		Média
					(°)	(%)	
P90R5	0°	t1	θ_c (°)	88.64	-4.91	-5.54	-5.64
			θ_s (°)	83.73			
		t2	θ_c (°)	88.95	-5.10	-5.73	
			θ_s (°)	83.85			
	90°	t1	θ_c (°)	88.73	-5.11	-5.76	-5.91
			θ_s (°)	83.62			
		t2	θ_c (°)	88.7	-5.37	-6.05	
			θ_s (°)	83.33			
AA6061-T6					Springback / Spring-go		Média
					(°)	(%)	
P90R5	0°	t1	θ_c (°)	88.64	-2.07	-2.34	-2.34
			θ_s (°)	86.57			
		t2	θ_c (°)	88.82	-2.09	-2.35	
			θ_s (°)	86.73			
	90°	t1	θ_c (°)	88.46	-1.74	-1.97	-1.95
			θ_s (°)	86.72			
		t2	θ_c (°)	88.64	-1.72	-1.94	
			θ_s (°)	86.92			
AA6022-T4					Springback / Spring-go		Média
					(°)	(%)	
P90R10	0°	t1	θ_c (°)	88.93	-1.99	-2.24	-2.21
			θ_s (°)	86.94			
		t2	θ_c (°)	89.02	-1.95	-2.19	
			θ_s (°)	87.07			
	90°	t1	θ_c (°)	89.14	-1.93	-2.17	-2.08
			θ_s (°)	87.21			
		t2	θ_c (°)	89.03	-1.78	-2.00	
			θ_s (°)	87.25			
AA6061-T6					Springback / Spring-go		Média
					(°)	(%)	
P90R10	0°	t1	θ_c (°)	88.8	1.18	1.33	1.36
			θ_s (°)	89.98			
		t2	θ_c (°)	88.8	1.24	1.40	
			θ_s (°)	90.04			
	90°	t1	θ_c (°)	88.67	1.19	1.34	1.36
			θ_s (°)	89.86			
		t2	θ_c (°)	88.92	1.23	1.38	
			θ_s (°)	90.15			

Anexo G.2 – Repetibilidade – P60R10

AA6022-T4					Springback / Spring-go	
					(°)	(%)
P60R10	t1	0°	θ_c (°)	59.07	1.44	2.44
			θ_s (°)	60.51		
		15°	θ_c (°)	59.40	1.46	2.46
			θ_s (°)	60.86		
		30°	θ_c (°)	59.02	1.70	2.88
			θ_s (°)	60.72		
		45°	θ_c (°)	58.89	1.60	2.72
			θ_s (°)	60.49		
		60°	θ_c (°)	59.17	1.71	2.89
	θ_s (°)		60.88			
	75°	θ_c (°)	59.23	1.43	2.41	
		θ_s (°)	60.66			
	90°	θ_c (°)	59.03	1.55	2.63	
		θ_s (°)	60.58			
	t2	0°	θ_c (°)	59.00	1.45	2.46
			θ_s (°)	60.45		
		15°	θ_c (°)	58.97	1.34	2.27
			θ_s (°)	60.31		
30°		θ_c (°)	59.01	1.67	2.83	
		θ_s (°)	60.68			
45°		θ_c (°)	58.98	1.31	2.22	
		θ_s (°)	60.29			
60°		θ_c (°)	59.01	1.36	2.30	
	θ_s (°)	60.37				
75°	θ_c (°)	59.02	1.39	2.36		
	θ_s (°)	60.41				
90°	θ_c (°)	58.96	1.46	2.48		
	θ_s (°)	60.42				

AA6061-T6					Springback / Spring-go	
					(°)	(%)
P60R10	t1	0°	θ_c (°)	58.83	8.92	15.16
			θ_s (°)	67.75		
		45°	θ_c (°)	59.33	3.15	5.31
			θ_s (°)	62.48		
		90°	θ_c (°)	58.94	8.53	14.47
			θ_s (°)	67.47		
	t2	0°	θ_c (°)	58.88	8.82	14.98
			θ_s (°)	67.70		
		45°	θ_c (°)	58.89	3.66	6.21
			θ_s (°)	62.55		
		90°	θ_c (°)	58.90	8.62	14.63
			θ_s (°)	67.52		

Anexo G.3 - P60R5

AA6022-T4				Springback / Spring-go		
				(°)	(%)	
P60R5	0°	θ_c (°)	58.86	-2.57	-4.4	
		θ_s (°)	56.29			
	15°	θ_c (°)	58.94	-2.39	-4.1	
		θ_s (°)	56.55			
	30°	θ_c (°)	58.93	-2.19	-3.7	
		θ_s (°)	56.74			
	45°	θ_c (°)	58.77	-2.28	-3.9	
		θ_s (°)	56.49			
	60°	θ_c (°)	59.31	-2.21	-3.7	
		θ_s (°)	57.1			
	75°	θ_c (°)	58.85	-2.23	-3.8	
		θ_s (°)	56.62			
	90°	θ_c (°)	59.07	-2.5	-4.2	
		θ_s (°)	56.57			
	AA6061-T6				Springback / Spring-go	
					(°)	(%)
P60R5	0°	θ_c (°)	58.89	1.67	2.84	
		θ_s (°)	60.56			
	45°	θ_c (°)	58.64	-2.94	-5.01	
		θ_s (°)	55.70			
	90°	θ_c (°)	58.82	1.49	2.53	
		θ_s (°)	60.31			

Anexo G.4 – P90R10

AA6022-T4				Springback / Spring-go		
				(°)	(%)	
P90R10	0°	θ_c (°)	88.92	-2.2	-2.5	
		θ_s (°)	86.72			
	15°	θ_c (°)	89.16	-1.94	-2.2	
		θ_s (°)	87.22			
	30°	θ_c (°)	88.92	-1.84	-2.1	
		θ_s (°)	87.08			
	45°	θ_c (°)	88.97	-1.74	-2.0	
		θ_s (°)	87.23			
	60°	θ_c (°)	89.22	-1.54	-1.7	
		θ_s (°)	87.68			
	75°	θ_c (°)	88.55	-1.63	-1.8	
		θ_s (°)	86.92			
	90°	θ_c (°)	88.76	-2.02	-2.3	
		θ_s (°)	86.74			
	AA6061-T6				Springback / Spring-go	
					(°)	(%)
P90R10	0°	θ_c (°)	88.59	1.12	1.26	
		θ_s (°)	89.71			
	45°	θ_c (°)	88.86	1.05	1.18	
		θ_s (°)	89.91			
	90°	θ_c (°)	88.71	1.20	1.35	
		θ_s (°)	89.91			

Anexo G.5 – U

AA6022-T4					Springback / Spring-go	
					(°)	(%)
U	0°	Ângulo Interno	θ_c (°)	88.99	1.01	1.1
			θ_s (°)	90		
	15°		θ_c (°)	89.14	1.31	1.5
			θ_s (°)	90.45		
	30°		θ_c (°)	88.69	1.76	2.0
			θ_s (°)	90.45		
	45°		θ_c (°)	88.73	1.27	1.4
			θ_s (°)	90		
	60°		θ_c (°)	89.03	1.21	1.4
			θ_s (°)	90.24		
	75°		θ_c (°)	88.89	1.11	1.2
			θ_s (°)	90		
	90°	θ_c (°)	88.45	1.55	1.8	
		θ_s (°)	90			
	0°	Ângulo Externo	θ_c (°)	88.25	-3.36	-3.8
			θ_s (°)	84.89		
	15°		θ_c (°)	88.56	-3.41	-3.9
			θ_s (°)	85.15		
	30°		θ_c (°)	88.35	-3.05	-3.5
			θ_s (°)	85.3		
	45°		θ_c (°)	87.87	-2.56	-2.9
			θ_s (°)	85.31		
	60°		θ_c (°)	88.03	-2.64	-3.0
			θ_s (°)	85.39		
75°	θ_c (°)		87.81	-2.57	-2.9	
	θ_s (°)		85.24			
90°	θ_c (°)	87.89	-2.68	-3.0		
	θ_s (°)	85.21				

AA6061-T6					Springback / Spring-go		
					(°)	(%)	
U	0°	Ângulo Interno	θ_c (°)	89.48	1.46	1.63	
			θ_s (°)	90.94			
	45°		θ_c (°)	89.47	1.49	1.67	
			θ_s (°)	90.96			
	90°		θ_c (°)	89.13	1.67	1.87	
			θ_s (°)	90.80			
	0°	Ângulo Externo	θ_c (°)	88.54	-2.48	-2.80	
			θ_s (°)	86.06			
			45°	θ_c (°)	89.62	-1.83	-2.04
				θ_s (°)	87.79		
			90°	θ_c (°)	88.65	-2.60	-2.93
				θ_s (°)	86.05		