



## Simulação de processos de estampagem pelo método de elementos finitos

ANDRÉ FILIPE RESENDE BARROS

outubro de 2023

# SIMULAÇÃO DE PROCESSOS DE ESTAMPAGEM PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

André Filipe Resende Barros

**2023**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



# SIMULAÇÃO DE PROCESSOS DE ESTAMPAGEM PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

André Filipe Resende Barros

1181167

Trabalho apresentado ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizado sob a orientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP, e coorientação dos Professores Francisco José Gomes da Silva e Eduardo Jorge Casal Cardoso Martins.

**2023**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu orientador, doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, pelo tempo dedicado e pelas orientações que forneceu, sem as quais não seria possível a concretização deste projeto. Para além disso, agradeço aos engenheiros coorientadores, Doutor Francisco José Gomes da Silva e Eduardo Jorge Casal Cardoso Martins, que desempenharam um papel crucial no desenvolvimento deste projeto.

O meu sincero agradecimento para o supervisor na KIRCHHOFF Automotive, a empresa acolhedora do projeto, Engenheiro Carlos Rafael Mota da Silva, que sempre se demonstrou disponível para me apoiar. A sua experiência e sabedoria foram fundamentais para o sucesso deste trabalho. Agradeço também a todos os membros da KIRCHHOFF pela colaboração, hospitalidade e disponibilidade para me ajudar e ensinar.

Por último, quero deixar um agradecimento especial à minha família e amigos próximos, por todo o amor, motivação e apoio que me ofereceram ao longo de todo o percurso.



## RESUMO

O processo de estampagem desempenha um papel fundamental em vários setores, nomeadamente o setor automóvel. Pela sua grande utilização, este ramo impulsionou a evolução de tecnologias e materiais usados em conformação plástica. Ainda que os aços de elevado limite elástico desenvolvidos apresentem excelentes propriedades mecânicas, existem inconvenientes relacionados com a sua conformabilidade, que estão associados ao aparecimento de defeitos que comprometem a qualidade dos produtos. Estes materiais podem apresentar respostas imprevisíveis devido a variações na sua composição química, tratamento térmico, processamento e outros parâmetros derivados do seu processo de fabrico, pelo que são necessários testes para garantir que o seu desempenho é satisfatório. Com o intuito de prever o aparecimento destes defeitos, a indústria tem vindo a recorrer às ferramentas de simulação numérica para estudar o comportamento dos materiais quando sujeitos a processos de conformação. Os softwares de simulação são, por isso, um instrumento bastante útil quando o conhecimento sobre determinado material ou processo é limitado. Deste modo, o foco deste trabalho consistiu no estudo do comportamento dos aços de elevado limite elástico e nas potencialidades da modelação numérica e as vantagens da sua aplicação à simulação de processos de fabrico na otimização do processo e na eliminação ou prevenção da formação de defeitos.

## PALAVRAS-CHAVE

Indústria automóvel, Estampagem, Conformação plástica, Aços de elevado limite elástico, Elementos Finitos, Stampack.



## **ABSTRACT**

The stamping process plays a key role in several industries, namely the automotive industry. Due to its widespread application, this sector has driven the evolution of technologies and materials used in plastic forming. Although the high strength steels have shown excellent mechanical properties, there are drawbacks related to their formability, which are associated with the appearance of defects that compromise product quality. These materials can show unpredictable responses due to variations in their chemical composition, heat treatment, processing and other parameters derived from their manufacturing process, thus tests are needed to ensure that their performance is satisfactory. With the intention of predicting the appearance of these defects, the industry has been resorting to numerical simulation tools to study the behavior of materials when subjected to forming processes. Simulation software is, therefore, a very useful instrument when knowledge about a certain material or process is limited. Therefore, the focus of this work was to study the behaviour of high yield strength steels and the potential of numerical modelling and the advantages of applying it to the simulation of manufacturing processes in order to optimize the process and eliminating or preventing the formation of defects.

## **KEYWORDS**

Automotive industry, Stamping, Plastic deformation, High yield strength steels, Finite elements, Stampack.



# ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	XV
ÍNDICE DE TABELAS .....	XXI
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XXIII
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Contextualização .....	1
1.2. Objetivos .....	1
1.3. Metodologia .....	2
1.4. Estrutura.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Indústria automóvel e de componentes .....	5
2.1.1. Caracterização do setor .....	5
2.1.2. Indústria automóvel mundial e nacional .....	6
2.1.3. Processos de fabrico comuns.....	7
2.1.4. Materiais utilizados.....	8
2.1.5. Constrangimentos atuais e tendências de futuro.....	9
2.2. Processo de estampagem.....	11
2.2.1. Tipos de estampagem .....	11
2.2.1.1. Estampagem a frio.....	11
2.2.1.2. Estampagem a quente.....	11
2.2.2. Operações .....	12
2.2.2.1.1. Corte.....	12
2.2.2.1.2. Dobragem.....	13
2.2.2.1.3. Embutidura profunda.....	15
2.2.3. Propriedades mecânicas .....	15
2.2.3.1. Curva tensão-deformação.....	15
2.2.3.2. Retorno elástico .....	16
2.2.3.3. Encruamento .....	17
2.2.3.4. Anisotropia .....	18
2.2.3.5. Modos de deformação .....	19
2.2.3.6. Limites de conformação .....	20
2.2.3.7. Ensaio mecânicos.....	21
2.2.4. Equipamentos de estampagem .....	22
2.2.4.1. Prensas .....	22
2.2.4.1.1. Prensa mecânica .....	23
2.2.4.1.2. Prensa hidráulica .....	23
2.2.4.1.3. Prensa servo-controlada .....	24
2.2.4.2. Ferramentas .....	25
2.2.4.2.1. Ferramentas manuais.....	26

2.2.4.2.2.	Ferramentas progressivas .....	26
2.2.4.2.3.	Ferramentas <i>transfer</i> .....	27
2.2.4.2.4.	Componentes .....	28
2.2.5.	Defeitos comuns e causas .....	29
2.2.5.1.	Fissura de extremidade .....	29
2.2.5.2.	Enrugamento .....	30
2.2.5.3.	Rotura por corte .....	30
2.2.6.	Estado da arte do processo de estampagem .....	31
2.3.	Modelação numérica .....	32
2.3.1.	Contextualização do método de elementos finitos .....	32
2.3.2.	Fundamentos do método .....	32
2.3.3.	Potencialidades do método .....	33
2.3.4.	Aplicações na indústria automóvel .....	34
2.3.5.	<i>Software</i> comercial genérico .....	34
2.3.6.	Fundamentos da modelação de conformação plástica .....	35
2.3.7.	<i>Software</i> de conformação plástica .....	36
2.3.7.1.	Método Explícito Dinâmico (ED) .....	36
2.3.7.2.	Método Implícito Estático (IE) .....	38
2.3.7.3.	Método Explícito Estático (EE) .....	38
2.3.7.4.	Comparação dos diferentes métodos .....	38
2.3.8.	Estado da arte de modelação numérica .....	39
2.3.8.1.	Modelação de processos de fabrico .....	39
2.3.8.2.	Modelação de conformação plástica .....	39
3.	DESENVOLVIMENTO .....	41
3.1.	Caracterização da empresa .....	41
3.2.	Métodos .....	44
3.2.1.	Abordagem e metodologia .....	44
3.2.2.	Processo de estampagem .....	45
3.2.3.	Caracterização do problema .....	46
3.2.4.	Limitações e requisitos .....	47
3.2.5.	Técnica DoE .....	48
3.2.6.	Diagrama de Gantt .....	51
3.3.	Ensaio experimentais .....	52
3.3.1.	Condições de ensaio .....	52
3.3.1.1.	Ensaio de tração .....	52
3.3.1.2.	Ensaio de dobragem .....	53
3.3.1.3.	Ensaio químicos .....	56
3.3.1.4.	Ensaio metalográficos .....	57
3.3.1.5.	Ensaio de dureza .....	58
3.3.1.6.	Ensaio de estampagem .....	58
3.3.2.	Materiais .....	60

---

3.3.3. Fabrico dos provetes de dobragem .....	61
3.3.4. Planeamento de experiências .....	64
3.3.5. Resultados dos ensaios .....	73
3.3.5.1. Ensaio de tração.....	73
3.3.5.1.1. Aço HR700LA .....	74
3.3.5.1.2. Aço CR340LA .....	77
3.3.5.1.3. Aço DP 800 .....	78
3.3.5.2. Ensaio de dobragem .....	78
3.3.5.3. Ensaio químicos .....	80
3.3.5.4. Ensaio metalográficos.....	81
3.3.5.5. Ensaio de dureza.....	87
3.4. Modelação numérica.....	89
3.4.1. <i>Software</i> a utilizar .....	89
3.4.2. <i>Benchmark</i> S-rail .....	90
3.4.3. Simulações a realizar.....	94
3.4.3.1. Ensaio de dobragem.....	94
3.4.3.2. Peça 1 – 16365 .....	95
3.4.3.3. Peça 2 – 14768 .....	96
3.4.4. Condições da análise numérica.....	98
3.4.5. Estudo paramétrico numérico .....	105
3.4.5.1. Ensaio de dobragem.....	105
3.4.5.2. Peça 1 – 16365 .....	110
3.4.5.3. Peça 2 – 14768 .....	115
3.4.6. Validação do modelo numérico .....	123
3.4.7. Seleção das condições ótimas de estampagem.....	126
3.4.8. Análise de custos.....	127
4. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....	129
4.1. Conclusões.....	129
4.2. Propostas de trabalhos futuros.....	131
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	133
ANEXOS .....	139



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Cadeia de abastecimento ilustrativa do processo de fabrico de um automóvel (adaptado de [2]) .....	5
Figura 2 - Níveis de desempenho nos diferentes princípios de montagem (adaptado de [3]).....	6
Figura 3 - Volume de vendas automóvel a nível mundial [5].....	6
Figura 4 - Volume de negócios de produção de componentes por setor no ano de 2021 (adaptado de [8]) .....	7
Figura 5 - Sequência de fabrico típica de um automóvel (adaptado de [9]).....	8
Figura 6 - Materiais utilizados no fabrico de automóveis (adaptado de [12]).....	9
Figura 7 - Diagrama resistência-ductilidade dos diferentes tipos de AHSS (adaptado de [13]) .....	9
Figura 8 - Evolução do desempenho em veículos elétricos de 2015 a 2025 (adaptado de [15]) ....	10
Figura 9 - Conformação a quente: a) Direta e b) Indireta (adaptado de [13]).....	12
Figura 10 - Representação do processo de corte em ferramenta [21] .....	12
Figura 11 - Aparecimento de rebarba na superfície de corte (adaptado de 20) .....	13
Figura 12 - Exemplo de uma operação de dobragem [21].....	13
Figura 13 - Deformações resultantes do processo de embutidura profunda [21] .....	15
Figura 14 - a) Gráfico tensão-deformação e b) Cálculo gráfico da tensão de cedência (adaptado de [24]).....	16
Figura 15 - Comparação do retorno elástico de um aço macio e de um HSS (adaptado de [13]) ...	16
Figura 16 - Influência dos parâmetros de estampagem no retorno elástico [25] .....	17
Figura 17 - a) Gráfico tensão-deformação de um sólido perfeitamente plástico e b) Gráfico tensão-deformação de um sólido perfeitamente elástico (adaptado de [26]).....	18
Figura 18 - Exemplo de provetes segundo a direção de laminagem, diagonal e transversal [13]...	19
Figura 19 - Gráfico tensão-deformação do aço S600MC, em função da orientação (adaptado de [29]) .....	19
Figura 20 - Modos de deformação (adaptado de [31]).....	20
Figura 21 - Curva limite de embutidura (adaptado de [34]) .....	21
Figura 22 - Exemplo de sistema excêntrico que utiliza engrenagens [41] .....	23
Figura 23 - Ciclo de funcionamento de uma prensa hidráulica [41] .....	24
Figura 24 - Funcionamento de uma prensa servo-controlada [42] .....	25
Figura 25 - Comparação do movimento de diferentes prensas [41] .....	25
Figura 26 - Banda metálica obtida numa ferramenta progressiva.....	26
Figura 27 - Banda metálica numa ferramenta <i>transfer</i> .....	27
Figura 28 - Componentes de uma ferramenta de estampagem.....	29
Figura 29 - Exemplo do aparecimento de uma <i>edge crack</i> [48] .....	30
Figura 30 - a) Peça sem defeito e b) Peça com defeito ( <i>wrinkling</i> ) [22] .....	30
Figura 31 - Exemplo de fratura por <i>shear fracture</i> [13] .....	30
Figura 32 - Comparação de uma malha grosseira (à esquerda) com uma malha refinada (direita) [58] .....	33
Figura 33 - Simulação de um embate frontal [59] .....	34
Figura 34 - Logótipo do grupo KIRCHHOFF [75].....	41
Figura 35 - Instalações da fábrica KIRCHHOFF em Ovar [75] .....	42

Figura 36 - a) Estampagem a frio; b) Estampagem a quente; c) Soldadura; d) Pintura catódica por imersão [75] .....	42
Figura 37 - Exemplos de componentes produzidos pela KIRCHHOFF: a) veículos ligeiros de passageiros; b) veículos comerciais [75] .....	43
Figura 38 - Faturação da KIRCHHOFF Automotive Portugal desde 1994, em milhões [75] .....	43
Figura 39 - Distribuição do volume de vendas da KIRCHHOFF Automotive Portugal por OEM [75] .....	44
Figura 40 - Armazenamento e transporte da matéria-prima [75] .....	45
Figura 41 - Alimentação da matéria-prima [75] .....	46
Figura 42 - Zona de trabalho da matéria-prima .....	46
Figura 43 - Aplicação do DoE (adaptado de [78]) .....	49
Figura 44 - Região experimental cuboidal [77] .....	50
Figura 45 - Adição de réplicas em pontos centrais: a) plano com 2 fatores; b) plano com 3 fatores [79] .....	51
Figura 46 - Diagrama de Gantt .....	52
Figura 47 - Geometria dos provetes de tração [82] .....	53
Figura 48 - Equipamento de tração universal da Zwickrowell .....	53
Figura 49 - Configuração do ensaio de dobragem [83] .....	54
Figura 50 - Equipamento de flexão universal da Zwickrowell .....	55
Figura 51 - Relação geométrica do ensaio de flexão para o cálculo analítico do ângulo de dobragem [83] .....	55
Figura 52 – a) Equipamento <i>PMI - Master Pro</i> ; b) Execução do ensaio .....	56
Figura 53 - Amostras dos dois lotes embutidas em resina .....	57
Figura 54 - Representação de um indentador Vickers [88] .....	58
Figura 55 - Servoprensa da Arisa de 2500 kN .....	59
Figura 56 - Ferramenta para corte de provetes .....	61
Figura 57 – Representação da ferramenta fechada, demonstrando o seu princípio de funcionamento .....	62
Figura 58 - Montagem das ferramentas para realização de chanfro em provetes .....	62
Figura 59 - Ferramenta na posição aberta (posição inicial) .....	63
Figura 60 - Ferramenta na posição fechada (posição final) .....	63
Figura 61 - Provetes do aço DP800 após o ensaio de flexão .....	66
Figura 62 - Gráfico força/deslocamento dos ensaios da matriz de experiência .....	67
Figura 63 - Introdução da matriz de experiências no Minitab .....	67
Figura 64 - Gráfico de Pareto normalizado dos efeitos de cada fator .....	68
Figura 65 - <i>Dotplots</i> do ângulo para cada fator .....	68
Figura 66 - <i>Factorial plots</i> dos efeitos de cada fator .....	69
Figura 67 - <i>Interaction plots</i> .....	69
Figura 68 - Análise de resíduos .....	70
Figura 69 - Gráfico força/deslocamento dos ensaios do novo plano de experiências .....	71
Figura 70 - Introdução da nova matriz de experiências no Minitab .....	71
Figura 71 - Gráfico de Pareto normalizado dos efeitos de cada fator do novo plano de experiências .....	72
Figura 72 - <i>Factorial plots</i> dos efeitos de cada fator do novo plano de experiências .....	73
Figura 73 - <i>Interaction plots</i> do novo plano de experiências .....	73
Figura 74 - Gráficos $\sigma$ - $\epsilon$ dos vários lotes do aço HR700LA .....	74

Figura 75 - $\sigma_r$ do aço HR700LA para os diferentes lotes testados .....	75
Figura 76 - $\sigma_e$ do aço HR700LA para os diferentes lotes testados .....	75
Figura 77 - A do aço HR700LA para os diferentes lotes testados.....	76
Figura 78 - Gráficos $\sigma$ - $\epsilon$ dos vários lotes do aço CR340LA .....	77
Figura 79 - Gráficos $\sigma$ - $\epsilon$ dos vários lotes do aço DP800 .....	78
Figura 80 - Provetes após o ensaio de dobragem: a) HR700LA; b) CR340LA; c) DP800 .....	79
Figura 81 - Gráfico força-deslocamento dos provetes em HR700LA .....	79
Figura 82 - Gráfico força-deslocamento dos provetes em CR340LA .....	79
Figura 83 - Gráfico força-deslocamento dos provetes em DP 800 .....	80
Figura 84 - Amostras dos três materiais onde se efetuou a leitura da composição química .....	81
Figura 85 - Micrografia da amostra 1 .....	82
Figura 86 - Micrografia da amostra 2 .....	83
Figura 87 - Inclusões/defeitos da amostra 1 .....	83
Figura 88 - Inclusões/defeitos da amostra 2 .....	84
Figura 89 - Identificação das várias zonas que compõem a microestrutura da amostra 1 .....	84
Figura 90 - Identificação das várias zonas que compõem a microestrutura da amostra 2 .....	85
Figura 91 - Composição química global da amostra 1 .....	85
Figura 92 - Composição química global da amostra 2 .....	86
Figura 93 - Composição química das inclusões da amostra 1 .....	86
Figura 94 - Composição química das inclusões da amostra 2 .....	87
Figura 95 - Composição química da Z1 da amostra 2 .....	87
Figura 96 - Marcas de indentação: a) Amostra 1; b) Amostra 2 .....	88
Figura 97 - Logótipo do Stampack Xpress [96].....	89
Figura 98 - Interface do <i>software</i> [96] .....	90
Figura 99 - <i>Benchmark S-rail</i> (adaptado de [97]) .....	91
Figura 100 - Vista explodida das malhas dos elementos que compõe o <i>benchmark</i> .....	92
Figura 101 - Distribuição da tensão equivalente de von Mises no final da estampagem .....	92
Figura 102 - Distribuição da tensão equivalente de von Mises após o retorno elástico .....	93
Figura 103 - Deformação da banda metálica antes e após o retorno elástico .....	93
Figura 104 - Disposição dos componentes envolvidos no ensaio de dobragem no Stampack.....	94
Figura 105 - Peça 16365 .....	95
Figura 106 - Ferramenta da peça 16365: a) conjunto inferior; b) conjunto superior .....	95
Figura 107 - Banda metálica da peça 16365 .....	95
Figura 108 - Fissuras ocorridas na peça 16365 .....	96
Figura 109 - a) Componentes utilizados na OP 70; b) Componentes utilizados na OP 80.....	96
Figura 110 - Peça 14768 .....	97
Figura 111 - Ferramenta progressiva referente à 14768: a) Bloco inferior; b) Bloco superior.....	97
Figura 112 - Banda metálica da peça 14768 .....	97
Figura 113 - Fissuras presentes na peça 14768.....	98
Figura 114 - Componentes envolvidos na OP 70 .....	98
Figura 115 - Modos de simulação ao dispor no Stampack.....	99
Figura 116 - Janela para a caracterização do material.....	100
Figura 117 - Previsão da CLR/CLRT .....	100
Figura 118 - Parâmetros que controlam a criação da malha .....	102
Figura 119 - Malha de elementos finitos do modelo de provete de ensaios .....	102

Figura 120 - Malha de elementos finitos dos restantes elementos envolvidos no ensaio de flexão .....	103
Figura 121 - Malha de elementos finitos do blank da peça 16365 .....	103
Figura 122 - Malha de elementos finitos: a) Componentes utilizados na OP 70; b) Componentes utilizados na OP80.....	104
Figura 123 - Malha de elementos finitos do blank da peça 14768 .....	104
Figura 124 - Malha de elementos finitos dos restantes componentes envolvidos na simulação da peça 14768.....	105
Figura 125 - a) Posição inicial; b) Posição final (final da simulação) .....	105
Figura 126 - Instante de rotura da simulação utilizando o aço HR700LA .....	106
Figura 127 - Instante final da simulação utilizando o aço CR340LA.....	106
Figura 128 - Instante de rotura da simulação utilizando o aço DP800 .....	106
Figura 129 - Representação vetorial das solicitações presentes no provete.....	107
Figura 130 - Representação vetorial e quantitativa de $\epsilon_1$ .....	108
Figura 131 - Efeito de Poisson observável na simulação numérica: a) vista isométrica; b) vista lateral .....	108
Figura 132 - Deformação plástica equivalente no instante de rotura do provete simulado em aço HR700LA.....	109
Figura 133 - Deformação plástica equivalente no instante de rotura do provete simulado em aço CR340LA .....	109
Figura 134 - Deformação plástica equivalente no instante de rotura do provete simulado em aço DP800 .....	109
Figura 135 - Diagrama de rotura triaxial obtido pelo Stampack.....	110
Figura 136 - Valores do coeficiente de rotura triaxial da peça 16365 .....	110
Figura 137 - Distribuição da tensão equivalente de von Mises ao longo da peça 16365 .....	111
Figura 138 - Valor de $\epsilon_1$ na zona de rotura .....	111
Figura 139 - Valor de $\epsilon_2$ na zona de rotura .....	112
Figura 140 - Valor de $\epsilon_3$ na zona de rotura .....	112
Figura 141 - Valor da deformação plástica equivalente na zona de rotura .....	112
Figura 142 - Representação vetorial das solicitações ao longo da peça 16365.....	113
Figura 143 - a) <i>Trim</i> original da peça 16365; b) <i>Trim</i> após alterações .....	113
Figura 144 - Diagrama de rotura triaxial da peça 16365 após a alteração geométrica .....	114
Figura 145 - Valores do coeficiente de rotura triaxial da peça 16365 após alteração.....	114
Figura 146 - Valores da tensão de von Mises da peça 16365 após alteração .....	115
Figura 147 - Valor da deformação plástica equivalente na peça 16365 após alteração .....	115
Figura 148 - a) Posição inicial dos componentes envolvidos na conformação da peça 14768; b) Posição final (final da simulação).....	115
Figura 149 - Diagrama de rotura triaxial da peça 14768.....	116
Figura 150 - Valores do coeficiente de rotura triaxial da peça 14768 .....	116
Figura 151 - Tensão equivalente de von Mises instalada na peça 14768.....	116
Figura 152 - Valor de $\epsilon_1$ no local de rotura da peça 14768 .....	117
Figura 153 - Valor de $\epsilon_2$ no local de rotura da peça 14768 .....	117
Figura 154 - Valor de $\epsilon_3$ no local de rotura da peça 14768 .....	118
Figura 155 - Valor de deformação plástica equivalente no local de rotura da peça 14768 .....	118
Figura 156 - Redução percentual de espessura nos locais de rotura da peça 14768 .....	119

Figura 157 - Representação vetorial e quantitativa de $\epsilon_1$ nos locais de rotura da peça 14768.....	119
Figura 158 - Representação vetorial das solicitações ao longo da peça 14768.....	119
Figura 159 - a) <i>Trim</i> original da peça 14768; b) Proposta de alteração ao <i>trim</i> da peça 14768....	120
Figura 160 - Malha de elementos finitos do novo <i>blank</i> da peça 14768.....	121
Figura 161 - Resultados da tensão de von Mises da peça 14768 após alteração.....	121
Figura 162 - Diagrama de rotura triaxial da peça 14768 após alteração.....	121
Figura 163 - Resultados do coeficiente de rotura triaxial da peça 14768 após alteração.....	122
Figura 164 - Resultados da deformação plástica equivalente da peça 14768 após alteração.....	122
Figura 165 - Representação dos esforços resultantes na aba central após a alteração.....	123
Figura 166 - Resultados da redução percentual de espessura da peça 14768 após alteração.....	123
Figura 167 - Ferramenta da peça 16365 após a retificação para otimizar o <i>trim</i> : a) matrizes; b) punções.....	124
Figura 168 - Alteração da ferramenta da peça 14768 para efetuar o corte central: a) matrizes; b) punções.....	124
Figura 169 - Peça 16365 após a modificação proposta.....	125
Figura 170 - Peça 14768 após a modificação proposta: a) banda metálica; b) OP 70.....	125
Figura 171 - <i>Trim</i> otimizado: a) Peça 16365; b) Peça 14768.....	126
Figura 172 - Alteração aos punções de corte.....	127
Figura 173 - Matrizes alteradas: a) primeira operação de corte; b) segunda operação de corte .	127



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de veículos a nível nacional [5] .....	7
Tabela 2 - Comparação das vantagens e desvantagens entre o aço e alumínio (adaptado de [14]) .....	10
Tabela 3 - Exposição dos principais ensaios mecânicos realizados no processo de estampagem ..	21
Tabela 4 - Tipos de prensas e suas classificações (adaptado de [39]) .....	22
Tabela 5 - Características de uma ferramenta progressiva [45] .....	27
Tabela 6 - Características de uma ferramenta transfer [45] .....	28
Tabela 7 - Efeito da redução de espessura na superfície de fratura de um aço DP780 (adaptado de [49]) .....	31
Tabela 8 - Estudos recentes sobre o processo de estampagem .....	31
Tabela 9 - Softwares de modelação numérica genéricos mais utilizados (adaptado de [61]) .....	34
Tabela 10 - Softwares de modelação de conformação plástica (adaptado de [66], [68]) .....	36
Tabela 11 - Comparação dos métodos IE, EE e ED (adaptado de [62]) .....	39
Tabela 12 - Estudos sobre a modelação de processos de fabrico .....	39
Tabela 13 - Estudos sobre a modelação de conformação plástica .....	40
Tabela 14 - Condições operacionais da prensa .....	59
Tabela 15 - Propriedades mecânicas dos 3 materiais selecionados .....	60
Tabela 16 - Composição química do aço HR700LA .....	60
Tabela 17 - Composição química do aço CR340LA .....	60
Tabela 18 - Composição química do aço DP800 .....	60
Tabela 19 - Fatores em estudo e respetivos níveis .....	64
Tabela 20 - Matriz de 12 ensaios .....	65
Tabela 21 - Matriz de ensaios .....	65
Tabela 22 - Tabela ANOVA do primeiro plano de experiências .....	68
Tabela 23 - Matriz de 4 ensaios .....	70
Tabela 24 - Matriz de ensaios para o segundo plano de experiências .....	71
Tabela 25 - Tabela ANOVA para o segundo plano de experiências .....	72
Tabela 26 - Propriedades mecânicas médias do aço HR700LA .....	75
Tabela 27 - Tabela ANOVA das propriedades mecânicas do aço HR700LA .....	76
Tabela 28 - Propriedades mecânicas médias do aço CR340LA .....	77
Tabela 29 - Propriedades mecânicas médias do aço DP800 .....	78
Tabela 30 - Ângulo de dobragem alcançado pelos diferentes materiais .....	80
Tabela 31 - Composição química dos três aços .....	81
Tabela 32 - Valores de dureza HV das amostras do lote 1 (lote com fissura) .....	88
Tabela 33 - Valores de dureza HV das amostras do lote 2 (lote sem fissura) .....	88
Tabela 34 - Propriedades mecânicas do Al 6111-T4 consideradas para a simulação do <i>benchmark</i> .....	91
Tabela 35 - Definição das propriedades dos materiais para a simulação numérica .....	101
Tabela 36 - Comparação entre o ângulo de dobragem experimental e numérico para os diferentes materiais .....	107



## LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

### Lista de siglas

AFIA	Associação de Fabricantes para a Indústria Automóvel
AHSS	<i>Advanced High Strength Steel</i>
CAD	<i>Computer Aided Drawing</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CEL	<i>Coupled Eulerian-Lagrangian</i>
CLE	Curva Limite de Embutidura
CLR	Curva Limite de Rotura
CLRT	Curva Limite de Rotura Triaxial
CP	<i>Complex-Phase</i>
DoE	<i>Design of Experiments</i>
DP	<i>Dual Phase</i>
DSR	<i>Design Science Research</i>
ED	Explícito Dinâmico
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>
EE	Explícito Estático
EPT	Estado Plano de Tensão
FB	<i>Ferritic-Bainitic</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
HAH	<i>Homogeneous Anisotropic Hardening</i>
HER	<i>Hole Expansion Ration</i>
HET	<i>Hole Expansion Test</i>
HF	<i>Hot-Formed</i>
IE	Implícito Estático
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
MAS	<i>Measurement System Analysis</i>
MEF	Método de Elementos Finitos
MS	<i>Martensitic</i>
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
OICA	Organização Internacional de Construtores Automóveis
PMI	<i>Positive Material Identification</i>
PIB	Produto Interno Bruto
RLE	Razão Limite de Estampagem
SGM	Sistema de Gestão de Qualidade
SPC	<i>Statistic Process Control</i>
TRIP	<i>Transformation-Induced Plasticity</i>
TWIP	<i>Twinning-Induced Plasticity</i>

**Lista de símbolos**

$A$	área	$\text{mm}^2$
$a$	espessura do provete	mm
$A$	alongamento	adimensional
$b$	largura	mm
$CV$	coeficiente de variação	adimensional
$e$	espessura da chapa	mm
$e$	espessura	mm
$F$	força de estampagem	N
$h$	distância	m
$HV$	valor de dureza Vickers	adimensional
$I$	momento de inércia	$\text{mm}^4$
$K$	módulo de elasticidade	GPa
$l$	distância entre apoios	mm
$L$	quantidade de níveis	adimensional
$M_f$	momento fletor	kgf.mm
$n$	coeficiente de encruamento	adimensional
$n_{ges}$	perdas energéticas	adimensional
$p$	perímetro de corte	mm
$P$	força	kgf
$p$	pressão	MPa
$P$	potência	W
$P$	número de fatores	adimensional
$Q$	esforço de corte	kgf
$Q$	cauda volúmico	$\text{m}^3/\text{h}$
$r$	valor de Lankford	adimensional
$R$	raio dos rolos	mm
$r$	raio de punção	mm
$\bar{r}$	anisotropia normal	adimensional
$r_0$	valor de Lankford na direção de laminagem	adimensional
$r_{45}$	valor de Lankford na direção diagonal	adimensional

$r_{90}$	valor de Lankford na direção transversal	adimensional
$S$	deslocamento do punção	mm
$T$	espessura	mm
$T$	tempo	s
$V$	volume	m <sup>3</sup>
$W$	trabalho	J
$X$	número de ensaios	adimensional
$\alpha$	ângulo de dobragem	°
$\Delta r$	anisotropia planar	adimensional
$\varepsilon$	deformação	adimensional
$\varepsilon_0$	pré-deformação	adimensional
$\varepsilon_t$	deformação na direção da espessura	adimensional
$\varepsilon_w$	deformação na direção da largura	adimensional
$\sigma$	tensão	MPa
$\sigma_c$	resistência ao corte	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_e$	tensão de cedência	MPa
$\sigma_f$	tensão de flexão	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_r$	resistência mecânica	MPa
$\sigma_t$	resistência à tração	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{VM}$	tensão equivalente de von Mises	MPa
$\sigma_{xx}$	tensões normais ao longo da direção de laminagem	MPa
$\sigma_{xy}$	tensão de corte	MPa
$\sigma_{yy}$	tensões normais na direção transversal à laminagem	MPa



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Contextualização

Ao longo dos últimos anos tem-se observado uma enorme evolução tecnológica por todos os setores e áreas da indústria. Um dos setores onde esta evolução é mais notória, por meio de contínuas reformulações e imposições de desempenho, é a indústria automóvel. Cada vez mais o setor é sujeito a desafios em três grandes áreas: segurança, ambiente e rentabilidade económica. A procura por resultados sucessivamente melhores, motivada pela competitividade e o mercado global, obriga os fabricantes a uma constante inovação em termos de design do produto, engenharia e produção, o que conduz à necessidade de inovação da tecnologia de processos de fabrico (em particular de ferramentas e materiais), de modo a acompanhar este desenvolvimento. A conformação plástica tem um dos seus maiores eixos associado ao fabrico de peças para a indústria automóvel, na qual a procura por componentes mais leves e com melhor desempenho ao nível da resistência mecânica propicia o desenvolvimento de novos materiais.

Assim, introduz-se a utilização de aços de alta resistência na produção de componentes da indústria automóvel, pois estes aços oferecem não só uma maior resistência e durabilidade aos componentes, mas em simultâneo permitem a redução do peso, tornando assim os meios de transporte cada vez mais seguros, leves e com menores taxas de emissão de gases poluentes. Se por um lado é de grande interesse aproveitar estas características para os componentes de automóveis, os aços de alta resistência apresentam alguns inconvenientes quando sujeitos a deformações plásticas. Para além da maior dificuldade sentida ao longo da sua produção e durante o próprio processo de conformação, após deformação estes materiais apresentam um elevado retorno elástico, o que torna difícil o controlo da qualidade dos produtos.

Uma das formas de garantir a qualidade dos produtos passa pela previsão dos defeitos. Deste modo, tem-se verificado uma crescente utilização dos *softwares* de modelação numérica aplicados a processos reais, em concreto aos processos de fabrico. A principal vantagem da utilização destes *softwares* está relacionada com a capacidade de resolver problemas complexos reduzindo significativamente os recursos e tempo despendidos. Assim sendo, como seria de esperar, a simulação por método de elementos finitos é um método que desperta interesse para a indústria no geral pois, para além de as suas aplicações serem extensas, oferece benefícios como o aumento da produtividade (de recursos e de tempo), redução de custos, otimização de sistemas, possibilidade de simulação de processos com inúmeras variantes, entre outros.

## 1.2. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho consiste na identificação e eliminação de fissuras que ocorrem durante o processo de estampagem de materiais metálicos através de um software de simulação numérica. Os objetivos complementares são essencialmente a implementação de um procedimento de validação/revogação de materiais através da caracterização da matéria-prima e respetiva comparação entre as suas propriedades e o seu comportamento. Esta análise é efetuada por intermédio de ensaios de tração que permitem avaliar as propriedades mecânicas da matéria-prima e por intermédio de ensaios metalográficos que possibilitam analisar as suas

microestruturas. Para além disso, pretende-se descobrir quais as condições de estampagem ótimas que maximizam o desempenho dos materiais.

### **1.3. Metodologia**

A metodologia utilizada para a elaboração deste trabalho foi a seguinte:

- Definição da estrutura do trabalho;
- Familiarização com o conteúdo;
- Avaliação da literatura já publicada na área;
- Pesquisa e seleção de artigos com base no seu conteúdo;
- Planeamento da integração da informação na revisão bibliográfica de modo a realizar uma sequência lógica de ideias;
- Identificação do problema e definição de objetivos para eliminar os defeitos;
- Caracterização dos materiais;
- Realização dos ensaios experimentais;
- Análise das propriedades e desempenho dos materiais;
- Simulação numérica de propostas de solução;
- Seleção das condições ótimas de estampagem;
- Implementação e avaliação das soluções;
- Conclusões e considerações finais.

### **1.4. Estrutura**

A estrutura deste trabalho está dividida em quatro capítulos.

O capítulo 1 corresponde à introdução do trabalho, onde se apresentam ao leitor os motivos que levaram à elaboração do trabalho, assim como os objetivos, a metodologia utilizada para os alcançar e a estrutura da dissertação.

O capítulo 2 é composto pela revisão bibliográfica do tema em estudo e é dividido em três subcapítulos. Inicialmente é feita a caracterização do setor automóvel, referindo os seus principais processos de fabrico, materiais utilizados e estrangimentos da indústria. De seguida, expõe-se o tema principal, designadamente a estampagem de chapas metálicas, através da abordagem de vários tópicos do processo, como a caracterização das diferentes operações, propriedades mecânicas relevantes, materiais utilizados e defeitos que podem surgir. Finalmente, refere-se a importância e utilidade dos programas de modelação numérica como ferramenta de auxílio na previsão dos processos de conformação plástica.

No capítulo 3 encontra-se o desenvolvimento do trabalho. Este capítulo é dividido em quatro principais subcapítulos. Na primeira parte é feita a caracterização da empresa acolhedora, expondo sucintamente a sua história e apresentando os produtos e processos que dispõe. No subcapítulo

seguinte é feita a exposição do problema, explicando a metodologia adotada e as limitações e requisitos enfrentados. De seguida, realiza-se o estudo do comportamento dos aços de elevado limite elástico selecionados, através de vários ensaios experimentais. Por fim, através de simulações numéricas, é feita a otimização de processos de estampagem a fim de eliminar o aparecimento de fissuras nos componentes fabricados.

Por último, o capítulo 4 apresenta as conclusões adquiridas e sugestões para trabalhos futuros.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Indústria automóvel e de componentes

A indústria automóvel representa, atualmente, um papel fundamental na economia global e uma parte significativa da evolução tecnológica presente nos diversos setores deve o seu desenvolvimento aos avanços adquiridos na indústria automóvel, uma vez que é uma das mais importantes atividades industriais. Se por um lado, durante algumas décadas, esta indústria se demonstrava dispersa, pouco qualificada e pouco desenvolvida, os últimos cinquenta anos deram lugar a uma rápida expansão motivada pela competitividade e aumento de consumo no sector [1].

#### 2.1.1. Caracterização do setor

A pressão imposta na qualidade, custos e prazos, obrigou a uma mudança de panorama na indústria automóvel e condicionou a mesma a recorrer a outras subindústrias e a estar dependente da indústria de componentes. Esta estratégia designa-se por *outsourcing* e consiste na contratação de uma organização externa para desenvolver uma determinada área da empresa [1]. Esta estratégia é esquematizada na Figura 1, onde se pode observar como acontece o processamento das diferentes matérias-primas, de forma paralela (isto é, em simultâneo), até ao produto final, neste caso, o automóvel. Cada semi-produto é produzido em diferentes organizações e cabe à empresa que os adquire, fazer a sua montagem.

O *outsourcing* é uma solução viável que resolve os elevados custos de produção, resulta num aumento de qualidade do produto e é um contributo para a economia de cada país, pois são criadas mais empresas e respetivos postos de trabalho.

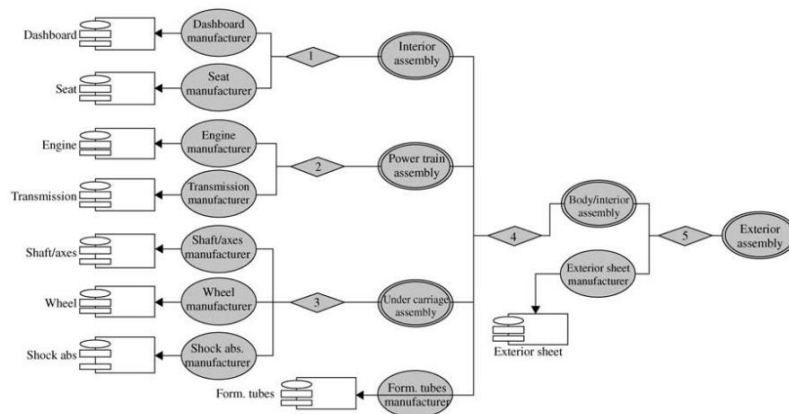


Figura 1 - Cadeia de abastecimento ilustrativa do processo de fabrico de um automóvel (adaptado de [2])

Associado ao *outsourcing*, verifica-se que o processo de produção de um automóvel depende particularmente da montagem de componentes. A montagem pode ser abordada de quatro formas: montagem manual, montagem semiautomática, montagem flexível e montagem fixa [3]. Na Figura 2 é representada a dependência dos níveis de desempenho do sistema, nomeadamente o volume de produção, número de variantes, tamanho de lote e flexibilidade, em função do princípio de montagem empregue.

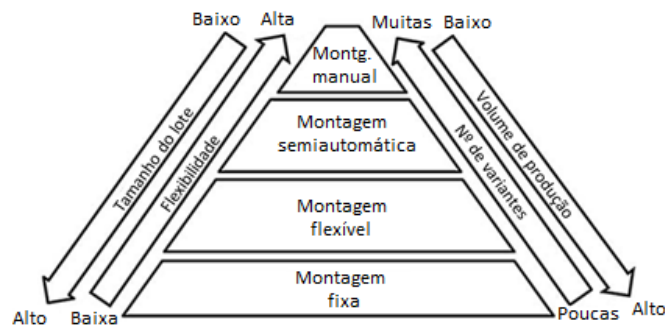


Figura 2 - Níveis de desempenho nos diferentes princípios de montagem (adaptado de [3])

O princípio que melhor se adequa à indústria automóvel é o de uma montagem semiautomática/flexível. Como é de notar, as linhas de montagem modernas deparam-se com exigências ao nível da flexibilidade e variedade de produtos e, ainda que o recurso a robôs avançados seja fundamental, é indispensável a interação do robô com o trabalhador humano para dar respostas às mesmas. Esta colaboração traz muitos benefícios e possibilita a montagem em processos complexos, sendo que o trabalhador oferece auxílio no decorrer do processo de fabrico e o robô é guiado, fornecendo assistência através da sua inteligência e do esforço que realiza [4].

### 2.1.2. Indústria automóvel mundial e nacional

Ao longo dos últimos anos, o crescimento da indústria automóvel foi significativo, pois o automóvel assume cada vez mais um papel de elevada importância na sociedade, já que a mobilidade quer de pessoas, quer de mercadorias, é crucial. Na Figura 3 são apresentados o número de automóveis produzidos anualmente, a nível mundial, desde 2010 a 2021.

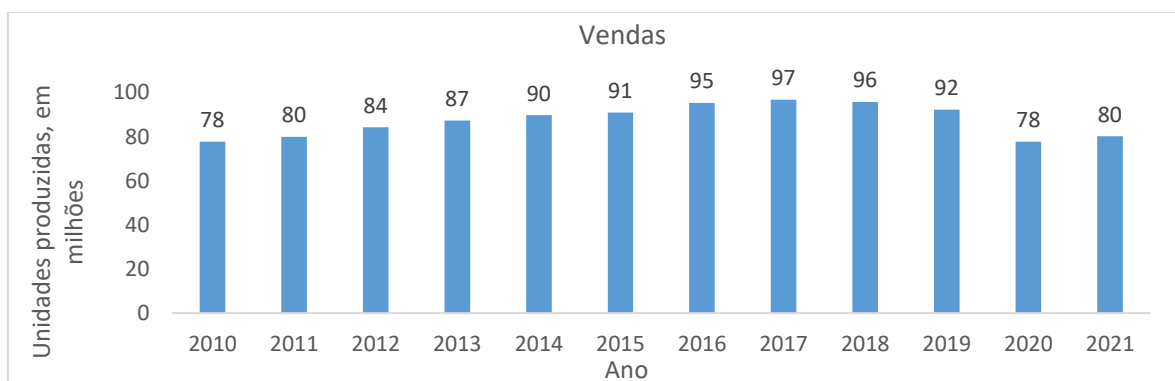


Figura 3 - Volume de vendas automóvel a nível mundial [5]

Observa-se uma tendência crescente no número de unidades vendidas a partir de 2010. No entanto, no ano de 2020 verifica-se uma quebra significativa no setor, explicada pelo panorama de crise global vivido [6]. Em 2021, contudo, volta-se a registar uma tendência de crescimento de produção.

O contexto nacional é semelhante, constatando-se que a indústria automóvel em Portugal estava muito limitada até ao princípio do século XX. Os automóveis eram importados face ao atraso no desenvolvimento tecnológico e à dificuldade em conseguir mão-de-obra qualificada. A afirmação do setor automóvel em Portugal é iniciada apenas na década de 1960 e mais tarde impulsionada por dois grandes projetos. O primeiro motivo de investimento em Portugal acontece em 1977, com o projeto *Renault*, resultando na ampliação do desenvolvimento tecnológico nacional. Por fim, o

lançamento do projeto *AutoEuropa*, no início dos anos 90, tem um contributo semelhante, expandindo o investimento no setor automóvel e aumentando o número de sistemas de montagem e veículos produzidos em Portugal [7].

Assim, tal como acontece a nível global, também o volume de veículos produzidos em Portugal apresenta uma tendência crescente, como demonstrado na Tabela 1, segundo a Organização Internacional de Construtores Automóveis (OICA).

Tabela 1 - Produção de veículos a nível nacional [5]

	2020	2021
Veículos de passageiros	211 281	229 221
Veículos comerciais ligeiros	49 855	56 372
Veículos comerciais pesados	3 039	4 338
Autocarros	61	23
Total de veículos	264 236	289 954

Comparativamente a 2020, ano em que se observou uma quebra de produção a nível global, foram produzidos em 2021, em Portugal, mais 25 7180 veículos, o que representa um crescimento de 9,7%. No entanto, ainda que se tenha verificado um crescimento, não se recuperou face a 2019. O volume de vendas registado em 2021 foi o terceiro melhor registado, apenas batido em 2019 e 2018. É de salientar ainda que apesar do crescimento em geral, a produção de autocarros decaiu cerca de 60% [5].

Atualmente, segundo a Associação de Fabricantes para a Indústria Automóvel (AFIA), a distribuição do setor de produção de componentes para automóvel em Portugal é dividida como demonstrado na Figura 4. Verifica-se que o volume de negócio está inserido, em maior porção, em 2 setores: componentes elétricos e eletrónicos (32%) e componentes metalúrgicos e metalomecânicos (31%).



Figura 4 - Volume de negócios de produção de componentes por setor no ano de 2021 (adaptado de [8])

Em Portugal, no ano de 2021, havia cerca de 350 empresas que fabricavam componentes e acessórios para automóveis. Este número traduziu-se em emprego direto a 62 000 pessoas e representa 9,1% do emprego da indústria transformadora. Por outro lado, este subsector faturou anualmente, entre 2015 e 2021, cerca de 11 100 mil milhões de euros, representando 5,1% do PIB (produto interno bruto) [8].

### 2.1.3. Processos de fabrico comuns

Embora hoje em dia seja possível a produção de chassis numa única peça fundida sob pressão, o fabrico da estrutura de um automóvel tipicamente inicia-se na estampagem. É aqui que o aço, na

forma de chapas metálicas, é conformado em diversos estágios até atingir a forma que é desejada. De seguida, é feita a montagem da carroçaria. Os componentes previamente estampados são então unidos, na sua maioria, por soldadura (podendo-se recorrer também a técnicas como rebitagem e brasagem). Ainda nesta fase são corrigidos pequenos defeitos e é feita uma inspeção em todas as uniões. Quando a estruturação da carroçaria é concluída, diz-se que o *body-in-white* (BiW) está completo. Neste momento, o conjunto está pronto para ser pintado. No entanto, antes desta etapa, o conjunto é sujeito a um tratamento químico para proteger a estrutura contra a corrosão. Por fim, faz-se a montagem de todos os componentes externos e internos, como componentes mecânicos, coluna de direção, vidros e acabamentos interiores.

Este processo é esquematizado na Figura 5, na qual se percebe que, como já salientado anteriormente, o trabalho humano e da máquina se complementam.



Figura 5 - Sequência de fabrico típica de um automóvel (adaptado de [9])

No que diz respeito ao fabrico de componentes, são empregues diversos processos de fabrico, em função do material utilizado, da sua aplicação, geometria do componente e requisitos de desempenho. Para além da estampagem e soldadura, estão presentes processos como fundição, forjamento, conformação plástica e maquinagem [10].

Entre estes, destaca-se o processo de fundição, utilizado em cerca de 60% dos componentes automóveis [11]. A fundição é um processo económico, que permite produzir componentes de formas complexas e fornece excelente resistência mecânica. As suas aplicações incluem o bloco do motor, coluna de direção, peças da transmissão, entre outras.

É ainda de salientar o recurso ao processo de forjamento no fabrico de componentes mecânicos, uma vez que através deste processo se atinge grande resistência mecânica e grande resistência à fadiga. Alguns exemplos de componentes obtidos pelo processo de forjamento, para os quais estas propriedades são especialmente importantes são a árvore de cames, válvulas, cambota e biela [10].

#### 2.1.4. Materiais utilizados

A indústria automóvel é uma das principais indústrias responsáveis pelo aparecimento dos mais recentes desenvolvimentos na ciência e tecnologia, que resultam da procura por uma constante melhoria no desempenho dos automóveis, e promove o gradual aumento da utilização de novos materiais. No entanto, é o aço que, há várias décadas, continua a liderar a constituição das carroçarias automóveis, como é visível na Figura 6.

Isto deve-se principalmente à sua elevada resistência e ao facto de o aço ser um material já muito bem estudado, devido ao seu longo histórico de utilização. No entanto, cada vez mais, a indústria impele exigências rigorosas e, muitas vezes, contraditórias, aos aços. Devem possuir elevada resistência e ao mesmo tempo uma boa capacidade de absorver energia e baixo peso, devem também ser de fácil fabrico, fácil manutenção e resistentes à corrosão [12].

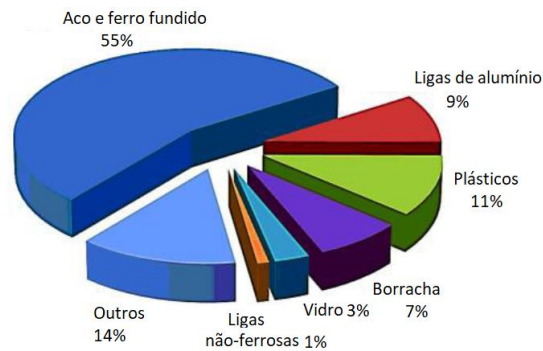


Figura 6 - Materiais utilizados no fabrico de automóveis (adaptado de [12])

Por este motivo, a indústria evolui com o intuito de incorporar nas estruturas automóveis os aços mais recentes de alto limite elástico, denominados *Advanced High Strength Steel* (AHSS). Os AHSS são materiais sofisticados que possuem composições químicas e microestruturas multifásicas especiais, uma combinação possível através de processos de fabrico que envolvem mecanismos de endurecimento, por aquecimento e arrefecimento controlados. Assim, é possível alcançar excelentes propriedades de resistência, ductilidade, tenacidade e resistência à fadiga.

Existem diferentes tipos de AHSS, que estão agrupados em três gerações, e que são classificados consoante a sua microestrutura, fases presentes e composição química (Figura 7). A primeira geração inclui os aços *Dual Phase* (DP), *Complex-Phase* (CP), *Ferritic-Bainitic* (FB) e *Martensitic* (MS). A segunda geração inclui os aços *Transformation-Induced Plasticity* (TRIP), *Hot-Formed* (HF), e *Twinning-Induced Plasticity* (TWIP). Os AHSS de terceira geração surgiram apenas recentemente e foram criados para responder à necessidade de uma melhor relação resistência-ductilidade, aliado a melhores ligações e custos reduzidos [13].

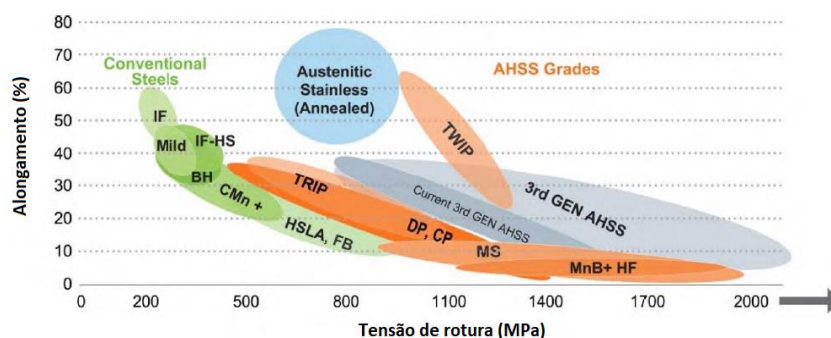


Figura 7 - Diagrama resistência-ductilidade dos diferentes tipos de AHSS (adaptado de [13])

### 2.1.5. Constrangimentos atuais e tendências de futuro

Um fator preponderante na mudança de paradigma na indústria automóvel são as recentes políticas de redução das emissões de gases tóxicos e dióxido de carbono. Esta condição representa a maior ameaça ao domínio dos aços no fabrico de estruturas automóveis. A elevada densidade do

aço, em comparação com materiais utilizados em aplicações semelhantes (como o alumínio ou até compósitos), está associada a um maior peso e, conseqüentemente, maiores consumos de combustíveis [14]. O debate entre o alumínio e o aço, assenta essencialmente no equilíbrio entre o impacto ambiental associado a cada material (desde a sua produção à sua utilização) em relação ao seu custo e benefícios que oferecem. Na Tabela 2 são apresentadas as vantagens e desvantagens de cada material.

Tabela 2 - Comparação das vantagens e desvantagens entre o aço e alumínio (adaptado de [14])

Material	Vantagens	Desvantagens
Aço	Baixo custo; Possibilidade de manutenção da carroçaria; Tecnologia de produção avançada.	Aumento do peso; Necessidade de proteção contra corrosão; Tempo de vida limitado.
Alumínio	Possibilidade de produzir partes de qualquer geometria; Peso da carroçaria reduzido; Facilidade no processamento; Resistência à corrosão e baixo custo de produção.	Baixa capacidade de reparação; Necessidade de equipamento especial; Métodos de ligação caros; Mais caro do que o aço (energia gasta na produção é mais elevada).

Em paralelo, as alterações climáticas no planeta, em conjunto com a disponibilidade limitada de combustíveis fósseis, impulsionaram o desenvolvimento da mobilidade elétrica, proporcionando o uso sustentável de recursos e a proteção ambiental.

Ainda que a generalidade do público se tenha demonstrado cético relativamente à viabilidade da mobilidade elétrica, a introdução das baterias íon-lítio na última década revela-se fundamental para a afirmação da mesma [15]. Para tal, é necessário a evolução dos materiais utilizados nos cátodos, com vista a aumentar a densidade energética. No entanto, no estudo apresentado por Andre et al. [15], é evidente que nenhum dos materiais considerados até ao momento cumpre todos estes requisitos. Espera-se, porém, que o potencial e o grande espaço para desenvolvimento que se tem verificado e ainda existe destes materiais, incite futuras investigações nesta direção (Figura 8). Nos últimos anos, as baterias de estado sólido foram consideradas fontes de energia alternativas promissoras para os veículos elétricos. Para além de apresentarem uma maior densidade energética, possuem uma maior vida útil e uma gama de temperaturas de funcionamento mais alargada. No entanto, a sua comercialização ainda está numa fase inicial [16].

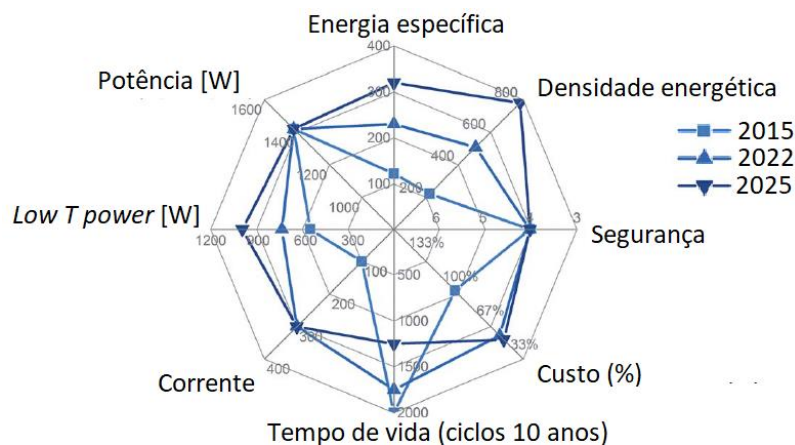


Figura 8 - Evolução do desempenho em veículos elétricos de 2015 a 2025 (adaptado de [15])

## **2.2. Processo de estampagem**

A estampagem é um processo de conformação plástica, no qual se procura conceder uma nova forma geométrica a uma chapa metálica. Para tal, realiza-se uma série de transformações, que podem ser executadas a frio ou a quente [17]. A chapa metálica pode ser deformada por meio de operações como corte e dobragem para atingir a forma desejada.

Os processos de conformação metálicos são utilizados para produzir componentes estruturais para uma ampla gama de indústrias, sendo a estampagem particularmente interessante no âmbito da indústria automóvel, cujas aplicações podem incluir armações da extremidade dianteira, sistemas de para-choques, suportes transversais/longitudinais para o painel de instrumentos, plataformas de piso, entre outras.

### **2.2.1. Tipos de estampagem**

De acordo com a temperatura de trabalho, a estampagem pode ser dividida em duas categorias: estampagem a frio ou estampagem a quente. Sendo este parâmetro determinante do processo de fabrico, têm sido realizados diversos estudos para avaliar o efeito da temperatura sobre a conformabilidade dos materiais. Em geral, pode-se afirmar que a conformabilidade melhora com o aumento da temperatura de trabalho, embora esta alteração implique equipamento adicional, isto é, uma fonte de calor, pelo que nem sempre esta é a melhor solução [18].

#### **2.2.1.1. Estampagem a frio**

Neste caso, a estampagem é realizada de modo geral à temperatura ambiente. A estampagem a frio oferece várias vantagens quando comparada à estampagem a quente, como tolerâncias mais reduzidas, bom acabamento superficial, maior dureza e resistência na peça devido ao encurvamento, custos de eletricidade e combustível reduzidos, uma vez que nenhum aquecimento da matéria-prima é necessário e requerimentos de maquinaria mínimos. Por outro lado, as desvantagens passam principalmente pela necessidade de maiores forças e energia, as ferramentas podem por vezes não ser dúcteis o suficiente para serem trabalhadas a frio e o encruamento limita a conformação exequível [19].

#### **2.2.1.2. Estampagem a quente**

A estampagem a quente envolve deformações acima da temperatura de recristalização do metal. O processo pode ser realizado de duas formas: diretamente ou indiretamente (Figura 9). No caso da estampagem a quente direta, a matéria-prima é inicialmente cortada e planificada com as dimensões desejadas. De seguida, o semi-produto é aquecido num forno e transferido para uma prensa, onde são feitas as operações de conformação. Por fim, a peça já com a geometria final, é sujeita a um arrefecimento brusco. Já na estampagem a quente indireta, o semi-produto é previamente submetido a um conjunto de operações de conformação a frio, através das quais adquire entre 90% a 95% da sua forma final. Assim, é apenas realizada conformação a quente em zonas da peça onde a estampagem é muito severa para trabalho a frio [13].

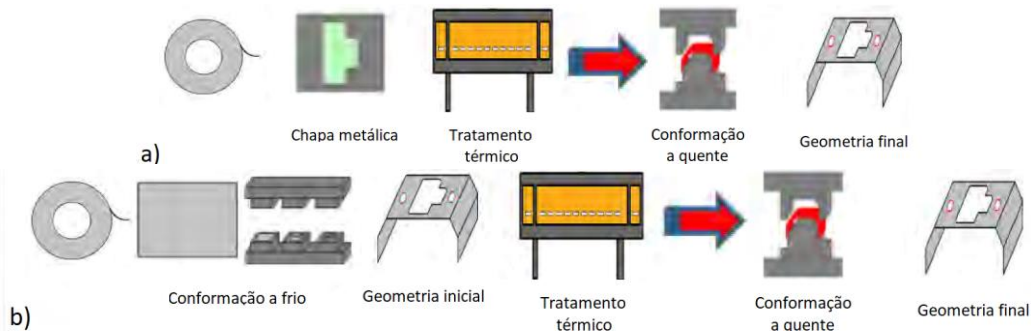


Figura 9 - Conformação a quente: a) Direta e b) Indireta (adaptado de [13])

O processo de estampagem a quente de caráter direto requer um sistema de arrefecimento de alta capacidade que, por sua vez, permite ao produto final adquirir estruturas martensíticas. Dependendo do material, isto significa um aumento da resistência à tração para a ordem dos 1000-1900 MPa [13]. Para além disso, é este método de conformação a quente que é maioritariamente aplicado a nível industrial, uma vez que o processo de natureza indireta requer duas matrizes, o que o torna mais dispendioso [20].

Assim sendo, as vantagens deste processo são a possibilidade de aplicar uma deformação plástica significativa na matéria-prima, força necessária mais reduzida, aumento das propriedades mecânicas da matéria-prima e eliminação dos problemas relacionados com retorno elástico. No entanto, as ferramentas têm um tempo de vida mais curto, o acabamento superficial da matéria-prima é pobre, existe menor rigor dimensional e acontece oxidação da superfície da peça. Para além disso, é um processo bastante complexo e, por isso, requer um domínio não só do processo de conformação, mas também dos fenómenos estruturais que acontecem durante o arrefecimento [13], [20].

## 2.2.2. Operações

Para atingir a forma geométrica desejada, é necessário a aplicação de forças externas à chapa metálica, subentendendo-a a diferentes operações durante o processo de estampagem, com vista à mudança definitiva da sua forma. Estas operações podem ser de corte, de dobragem ou ainda uma embutidura profunda.

### 2.2.2.1.1. Corte

A definição para o corte em ferramenta, segundo Chiaverini [17], é a obtenção de certas formas geométricas a partir de chapas metálicas, através da intervenção de um punção que exerce pressão na chapa apoiada numa matriz. Como é demonstrado na Figura 10, quando o punção penetra a matriz, o esforço de compressão converte-se em esforço de cisalhamento e acontece o corte de um pedaço de chapa. Assim, é importante que, quer o punção, quer a matriz, apresentem um perímetro/cavidade em conformidade com a forma que se pretende obter a partir da chapa.

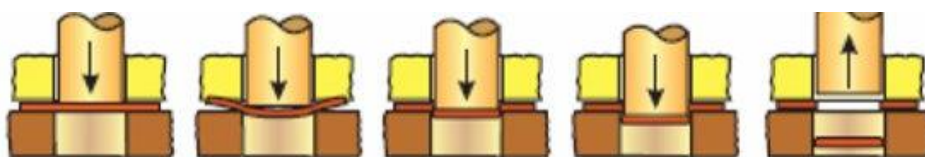


Figura 10 - Representação do processo de corte em ferramenta [21]

A separação da chapa acontece por arrancamento e ocorre de forma brusca. Assim sendo, a superfície inferior ao corte não é perfeita e apresenta rebarbas, em oposição à superfície superior, cujo estado de superfície não possui defeitos. Este fenómeno é demonstrado na Figura 11 e existem vários fatores que podem contribuir para o aumento ou redução da quantidade de rebarba. Um dos mais relevantes é a folga entre o punção e a matriz. Este valor é definido em função da espessura da chapa a trabalhar e do tipo de material, que pode ser mais ou menos rígido. Quanto maior a espessura da chapa e o diâmetro do punção, maior a folga; e vice-versa. Um valor de folga desajustado pode levar à laminagem e aparecimento de rebarbas exagerado que danificam o punção [17].

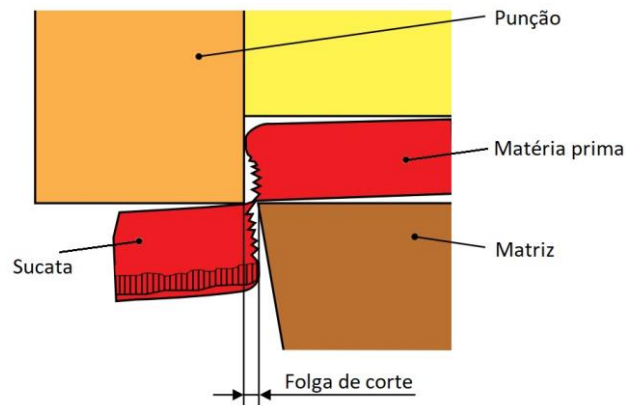


Figura 11 - Aparecimento de rebarba na superfície de corte (adaptado de 20)

A equação que permite determinar o esforço para o corte é a seguinte:

$$Q = p \cdot e \cdot \sigma_c, \quad (1)$$

onde  $Q$  representa o esforço de corte (em kgf),  $p$  o perímetro de corte (mm),  $e$  a espessura da chapa (mm) e  $\sigma_c$  a resistência ao corte do material (em kgf/mm<sup>2</sup>). Sendo que a resistência ao corte é 3/4 a 4/5 da resistência à tração do material,  $\sigma_t$ .

### 2.2.2.1.2. Dobragem

Tal como o nome sugere, este processo consiste na dobragem da chapa, de forma a obter elementos curvos, procurando manter a espessura da mesma ou evitar qualquer outra alteração dimensional. O processo ocorre tal como demonstrado na Figura 12, onde se pode observar a ferramenta na sua fase final ou fechada. À medida que o punção vai descendo, entra em contacto com a chapa metálica, exercendo força sobre a mesma. Com o deslocamento progressivo do punção, a chapa é obrigada a se deformar e moldar à forma da cavidade da matriz.



Figura 12 - Exemplo de uma operação de dobragem [21]

Em materiais muito duros, é comum que, após a realização do esforço de dobragem, a chapa tenda a voltar à sua forma original (retorno elástico). Para combater este fenómeno, é indicado construir as matrizes com ângulos de dobragem maiores, para além de se realizar a operação em várias etapas, com uma única ou várias matrizes. Por esta razão, na dobragem é muito importante ter em tenção o raio de curvatura e a elasticidade do material [17]. A determinação do esforço de dobragem numa chapa numa matriz sujeita ao esforço de dobragem é efetuada admitindo que a chapa se comporta como um sólido apoiado nas extremidades e carregado no centro [17]. Assim sendo, o momento fletor resultante das forças externas  $M_f$ , é:

$$M_f = \frac{P \cdot \frac{l}{2} \cdot \frac{l}{2}}{l} = \frac{P \cdot l^2}{4 \cdot l} = \frac{P \cdot l}{4} \quad (2)$$

Sendo a força necessária para a dobragem  $P$ , e a distância entre apoios  $l$ . Ao momento fletor opõe-se o momento das reações internas do material, dado por:

$$\sigma_f \cdot \frac{I}{z} \quad (3)$$

Sendo que,

$I$  = momento de inércia da secção, em relação ao eixo neutro,  $\text{mm}^4$

$\sigma_t$  = limite de resistência à tração,  $\text{kgf}/\text{mm}^2$

$\sigma_f$  = tensão de flexão necessária para obter a deformação permanente,  $\text{kgf}/\text{mm}^2$

Admite-se que  $\sigma_f = 2 \cdot \sigma_t$

Logo, igualando as duas componentes, tem-se que:

$$\frac{P \cdot l}{4} = \sigma_f \cdot \frac{I}{z} \quad (4)$$

Para secções retangulares,

$$\frac{I}{z} = \frac{b \cdot e^2}{6}, \quad (5)$$

com  $b$ , a largura da chapa e a espessura,  $e$ . Então:

$$\begin{aligned} \frac{P \cdot l}{4} = \frac{\sigma_f \cdot b \cdot e^2}{6} &\equiv \frac{P \cdot l}{2} = \frac{\sigma_f \cdot b \cdot e^2}{3} \\ &\equiv P = \frac{2 \cdot \sigma_f \cdot b \cdot e^2}{3 \cdot l} \end{aligned} \quad (6)$$

### 2.2.2.1.3. Embutidura profunda

A embutidura profunda tem a finalidade produzir objetos ocos a partir de chapas planas sem modificar a espessura das mesmas, tal como acontece na dobragem. A deformação acontece durante uma ou mais fases. Segundo Keeler et al. [13] o processo, exemplificado na Figura 13, acontece quando o bordo de uma chapa circular é sujeito a tensão radial e compressão circunferencial, à medida que o centro da chapa se desloca radialmente em direção ao centro da matriz, devido à força aplicada por um punção.

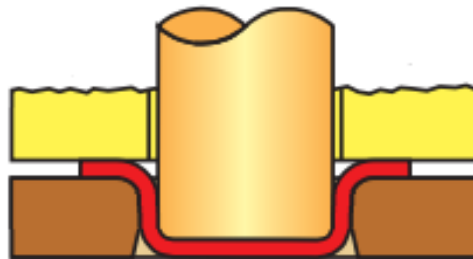


Figura 13 - Deformações resultantes do processo de embutidura profunda [21]

A embutidura profunda é um processo bastante interessante, quando aplicado em componentes cuja geometria obrigue elevadas deformações durante o seu fabrico. De salientar que a propriedade mecânica crucial para um bom desempenho do processo é o valor de anisotropia normal. Este processo tem sido pouco desenvolvido ao longo dos anos, uma vez que é um processo relativamente simples, assinalando-se como único progresso de relevância a implementação de desenho assistido por computador [22]. As aplicações são diversas como cápsulas, extintores de incêndio, lavatórios de cozinha, latas de conserva de bebida e comida, entre outros. Na indústria automóvel destacam-se os reservatórios de combustível, guarda-lamas e cárteres.

### 2.2.3. Propriedades mecânicas

No seu livro sobre conformação de chapa metálica, Hu et al. [23] referem que a capacidade de uma chapa metálica para ser moldada pode ser designada por conformabilidade e deve ser bem conhecida de modo a se conseguir prever e descrever o comportamento da mesma. Durante o processo de conformação, a deformação da chapa pode acontecer em dois regimes distintos – elástico e plástico. Sempre que a uma chapa metálica é aplicada tensão ocorre deformação elástica, por muito pequena que seja. No entanto, o processo de estampagem acarreta naturalmente elevadas deformações e implica a transição para um regime de deformação plástica [23].

#### 2.2.3.1. Curva tensão-deformação

Todos os aços têm um comportamento idêntico e que pode, por isso, ser conjeturado. A curva tensão-deformação é uma descrição gráfica da deformação de um material quando submetido a uma carga de tração uniaxial (ensaio de tração). Inicialmente constata-se que a deformação é do tipo elástico, isto é, é recuperável. A deformação desaparece quando a tensão, na forma de força aplicada, é removida. Nesta situação, a força é proporcional ao deslocamento. Porém, em patamares de força superiores o material entra em regime plástico, ou não recuperável. Num material dúctil, como é o caso exemplificado na Figura 14(a), a tensão atinge um nível máximo

(tensão de rotura) e após isso decresce, até à ocorrência de fratura. Assim sendo, em regime plástico é difícil prever com exatidão o comportamento do provete tendo em conta que não existe uma relação linear entre a tensão e a deformação [24].

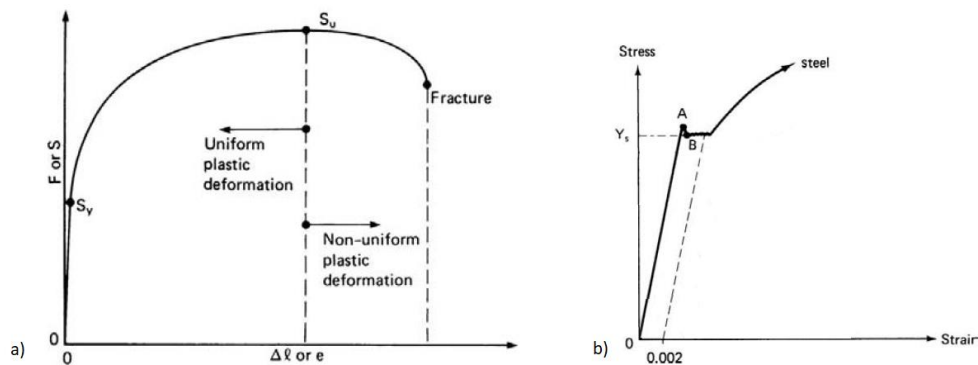


Figura 14 - a) Gráfico tensão-deformação e b) Cálculo gráfico da tensão de cedência (adaptado de [24])

A transição entre o regime elástico e o regime plástico acontece, quase sempre, de forma gradual e instável, e designa-se patamar de cedência. Esta região é facilmente identificável, pois verifica-se um aumento da deformação sem que o valor de tensão se altere (Figura 14(b)). No entanto, nem todos os materiais, como o caso dos aços de elevado limite elástico, apresentam patamar de cedência. Tendo em conta estes casos, desenvolveu-se um método para calcular a tensão de cedência em qualquer material, traçando uma linha paralela ao segmento linear do gráfico, com um *offset* à origem de 0,002, e que interseja o regime plástico do gráfico. Isto significa que a tensão de cedência pode ser definida como a tensão para qual a deformação plástica é 0,2% [24]. Este procedimento encontra-se representando na Figura 14(b).

### 2.2.3.2. Retorno elástico

O retorno elástico é caracterizado por uma alteração de formato da peça que acontece quando se deixa de aplicar carga. Durante este fenómeno a peça tende a recuperar elasticamente e voltar à sua forma inicial (uma vez que se encontra ainda no regime elástico do gráfico tensão-deformação). O *springback*, como também pode ser designado, acontece em todos os materiais, embora em alguns casos possa ser impercetível. As preocupações relativamente ao retorno elástico e controlo de qualidade têm vindo a crescer entre os fabricantes, uma vez que, de igual modo, o uso de AHSS tem vindo a aumentar. Partes compostas por AHSS apresentam um retorno elástico maior, comparativamente a componentes em aço macio [13].

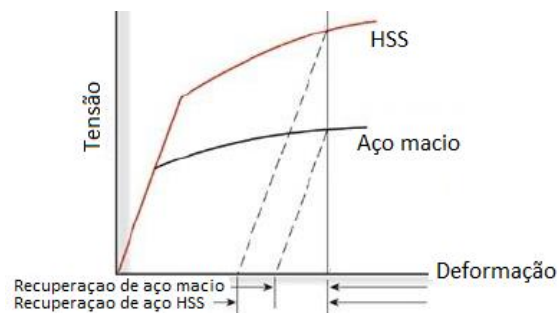


Figura 15 - Comparação do retorno elástico de um aço macio e de um HSS (adaptado de [13])

São várias as causas do retorno elástico, mas a explicação para a discrepância observada na Figura 15, deve-se essencialmente à diferença de valor da tensão de rotura. Pode-se afirmar que, em materiais com igual módulo de elasticidade, o retorno elástico é diretamente proporcional à tensão de rotura, daí a razão para que um aço de alta resistência apresente um maior retorno elástico. Ainda assim, existem outros fatores bastante preponderantes no comportamento elástico de uma peça, distinguindo-se: o material utilizado, parâmetros do próprio processo, geometria das ferramentas, espessura e geometria da peça, como demonstrado na Figura 16 [25].

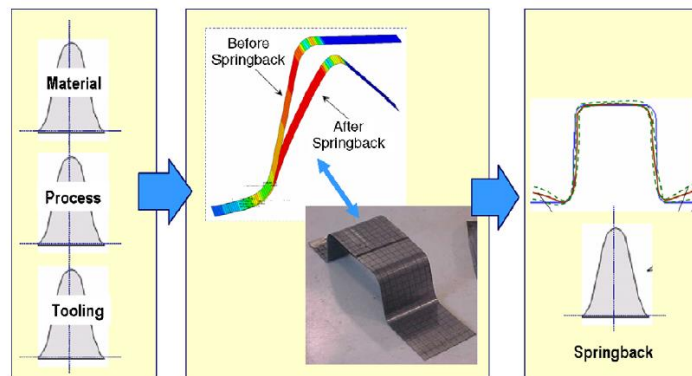


Figura 16 - Influência dos parâmetros de estampagem no retorno elástico [25]

As variações no retorno elástico entre diferentes materiais tornam inviável a prevenção e aplicabilidade de técnicas de compensação. No entanto, este fenômeno conduz a variações de qualidade e, por consequência, problemas durante a montagem final de peças [25]. Entender e conseguir prever e solucionar o retorno elástico é fundamental para reduzir atrasos e sucata em produções em massa e, assim, custos adicionais.

### 2.2.3.3. Encruamento

O encruamento é um fenômeno que acontece durante a fase plástica e que resulta num aumento da resistência e dureza do material, também chamado de *strain hardening*. Este fenômeno acontece quando um metal é deformado plasticamente abaixo da temperatura de recristalização, isto é, é trabalhado a frio. Geralmente, o trabalho a frio aumenta a resistência e a dureza de um material e reduz a sua ductilidade [24]. Dependendo da situação, este fenômeno pode representar uma vantagem ou uma desvantagem e por isso, a sua avaliação é fundamental. Existem vários modelos matemáticos para descrever este fenômeno, mas geralmente o mais utilizado é a simplificação realizada por Hollomon:

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n, \quad (7)$$

onde  $\sigma$  é a tensão,  $K$  é o módulo de elasticidade,  $\varepsilon$  é a deformação e  $n$  é o coeficiente de encruamento.

Uma vez que o coeficiente de encruamento do material assume valores entre 0 e 1, podem-se retirar as seguintes conclusões: no caso de  $n = 0$ , a equação que descreve a tensão torna-se  $\sigma = K$ . Assim, a deformação do material no regime plástico ocorre a tensão constante. Estamos na presença de um sólido perfeitamente plástico (Figura 17(a)). Por outro lado, para situações em que  $n = 1$ , o material comporta-se como um sólido perfeitamente elástico (Figura 17(b)). Isto é, a equação que descreve a evolução da tensão toma a forma  $\sigma = K \cdot \varepsilon$ . Nesta condição, em regime

plástico, o material apresenta um comportamento linear e a deformação aumenta proporcionalmente com o aumento da tensão. No entanto, os materiais metálicos não possuem um comportamento tão extremo. Neste caso, o comportamento pode ser representado por uma curva intermédia em função do coeficiente de encruamento do material.

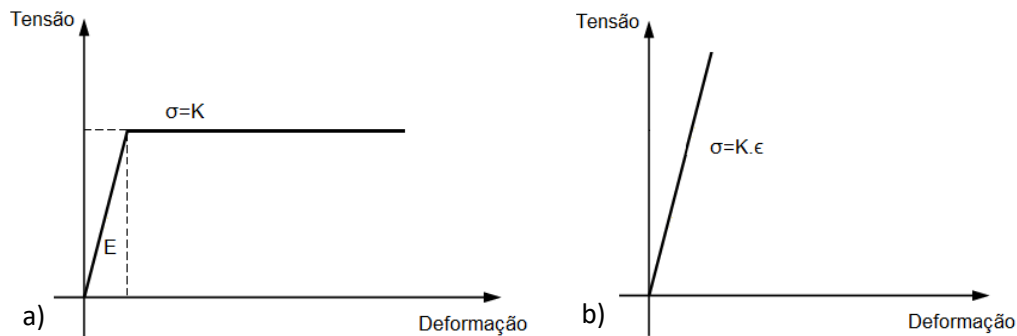


Figura 17 - a) Gráfico tensão-deformação de um sólido perfeitamente plástico e b) Gráfico tensão-deformação de um sólido perfeitamente elástico (adaptado de [26])

Outro modelo bastante utilizado é o modelo de Swift. A lei de endurecimento do material, para este caso, tem em consideração a pré-deformação:

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n, \quad (8)$$

com  $\varepsilon_0$  sendo a pré-deformação.

#### 2.2.3.4. Anisotropia

A anisotropia é uma característica dos materiais caracterizada pela dependência direcional das propriedades mecânicas. As chapas metálicas demonstram um comportamento plástico anisotrópico devido à recristalização da sua estrutura causado maioritariamente pelo processo de laminagem. As diferenças de propriedades mecânicas dentro do próprio material acontecem pois, durante as operações de laminagem, ocorre o alongamento e alinhamento dos grãos da microestrutura na direção da laminagem e, em contrapartida, os grãos são contraídos na direção da espessura [25]. Lankford [27] propôs um modelo matemático para calcular a anisotropia plástica, introduzindo a taxa de deformação plástica, ( $r$ ), também designado por valor de Lankford. Este cálculo é feito através da razão entre a deformação na direção da largura e a deformação na direção da espessura do provete, recorrendo a ensaios de tração uniaxiais.

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t}, \quad (9)$$

em que  $\varepsilon_w$  corresponde à deformação real na direção da largura e  $\varepsilon_t$  corresponde à deformação real na direção da espessura.

São considerados dois tipos de anisotropia: anisotropia planar e anisotropia normal. A anisotropia planar avalia de que forma as propriedades do material variam no plano da chapa. Já no caso da anisotropia normal, é analisado de que forma as propriedades na direção da espessura variam das propriedades do plano da chapa [28].

A determinação da anisotropia normal ( $\bar{r}$ ) é quantificada como demonstrado na equação (10) como o valor médio de  $r$  em três direções (demonstradas na Figura 18): direção de laminagem ( $r_0$ ), direção diagonal ( $r_{45}$ ) e direção transversal ( $r_{90}$ ). Em materiais isotrópicos, o valor de  $\bar{r}$  é igual a 1, o que significa que, tal como seria expectável, o comportamento do corpo de prova é igual em todas as direções. Já a anisotropia planar,  $\Delta r$ , é calculada pela equação (11).

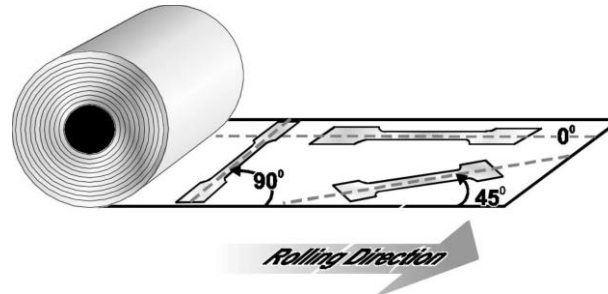


Figura 18 - Exemplo de provetes segundo a direção de laminagem, diagonal e transversal [13]

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2.r_{45} + r_{90}}{4} \quad (10)$$

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2.r_{45} + r_{90}}{2} \quad (11)$$

Ailinei et al. [29] evidenciam como o comportamento de um material diferente consoante a direção do provete. Recorrendo a ensaios de tração foram obtidos os gráficos tensão-deformação para as diferentes situações (Figura 19), assim demonstrado a dependência do limite elástico em relação à orientação no material S600MC.

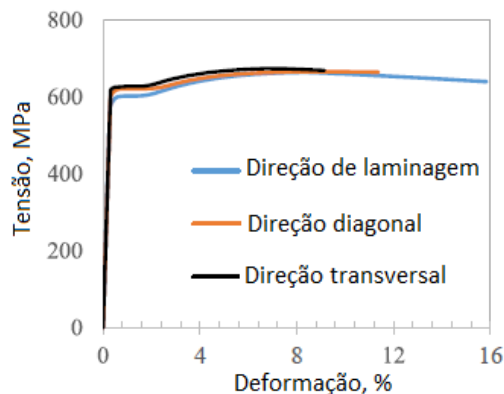


Figura 19 - Gráfico tensão-deformação do aço S600MC, em função da orientação (adaptado de [29])

### 2.2.3.5. Modos de deformação

O estado de tensão de um ponto pode ser representado por um elemento orientado numa determinada direção, de modo a que esteja sujeito apenas a tensões denominadas principais, com valores máximos e mínimos ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$ ). Por sua vez, estas tensões submetem o elemento a deformações designadas, de igual modo, deformações principais ( $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  e  $\epsilon_3$ ). Em processos de estampagem, estas deformações podem ser obtidas por um processo de impressão de uma malha de círculos na superfície da chapa e posterior análise da sua distorção. Ou seja, quando o material

sofre deformação, os círculos tomam a forma de elipses alinhados segundo as direções principais de deformação,  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$ .

Na estampagem a deformação acontece essencialmente de duas formas [30], sinalizadas no diagrama da Figura 20:

- **Por expansão** – domínio onde a chapa é sujeita a esforços de tração em todas as direções ( $\varepsilon_2 > 0$ );
- **Por extensão** – domínio no qual existe compressão ( $\varepsilon_2 < 0$ ), associado, por isso, a um aumento de espessura.

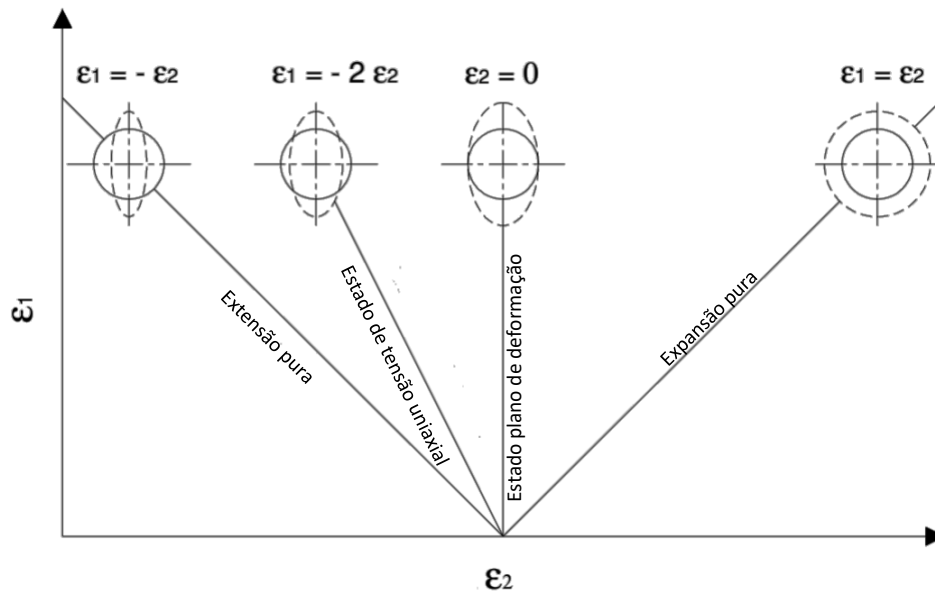


Figura 20 - Modos de deformação (adaptado de [31])

O componente responsável por controlar o modo de deformação durante a estampagem é o calcador. Se a pressão realizada na chapa for suficiente para impedir o seu deslocamento na matriz, a deformação acontece principalmente por expansão. Caso contrário, se a pressão for insuficiente para impedir o deslocamento da chapa, ocorre deslizamento do material para o interior da matriz e as tensões de compressão provocam um aumento de espessura no componente. Neste caso, diz-se que a deformação ocorre principalmente por extensão [30].

### 2.2.3.6. Limites de conformação

É possível delimitar uma zona que, em teoria, define as deformações máximas principais admissíveis que um material pode sofrer sem que haja o risco de estrição ou fratura. Este limite é representado num diagrama, tal como a Figura 21, desenvolvido por Keeler [32] e Goodwin [33] ao qual se dá o nome de curva limite de embutidura (CLE). A CLE obtém-se através da realização de ensaios mecânicos (geralmente o ensaio de Marciniak e de Nakazima), a partir da medição do estado de deformação em diversos momentos: momento da formação de pescoço de estrição e nos momentos imediatamente antes e depois. Esta ferramenta mostra, de forma gráfica, a relação entre as deformações principais que ocorrem no plano da chapa.

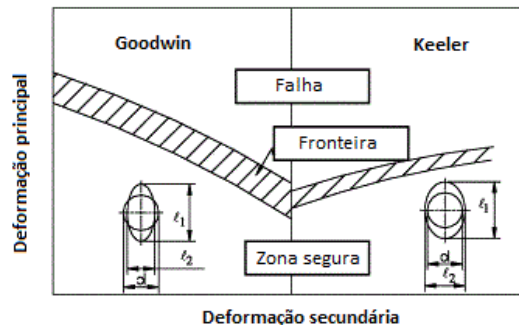


Figura 21 - Curva limite de embutadura (adaptado de [34])

O limite de embutadura depende essencialmente da espessura e o coeficiente de encruamento. Pode-se afirmar que é, fundamentalmente, este último o parâmetro preponderante na determinação da CLE. Todos os aços apresentam, normalmente, uma CLE com o mesmo aspeto, embora se verifique que os aços macios apresentam uma CLE mais elevada do que aços de alta resistência [32]. Embora a CLE seja uma ferramenta bastante útil em casos de conformação severa, este método é válido apenas em casos de carregamento proporcional, nos quais a razão entre as tensões principais se mantém constante. Esta condição é, por vezes, erradamente comparada a uma condição de deformação proporcional, caso em que a razão entre as tensões plásticas principais é constante [35]. No entanto, para assegurar que a rotura não acontece, geralmente constrói-se uma Curva Limite de Rotura (CLR), que determina os valores de  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$  máximos admitidos pelo material.

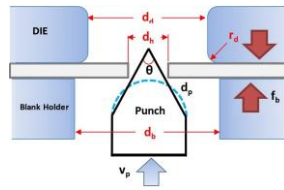
### 2.2.3.7. Ensaios mecânicos

Neste subcapítulo são abordados os ensaios mecânicos mais utilizados para obter as propriedades e limites de conformabilidade dos materiais no âmbito do processo de estampagem, com vista à validação da conformabilidade dos mesmos. Assim sendo, destacam-se os ensaios descritos na Tabela 3: ensaio de tração, ensaio de Nakazima, *Hole Expansion Test* (HET), ensaio Swift e o ensaio de flexão de dobragem [36].

Tabela 3 - Exposição dos principais ensaios mecânicos realizados no processo de estampagem

Designação	Imagem	Descrição
Ensaio de tração		<p>Os ensaios de tração são geralmente a ferramenta mais utilizada na indústria para medir de que forma as tensões instaladas se traduzem em deformação, dando origem ao gráfico tensão-deformação. O procedimento de um ensaio de tração envolve a aplicação gradual de uma carga uniaxial (até à fratura da amostra), através de garras fixadas nas duas extremidades da amostra, enquanto uma célula de carga monitoriza a força e um extensómetro monitoriza o deslocamento ao longo de todo o ensaio. Através deste ensaio é possível obter várias propriedades mecânicas essenciais para caracterizar o material, como módulo de elasticidade longitudinal, resistência à tração, tensão de rotura, tensão de cedência, entre outras [37].</p>

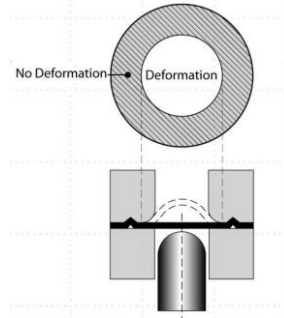
### Hole Expansion Test



O ensaio HET é, essencialmente, um punção numa chapa plana munida de um furo, utilizando um punção plano ou cónico.

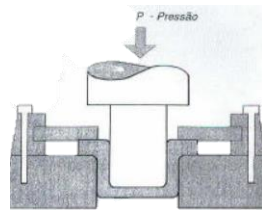
Quando aparece uma fissura em toda a espessura da chapa é calculado o fator *Hole Expansion Ratio* (HER) - aumento percentual que o diâmetro sofre até à fissura. Assim, quanto maior for este valor, maior é a capacidade de conformação local [37].

### Ensaio de Nakazima



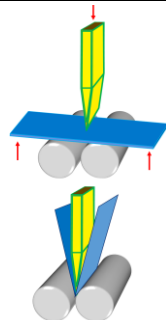
O ensaio de Nakazima tem como objetivo obter a CLE de um material e avaliar a conformabilidade de uma chapa. Realiza-se pela estampagem de vários provetes retangulares, de diferentes dimensões, utilizando um punção hemisférico. Pela repetição dos ensaios em provetes de espessura variada, é possível obter uma vasta gama de estados de tensão que permitem gerar diferentes trajetórias de deformação, a partir das quais são determinadas as deformações críticas. É um dos ensaios mais utilizados para este efeito devido à sua simplicidade, ainda que seja demorado e dispendioso, no sentido em que requer diversos provetes [37].

### Ensaio Swift



O ensaio Swift é realizado por intermédio de um punção e uma matriz que deformam um disco metálico, por embutidura profunda. É um ensaio especialmente útil no estudo deste processo. Deste ensaio, é possível obter a razão limite de estampagem (RLE), que corresponde à máxima razão entre o diâmetro máximo do disco e o diâmetro mínimo do punção para que a estampagem aconteça sem que se verifique falha [38].

### Ensaio de dobragem



Estes testes são essencialmente uma flexão a três pontos com um punção fino, que se traduz numa dobragem do provete em V. Na indústria automóvel, a norma VDA 238-100, que rege o procedimento destes ensaios, é amplamente utilizada com o intuito de limitar a variabilidade de resultados. Esta norma restringe a dimensão da amostra, raio do punção, espaçamento entre rolos e raio dos rolos. Estes testes são uma alternativa aos tradicionais ensaios de tração, cujos resultados não permitem averiguar a conformabilidade à flexão de um material, pois trata-se de dois métodos de falha distintos [37].

## 2.2.4. Equipamentos de estampagem

### 2.2.4.1. Prensas

A prensa é o componente responsável por aplicar força à matéria-prima, num determinado intervalo de tempo e precisão. De acordo com Suchy [39], as prensas são classificadas como descrito na Tabela 4.

Tabela 4 - Tipos de prensas e suas classificações (adaptado de [39])

Parâmetro de classificação	Classificação
Função	Produção de energia
	Produção de força
	Servo-controlada

	Hidráulica
	Mecânica
Mecanismo de acionamento	Pneumática
	Eletromagnética
Construção	Prensa em "C"
	Prensa em "O"

No domínio da estampagem de componentes para a estrutura automóvel, as prensas mais utilizadas são as mecânicas, hidráulicas e, mais recentemente, as servo-controladas. Assim sendo, é apresentada uma breve descrição destes três tipos de prensas e as suas respetivas vantagens e desvantagens.

### 2.2.4.1.1. Prensa mecânica

Existem vários tipos de prensas mecânicas convencionais, que diferem entre si consoante o mecanismo usado para converter o movimento de rotação do motor em movimento linear do carro. O mecanismo mais utilizado é do tipo biela excêntrica, que pode ser observado em detalhe na Figura 22. Na prensa excêntrica, o motor aciona o volante através de uma correia de transmissão. A energia é transferida do volante através do sistema combinado de embraiagem/travão para o eixo excêntrico. Por sua vez, a biela, montada na bucha excêntrica, transforma o movimento circular em linear [40]. Este sistema destaca-se pelo baixo custo, simplicidade e capacidade de funcionar a elevadas taxas de produção e elevada precisão.

A magnitude da força de estampagem  $F$ , gerada nas prensas mecânicas, depende da distância  $h$ , sobre a qual é exercido uma determinada quantidade de trabalho  $W$ :

$$F = \frac{W}{h} . \quad (12)$$

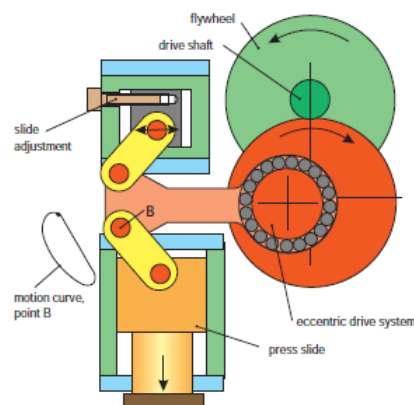


Figura 22 - Exemplo de sistema excêntrico que utiliza engrenagens [41]

### 2.2.4.1.2. Prensa hidráulica

Os sistemas hidráulicos convertem energia elétrica (com auxílio de um motor) em energia hidráulica, que é posteriormente transformada em energia mecânica, recorrendo aos cilindros hidráulicos presentes no interior da prensa, como demonstrado na Figura 23. Estes equipamentos

funcionam com base no princípio segundo o qual uma pressão hidrostática é distribuída uniformemente ao longo de um sistema de tubos, e que uma pressão  $p$ , que atua numa superfície de área  $A$ , produz uma força  $F$ , igual a:

$$F = p.A. \quad (13)$$

Para além disso, a potência de uma prensa hidráulica  $P$ , depende do caudal volúmico de fluido  $Q$ , e ainda da pressão, bem como das perdas energéticas  $n_{ges}$ :

$$P = \frac{Q \cdot p}{n_{ges}}. \quad (14)$$

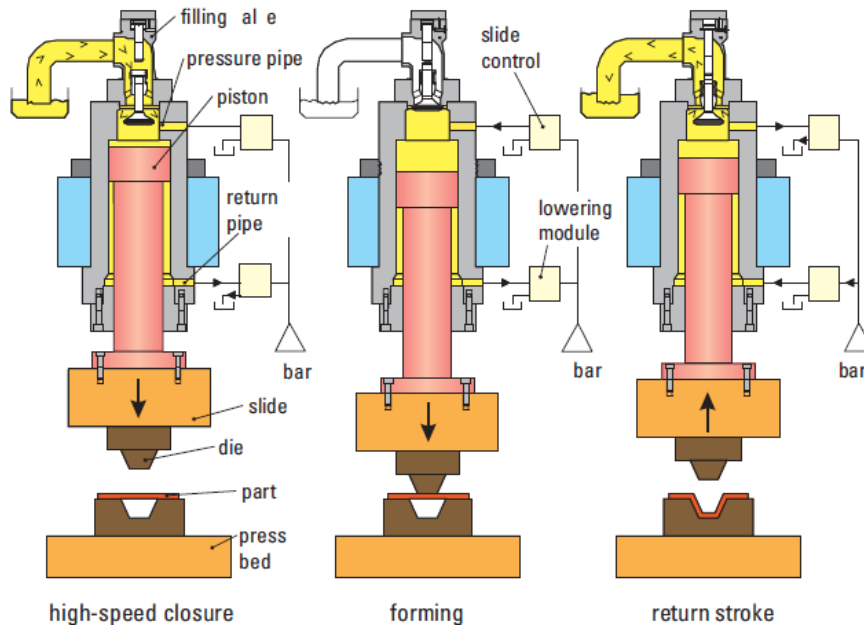


Figura 23 - Ciclo de funcionamento de uma prensa hidráulica [41]

As prensas hidráulicas destacam-se pela sua versatilidade, pelo que apresentam uma vasta gama de aplicações, uma vez que têm a capacidade de executar cursos longos e permitem o controlo sobre o carro da prensa em todo o curso. Comparativamente às prensas mecânicas, são habitualmente mais lentas, embora apresentem a possibilidade de conseguir variar a velocidade do carro. Este fator é especialmente importante pois pretende-se uma aproximação rápida à peça, estampagem lenta, seguida de uma abertura rápida da prensa. Para além disso, as prensas hidráulicas são especialmente interessantes em processos de embutidura profunda, pois mantêm uma pressão constante na peça. No entanto, dado que não é possível conservar energia de reserva, toda a potência é aplicada durante o processo de conformação. Por esta razão, as prensas hidráulicas necessitam de uma potência significativamente maior para atingirem forças de operação semelhantes às aplicadas pelas prensas mecânicas.

### 2.2.4.1.3. Prensa servo-controlada

Recentemente, as prensas convencionais evoluíram para as prensas servo-controladas [13]. A principal diferença no que diz respeito ao mecanismo de funcionamento das prensas servo-controladas, relativamente às prensas convencionais, é a utilização exclusiva de um servomotor como fonte de energia, o que elimina a necessidade dos volantes de inércia e embraiagem, como

se observa na Figura 24. Este sistema permite obter a flexibilidade de uma prensa hidráulica e alcançar a velocidade e precisão das prensas mecânicas.

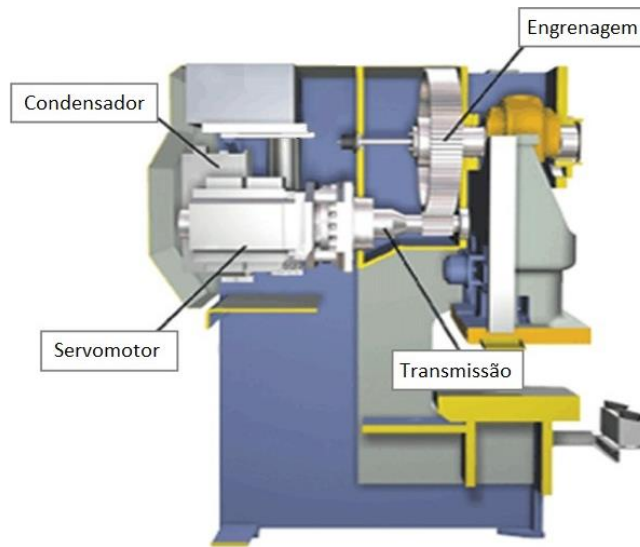


Figura 24 - Funcionamento de uma prensa servo-controlada [42]

A evolução registada deveu-se essencialmente à procura de um sistema que fosse capaz de reduzir o tempo de ciclo. A utilização de motores dinâmicos facilita a rápida programação de diferentes sequências de movimento do ciclo de prensa. Assim, através de cursos que descrevem movimentos oscilatórios, onde o excêntrico se comporta como um pêndulo alternadamente entre o avanço e recuo, o tempo de ciclo pode ser ainda mais encurtado, como é visível na Figura 25. Este sistema representa uma redução do tempo de ciclo para metade, em comparação com as prensas convencionais [13].

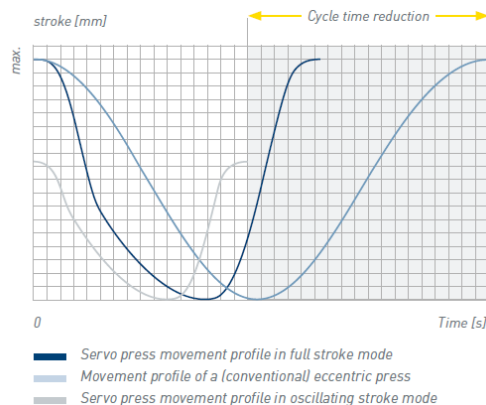


Figura 25 - Comparação do movimento de diferentes prensas [41]

## 2.2.4.2. Ferramentas

As ferramentas utilizadas no processo de estampagem podem ser divididas em três grandes grupos: manuais, progressivas e *transfer*. Como em qualquer projeto, a seleção do tipo de ferramenta depende de vários fatores, entre eles a dimensão da peça, cadência de produção, material e sua espessura, complexidade da peça, entre outros. No entanto, uma mesma peça pode, de igual forma, ser obtida através de ferramentas de diferentes naturezas, pelo que é importante selecionar a ferramenta mais rentável para cada situação [43].

### 2.2.4.2.1. Ferramentas manuais

Como o nome sugere, neste tipo de ferramenta a peça é transferida manualmente pelo operador. Estas ferramentas apenas permitem executar uma operação por cada golpe da prensa. Por esta razão, as ferramentas manuais são concebidas para pequenas séries e trabalham a cadências baixas de 5-20 peças por hora. É de evitar a utilização deste tipo de prensa numa produção industrial pois envolve trabalho manual, o que reduz o grau automatização do processo e, em contrapartida, aumenta significativamente o tempo de ciclo [43].

### 2.2.4.2.2. Ferramentas progressivas

Nas ferramentas progressivas as várias operações necessárias para a obtenção do produto final são sequenciais. A bobine é desenrolada, passando inicialmente entre rolos que garantem o seu nivelamento com a prensa. De seguida, a chapa é alimentada à prensa de forma automática através de um movimento designado por passo, ou avanço da ferramenta, na qual é sujeita a um conjunto de diferentes operações incrementais que complementam o trabalho realizado nos estágios anteriores. A última operação consiste na separação da peça da banda metálica. Assim sendo, uma vez que a prensa executa diferentes operações de forma contínua e em simultâneo, significa que existem várias peças no interior da prensa que estão em diferentes estágios de fabrico. A banda metálica que origina o produto final tem um aspeto muito característico, como apresentado na Figura 26 [44].



Figura 26 - Banda metálica obtida numa ferramenta progressiva

Convém salientar que, uma vez que a peça se encontra ligada à chapa até ao momento da separação, é importante que a tira de chapa se encontre devidamente posicionada na prensa para garantir que as operações se realizem com precisão no local planeado. Para tal, são realizados furos na tira, designados por furos piloto. Deste modo, quando a prensa fecha para realizar trabalho sobre a matéria-prima, os pilotos localizados no bloco superior (que são salientes relativamente aos punções, para que o posicionamento se realize antes das operações de conformação) entram

nestes mesmos furos e permitem que a banda se ajuste. Esta técnica aumenta significativamente a precisão do processo.

As vantagens e desvantagens de maior relevância das ferramentas progressivas estão expostas na Tabela 5.

Tabela 5 - Características de uma ferramenta progressiva [45]

<b>Vantagens</b>	Variedade de perfis através de um processo único;
	Adequado ao fabrico de peças de tamanho pequeno/médio;
	Eficiência e fabrico de baixo custo para produções de grande escala;
	Produção de alta velocidade;
	Indicado para projetos com tolerâncias reduzidas;
<b>Desvantagens</b>	Produção de sucata é mínima.
	Incapacidade de executar operações em direções diferentes da direção realizada pelo carro da prensa (que tipicamente é horizontal);
	Ferramentas geralmente mais complexas e mais caras.

### 2.2.4.2.3. Ferramentas *transfer*

Ao contrário das ferramentas progressivas, as prensas *transfer* são compostas por várias ferramentas que executam as operações individualmente, como a grande diferença diz respeito à separação da banda metálica da matéria-prima acontecer logo à entrada da prensa. Ao contrário do que acontece nas ferramentas progressivas, onde a matéria-prima permanece ligada à bobina durante todo o processo de conformação, nas ferramentas *transfer* o *blank* é separado da bobina na primeira operação e transita de operação em operação através de um sistema automático de pinças, como se demonstra na Figura 27 [39]. Na Tabela 6 são apresentadas as características das ferramentas *transfer*.

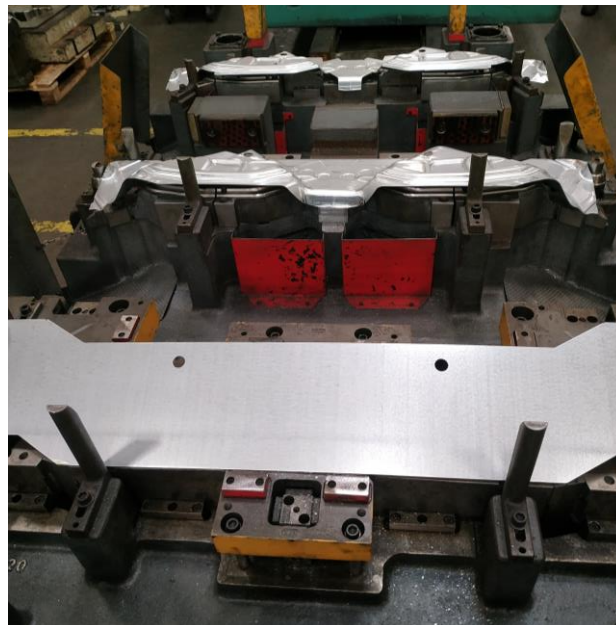


Figura 27 - Banda metálica numa ferramenta *transfer*

Tabela 6 - Características de uma ferramenta transfer [45]

<b>Vantagens</b>	Alto rendimento e produtividade em produções de pequena escala;
	Não há a necessidade de guiar a chapa, pois a matéria-prima é transferida individualmente;
	Indicado para o fabrico de peças de grande tamanho;
	Processo flexível.
<b>Desvantagens</b>	Velocidade de estampagem baixa;
	Tempo de ciclo longo devido à transferência de material entre secções.

#### 2.2.4.2.4. Componentes

As ferramentas de estampagem são compostas por um vasto número de componentes normalizados essenciais para a execução do processo. De seguida, são apresentados os componentes (expostos na Figura 28) e feita uma sucinta explicação da sua função [46].

- Punção (1) /Matriz (2) – Elementos usados para a execução de formas ou diversas operações de corte;
- Cabeçote/bloco superior (3) – Fixa a parte superior da ferramenta;
- Bloco inferior (4) – Fixa a parte inferior da ferramenta;
- Porta-punções (5) – Elemento responsável por fixar os punções no cabeçote;
- Porta-matriz (6) – Da mesma forma que o porta-punções, tem a função de fixar as matrizes ao bloco inferior;
- Extratores (7) – Pinos aplicados nas diversas operações da ferramenta, usados para facilitar a extração da peça ou do desperdício (em caso de operações de corte);
- Colunas (8) /Casquilhos de guiamento (9) – Elementos que garantem o devido alinhamento entre o punção e a matriz;
- Molas/Cilindros a gás (10) – Elementos destinados a absorver energia e amortecer as forças aplicadas durante o curso de trabalho;
- Cerra-chapas/Almofada/Calcador (11) – Componente responsável por exercer pressão sobre a chapa durante a realização das várias operações, para garantir a sua imobilização;
- Guia da chapa (12) – Como o nome indica, garante o correto posicionamento da banda ao longo de todo o processo;
- Elevadores (13) – Têm a função de elevar a banda para o deslocamento da mesma entre operações.

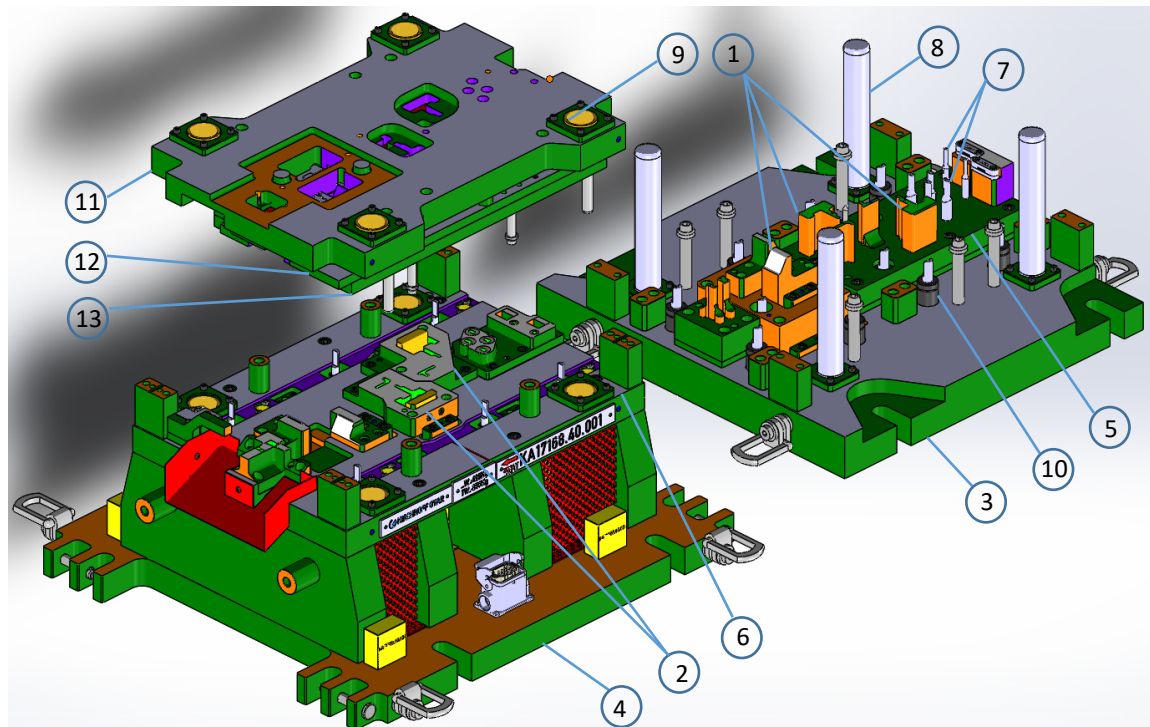


Figura 28 - Componentes de uma ferramenta de estampagem

## 2.2.5. Defeitos comuns e causas

Ainda que nos dias de hoje a utilização de *softwares* comerciais de simulação de elementos finitos se demonstre uma ferramenta viável na prevenção de defeitos relacionados com o processo de estampagem, em alguns casos, o aparecimento de defeitos ocorre de forma inesperada. Os defeitos podem ser classificados essencialmente em três categorias distintas [47]: defeitos de forma ou dimensional, defeitos na superfície da peça e propriedades mecânicas das peças não satisfatórias. De seguida serão apresentados alguns dos defeitos de superfície mais comuns.

### 2.2.5.1. Fissura de extremidade

Um dos defeitos mais recorrentes resultante do processo de estampagem são as fissuras de extremidade, ou *edge crack*. No entanto, ainda que este defeito seja bastante recorrente, nem sempre é fácil identificar a sua causa. Este problema advém principalmente de fatores metalúrgicos, como a homogeneidade da microestrutura, inclusões ou acabamento superficial de aresta. Esta é a principal razão pela qual não é possível prever com completa confiança o aparecimento de defeitos com recurso a *softwares* de simulação, pois estes não têm a capacidade ter estes fatores em conta [48].

Este defeito, como o nome indica, caracteriza-se pela formação de uma fissura na periferia da peça e acontece em casos onde existe dobragem de material e as tensões instaladas por flexão são de grande magnitude e, em combinação com a existência de rebarbas resultantes de processos de corte anteriores, podem levar ao aparecimento de fissuras nas faces externas da chapa (quando a rebarba se localiza nesta zona), como visível na Figura 29. A rebarba constitui uma superfície rugosa com microfissuras que eventualmente estarão na origem do aparecimento e propagação de fissuras

no resto do material. Uma forma de a diminuir o risco de fissura é, sempre que possível, posicionar a aresta de corte que possui rebarba para a região interna da dobra.



Figura 29 - Exemplo do aparecimento de uma *edge crack* [48]

### 2.2.5.2. Enrugamento

Nas operações de embutidura profunda, pode acontecer o enrugamento da chapa ou *wrinkling*, um dos defeitos principais resultantes deste processo. O defeito, demonstrado na Figura 30, surge por ação de tensões de compressão e tensões radiais que ocorrem no bordo da chapa [22]. As principais causas para o aparecimento deste defeito são a temperatura de trabalho, atrito entre a chapa e a matriz e o serra-chapa, forma e espessura da chapa, velocidade do punção e geometria final. Assim sendo, o fenómeno pode ser muitas vezes evitado se as peças e as ferramentas de estampagem forem devidamente projetadas. Duas formas de reduzir o aparecimento deste fenómeno são o redesenho da cavidade da matriz e utilização de serra-chapas [22].

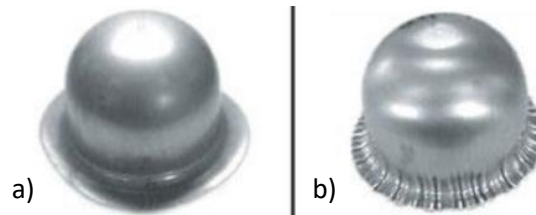


Figura 30 - a) Peça sem defeito e b) Peça com defeito (*wrinkling*) [22]

### 2.2.5.3. Ruptura por corte

Quando se verifica um fenómeno de fratura prematura em condições de estrição e flexão diz-se que acontece o fenómeno de ruptura por corte, *shear fracture*, demonstrado na Figura 31. É uma particularidade única dos AHSS que se caracteriza pela inexistência de secções de espessura reduzida ou pescoços de estrição, antes da fratura. Deste modo, a fratura não pode ser prevista pois acontece mais cedo do que a CLE prevê.



Figura 31 - Exemplo de fratura por *shear fracture* [13]

As razões por detrás deste fenómeno estão relacionadas manifestamente com a relação entre o raio de punção ( $R$ ) e a profundidade de estampagem ( $t$ ). À medida que esta relação diminui, o mecanismo de falha em AHSS transita de uma rotura por redução de espessura (aparecimento de pescoço de estrição) para a fratura, como se comprova pela Tabela 7. Em simultâneo, a zona de falha transita da face da peça para a dobra [49].

Tabela 7 - Efeito da redução de espessura na superfície de fratura de um aço DP780 (adaptado de [49])

R/t	Redução de espessura (%)
8	30,56
4,8	5,02
1,6	2,97

### 2.2.6. Estado da arte do processo de estampagem

A estampagem é um dos principais processos industriais de conformação de chapa metálica, apesar de ser um dos processos mais complexos de aperfeiçoar. Os defeitos que ocorrem são muitas vezes variáveis e, por isso, um grave problema para indústrias de produção em massa. Assim sendo, é fundamental estudar de que forma as variáveis do processo influenciam o aparecimento de defeitos e assim perceber de que forma estes podem ser reduzidos. Alguns dos estudos recentes mais importantes sobre o processo de estampagem são descritos na Tabela 8.

Tabela 8 - Estudos recentes sobre o processo de estampagem

Autores	Descrição
P. R. Tiwari. et al. [50] (2021)	Este estudo consistiu na revisão do estado da arte do processo de embutidura profunda de forma a atingir resultados que não comprometam a qualidade do produto, e em simultâneo conseguir prever resultados do processo dependo das condições. Para isso, os autores descreveram a origem dos defeitos no processo de embutidura profunda e concluíram que as principais variáveis que afetam o processo são temperatura, espessura, atrito, força de retenção, pressão, geometria, lubrificação, velocidade do punção, força de estampagem, raio do punção e raio da matriz. Entre outras conclusões, os autores perceberam que, à medida que a temperatura a que o processo ocorre decresce, a tensão efetiva também diminui; a tensão de cedência aumenta com a diminuição da temperatura; o aumento do coeficiente de atrito tem um efeito proporcional no número de defeitos; um menor coeficiente de atrito requer uma menor força do punção; a aplicação de uma pressão constante produz uma melhor homogeneidade da espessura da chapa; existe uma pressão ótima para minimizar o aparecimento de defeitos.
M. Ganapathy. et al. [51] (2019)	Os autores introduziram pela primeira vez com sucesso uma técnica de estampagem a quente realizada a baixas temperaturas no fabrico de componentes para o pilar B automóvel. Assim, foram realizados testes em aços 22MnB5 com 1,5 mm de espessura, que permitiriam compara os resultados do método convencional de estampagem a quente com o novo processo proposto que envolve um pré-aquecimento da matéria-prima. Os resultados demonstram que o tempo de têmpera necessário para arrefecer o produto pode ser reduzido em mais de 48%. Ainda que em produções unitárias o tempo de ciclo seja aproximadamente o mesmo (pois existe o tempo adicional de pré-aquecimento), em produções contínuas ou em massa isto representa um grande aumento da produtividade. Para além disso, as propriedades mecânicas dos componentes obtidas através desta técnica são igualmente atraentes.

## 2.3. Modelação numérica

### 2.3.1. Contextualização do método de elementos finitos

Os primeiros estudos que contribuíram para o desenvolvimento do método de elementos finitos (MEF) remontam aos finais do século XIX, quando William Strutt Rayleigh desenvolveu um estudo para prever frequências naturais de estruturas simples. Em 1909, Walter Ritz evoluiu este estudo para um método (atualmente conhecido como método de Rayleigh-Ritz) para determinar a solução aproximada de problemas em mecânica de materiais [52]. Esta investigação serviu de trabalho teórico preparatório, continuado por Richard Courant em 1943. Pode-se afirmar que foi com Courant que o MEF teve o seu início, pela utilização de funções descontínuas em subdomínios triangulares. Sendo que se ultrapassou o grande desafio existente, a determinação dos valores das funções nos pontos nodais das regiões triangulares, a grande limitação das funções de Ritz – satisfação das condições de fronteira – foi ultrapassada [53]. Anos mais tarde, em 1960, Ray William Clough [54] introduz pela primeira vez o termo “elemento finito”, aquando do estudo de um problema estrutural a duas dimensões em estado plano de tensão (EPT). Este desenvolvimento permitiu, no final dos anos 60, a aplicação deste método a um largo espectro de ramos, nomeadamente a simulação de problemas não estruturais de fluidos, termomecânicos e de eletromagnetismo. Atualmente, o MEF é um método altamente consolidado, aplicado de forma recorrente como uma técnica de auxílio para a solução computacional de problemas complexos em diferentes campos da engenharia, como civil, mecânica, biomédica, hidrodinâmica, condução de calor, entre outros [55].

### 2.3.2. Fundamentos do método

A ideia base do MEF requer a existência de uma equação integral, de tal modo que seja possível substituir o integral de um domínio complexo (volume  $V$ ) por um somatório de integrais estendidos a subdomínios de geometrias simples (de volume  $V_i$ ). Este princípio é ilustrado na equação seguinte, utilizando como exemplo o integral de volume de uma função  $f$  [56]:

$$\int_V f \, dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f \, dV, \quad (15)$$

em que se parte do pressuposto que

$$V = \sum_{i=1}^n V_i. \quad (16)$$

O método sugere que o número infinito de variáveis desconhecidas seja substituído por um número limitado de elementos de comportamento bem definido, chamados de “elementos finitos” – origem da nomenclatura. Os elementos finitos são conectados entre si por pontos, chamados de nós ou pontos nodais, enquanto ao conjunto de todos os elementos e nós se atribui a designação de malha. Os nós correspondem a pontos onde as variáveis de campo são calculadas precisamente pelo MEF. Por sua vez, as variáveis de campo em pontos não nodais são obtidas através de funções de interpolação, recorrendo aos valores das variáveis de campo conhecidos nos nós [57].

A solução, tal como Campilho [57] explica, pode ser calculada através da resolução de um sistema de equações lineares. Neste sistema, o número de incógnitas é dado pelo produto do número de nós pelo número de variáveis nodais. Como se sabe que, para obter uma solução precisa, é necessário um grande número de elementos e nós, torna-se obrigatório a utilização de computadores para chegar à solução. Isto acontece, pois, a aproximação efetuada é tão mais próxima da realidade quanto maior for o número de elementos que constituem a malha. Ou seja, aumentando o número de elementos (pela diminuição do tamanho dos mesmos) e refinando a malha, como demonstrado na Figura 32, acontece uma convergência para a solução exata. No entanto, o problema fica mais complexo e o tempo de resolução (computação) aumenta.

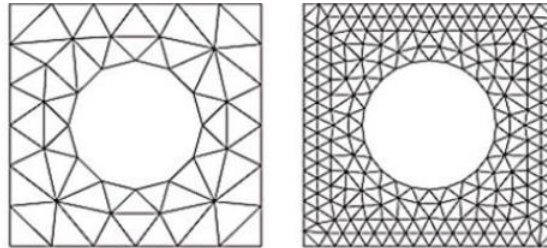


Figura 32 - Comparação de uma malha grosseira (à esquerda) com uma malha refinada (direita) [58]

### 2.3.3. Potencialidades do método

O MEF pode ser dividido em estudos lineares e estudos não-lineares. As análises lineares são as mais comuns, pois na grande maioria dos problemas estruturais as cargas aplicadas são do tipo estático e não levam os materiais a entrar no domínio plástico nem os sujeitam a grandes deformações. Por outro lado, as análises não-lineares aplicam-se em casos onde se verifica a rotura dos componentes ou processos de conformação plástica (não linearidade do material) e em casos onde se incluem os efeitos das deformações e deslocamentos na formulação das equações de equilíbrio (não linearidade geométrica) [58]. Os tipos de problemas a resolver podem abranger áreas bastante distintas, como análises de tensões em estruturas mecânicas, análise sísmica, análise de *crash tests*, resolução de problemas de mecânica de fluidos, análises térmicas, análise do comportamento de ondas eletromagnéticas, entre outros.

Em teoria, se um determinado fenómeno pode ser descrito por equações matemáticas, este pode de igual modo ser simulado num computador. Assim sendo, a aplicabilidade do MEF só é possível na indústria com o recuso a *softwares* de simulação, devido à complexidade destes problemas. A utilização destes *softwares* acarreta naturalmente uma redução de custos e aumento da produtividade do trabalho pois, para além de agilizar o processo, tendo em conta que a capacidade de cálculo de um computador é inúmeras vezes superior à de um humano, é eliminada a probabilidade de erros de cálculo. Para além disso, os *softwares* são capazes de executar várias simulações em simultâneo, o que isenta o trabalhador para outras atividades. Assim, a utilização do MEF oferece diversos benefícios para a indústria e desenvolvimento de projetos, nomeadamente redução de custos e tempo do projeto, otimização de estruturas, melhor avaliação de estruturas complexas, comparação de diferentes propriedades e materiais num mesmo sistema, melhoria da qualidade dos produtos, entre outros [55].

### 2.3.4. Aplicações na indústria automóvel

A aplicação do MEF na indústria automóvel tem vindo a propagar-se devido à crescente pressão para reduzir o tempo necessário para implementar novos *designs* na produção. Ao mesmo tempo, é necessário que os veículos desenvolvidos possuam as características necessárias para permanecerem competitivos, em termos de preço, segurança e qualidade. Estes pressupostos vão de encontro às vantagens do MEF enumeradas anteriormente. Na indústria automóvel, a criação de novos e melhores *designs* pode promover uma vantagem competitiva significativa e definir o sucesso ou falha de uma linha de produção inteira. Assim, as análises lineares podem ter como objetivo [57] a otimização da rigidez da estrutura, aumento da vida dos componentes da suspensão (sujeitos a fadiga), análise de vibrações, otimização da aerodinâmica, análise acústica e análise de tensões e temperaturas instaladas no motor.

Já as análises não lineares dizem respeito essencialmente a estudos de estruturas deformáveis e estudos de *crash tests* (exemplo da Figura 33), que podem atualmente ser realizados ao veículo completo. Como é evidente, isto representa uma grande redução de custos na realização dos convencionais ensaios de *crash tests*.

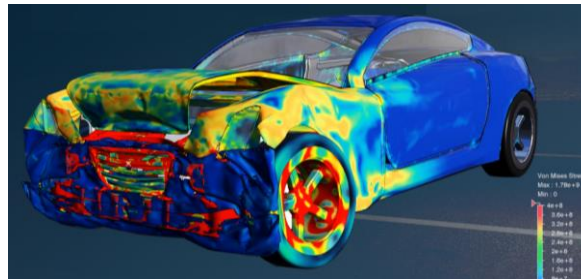


Figura 33 - Simulação de um embate frontal [59]

### 2.3.5. Software comercial genérico

Os *softwares* de modelação numérica permitem prever o comportamento de fenómenos reais, recorrendo à sua representação através de um modelo. A realização de análises em *softwares* de modelação numérica pode-se designar por engenharia assistida por computador, ou *computer aided engineering* (CAE) [60]. Para facilitar o processo, muitos *softwares* possuem sistemas integrados de desenho assistido por computador, ou *computer aided drawing* (CAD), para facilmente criar, modificar ou otimizar a geometria dos casos de estudo. Os *softwares* de modelação numérica mais relevantes e respetivas características estão expostos na Tabela 9.

Tabela 9 - Softwares de modelação numérica genéricos mais utilizados (adaptado de[61])

Programa	Empresa, origem	Tipo	Sistema operativo
Ansys Mechanical	Ansys, EUA	Independente	Windows
Abaqus	3DS, França	Independente	Windows, Linux
Solidworks	3DS, França	CAD-Integrado	Windows
CATIA	3DS, França	CAD-Integrado	Windows
HyperWorks	Altair Engineering, EUA	Independente	Windows, Linux
SimScale	SimScale, EUA	Independente	Nenhum (Online)
NX Advanced Simulation	Siemens, Alemanha	CAD-Integrado	Windows
Inventor	AutoDesk, EUA	CAD-Integrado	Windows

### 2.3.6. Fundamentos da modelação de conformação plástica

A modelação de conformação plástica é uma área bastante complexa, uma vez que tem como base o estudo de análises não-lineares. Isto acontece por uma série de razões, devido a um comportamento cinemático não linear (provocado por grandes deslocamentos, rotações e deformações), devido a um comportamento dos materiais não linear (devido à plasticidade e provocado pelo comportamento anisotrópico do material ou alteração da anisotropia com a evolução da deformação plástica), ou ainda devido a características não lineares nas zonas de fronteira (pois a interação entre a chapa e as ferramentas, como o contacto e o atrito, altera-se ao longo do processo) [62].

Assim, uma das dificuldades identificadas é encontrar um modelo que descreva com precisão o comportamento plástico do material a deformar. Muitas das vezes é difícil estabelecer uma relação geral entre a tensão e a deformação pois existem vários fatores do processo que são externos ao material que têm influência no seu comportamento. Na literatura de modelos constitutivos existem três grandes grupos para descrever o comportamento plástico de um material [63]:

- Modelo rígido-plástico;
- Modelo elasto-plástico;
- Modelo visco-plástico.

O modelo plástico a utilizar deve ser selecionado com base em vários fatores inerentes ao processo de conformação, como níveis de deformação, tipo e nível de carga aplicada, gradiente de temperatura no decorrer do processo, entre outros. Em geral, em materiais dúcteis trabalhados à temperatura ambiente, o comportamento do material é modelado pelo modelo elasto-plástico [63], descrito pela equação de Hollomon (equação (7)), referida no capítulo 2.2.3.3. Neste modelo, a deformação plástica traduz-se no aumento da resistência – encruamento.

Os resultados finais das simulações diferem ainda devido ao tipo de elementos utilizados. Na simulação da conformação plástica de chapa os elementos mais utilizados são os de membrana, de casca e sólidos [64]. O elemento de membrana é o mais simples, embora não seja apropriado em situações onde a dobragem é significativa, tornado a sua utilização inválida em várias situações, como quinagens, por exemplo. Por sua vez, os elementos sólidos, ainda que apresentem resultados mais próximos da realidade, aumentam consideravelmente a dimensão do problema e, em consequência, o tempo de resolução. Desta forma, os elementos mais utilizados são os elementos de casca. A utilização dos elementos de casca, para além de simplificar o problema, permite obter bons resultados quer ao nível das tensões e deformações, quer ao nível da previsão de defeitos, utilizando a lei da incompressibilidade para o obter a deformação ao longo da espessura [65]. Assim, estes elementos oferecem uma excelente relação desempenho/tempo de cálculo. O principal entrave deste elemento é a dificuldade em caracterizar o contacto entre superfícies [66].

Deste modo, os resultados em processos de conformação plástica dependem de fatores que muitas vezes não são facilmente modelados numericamente, como é o caso da interação ferramenta-chapa (contacto e atrito). No entanto, este parâmetro revela-se como um dos mais importantes pois a simulação numérica desenvolve-se com base nos pontos de contacto entre a chapa e as ferramentas. Os resultados numéricos estão diretamente relacionados com a malha utilizada, pois quanto maior o número de pontos usados para os elementos maior é a precisão do contacto.

Existem várias metodologias para definir o contacto entre sólidos, mas os principais métodos na literatura e mais utilizados em *softwares* de modelação numérica são o método da penalização e o método dos multiplicadores de Lagrange [66]. O método da penalização impõe restrições às condições fronteira por meio de um fator de penalização de energia. Já o método dos multiplicadores de Lagrange impõe a verificação das equações de restrição.

Para além disso, o atrito é outro parâmetro fundamental no estudo de processos de conformação plástica pois define o comportamento na interface do contacto. Ainda assim, esta área é uma das mais atrasadas em comparação com os outros campos da simulação numérica do processo de conformação [67]. É importante perceber em que situações o contacto acontece sem escorregamento ou com escorregamento para que os resultados da simulação sejam o mais próximo da realidade possível.

### 2.3.7. Software de conformação plástica

Os *softwares* de simulação numérica aplicados ao âmbito da estampagem podem ser distinguidos quanto ao método de integração em três categorias diferentes [62]:

- Método Explícito Dinâmico (ED);
- Método Implícito Estático (IE);
- Método Explícito Estático (EE).

Na Tabela 10 são apresentados alguns destes *softwares* em função do método de interação que utilizam.

Tabela 10 - Softwares de modelação de conformação plástica (adaptado de [66], [68])

Método de integração	ED	IE	EE
<i>Software</i>	ITAS3D	MARC	DYNA3D
	ROBUST	ABAQUS	ABAQUS/Exp.
	EXPEX3D	NIKE	PAM STAMP
	STAMPAK	ADINA	OPTRIS
		SIMEN3	
		INDEED	
		CALEMBOUR	

#### 2.3.7.1. Método Explícito Dinâmico (ED)

O método ED tem como base da formulação de cálculo a equação de Cauchy [62]. Assim, o equilíbrio dinâmico de um corpo é descrito pela forma:

$$\frac{\partial \vec{\sigma}}{\partial x} + p \vec{b} = p \vec{\ddot{x}}, \quad (17)$$

e a equação de movimento corresponde a:

$$\int_v \vec{\sigma} \cdot \delta \vec{\epsilon} \cdot dV + \int_v p \vec{\ddot{x}} \cdot \delta \vec{u} \cdot dV - \int_v p \vec{b} \cdot \delta \vec{u} \cdot dV - \int_s \vec{f} \cdot \delta \vec{u} \cdot dS - \int_{s_r} \vec{f}_T \cdot \delta \vec{u}_T \cdot dS = 0, \quad (18)$$

onde,

$\vec{\sigma}$  - Tensão de Cauchy;

$b$  - Força de corpo, por unidade de massa;

$\vec{f}$  - Força de superfície, por unidade de área;

$\vec{f}_T$  - Força de atrito, por unidade de área;

$\vec{x}$  - Posição;

$p$  - Massa;

$\vec{\delta u}$  - Deslocamento virtual;

$\vec{\delta u}_T$  - Deslocamento virtual na superfície de contacto.

$$\vec{\delta \varepsilon} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\vec{\delta u}}{\vec{\delta x}} + \left( \frac{\vec{\delta u}}{\vec{\delta x}} \right)^T \right]$$

Reescrevendo a equação (18) na formulação de elementos finitos, obtêm-se

$$\vec{P} + M \vec{\ddot{u}} - \vec{F} - \vec{F}_c = 0, \quad (19)$$

com

$$\vec{P} = \int_v B^T \vec{\sigma} dV \quad \text{vetor da força interna}$$

$$\vec{F} = \int_v p N^T \vec{b} dV + \int_s N^T \vec{f} dS \quad \text{força do corpo + força da superfície}$$

$$\vec{F}_c = \int_{s_c} N^T \vec{f}_T dS \quad \text{força de contacto devido ao atrito}$$

$$M = \int_v p N^T N dV \quad \text{matriz de massa}$$

$$\vec{u} \quad \text{deslocamento nodal}$$

$$N \quad \text{função de forma dos elementos}$$

$$B \quad \text{função de forma das deformações}$$

A solução da equação (19) obtém-se resolvendo o procedimento de integração explícito no tempo, ou seja, sabendo a solução na etapa  $n$ , a solução da etapa  $n+1$  é dada por:

$$\frac{M}{\Delta t^2} \vec{u}_{n+1} = \vec{F}_n + \frac{M}{\Delta t^2} (2\vec{u}_n - \vec{u}_{n-1}) \quad (20)$$

Finalmente, para obter um estado de equilíbrio estático a partir do sistema dinâmico, geralmente introduz-se um termo que representa o amortecimento  $C \cdot \dot{\vec{u}}$  na equação (19):

$$\vec{P} + M \ddot{\vec{u}} + C \dot{\vec{u}} - \vec{F} - \vec{F}_c = 0 \quad (21)$$

### 2.3.7.2. Método Implícito Estático (IE)

Em formulações estáticas o termo de inércia da equação de movimento de Cauchy é desprezável [62]. Para além disso, no método IE a chapa está em equilíbrio na etapa  $n$ , logo:

$$\vec{P}_n + \vec{F}_n - \vec{F}_c = 0 \quad (22)$$

De seguida, é necessário conhecer o incremento de deslocamento  $\Delta \vec{\mu} = \vec{x}_{n+1} - \vec{x}_n$ , que satisfaça o equilíbrio na próxima etapa ( $n+1$ ):

$$\vec{P}_{n+1} + \vec{F}_{n+1} - \vec{F}_{c+1} = 0 \quad (23)$$

A solução de  $\Delta \vec{\mu}$  que satisfaça a equação 17 é determinada, quando a equação

$$K^i \cdot d\vec{u}^{i+1} = \vec{R}^i \quad (K^i - \text{matriz de rigidez na iteração } i) \quad (24)$$

é resolvida por iteração, até que o valor residual

$$\vec{R}^i = \vec{P}^i - \vec{F}^i - \vec{F}_c^i \quad (25)$$

na iteração  $i$  se torne tão pequeno tal que  $|\vec{R}^i| < \text{tolerância}$ .

### 2.3.7.3. Método Explícito Estático (EE)

Na formulação EE, a forma incremental da equação,

$$\Delta \vec{P} + \Delta \vec{F} - \Delta \vec{F}_c = 0, \quad (26)$$

é resolvida explicitamente para o incremento de deslocamento  $\Delta \vec{u}$ , sem recorrer a iteração [62]. Assim sendo, a equação linear (27) determina a solução do problema.

$$K \cdot \Delta \vec{u} = \Delta \vec{F} + \Delta \vec{F}_c \quad (27)$$

### 2.3.7.4. Comparação dos diferentes métodos

Cada um dos diferentes métodos apresenta vantagens e desvantagens em relação aos restantes. Os métodos implícitos, por exemplo, foram muito utilizados nos primeiros anos e a sua utilização é particularmente interessante em problemas bidimensionais (2D). No entanto, este método é pouco preciso na resolução de problemas tridimensionais (3D), constatando-se uma dificuldade em obter uma solução por ausência de convergência por iteração. Por outro lado, os métodos explícitos não apresentam estas limitações, pelo que são mais indicados para projetos em estampagem. No entanto, estes possuem outros problemas nomeadamente imprecisões ao nível da distribuição de deformações e de tensões [65]. Na Tabela 11 estão expostos os principais parâmetros relacionados com as formulações numéricas.

Tabela 11 - Comparação dos métodos IE, EE e ED (adaptado de [62])

	IE	EE	ED
<b>Equação de equilíbrio</b>	Quase-Estático		Dinâmico
<b>Estrutura</b>	Matriz de rigidez		Matriz de massa diagonal
<b>Estabilidade da solução</b>	Problemas de convergência	Estável	Estável
<b>Dimensão do incremento</b>	Grande	Pequeno	Estável
<b>Tempo de CPU por incremento</b>	Longo	Médio	Curto
<b>Nº total de incrementos</b>	Centenas	Milhares	Dezenas de milhar
<b>Precisão da distribuição das tensões</b>	Elevada	Média	Baixa

### 2.3.8. Estado da arte de modelação numérica

#### 2.3.8.1. Modelação de processos de fabrico

A simulação numérica tem um papel fundamental no desenvolvimento e otimização de uma cadeia de produção, oferecendo benefícios a nível económico e a nível técnico [69]. O interesse em recorrer a estas técnicas passa por substituir os testes experimentais, simulando virtualmente a produção do produto. Por esta razão, a simulação dos processos de fabrico por MEF é uma área em crescente desenvolvimento. Algumas das mais recentes e relevantes investigações estão descritas na Tabela 12.

Tabela 12 - Estudos sobre a modelação de processos de fabrico

Autores	Descrição
N. Sridhar et al. [70] (2022)	Os autores introduziram um método alternativo para prever parâmetros relacionados com o processo de corte de metal através da simulação por MEF no <i>software</i> Deform 3D, usando a abordagem <i>Coupled Eulerian-Lagrangian</i> (CEL). Investigando o material Al-Si7Mg e o efeito da rugosidade (Ra) e a taxa de remoção de material, os autores alcançaram um erro da força de corte prevista em apenas 9%. Através deste estudo foi demonstrado que a modelações numérica é uma ferramenta viável, que assistiu os fabricantes na escolha das condições de corte mais efetivas.
M. Sigvant et al. [71] (2019)	Os autores investigaram a importância do controlo do acabamento superficial nas ferramentas de conformação de chapa metálica, analisando de que forma a rugosidade superficial pode dificultar a capacidade de conformação da chapa. Com recurso a simulações no programa Autoform <sup>plus</sup> de modelos com diferentes revestimentos, concluíram que através de revestimentos de zinco-alumínio, que originam uma menor sensibilidade à rugosidade, é possível reduzir os custos associados ao fabrico de ferramentas e de produção, no início de um novo projeto automóvel.

#### 2.3.8.2. Modelação de conformação plástica

O histórico do fabrico de peças por conformação plástica de chapa metálica demonstra que o processo está dependente do conhecimento empírico adquirido pela experiência e de ciclos de tentativa e erro [72]. Os ciclos de tentativa e erro são tão maiores quanto menor for o

conhecimento sobre a geometria e material utilizado. Posto isto, o fundamento da modelação em conformação plástica é reduzir o recurso ao processo iterativo de tentativa e erro através de simulações numéricas e, assim, aumentar a eficiência de recursos e tempo despendido.

Atualmente é possível obter resultados que se revelam de interesse, pois a necessidade em atingir requisitos de qualidade obrigou ao desenvolvimento e investigação na área da simulação dos processos de conformação plástica. Alguns dos estudos recentes mais relevantes sobre este tema estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Estudos sobre a modelação de conformação plástica

Autores	Descrição
S.-Y. Yoon et al. [73] (2022)	Os autores desenvolveram uma teoria de plasticidade dependente da pressão e implementaram no MEF um modelo de endurecimento anisotrópico homogéneo, ou <i>homogeneous anisotropic hardening</i> (HAH). Foram simulados modelos de chapa em aço TRIP1180 dobrados por estampagem em U. Através deste estudo, os autores demonstraram que é possível aplicar estes princípios com sucesso à simulação da estampagem de uma parte automóvel complexa, nomeadamente o pilar B do POSCO BC-EV, prevendo com sucesso o retorno elástico de materiais consoante o HAH.
T.-T. Luyen et al. [74] (2021)	O estudo apresenta um método de simulação explícito por MEF do processo de embutidura profunda, analisando o comportamento de um aço ao carbono laminado a frio. O objetivo foi obter a curva CLE do material e investigar de que forma a força de retenção e o raio do punção afetam o aparecimento de fratura em copos cilíndricos. Concluiu-se que o MEF constitui uma boa previsão de fratura, apresentando um desvio máximo de 3,67% quando comparado com resultados experimentais.

## 3. DESENVOLVIMENTO

### 3.1. Caracterização da empresa

O grupo KIRCHHOFF, cujo logótipo se encontra na Figura 34, é atualmente composto por quatro divisões: KIRCHHOFF Automotive, KIRCHHOFF Ecotec, WITTE Tools e KIRCHHOFF Mobility. A sua origem remonta a 1785, com a fundação da Stephan Witte, uma empresa de agulhas de costura em Iserlohn, Alemanha. Com o declínio da produção de agulhas, e já sob a alçada de Friedrich Kirchoff, a empresa desenvolve uma divisão de prensagem e de estampagem, aventurando-se na produção de componentes em chapa de aço, em especial para a indústria de carruagens e locomotivas e, mais tarde, para as indústrias mineira e automóvel.

Uma vez que este negócio florescia, a família Kirchoff decide concentrar a sua atividade na produção e oferta para a indústria automóvel e, na década de 1990, inicia a sua globalização. A KIRCHHOFF Automotive segue os grandes fabricantes de automóveis para novos mercados e adquire várias empresas pela Europa, que são alvo de investimentos e melhorias contínuas, com vista à criação de novas filiais e pavilhões para acolher maquinaria cada vez mais moderna. Atualmente, o grupo conta, a nível global, com mais de 13.000 funcionários a operar em três continentes: Europa, Ásia e América do Norte [75].



Figura 34 - Logótipo do grupo KIRCHHOFF [75]

O desenvolvimento da KIRCHHOFF em Portugal remonta numa primeira fase a 1963, à empresa Gametal, em Cucujães, que se dedicava à produção de ferramentas e moldes para a indústria automóvel, posteriormente adquirida e expandida pelo grupo francês Bertrand Faure. Em 1993, a empresa é então vendida à KIRCHHOFF Automotive (que iniciava a sua globalização) e o seu crescimento é evidente nas décadas seguintes. Assim, em 2014 acontece o marco mais importante na história da empresa com a alteração da denominação do nome da empresa Gametal para KIRCHHOFF Automotive Portugal S.A., o que permite a sua associação global com o grupo KIRCHHOFF Automotive (ao qual pertence) e a mudança da sede da empresa, até então em Cucujães, para as instalações em Ovar. A fábrica em Ovar, exposta na Figura 35, dispõe de uma área coberta de cerca de 34.000 m<sup>2</sup> e conta com 530 colaboradores. É de realçar o forte investimento desta fábrica em novas tecnologias e formação inicial e contínua que oferece aos seus recursos humanos, de modo a satisfazer as elevadas exigências de qualidade e de desempenho. Esta política permitiu alcançar várias certificações, como IATF 16949 – Sistema De Gestão Da Qualidade Automóvel, ISO 14001 – Sistema de Gestão Ambiental, ISO 45001 – Sistemas de Gestão da Segurança e Saúde no Trabalho, VDA 6.1 – Sistema De Gestão Da Qualidade: Produção Em Série, Ford Q1 e o prémio “PSA Best Plant” em 2014 e 2017 [75].



Figura 35 - Instalações da fábrica KIRCHHOFF em Ovar [75]

O desenvolvimento técnico que a KIRCHHOFF facilita permite, através da equipa de engenheiros e técnicos qualificados, desenvolver processos robustos em conformidade com os mais altos padrões de qualidade da indústria. Assim, a empresa dispõe de tecnologias capazes de produzir e transformar componentes metálicos, através da moldagem, união e tratamento de superfícies. Na área da estampagem, possui um setor de estampagem a frio e um setor de estampagem a quente. A estampagem a frio (Figura 36(a)) é o ponto de partida da cadeia de produção, onde é possível trabalhar chapas de espessura entre 0,5 mm até 5 mm. Existem várias prensas automáticas, progressivas e *transfer*, com capacidade desde 160 t até as 1250 t e com mesas até os 6 metros de comprimento. Para estampagem a quente (Figura 36(b)), a fábrica dispõe de um forno com 85 metros de comprimento que aquece a matéria-prima até aos 700 °C. Para além disso, existe ainda uma prensa com uma capacidade de carga de 1200 t para realizar a estampagem dos perfis. De forma a unir os componentes fabricados, existe também uma área de soldadura (Figura 36 (c)) que dispõe de processos de união térmica a quente e frio, como soldadura MIG/MAG, por projeção, por pontos, MIG *Brazing* e a laser. Por fim, para garantir a proteção contra a corrosão, há ainda a capacidade de realizar um tratamento de através de pintura catódica por imersão por KTL/cataforese (Figura 36 (d)). Para além destes processos, a fábrica possui um departamento de ferramentaria, capaz de realizar manutenção das próprias ferramentas das prensas.

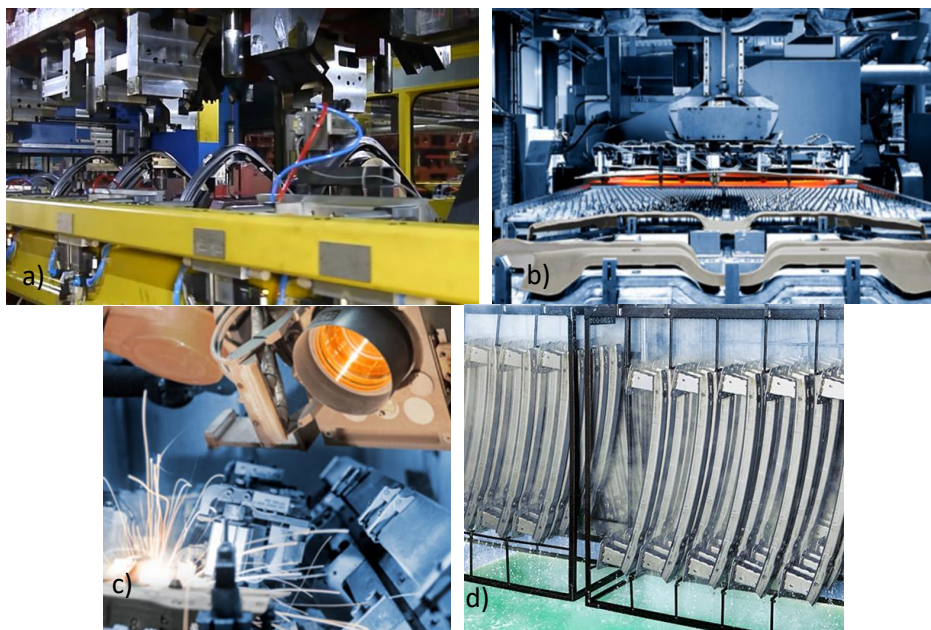


Figura 36 - a) Estampagem a frio; b) Estampagem a quente; c) Soldadura; d) Pintura catódica por imersão [75]

A KIRCHHOFF Automotive desenvolve estruturas metálicas e híbridas para a carroçaria quer de veículos ligeiros de passageiros, quer veículos comerciais. Para alcançar um elevado grau de excelência, revela-se fundamental a abordagem holística de construção leve que garante uma conceção geométrica óptima dos componentes, através de uma estratégia de utilizar o “material certo no local certo”. Isto significa que aplicam um desing híbrido, permitindo fabricar produtos em aço com diferentes gamas de resistência e otimizar as necessidades da carroçaria, que garantem *standards* uniformes de qualidade. Se, por um lado, realizam chassis leves e inovadores para um alto desempenho, por outro lado, os componentes estruturais desempenham um papel decisivo na protecção dos ocupantes, tornando a mobilidade de pessoas segura. Alguns exemplos de produtos produzidos pela KIRCHHOFF Automotive são os pilares A/B, para-choques, estrutura frontal, suporte para o painel de instrumentos, travessas de esforço, barras de impacto lateral e armações da extremidade dianteira, em veículos ligeiros de passageiros (Figura 37(a)) e alojamentos do eixo, suspensão e peças estruturais da cabine, suportes transversais, proteções à frente contra o encaixe, suportes de depósito e suportes da bateria, em veículos comerciais (Figura 37(b)), entre outros [75].

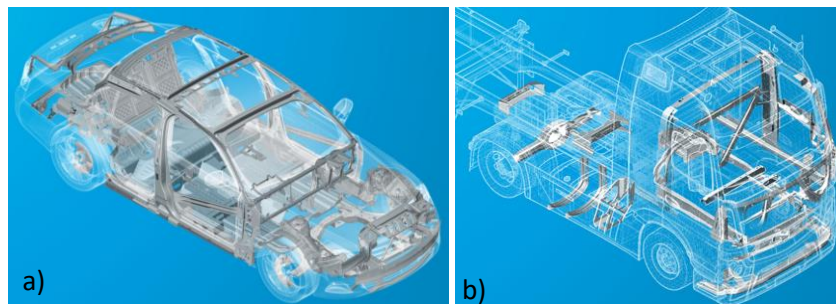


Figura 37 - Exemplos de componentes produzidos pela KIRCHHOFF: a) veículos ligeiros de passageiros; b) veículos comerciais [75]

Enquanto interveniente global, a KIRCHHOFF Automotive oferece aos clientes por todo o mundo um *know-how* abrangente nas áreas de construção, proporcionado estruturas de elevada qualidade. Por esta razão, a KIRCHHOFF Automotive Portugal tem evoluído de forma praticamente contínua, gerando um crescimento sustentável e lucrativo desde 1994, como demonstrado na Figura 38.

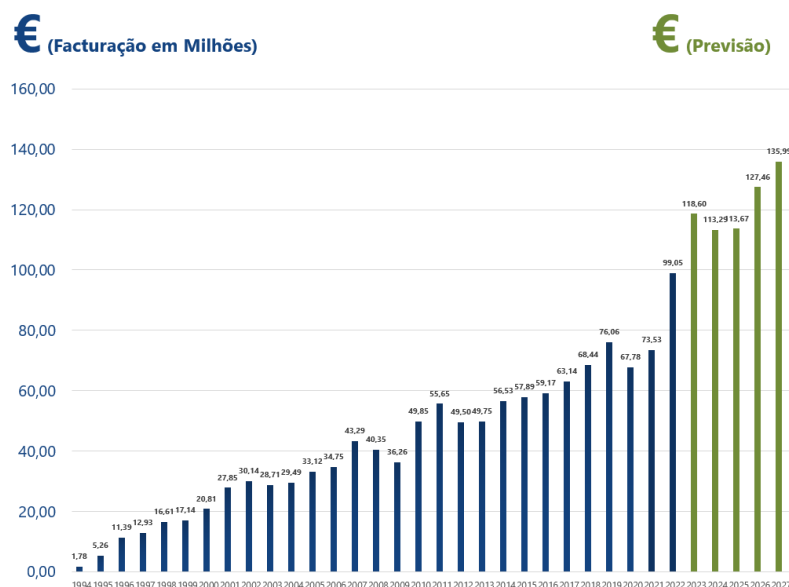


Figura 38 - Faturação da KIRCHHOFF Automotive Portugal desde 1994, em milhões [75]

A instituição é reconhecida pelo seu alto nível de desempenho, o que suscita que os componentes produzidos em Ovar sejam expedidos diariamente para grandes fabricantes de automóveis, como a Volkswagen, Ford e General Motors, bem como para fornecedores de primeira categoria. Esta afirmação é comprovada pela Figura 39, que apresenta a distribuição do volume de vendas da KIRCHHOFF Automotive Portugal por *Original Equipment Manufacturer* (OEM).

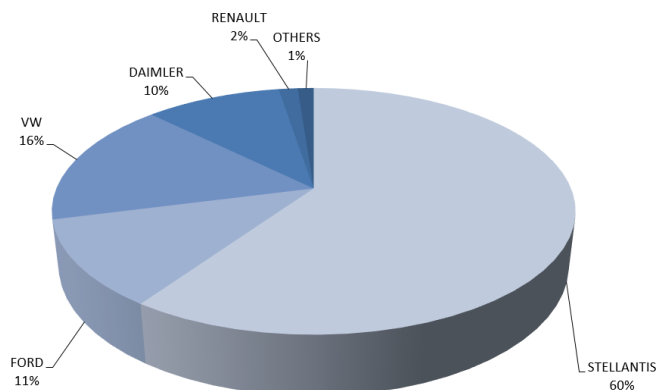


Figura 39 - Distribuição do volume de vendas da KIRCHHOFF Automotive Portugal por OEM [75]

## 3.2. Métodos

### 3.2.1. Abordagem e metodologia

O desenvolvimento da presente dissertação segue os princípios da metodologia *design science research* (DSR). A abordagem DSR visa desenvolver sistemas/equipamentos projetados com objetivo de melhorar o seu desempenho funcional [76]. Esta abordagem é particularmente interessante quando aplicada ao desenho e melhoria de processos existentes, pois implica o estudo detalhado do processo existente e a proposta de novas soluções em função dos *inputs* dos vários intervenientes no processo. Ainda que esta necessidade possa ser vista como uma limitação, uma vez que exige múltiplas iterações e um incremento de tempo ao projeto, esta promove uma melhoria do processo benéfica em diferentes parâmetros. Uma abordagem DSR normalmente aplica-se numa perspetiva de curto prazo onde as partes interessadas (empresas) definem os objetivos conforme os recursos e conhecimento disponível.

Esta metodologia é definida por seis etapas [76]:

- 1 - Identificação do problema: Análise do equipamento atual, descrição das limitações e pontos de melhoria;
- 2 - Definição de objetivos: Caracterização dos objetivos e requisitos para alcançar o resultado pretendido;
- 3 - *Design* e desenvolvimento: Seleção dos novos conceitos a implementar, com base nos requisitos;
- 4 - Demonstração da solução: Implementação dos conceitos definidos na etapa anterior;
- 5 - Avaliação da solução: Verificação do desempenho da solução em relação aos objetivos/requisitos iniciais;
- 6 - Conclusões: Comparação entre a solução inicial e a desenvolvida.

Deste modo, no capítulo 3.2.3 e 3.2.4 são realizadas as duas primeiras etapas. Inicialmente é apresentado a identificação do problema, contextualizando os defeitos que surgem no processo de conformação, seguindo-se a definição dos objetivos, assinalando os requisitos e limitações a enfrentar. A terceira etapa, “*Design* e desenvolvimento”, tem lugar no capítulo 3.3.4, com uma componente experimental para analisar os conceitos que compõem o processo de conformação e em grande parte do capítulo 3.4, onde se descreve o estudo paramétrico numérico dos casos de estudo. No capítulo 3.4.5, é desenvolvida a quarta etapa, “*Demonstração da solução*”, propondo alterações ao projeto com vista a solucionar os defeitos que surgem nos componentes produzidos pela empresa. A fase seguinte, “*Avaliação da solução*”, é realizada ao longo do capítulo 3.4.6, no qual se valida o estudo numérico realizado anteriormente e se reconhece a melhoria de desempenho da solução proposta, face ao projeto inicial. Por fim, as “*Conclusões*” estão presentes no capítulo 4. Neste capítulo é realizada a síntese de todas as conclusões retiradas ao longo deste trabalho.

### 3.2.2. Processo de estampagem

O processo de estampagem abordado na presente dissertação é a estampagem a frio, uma vez que corresponde ao processo de conformação dos dois casos de estudo desenvolvidos. O processo, como é de esperar, não pode ocorrer sem a aquisição da matéria-prima. Esta é a primeira etapa: a aquisição e o armazenamento da matéria-prima. A matéria-prima é adquirida na forma de bobines o que permite que o seu transporte seja realizado através de elevadores, como demonstrado na Figura 40. O armazenamento das bobines de material é feito num espaço adjacente às prensas para que, no início do processo, a distância que a matéria-prima é movimentada seja reduzida.



Figura 40 - Armazenamento e transporte da matéria-prima [75]

Para dar início ao processo, a bobine é posicionada no alimentador. O alimentador tem a função de levar a chapa até à zona de serviço da prensa. Este transporte acontece por intermédio de vários rolos onde a chapa assenta (Figura 41). Devido ao movimento giratório dos rolos, a matéria-prima é encaminhada para a prensa. É de salientar que, no início da alimentação, a matéria-prima passa por entre dois rolos de diâmetro maior para esticar a chapa e remover quaisquer curvaturas ganhas durante o enrolamento na bobina.



Figura 41 - Alimentação da matéria-prima [75]

A última etapa acontece na prensa, onde ocorre a conformação da matéria-prima. A chapa, movida pelo alimentador, é alimentada para a zona de trabalho da ferramenta, entre o bloco superior e o bloco inferior, conforme ilustrado na Figura 42. Uma vez que em ambos os casos de estudo abordados, os componentes são produzidos através de um sistema progressivo, o avanço da matéria-prima acontece de forma progressiva a cada batimento da ferramenta e assim a chapa vai avançando entre etapas, sofrendo as devidas modificações ao longo da prensa. Por fim, quando os componentes estão na sua forma final, estes são conduzidos por um tapete rolante para fora da prensa e um operador armazena-os num recipiente.



Figura 42 - Zona de trabalho da matéria-prima

### 3.2.3. Caracterização do problema

O contexto para a realização deste trabalho surge em resposta a defeitos repentinos que surgem em peças fabricadas por estampagem a frio. Em alguns casos, após anos de produção e sem qualquer alteração aos parâmetros do processo, verifica-se que, sem aparente explicação, passa-

se a registar uma elevada taxa de peças não-conformes (no caso de estudo 1 a taxa observada variável de 60% a 90%, consoante a produção, e no caso de estudo 2 a rejeição foi de 100%) devido à presença de fissuras. Com base no historial de casos verificados na KIRCHHOFF e após investigação, algumas causas possíveis foram identificadas como responsáveis pelo aparecimento das fissuras:

1. Material inadequado: se não se verificou nenhuma alteração ao processo, uma causa lógica é que o material utilizado estava fora das especificações. Se a composição química do material estiver desequilibrada ou a estrutura metalográfica for anormal, o material pode apresentar menor resistência e ductilidade do que os valores expectáveis, levando ao aparecimento de fissuras durante a estampagem;
2. Projeto inadequado: o projeto da peça em si também foi identificado como um fator crucial. É importante que a geometria da peça seja adequada para que se obtenha uma correta distribuição das tensões durante o processo de conformação. Se esta condição não se verificar, determinadas zonas da peça são submetidas a tensões e deformações excessivas;
3. Condições de processo: As condições operacionais da ferramenta também se revelam importantes, pelo que foram alvo de avaliação. De facto, condições inadequadas para o material utilizado e para o projeto da peça contribuem para o surgimento das fissuras.

De modo a compreender por completo a fratura dos materiais sujeitos a conformação plástica, todo o processo deve ser investigado. Este trabalho é iniciado pela caracterização dos materiais, complementando os tradicionais ensaios de tração com ensaios de dobragem. Após este trabalho preliminar, é realizada uma investigação às condições do processo que têm maior influência no desempenho dos materiais, enquanto em paralelo se analisa o estado de tensão e deformação nas peças através de simulações numéricas, de forma a identificar e corrigir áreas do projeto vulneráveis.

Assim sendo, neste trabalho desenvolveu-se um procedimento que descreve uma metodologia aplicável a qualquer caso de estudo e que permita inferir se existe probabilidade de defeitos na produção, assim como identificar se as causas por detrás destes defeitos têm origem do próprio processo de conformação ou se devem a irregularidades metalográficas dos materiais.

### **3.2.4. Limitações e requisitos**

Neste capítulo são apresentadas as limitações e requisitos inerentes ao processo de elaboração desta dissertação. A primeira limitação identificada diz respeito à complexidade do processo de estampagem. A complexidade por detrás desta realidade exige um profundo conhecimento dos fenómenos que ocorrem durante as altas deformações da matéria-prima e torna difícil abordar todos esses aspetos numa dissertação de duração semestral. Para além disso, conforme estudado ao longo deste trabalho, os parâmetros intrínsecos do material como a composição química e estrutura metalográfica (que advêm do tratamento térmico), entre outros fatores, podem levar a variações nas propriedades mecânicas do aço que afetam a consistência dos resultados experimentais. Outra limitação reconhecida corresponde à modelação numérica do comportamento dos materiais. Uma vez que a estampagem envolve fenómenos complexos, nem sempre é fácil reproduzir nos modelos numéricos parâmetros como a anisotropia e o encruamento,

ou aspetos relacionados com o estado de superfície da matéria-prima. Por isso, o processo deve ser modelado de forma cuidada para se obter resultados que coincidem com os resultados experimentais. Para além disso, a modelação destes processos é minuciosa e há a necessidade de utilizar critérios de plasticidade e rotura complexos para se obter resultados equivalentes aos resultados práticos. Por fim, é de salientar que a disponibilidade de recursos como tempo, orçamento e acesso a equipamentos limitou a extensão e velocidade da pesquisa (uma vez que os equipamentos utilizados nas instalações da KIRCHHOFF, como as prensas ou equipamentos de ensaios, eram manuseados diariamente para compromissos da empresa, a sua utilização foi limitada consoante a disponibilidade dos mesmos).

No que diz respeito aos requisitos a seguir, é crucial que a dissertação apresente uma compreensão profunda dos fundamentos do processo de estampagem, explicando todo o processo e as suas aplicações. De seguida, um requisito fundamental é a matéria-prima. Os materiais utilizados para o fabrico dos casos de estudo analisados são uma imposição cliente que tem de ser cumprida. Estes materiais são o aço HR700LA, com espessura de 3 mm, o aço CR340LA e o aço DP800, ambos com espessura de 2 mm. Por sua vez, os equipamentos onde estes materiais serão conformados ou ensaiados são, necessariamente, os equipamentos disponibilizados pela KIRCHHOFF e os parâmetros de processo, previamente definidos, são um requisito a seguir. Em relação à modelação numérica, a utilização do Stampack enquanto *software* de simulação numérica é também um requisito, pois este é o programa cedido pela empresa, que se encontra perfeitamente adequado à simulação de processos de conformação plástica. Para além disso, foi inicialmente estipulado pela empresa que é necessário validar os modelos numéricos com os resultados experimentais dos ensaios de estampagem, assegurando a eliminação dos problemas de fissuração.

### 3.2.5. Técnica DoE

A técnica planeamento de experiências, ou *Design of Experiments* (DoE), diz respeito a um processo de planeamento de experiências e da análise de dados empíricos a fim de obter informação válida e objetiva relativa a um sistema subjacente. A vasta aplicabilidade desta técnica faz com que a sua definição seja manifestamente vaga. No entanto, a técnica DoE pode ser interpretada como a determinação da relação que um conjunto de fatores (os aspetos do processo ou produto) têm sobre uma resposta ou conjunto de respostas (as características de interesse para o estudo). Os objetivos da experiência passam por quantificar esta relação da forma mais clara possível, obtendo a maior precisão em função dos recursos disponíveis e minimizando possíveis distorções que não correspondam à realidade na relação encontrada [77].

Desta forma, a informação que se pretende conhecer desempenha um papel fundamental no processo de aplicação da técnica DoE, pois tem um impacto direto na seleção de planos de experiências a realizar (Figura 43). Por um lado, a conceção do processo experimental desenrola-se de cima para baixo, como exemplificado na Figura 43. Por outro lado, na prática, a implementação dos diferentes passos acontece na ordem inversa. Assim, um estudo que aplica os princípios DoE inicia-se pela realização de experiências e recolha de dados que são posteriormente analisados, usando métodos estatísticos para se chegar à informação desejada. Idealmente, o desenho de experiências relaciona a informação desejada, os métodos analíticos e as características experimentais, existindo uma região onde os três parâmetros se sobrepõem [78].

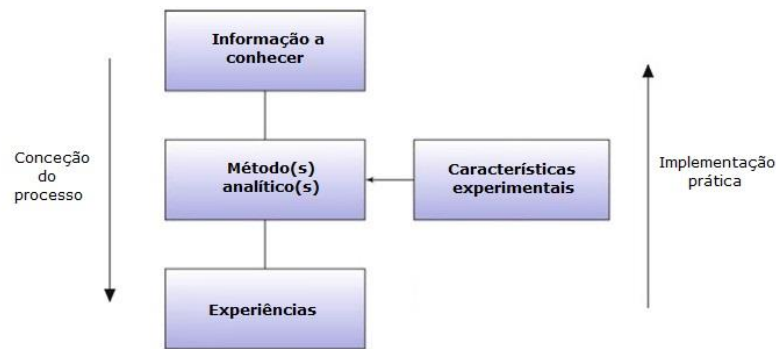


Figura 43 - Aplicação do DoE (adaptado de [78])

Os três grandes pilares para um correto procedimento experimental pela técnica DoE são a randomização, replicação e o controlo local do erro. A replicação implica que sejam criadas réplicas a cada unidade experimental, o que permite não só estimar o erro experimental, mas também obter uma melhor precisão nos efeitos estimados. A randomização significa que os testes sejam realizados de forma aleatória, de forma a distribuir o efeito de possíveis interferências nos resultados. Por fim, o controlo local do erro consiste em controlar tudo que possa afetar a variável de resposta (para além dos fatores definidos). Assim sendo, aliando um controlo local do erro a um DoE de estrutura fatorial é possível estabelecer uma relação entre as variáveis de resposta e os fatores de forma esclarecedora [77].

Em contexto de um DoE, a análise de variância (ANOVA) é uma ferramenta fundamental para analisar os resultados e determinar a confiança dos mesmos. A ANOVA é uma técnica estatística padrão que avalia a confiança através da medição da variância, pois não analisa diretamente os resultados, mas sim a variância dos mesmos [79]. As informações que a análise ANOVA fornece são normalmente apresentadas numa tabela onde se pode encontrar os graus de liberdade, soma de quadrados, médias de quadrados, erro residual, entre outros parâmetros que avaliam a variação nos dados, para determinar se as diferenças entre grupos são significativas. Na prática, para realizar uma análise de variância é comum utilizar-se *softwares* estatísticos. Estes *softwares*, para além de auxiliarem na manipulação de grandes volumes de dados, oferecem análises gráficas que geralmente são métodos mais eficientes e simples de demonstrar os resultados. A abordagem gráfica é muito interessante pois permite de forma clara visualizar a dispersão de dados, identificar tendências e padrões ou até mesmo descobrir discrepâncias nos resultados. Os gráficos de dispersão, gráficos de pontos, gráficos de caixa ou gráficos de Pareto são alguns dos recursos gráficos que os *softwares* estatísticos oferecem para sintetizar e demonstrar os resultados [79].

Para que se possa aplicar um tratamento estatístico na análise de um plano de experiências, é essencial que o utilizador possua uma compreensão clara do que se pretende estudar, de como são recolhidos os dados e ainda de como os mesmos são analisados. Para garantir que estes requisitos são alcançados, Montgomery [79] descreve uma metodologia a seguir, composta por sete etapas:

- Identificar o problema;
- Selecionar a variável (ou variáveis) de estudo, que deve fornecer informação acerca do processo em estudo;
- Identificar as características e parâmetros importantes para a qualidade do produto em estudo;

- Desenho de experiências normalizado, utilizando matrizes ortogonais em função do número de fatores, níveis e réplicas;
- Realização das experiências;
- Análise dos resultados com vista a determinar as condições ótimas para maximizar a qualidade do produto;
- Conclusões e recomendações (realização de experiências confirmatórias implementando as condições ótimas, se necessário).

As técnicas de DoE para a obtenção de um desenho de experiências normalizado podem ser classificadas como clássicas ou contemporâneas. Os métodos clássicos são vastamente utilizados e são por isso bem consolidados, sendo o método fatorial completo, ou *full factorial*, um dos mais reconhecidos. Este método estuda vários fatores, cada um podendo comportar vários níveis, avaliando todas as combinações diferentes entre fatores-níveis. Para  $k$  fatores, cada um com  $n$  níveis, existem  $n^k$  combinações diferentes. Assim sendo, ainda que o método fatorial completo providencie um profundo conjunto de informação, a sua aplicação apenas é viável em amostras pequenas devido ao investimento de tempo, recursos e mão de obra necessários para realizar todas as experiências relativas às diferentes combinações [78]. Em alternativa, existem vários métodos que tentam reduzir o número de experiências necessárias, entre eles o método fatorial fracionado. Este procedimento é mais rápido e mais económico e não é mais do que uma fração do método fatorial, pois no método fatorial fracionado apenas são seleccionadas algumas combinações do método fatorial completo.

Uma questão a ter em consideração na escolha do método a adotar é a região comportada pela experiência. No caso de uma simples experiência de 2 fatores, cada fator com 2 níveis, esta região é cuboidal se todas as combinações dos níveis de valor superior (1) e valor inferior (-1) existem, como demonstrado na Figura 44. Os *designs* clássicos podem ser aplicados se a região da experiência é regular (cuboidal ou esférica). No entanto, em grande parte dos casos, podem ser feitas alterações para transformar regiões experimentais irregulares em regiões regulares e assim aplicar uma técnica DoE clássica.

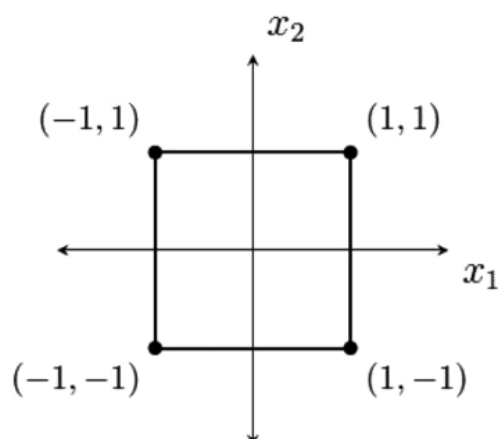


Figura 44 - Região experimental cuboidal [77]

Outro aspeto muito importante para garantir a viabilidade dos resultados é a inclusão de pontos centrais ao plano de experiências. Em algumas situações, a resposta do sistema pode não ser linear. Assim, ao incluir pontos centrais é possível detetar efeitos não lineares e curvaturas na resposta

pois, ainda que os pontos centrais não afetem o resto das estimativas do plano de experiências, estes estabelecem uma referência de como o sistema funciona em valores médios [79]. A adição destas réplicas ao plano de experiências passa por realizar experiências conduzidas no valor central de cada fator, como se constata na Figura 45.

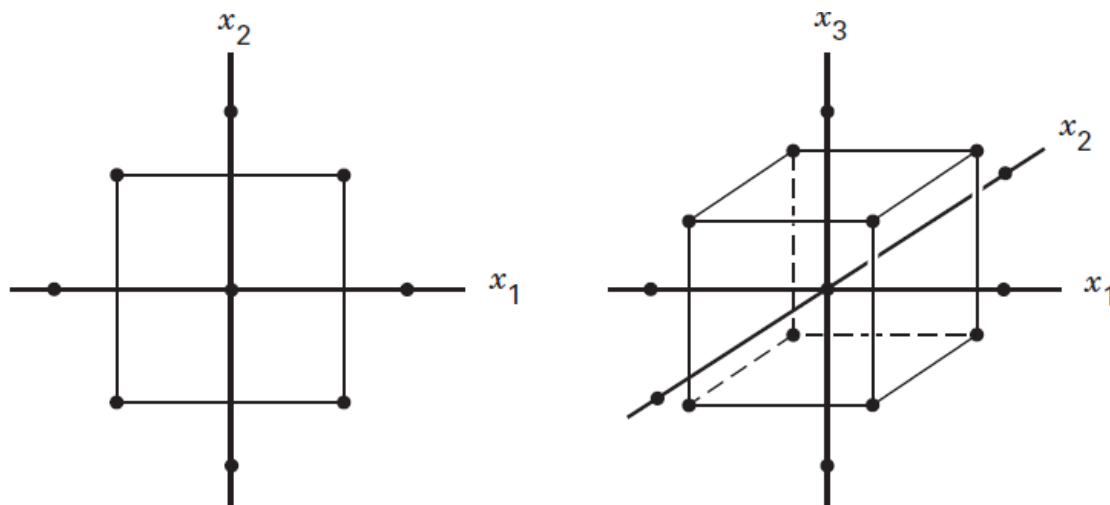


Figura 45 - Adição de réplicas em pontos centrais: a) plano com 2 fatores; b) plano com 3 fatores [79]

### 3.2.6. Diagrama de Gantt

A formulação de uma dissertação implica um planeamento de várias etapas que, muitas vezes, por serem complexas e apresentarem dependência entre si, revelam-se de difícil organização. Para garantir que este estudo siga uma linha de trabalho organizada e contínua do início ao fim, começou-se por elaborar um Diagrama de Gantt, apresentado na Figura 46. O Diagrama de Gantt é uma representação visual que permite ilustrar a planificação de tarefas ao longo do tempo. As atividades são apresentadas de forma sequencial, salientando a duração de cada uma e as interdependências entre as mesmas. O uso desta ferramenta proporciona uma visão clara e sistematizada das etapas, permitindo uma gestão eficaz do tempo e dos recursos disponíveis, pois assegura uma progressão do trabalho contínua e organizada [80].

O ponto de partida deste trabalho consiste na pesquisa dos fundamentos teóricos e a construção da revisão bibliográfica. De seguida, dá-se início à execução das atividades preparatórias do trabalho experimental, como o planeamento estatístico, a recolha da matéria-prima para ensaios, o desenho da ferramenta para o corte de provetes, o contacto com as máquinas de ensaios, ao mesmo tempo que se introduz o *software* de simulação numérica. De seguida, prossegue-se com o desenvolvimento do trabalho, realizando todos os ensaios mecânicos e as simulações numéricas dos casos de estudo. Após a aplicação das melhorias sugeridas, as soluções são analisadas e os resultados validados através de ensaios de estampagem. O trabalho termina com a transposição e redação de todo o trabalho desenvolvido, finalizando com as conclusões retiradas.

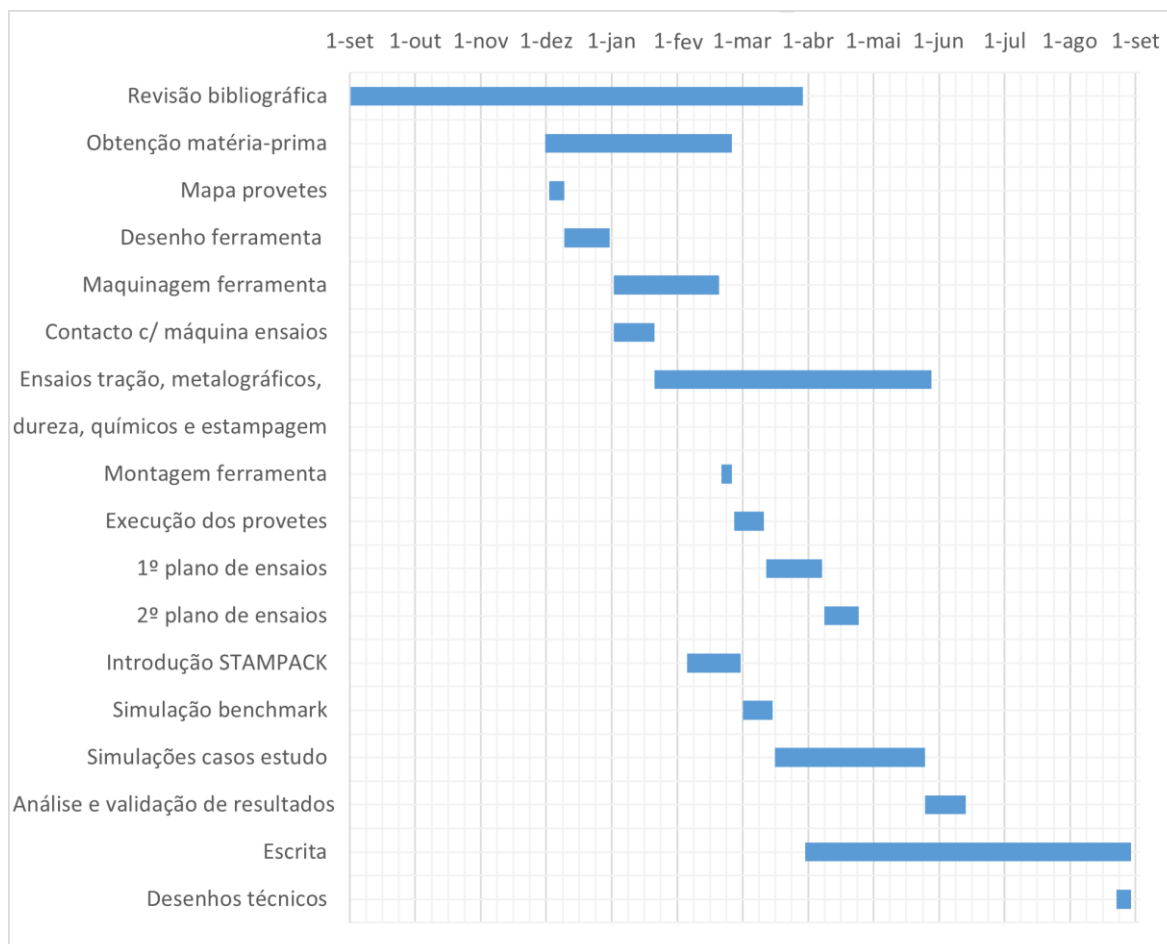


Figura 46 - Diagrama de Gantt

### 3.3. Ensaio experimentais

Após vários meses de produção de peças produzidas sem defeito, sem razão aparente, verificou-se uma elevada taxa de sucata devido ao aparecimento de fissuras nas faces externas da chapa – fissura por flexão. Por essa razão, estes indicadores sugerem que a possível explicação seja de origem metalográfica, pois a única variável do processo foi o material. Assim, foram realizados ensaios experimentais para caracterizar os materiais em estudo e tentar identificar anomalias nos mesmos, entre os quais ensaios de tração, ensaios de dobragem, ensaios químicos, ensaios metalográficos, ensaios de dureza e ensaios de estampagem. Foram ainda conduzidos ensaios de flexão aplicando a técnica DoE.

#### 3.3.1. Condições de ensaio

##### 3.3.1.1. Ensaio de tração

Sendo a ferramenta mais utilizada para obter as principais propriedades mecânicas de materiais, foram realizados ensaios de tração como ponto de partida para a caracterização dos materiais utilizados no caso de estudo. Os ensaios seguiram as condições enumeradas na norma ISO 6892-1:2019 [81]. Os provetes foram obtidos por maquinação, com recurso à fresadora presente nas

instalações da KIRCHHOF, segundo a geometria ilustrada na Figura 47, com  $b=12,5$  mm,  $L_c=75$  mm,  $r=20$  mm,  $g=20$  mm,  $k=35$  mm e  $t=3$  mm.

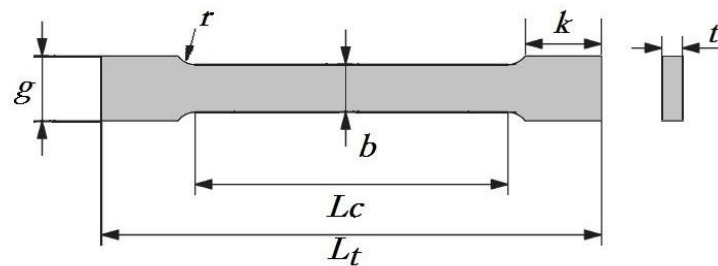


Figura 47 - Geometria dos provetes de tração [82]

Os ensaios de tração foram realizados nas instalações da KIRCHHOFF, através do equipamento de tração universal da Zwickrowell existente no laboratório de qualidade, que se pode observar na Figura 48.



Figura 48 - Equipamento de tração universal da Zwickrowell

Tal como recomendado pela norma, todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente, que deve estar compreendida entre os 10°C e os 35°C. A velocidade dos ensaios foi 2 mm/min e a pré-carga de 200 N. O equipamento possui uma célula de carga de 250 kN e é munido de um extensómetro mecânico que permite obter com elevada precisão os deslocamentos ao longo de todo o ensaio.

### 3.3.1.2. Ensaios de dobragem

Como o método de falha do problema descrito ocorre durante o processo de estampagem da matéria-prima, foram realizados ensaios de dobragem com o objetivo de estudar o comportamento

de materiais metálicos durante processos de conformação nos quais as deformações e tensões são provocadas principalmente por flexão. Uma vez que se pretende uma ferramenta própria para o fabrico destes provetes, este aspeto é descrito em detalhe no capítulo 3.3.3. Estes ensaios, especialmente indicados para aços de elevado limite elástico, foram realizados segundo a norma VDA 238-100 [83]. Com o rápido desenvolvimento e introdução de AHSS no fabrico de estruturas automóveis leves, a conformabilidade dos materiais tornou-se um fator crítico ao desempenho destes materiais. Por essa razão, a norma VDA 238-100, concebida para testar situações de flexão pura, foi adotada pela maioria dos fornecedores automóveis e produtores de materiais para caracterizar a conformabilidade local. Os esforços de flexão produzidos pela dobragem em V do ensaio de dobragem são equivalentes aos que ocorrem na conformação plástica de chapas metálicas.

Os provetes devem ser posicionados no equipamento como demonstrado na Figura 49, sendo que os rolos devem estar paralelos e centrados em relação ao punção. Os provetes são retangulares com largura  $b=30$  mm, comprimento  $l=60$  mm e espessura  $T=3$  mm. Para além disso, o punção tem uma altura total de 55 mm e inclinação de ataque de  $8^\circ$ , sendo que a altura da face inclinada é 10 mm e o raio 0,4 mm.

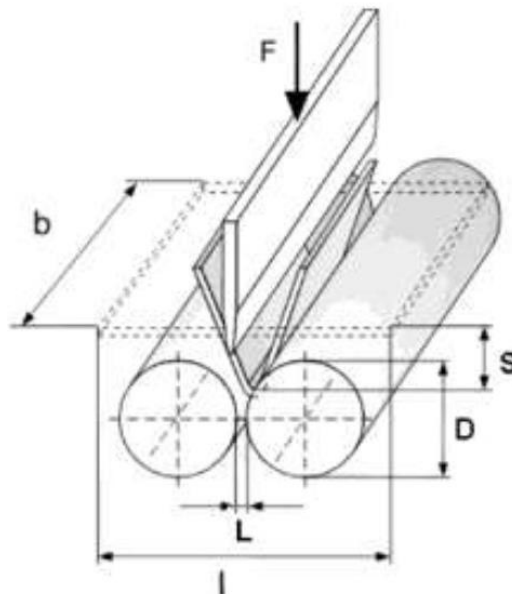


Figura 49 - Configuração do ensaio de dobragem [83]

O procedimento do ensaio começa por manualmente ajustar o afastamento dos rolos de modo a que este seja igual a  $2T_m+0,5$ . De seguida, os provetes são posicionados sobre os rolos (de forma centrada), de modo a que a força seja aplicada no plano central aos rolos (Figura 50). A norma recomenda ainda que, no caso da existência de alguma face do provete com rebarba, esta superfície seja colocada no lado oposto ao que irá sofrer esforços de tração, isto é, deve estar voltada para o lado que entrará em contacto com o punção. No entanto, para comparar e estudar o efeito do estado de acabamento superficial na conformabilidade da chapa, foram deliberadamente realizados ensaios nas duas condições.

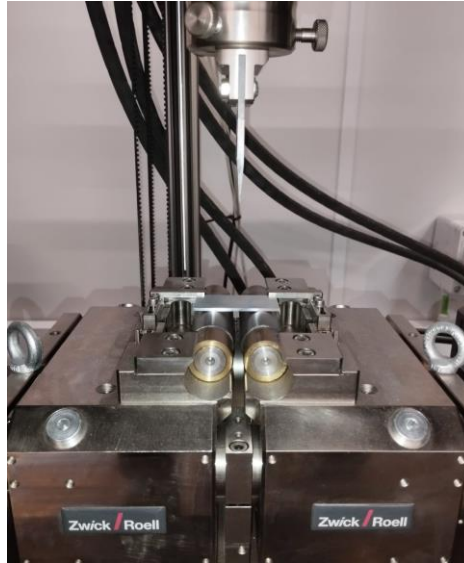


Figura 50 - Equipamento de flexão universal da Zwickroell

As condições às quais os ensaios foram realizados são definidas pela norma VDA 238-100 e são as seguintes:

- Velocidade de pré-carga: 10 mm/min;
- Pré-carga: 30 N;
- Velocidade de ensaio: 20 mm/min.

É possível, de forma analítica, calcular o ângulo de dobragem fazendo uma relação trigonométrica com o deslocamento vertical do punção, como representado esquematicamente na Figura 51. O ângulo de dobragem,  $\alpha$ , pode então ser obtido em função do raio dos rolos,  $R$ , do raio do punção,  $r$ , da distância entre rolos,  $L$ , espessura do provete,  $a$ , e, como mencionado, o deslocamento do punção,  $S$ , através da equação (28).

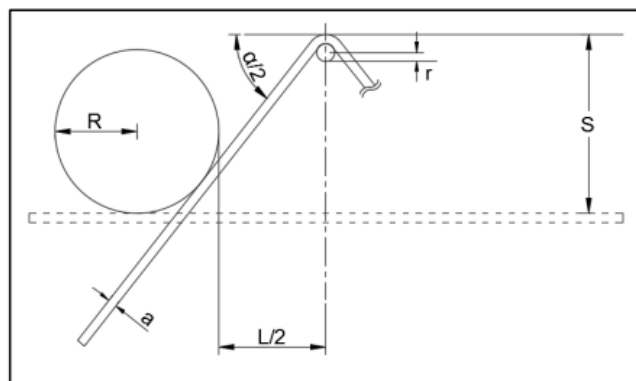


Figura 51 - Relação geométrica do ensaio de flexão para o cálculo analítico do ângulo de dobragem [83]

$$\alpha = 2 \left( -\tan^{-1} \left( \left( \frac{-h - \sqrt{h^2 - 4g \cdot i}}{2g} \right)^{-1} \sqrt{(R + a^2) - \left( \left( \frac{-\sqrt{h^2 - 4g \cdot i} - h}{2g} \right) + \left( R + \frac{L}{2} \right) \right)^2} - (R + a - S) \right) \cdot \frac{180}{\pi} \right), \quad (28)$$

sendo:

$$g = \left(R + \frac{L}{2}\right)^2 + (R + a - S)^2 \quad (29)$$

$$h = 2(R + a)^2 \cdot \left(-\left(R + \frac{L}{2}\right)\right) + 2\left(R + \frac{L}{2}\right)^3 - 2(R + a - S)^2 \cdot \left(-\left(R + \frac{L}{2}\right)\right) \quad (30)$$

$$i = (R + a)^4 - 2(R + a)^2 \cdot \left(R + \frac{L}{2}\right)^2 - (R + a - S)^2 \cdot (R + a)^2 + (R + a - S)^2 \cdot \left(R + \frac{L}{2}\right)^2 + \left(R + \frac{L}{2}\right)^4 \cdot (31)$$

### 3.3.1.3. Ensaios químicos

O ensaio químico é um ensaio de fácil realização que complementa todos os outros testes e oferece informação adicional (nomeadamente a composição química) sobre os materiais. O ensaio foi realizado nas instalações da KIRCHHOFF, utilizando o equipamento PMI – Master Pro da Oxford Instruments, apresentado na Figura 52(a). O ensaio foi realizado seguindo o procedimento *Positive Material Identification* (PMI), que consiste num método não-destrutivo para avaliar a composição química de aços. As diretrizes recomendadas para a realização de ensaios químicos através deste procedimento podem ser encontradas na norma ASTM E1476 [84].

O princípio por detrás da análise química realizada pelo equipamento é a espectrometria de emissão ótica. Este princípio consiste em descarregar uma carga elétrica a partir de um eletrodo para o metal, que excita as moléculas, átomos e partículas de cada elemento que transmitem uma emissão de energia. A intensidade da radiação é proporcional à concentração do elemento na amostra, que é então calculada pelo equipamento a partir de um conjunto armazenado de curvas de calibração [85].

O procedimento do teste é bastante simples. A amostra não necessita de cumprir nenhuma especificação em relação à sua geometria, deve apenas apresentar uma superfície plana. A primeira etapa deve ser a lixagem da superfície para remover qualquer revestimento que possa interferir com as leituras. De seguida, a sonda do equipamento deve ser encostada à amostra a analisar e acionada pelo gatilho da mesma, como demonstrado na Figura 52(b). A composição química completa da amostra aparece em poucos segundos na tela do equipamento.



Figura 52 – a) Equipamento PMI - Master Pro; b) Execução do ensaio

### 3.3.1.4. Ensaios metalográficos

A análise metalográfica, por definição, procura estudar a estrutura dos metais e entender a relação do seu desempenho com a sua microestrutura [86]. O ensaio metalográfico é um ensaio destrutivo porque é necessário recolher uma secção da peça para analisar, danificando a mesma. Assim, o primeiro passo consiste no corte de uma pequena amostra do aço a analisar. Neste trabalho são analisados dois lotes do aço HR700LA: um lote recente (amostra 1), que apresenta elevada taxa de sucata por fissuração nas peças fabricadas, e um lote antigo (amostra 2), cujas peças produzidas não apresentaram qualquer defeito. A preparação da amostra começa com a montagem das amostras do aço numa resina, para facilitar o seu transporte a realização das etapas seguintes. Este passo, bem como toda a preparação das amostras, foi realizada nas instalações do ISEP, no laboratório de metalografia. A montagem é realizada a quente, utilizando uma prensa e resina termoendurecível (baquelite). Convém referir que, de cada lote de material, foram cortadas duas amostras: uma amostra de uma zona da peça não solicitada (material nas condições originais) e uma amostra da zona onde surgem as fissuras que corresponde à zona mais solicitada da peça (identificada em cada um dos casos com um clipe embutido na resina, como se observa na Figura 53).

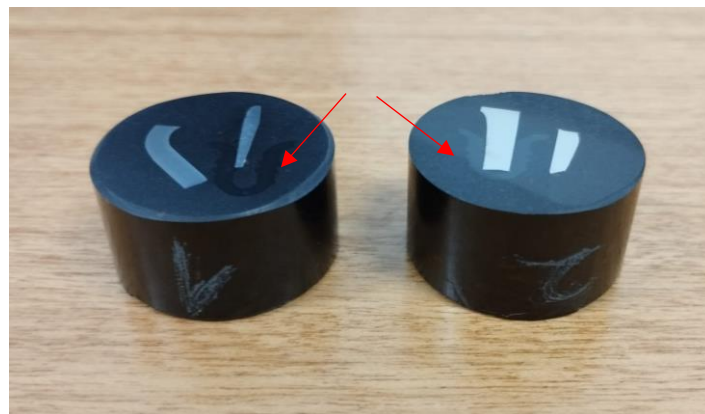


Figura 53 - Amostras dos dois lotes embutidas em resina

A preparação das amostras continua com a lixagem das mesmas. A lixagem tem como objetivo eliminar marcas profundas da superfície do material, pelo que é essencial. Neste processo, as amostras são trabalhadas com lixas de granulometria cada vez menor (220, 500 e 1000), rodando as amostras em 90° cada vez que se passa para lixa de granulometria diferente. Após a lixagem, realiza-se o polimento. O polimento das amostras é realizado com abrasivo de diamante de diâmetro médio de 3  $\mu\text{m}$  e, de seguida, abrasivo de diamante de 1  $\mu\text{m}$ . Este procedimento tem o objetivo de conferir à superfície polida das amostras um aspeto espalhado e isento de riscos. Por fim, faz-se um ataque químico às amostras, que permite a posterior observação dos contornos de grão e diferentes fases na microestrutura do material. Neste caso, o reagente de ataque onde as amostras são mergulhadas é o Nital 4%. Após o ataque químico, as superfícies das amostras devem ser lavadas com água e álcool e limpas utilizando ar comprimido.

Após as amostras estarem preparadas, estas foram analisadas utilizando um microscópio eletrónico de varrimento, presente nas instalações do Centro de Materiais da Universidade do Porto (CEMUP). Este instrumento permite inspecionar as estruturas internas do material em diferentes níveis de ampliação, proporcionando a identificação de diferentes fases, grãos, inclusões, defeitos e outros constituintes importantes que compõem a microestrutura do metal.

### 3.3.1.5. Ensaios de dureza

As amostras a utilizar nos ensaios de dureza são as mesmas utilizadas nos ensaios metalográficos, pelo que a sua preparação já está realizada e explicada no capítulo anterior. Estes ensaios foram realizados nas instalações do ISEP, no laboratório de ensaios tecnológicos, seguindo a norma ASTM E 384 [87]. Foi utilizado um indentador com a ponta de diamante e forma piramidal de base quadrada (indentador utilizado no teste Vickers), que possui ângulos de abertura de  $136^\circ$ , como demonstrado na Figura 54. O indentador aplica uma determinada carga,  $P$ , na amostra, produzindo uma impressão na sua superfície. Tendo em conta a medição das diagonais de indentação,  $d$ , o valor de dureza Vickers, HV, pode ser calculado pela equação (32).

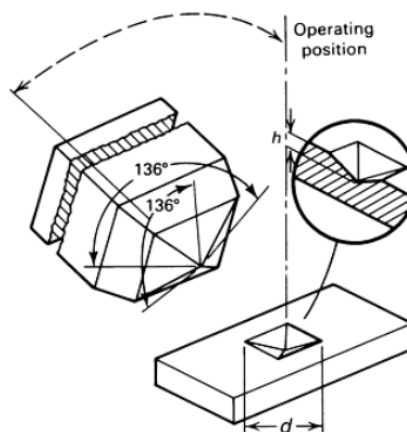


Figura 54 - Representação de um indentador Vickers [88]

$$HV = 1,854.F / d^2 \quad (32)$$

O teste foi realizado seguindo as premissas descritas na norma ASTM E 384 e as condições utilizadas foram:

- Carga: 500 gf;
- Tempo de carga: 5 s;
- Objetiva: 40x.

### 3.3.1.6. Ensaios de estampagem

Os resultados dos ensaios de estampagem efetuados são descritos apenas no capítulo 3.4, para validação do estudo paramétrico numérico. O objetivo dos ensaios de estampagem é validar as soluções propostas e demonstrar que a presença de fissuras no fabrico das peças estudadas foi eliminada. Assim, neste capítulo são descritas as condições operacionais às quais acontecem os ensaios de estampagem dos componentes 16365 e 14768. Ambos os componentes são fabricados através da servoprensa da marca Arisa com capacidade de 2500 kN. Assim, os dois ensaios ocorrem nesta mesma prensa, exposta na Figura 55.



Figura 55 - Servoprensa da Arisa de 2500 kN

Estas prensas possuem um programa incorporado que permite ao operador controlar a máquina e ajustar os parâmetros de produção, consoante o componente a produzir. Esta característica permite a otimização do desempenho para cada ferramenta. Assim, as condições dos ensaios de estampagem para os dois componentes encontram-se definidas na Tabela 14. Estes parâmetros foram definidos em função de estampagens de tipologia semelhante e ajustados para cada peça pela empresa através de ensaios realizados antes da primeira produção dos componentes.

Tabela 14 - Condições operacionais da prensa

	<b>Ensaio 16365</b>	<b>Ensaio 14768</b>
Curso (mm)	128	152
Velocidade (golpe/m)	36	33
Altura de trabalho (mm)	426,4	423,5
Altura de amarre (mm)	466,5	466,5
Passo (mm)	91,5	132
Pressão do alimentador (bar)	3	2
Pressão do óleo (bar)	2	4
Pressão do ar (bar)	3	3
Força (t)	235	230
Frequência lubrificação	1 golpe	3 golpes
Tempo lubrificação por golpe (s)	0,4	0,1

Os resultados dos ensaios de estampagem não serão demonstrados neste capítulo, mas sim no capítulo 3.4.6, depois de apresentadas as propostas de solução otimizadas por modelação numérica, para validar o modelo teórico.

### 3.3.2. Materiais

Os materiais selecionados para este estudo correspondem aos materiais de três peças distintas produzidas pela KIRCHHOFF, cujo fabrico se revelou de difícil compreensão, pois estas peças apresentaram uma taxa de sucata variável e inesperada. Estes materiais são os aços HR700LA, CR340LA e DP800, cujas propriedades se encontram na Tabela 15 e composição química na Tabela 16, Tabela 17 e Tabela 18, respetivamente. O primeiro material é fornecido pela Volkswagen e as suas propriedades podem ser encontradas na norma interna Volkswagen VW 50065, cujos regulamentos se baseiam na norma VDA 239-100. Já os aços CR340LA e o DP800 seguem as orientações publicadas pela FORD e as propriedades destes materiais encontram-se nas normas internas WSS-M1A367-A16 e WSS-M1A368-A14, respetivamente. Estes três materiais pertencem à família dos aços de elevada resistência e são altamente utilizados na indústria automóvel, pela sua boa capacidade de conformação e as excelentes propriedades mecânicas, permitindo estruturas automóveis mais seguras.

Tabela 15 - Propriedades mecânicas dos 3 materiais selecionados

Propriedades/Material	HR700LA	CR340LA	DP 800
Espessura (mm)	3	2	2
Tensão de cedência min. (MPa)	700	340	420
Tensão de cedência max. (MPa)	850	420	550
Resistência mecânica min. (MPa)	750	410	780
Resistência mecânica max. (MPa)	950	530	900
Alongamento (min %)	13	20	14

Tabela 16 - Composição química do aço HR700LA

	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Al (%)	Ti (%)	Nb (%)	Cu (%)
<b>HR700LA</b>	≤ 0,12	≤ 0,6	≤ 2,1	≤ 0,03	≤ 0,025	≤ 0,015	≤ 0,15	≤ 0,1	≤ 0,2

Tabela 17 - Composição química do aço CR340LA

	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Al (%)	Ti (%)	Nb (%)	Cu (%)
<b>CR340LA</b>	≤ 0,12	≤ 0,5	≤ 1,5	≤ 0,03	≤ 0,025	≤ 0,015	≤ 0,15	≤ 0,09	≤ 0,2

Tabela 18 - Composição química do aço DP800

	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Al (%)	Ti+Nb (%)	Cr+Mo (%)	B (%)	Cu (%)
<b>DP800</b>	≤ 0,18	≤ 0,8	≤ 2,5	≤ 0,05	≤ 0,01	0,015-1	≤ 0,15	≤ 1,4	≤ 0,005	≤ 0,2

### 3.3.3. Fabrico dos provetes de dobragem

Os provetes para os ensaios de dobragem foram obtidos por corte em ferramenta de estampagem, de forma a produzir diferentes níveis de folga, diferentes orientações do material, chanfros e o mesmo estado de superfície que a chapa adquire através de uma operação de corte no decorrer do processo de estampagem. Para que o corte dos provetes com as dimensões pretendidas seja possível foi necessário projetar uma ferramenta de estampagem para esse fim. Assim sendo, com recurso à ferramenta CAD que o *software* Solidworks apresenta, foram desenhados os componentes que compõem uma ferramenta de estampagem, como punções, matrizes, calcador, placa-choque, bloco inferior e bloco superior. O sistema foi idealizado de modo a alojar todos componentes normalizados necessários ao funcionamento da ferramenta, como molas, extratores, parafusos e cavilhas. O aspeto final da ferramenta, após montagem, é demonstrado na Figura 56. A chapa é posicionada manualmente permitindo obter provetes em diferentes orientações.

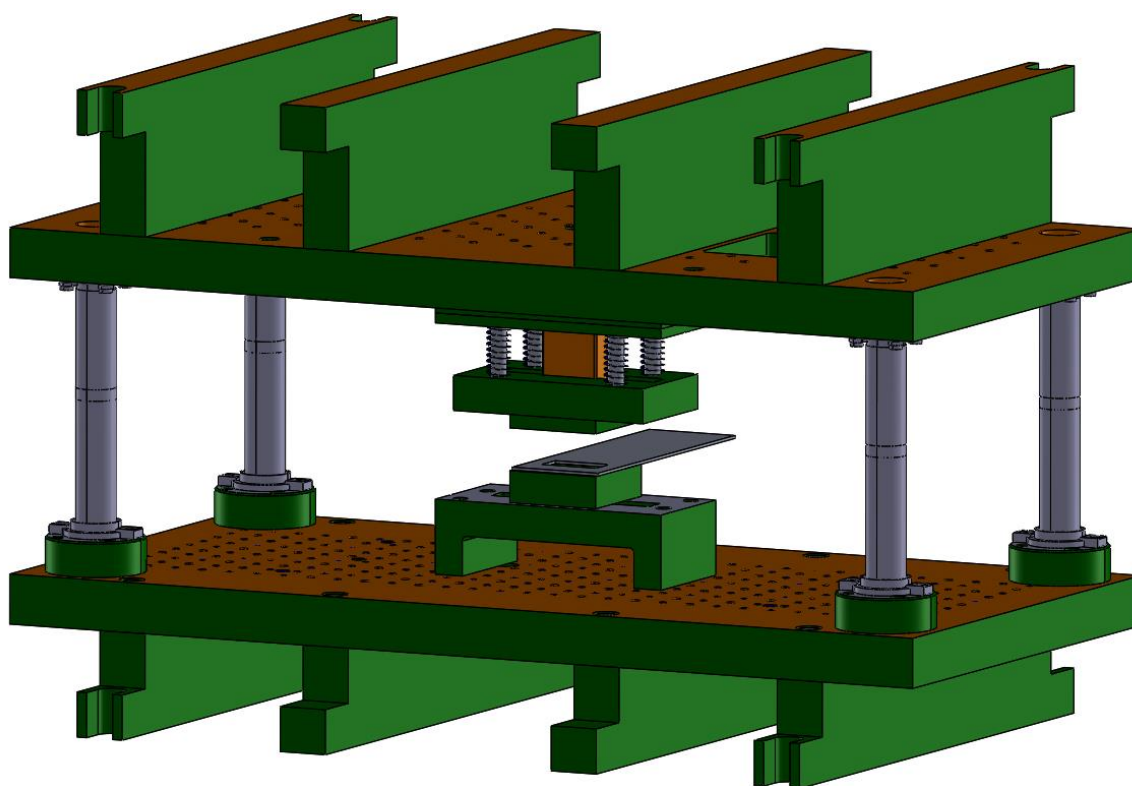


Figura 56 - Ferramenta para corte de provetes

O sistema foi desenhado de forma a permitir que no futuro sejam extraídos também provetes para o ensaio de tração. Para este efeito, uma vez que os provetes de tração e os provetes de dobragem têm dimensões diferentes, foram desenhados dois conjuntos de punções-matrizes: um conjunto destinado exclusivamente a extrair provetes para os ensaios de tração e outro conjunto destinado a extrair provetes de dobragem. Todos os outros componentes responsáveis pela fixação, extração dos provetes e aplicação da pressão na placa foram pensados de modo a serem compatíveis com os dois processos e para evitar a necessidade de serem substituídos ou refeitos na permuta entre punções e matrizes. Para além disso, cada conjunto engloba punções de tamanhos diferentes. Assim, para a mesma matriz, consegue-se variar a folga de corte do processo através da mudança (redução) do perímetro de corte do punção. O curso do punção é garantido pelos parafusos guia e corresponde a 10 mm. Este curso deve garantir que, quando a ferramenta fecha totalmente, o

punção atravesse a matriz de forma a completar a separação do provete da matéria-prima sem, no entanto, provocar interferência entre os componentes do bloco superior e os componentes do bloco inferior, como se verifica na Figura 57.

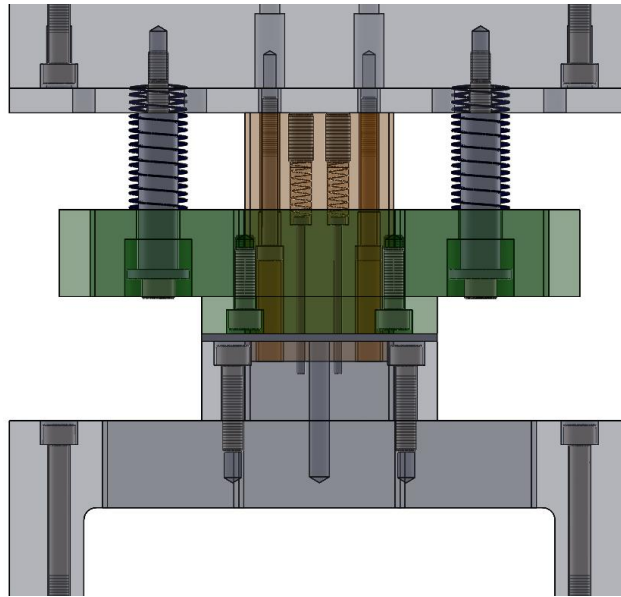


Figura 57 – Representação da ferramenta fechada, demonstrando o seu princípio de funcionamento

Por fim, para realizar os chanfros aos provetes, basta substituir os punções e matrizes de corte por um punção e matriz de estampagem produzidos para o efeito. A ferramenta trabalha com os mesmos componentes, uma vez que este conjunto punção/matriz pode de igual forma ser alojado aos blocos superiores e inferiores, como demonstrado na Figura 58. As faces na cavidade da matriz possuem uma inclinação de  $45^\circ$  que, ao realizar a estampagem, permite conformar os provetes e executar um chanfro cujas dimensões são proporcionais ao curso do bloco. Neste caso, o curso pode ser programado no equipamento pelo operador.

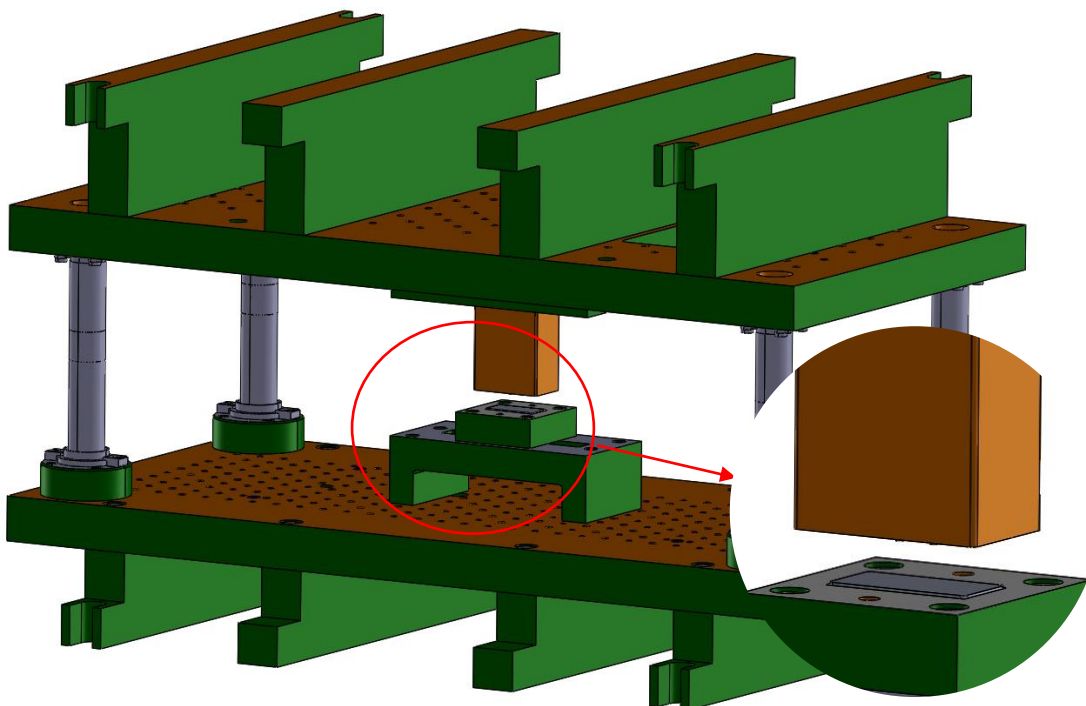


Figura 58 - Montagem das ferramentas para realização de chanfro em provetes

Na Figura 59 e Figura 60 pode ser observada a montagem da ferramenta numa prensa manual e o seu funcionamento, desde a posição inicial até ao fecho da ferramenta, isto é, quando atinge o curso e acontece a extração do provete.



Figura 59 - Ferramenta na posição aberta (posição inicial)



Figura 60 - Ferramenta na posição fechada (posição final)

### 3.3.4. Planeamento de experiências

Para o estudo do processo de estampagem, foram analisadas quatro variáveis que potencialmente podem afetar significativamente o desempenho de um material, como a orientação da matéria-prima, a folga de corte, utilização de chanfro (que funciona como um quebra rebarbas) e o estado de superfície da aresta. A definição destas variáveis deve-se ao facto de estes parâmetros serem aqueles que, a partir da experiência da empresa, têm maior influência na qualidade de um produto resultante de uma estampagem de chapa metálica, com base em estampagens de tipologia semelhante. Assim, decidiu-se utilizar os valores apresentados na Tabela 19, seguindo o *know-how* presente na empresa.

Tabela 19 - Fatores em estudo e respetivos níveis

Nível	Orientação da matéria-prima	Folga de corte	Chanfro	Estado de superfície
1	0°	5%	s/ chanfro	Aresta s/rebarba
2	45°	10%	0,5 x 0,5 mm	Aresta c/rebarba
3	90°	15%	1,5 x 1,5 mm	-

Assim sendo, entende-se o interesse em utilizar fatoriais fracionados na definição do desenho de experiências. A utilização da tradicional abordagem fatorial completa é inconcebível, considerando os recursos e tempo disponível, uma vez que o número de ensaios a realizar seria 162, como demonstrado pela equação (33), tendo em conta as três réplicas de cada provete necessárias para garantir rigor científico

$$X = L^P = (2^1 \times 3^3) \times 3 = 162, \quad (33)$$

sendo X o número de ensaios, P o número de fatores e L a quantidade níveis.

O procedimento adotado na fase inicial para experimentar todos estes fatores sem, no entanto, utilizar em excesso os recursos disponíveis, consiste em transformar a experiência num plano de 4 fatores com 2 níveis, de forma a que se obtenha uma região regular. Ao aplicar o método fatorial fracionado (excluindo por enquanto o nível central dos fatores com 3 níveis e considerando apenas os valores extremos) obtém-se uma experiência de  $2^{4-1}$  ensaios, isto é, 8 ensaios. De seguida, são adicionados ao plano de experiências as combinações que incluam os níveis centrais. Uma vez que cada nível correspondente aos valores extremos surge quatro vezes, foram utilizadas 4 combinações com os pontos centrais para o plano de experiências ficar equilibrado. A matriz de ensaios obtida corresponde então a uma matriz de 12 ensaios, apresentada na Tabela 20, sendo que as linhas que incluem os pontos centrais correspondem aos tratamentos 9 e 10.

A metodologia a seguir consiste na realização de ensaios nos quais a variável de resposta é o ângulo de dobragem atingido por provetes segundo o ensaio descrito na norma VDA 238-100: ensaio de dobragem, variando as condições descritas na Tabela 19. Deste modo, analisando o ângulo máximo que cada provete consegue atingir sem fissurar é possível retirar conclusões relativas à melhor ou pior capacidade de conformação em função de cada condição de ensaio. Esta experiência serve como um ponto de partida e, em função dos resultados, será criado um novo plano de experiências, incluindo apenas os fatores que se revelem de maior importância.

Tabela 20 - Matriz de 12 ensaios

Tratamento	Orientação da matéria-prima (°)	Folga de corte (%)	Chanfro (mm)	Estado de superfície
1	-1	1	1	-1
2	1	1	-1	-1
9	0	0	0	-1
3	1	-1	1	-1
9	0	0	0	-1
4	1	1	1	1
5	-1	1	-1	1
10	0	0	0	1
6	1	-1	-1	1
10	0	0	0	1
7	-1	-1	1	1
8	-1	-1	-1	-1

Substituindo os valores de cada nível apresentados na Tabela 20 pelo respectivo parâmetro de cada fator da Tabela 19 obteve-se a matriz de ensaios utilizada, apresentada na Tabela 21. Deste modo são realizados ensaios de flexão em 10 condições diferentes. Para além disso, cada provete é replicado três vezes, o que perfaz um total de 54 provetes/ensaios. A realização dos ensaios foi randomizada, com exceção dos pontos centrais, e a ordem pela qual os ensaios são apresentados (*RunOrder*), corresponde à sequência de execução.

Tabela 21 - Matriz de ensaios

Tratamento	<i>RunOrder</i>	Orientação da matéria-prima (°)	Folga de corte (%)	Chanfro (mm)	Estado de superfície
5	1	0	15	0	Aresta c/rebarba
4	2	90	15	1,5x1,50	Aresta c/rebarba
9	3	45	10	0,5x0,5	Aresta s/rebarba
7	4	0	5	1,5x1,5	Aresta c/rebarba
4	5	90	15	1,5x1,50	Aresta c/rebarba
9	6	45	10	0,5x0,5	Aresta s/rebarba
5	7	0	15	0	Aresta c/rebarba
1	8	0	15	1,5x1,5	Aresta s/rebarba
9	9	45	10	0,5x0,5	Aresta s/rebarba
2	10	90	15	0	Aresta s/rebarba
3	11	90	5	1,5x1,5	Aresta s/rebarba
10	12	45	10	0,5x0,5	Aresta c/rebarba
7	13	0	5	1,5x1,5	Aresta c/rebarba
3	14	90	5	1,5x1,5	Aresta s/rebarba
10	15	45	10	0,5x0,5	Aresta c/rebarba
6	16	90	5	0	Aresta c/rebarba
2	17	90	15	0	Aresta s/rebarba
10	18	45	10	0,5x0,5	Aresta c/rebarba

8	19	0	5	0	Aresta s/rebarba
8	20	0	5	0	Aresta s/rebarba
9	21	45	10	0,5x0,5	Aresta s/rebarba
2	22	90	15	0	Aresta s/rebarba
6	23	90	5	0	Aresta c/rebarba
9	24	45	10	0,5x0,5	Aresta s/rebarba
5	25	0	15	0	Aresta c/rebarba
8	26	0	5	0	Aresta s/rebarba
9	27	45	10	0,5x0,5	Aresta s/rebarba
3	28	90	5	1,5x1,5	Aresta s/rebarba
6	29	90	5	0	Aresta c/rebarba
10	30	45	10	0,5x0,5	Aresta c/rebarba
1	31	0	15	1,5x1,5	Aresta s/rebarba
4	32	90	15	1,5x1,50	Aresta c/rebarba
10	33	45	10	0,5x0,5	Aresta c/rebarba
7	34	0	5	1,5x1,5	Aresta c/rebarba
1	35	0	15	1,5x1,5	Aresta s/rebarba
10	36	45	10	0,5x0,5	Aresta c/rebarba

Assim sendo, procedeu-se à recolha dos provetes nas diferentes orientações da matéria-prima através da ferramenta projetada no capítulo 3.3.3, seguida pela estampagem dos chanfros na aresta com rebarba dos provetes (quando necessária) e terminando com os ensaios de dobragem (cujo aspeto final se pode observar na Figura 61), sujeitando a face dos provetes com ou sem rebarba, consoante o ensaio, a esforços de tração durante a flexão. Esta permuta é feita alterando o posicionamento do provete, uma vez que o raio exterior de dobragem está sob esforços de tração e o raio interior sob esforços de compressão.



Figura 61 - Provetes do aço DP800 após o ensaio de flexão

O equipamento regista o deslocamento do punção em função da força aplicada e, como é visível na Figura 62, o ângulo de dobragem ao qual se inicia a fissura é notoriamente diferente entre as diferentes condições do ensaio, uma vez que o ângulo é diretamente proporcional ao deslocamento do punção.

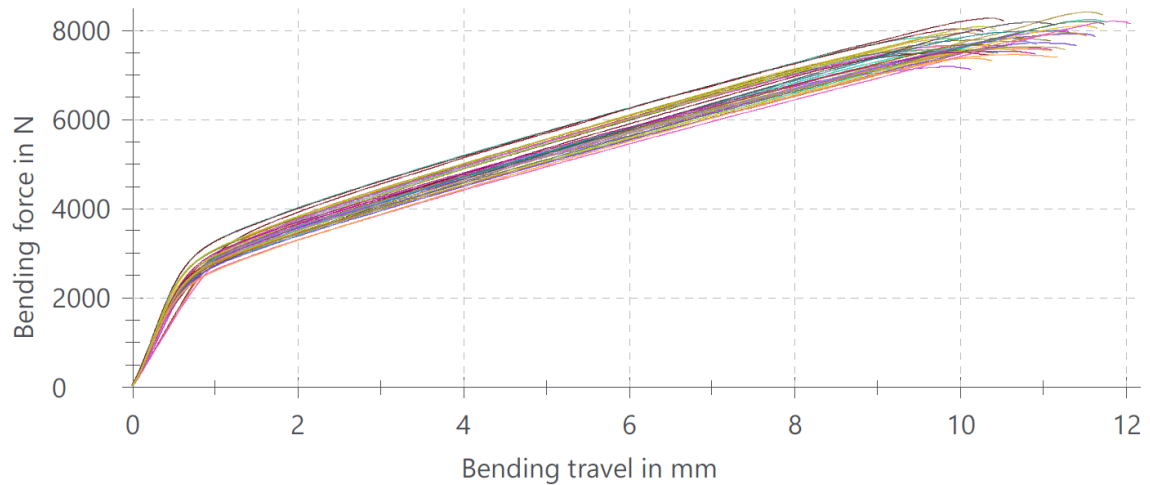


Figura 62 - Gráfico força/deslocamento dos ensaios da matriz de experiência

Após a extração dos valores do ângulo de dobragem do equipamento, a matriz de ensaios é introduzida no *software* Minitab, juntamente com os valores da variável de resposta em questão, como é demonstrado na Figura 63.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	RunOrder	Orientação	Folga	Chanfro	Face	Angulo
1	1	-1	1	-1	1	88,268
2	2	1	1	1	1	96,489
3	3	0	0	0	-1	104,844
4	4	-1	-1	1	1	92,971
5	5	1	1	1	1	91,376
6	6	0	0	0	-1	107,082
7	7	-1	1	-1	1	87,881
8	8	-1	1	1	-1	90,996
9	9	0	0	0	-1	108,486
10	10	1	1	-1	-1	99,720
11	11	1	-1	1	-1	89,990
12	12	0	0	0	1	95,297
13	13	-1	-1	1	1	89,810
14	14	1	-1	1	-1	96,995
15	15	0	0	0	1	107,718
16	16	1	-1	-1	1	85,940
17	17	1	1	-1	-1	106,056
18	18	0	0	0	1	98,011
19	19	-1	-1	-1	-1	83,956
20	20	-1	-1	-1	-1	88,492
21	21	0	0	0	-1	108,269
22	22	1	1	-1	-1	100,918
23	23	1	-1	-1	1	90,298
24	24	0	0	0	-1	101,131
25	25	-1	1	-1	1	87,281
26	26	-1	-1	-1	-1	91,853
27	27	0	0	0	-1	111,695
28	28	1	-1	1	-1	95,580
29	29	1	-1	-1	1	87,848
30	30	0	0	0	1	93,544
31	31	-1	1	1	-1	87,187
32	32	1	1	1	1	103,825
33	33	0	0	0	1	99,076
34	34	-1	-1	1	1	89,191
35	35	-1	1	1	-1	94,481
36	36	0	0	0	1	97,057

Figura 63 - Introdução da matriz de experiências no Minitab

De seguida, é analisado através do programa de que forma cada *input* afeta o valor do *output*. Isto é, de que forma a orientação da matéria-prima, a folga de corte, o chanfro e a face afetam o valor atingido no ensaio de dobragem em pratos metálicos. Esta análise foi realizada com um intervalo de confiança de 90% e os resultados da análise de variância encontram-se na Tabela 22. Começando

por observar o gráfico de Pareto normalizado dos efeitos de cada termo (Figura 64), conclui-se que a orientação da matéria-prima, a face e a folga de corte se assumem de importância significativa para a capacidade de conformação da chapa, pois o efeito destes fatores estão à direita da reta vertical vermelha. O *software* identifica ainda uma interação de importância entre a orientação da matéria-prima e a face.

Tabela 22 - Tabela ANOVA do primeiro plano de experiências

#### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	1562,54	195,317	11,63	0,000
Linear	4	552,82	138,205	8,23	0,000
Direção	1	220,03	220,033	13,10	0,001
Folga	1	110,75	110,749	6,59	0,016
Chanfro	1	17,30	17,302	1,03	0,319
Face	1	204,74	204,736	12,19	0,002
2-Way Interactions	3	162,26	54,086	3,22	0,038
Direção*Folga	1	112,29	112,291	6,68	0,015
Direção*Chanfro	1	7,51	7,515	0,45	0,509
Direção*Face	1	42,45	42,453	2,53	0,124
Curvature	1	847,46	847,458	50,44	0,000
Error	27	453,61	16,800		
Lack-of-Fit	1	61,54	61,538	4,08	0,054
Pure Error	26	392,07	15,080		
Total	35	2016,15			

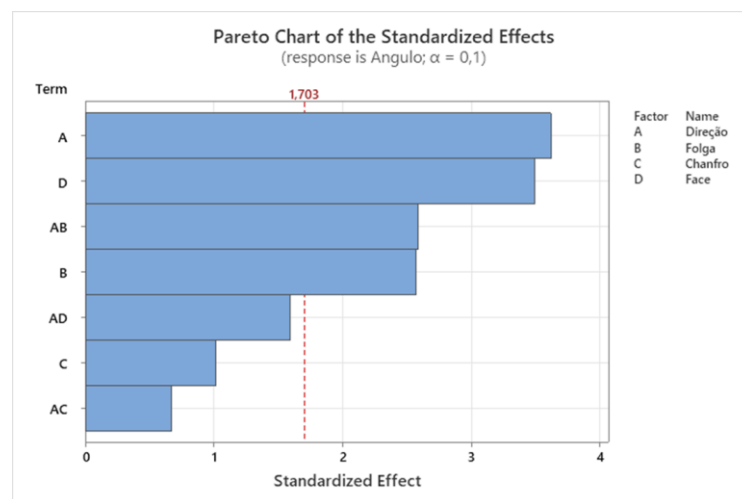


Figura 64 - Gráfico de Pareto normalizado dos efeitos de cada fator

Os *dotplots* permitem avaliar a dispersão dos valores do ângulo obtido para cada nível de cada fator (Figura 65). Pela observação dos diagramas não se identificam *outliers*.

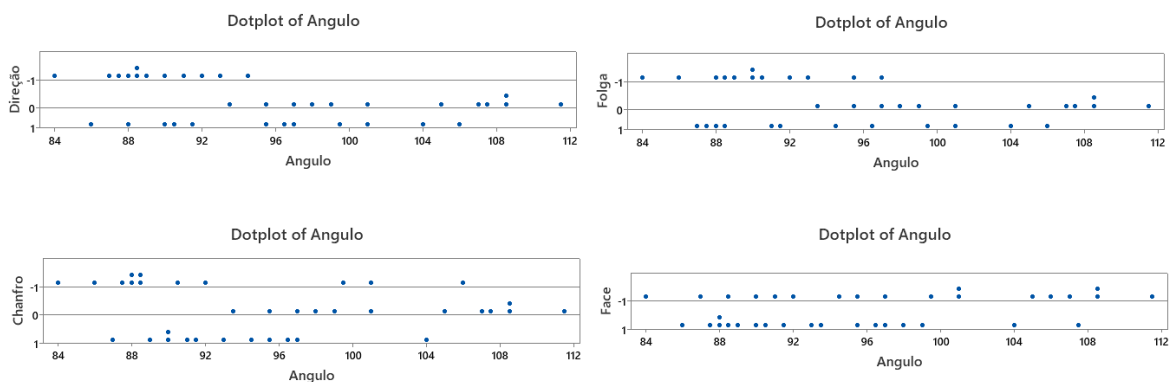


Figura 65 - *Dotplots* do ângulo para cada fator

Os *factorial plots*, apresentados na Figura 66, representam graficamente os dados presentes nos *dotplots*. Na análise dos *factorial plots* sobressai a curvatura que existe na tendência dos níveis centrais. Verifica-se que os pontos centrais estão bem acima dos níveis -1 e +1, implicando que a linha de tendência tem a forma de uma parábola passando pelos pontos centrais. Estes resultados, no entanto, não foram os expectáveis. Seria de esperar um desempenho proporcional à folga de corte e limitações no material quando sujeito a cargas aplicadas numa direção diferente da direção de laminagem. Já no *factorial plot* da face não faz sentido analisar o ponto central uma vez que a face não possui nível central.

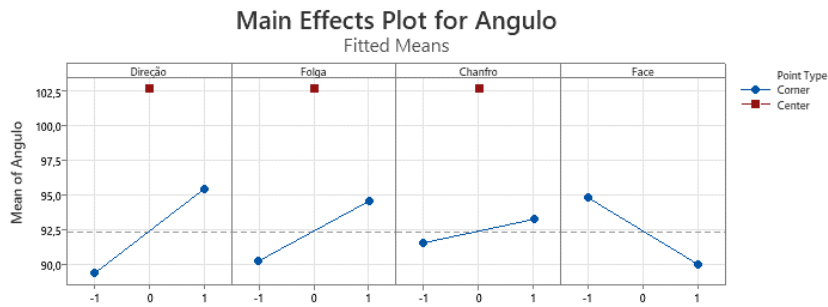


Figura 66 - Factorial plots dos efeitos de cada fator

Para além disso, a análise dos *interaction plots* (Figura 67), revela novamente que a interação direção-folga é a única que merece ser analisada, pois corresponde ao cenário no qual as retas são menos paralelas e, por isso, maior é o efeito da interação.

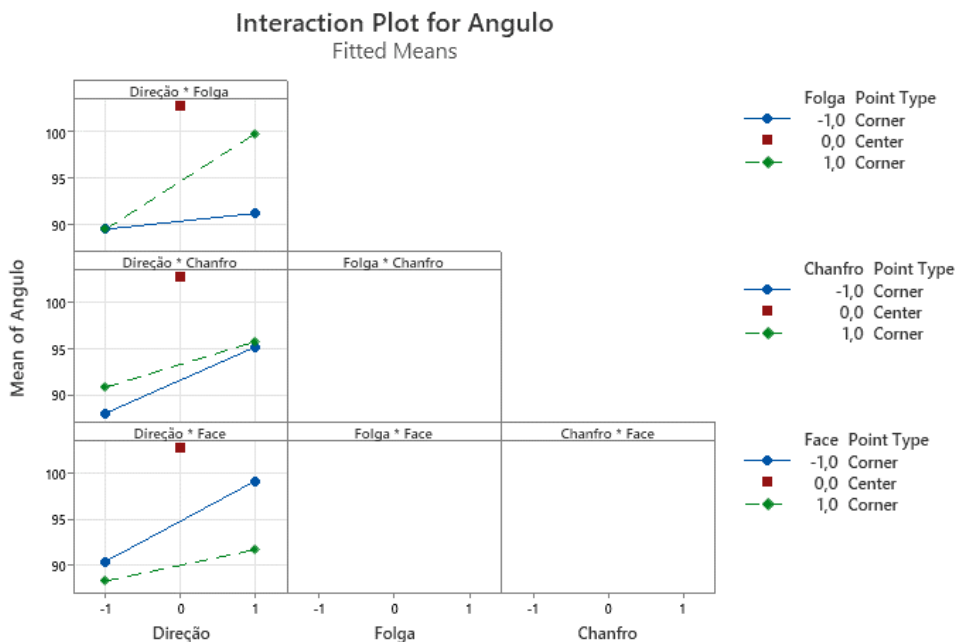


Figura 67 - Interaction plots

É de notar que o sumário da experiência avalia o coeficiente de correlação em 77,5%, o que significa que o modelo estudado explica 77,5% da variância dos resultados do plano de experiências. Eventualmente, existem outros fatores que não foram considerados e que podem ajudar a explicar os 22,5% restantes da variância, ou o processo possui um ruído natural elevado. No entanto, não é o caso, pois na análise dos resíduos (Figura 68) não se verifica qualquer padrão, logo não existe suspeita de qualquer erro ou influência externa na condução do plano de experiências.

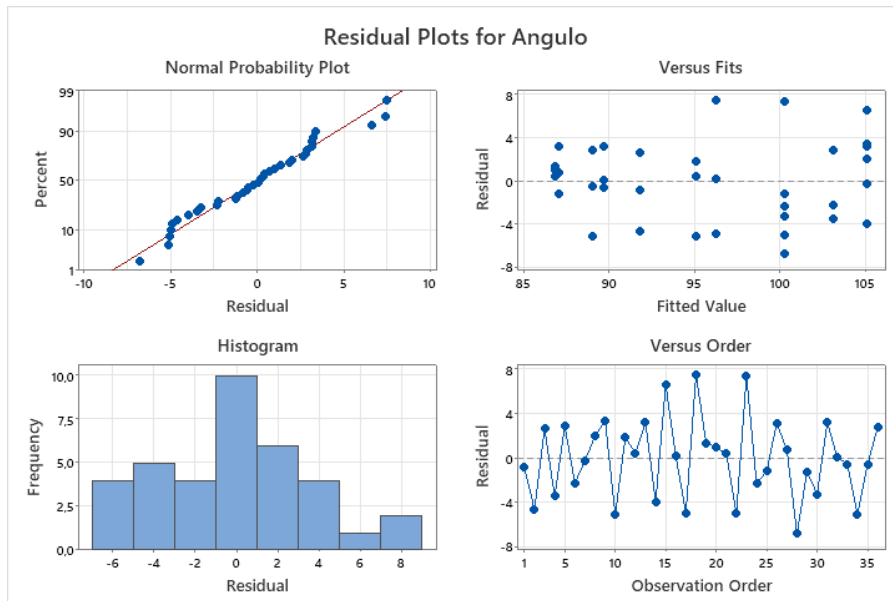


Figura 68 - Análise de resíduos

Em suma, de todos os fatores, é possível concluir que a existência do chanfro não se revelou importante. Ainda que na realidade esta seja uma técnica aplicada para eliminar rebarbas nas arestas da chapa e prevenir o aparecimento de fissuras, é perceptível que o seu peso em comparação com a folga de corte e a face que sofre os esforços de tração durante o ensaio de dobragem (fatores diretamente relacionados com a presença de rebarbas) é substancialmente menor. A face, como seria de esperar, revelou ser um fator importante e o nível “A” (quando a face sem rebarba está voltada para baixo – lado sujeito à tração) é o que garante maior ângulo de dobragem. Estes resultados vão de encontro ao conhecimento presente na indústria.

Por outro lado, os resultados relativos à orientação e à folga de corte são surpreendentes. Deste modo, é realizado um novo plano de experiências com o intuito de confirmar os resultados, de modo a explicar/validar o motivo pelo qual os pontos centrais se apresentam extramente altos e validar a existência de interação entre estes fatores. Para esta análise, o chanfro será descartado e a face é fixada no nível “A”, que corresponde à condição ótima. Posto isto, o plano de experiências é agora composto por dois fatores a dois níveis, nível central (nível 0) contra o melhor nível, que para ambos os casos corresponde aos níveis “+1” (orientação da matéria-prima de 90° e folga de corte de 15%). Assim, o segundo plano de experiências é um simples plano fatorial completo de quatro ensaio com dois fatores, como se observa na Tabela 23.

Tabela 23 - Matriz de 4 ensaios

Treatamento	Orientação da matéria-prima (°)	Folga de corte (%)
1	-1	-1
2	-1	1
3	1	1
4	1	-1

Tal como se considerou no primeiro plano de experiências, cada tratamento é replicado três vezes (Tabela 24).

Tabela 24 - Matriz de ensaios para o segundo plano de experiências

Tratamento	RunOrder	Orientação da matéria-prima (°)	Folga de corte (%)
1	1	90	10
2	2	90	15
3	3	45	15
4	4	45	10
1	5	90	10
2	6	90	15
3	7	45	15
4	8	45	10
1	9	90	10
2	10	90	15
3	11	45	15
4	12	45	10

Após a preparação dos novos provetes, seguindo o procedimento descrito anteriormente, os ensaios de flexão foram repetidos e os resultados registados pelo equipamento de flexão são apresentados na Figura 69. Estes dados são novamente inseridos no Minitab (Figura 70).

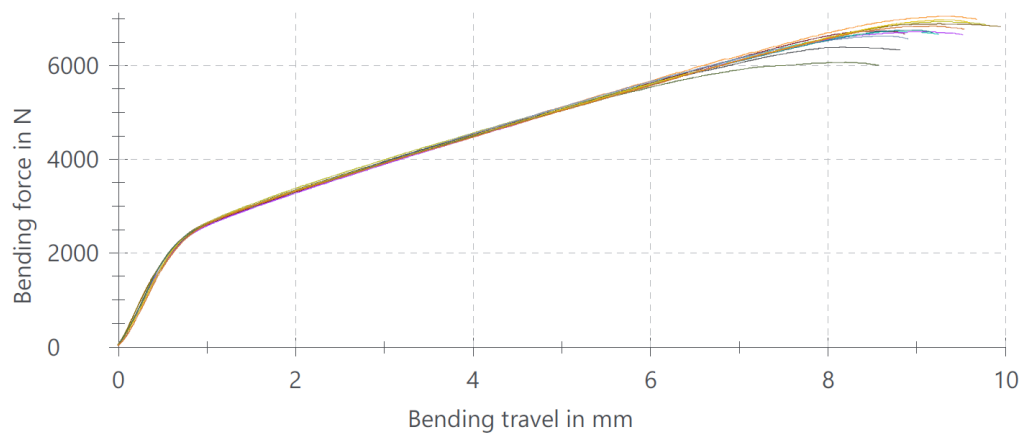


Figura 69 - Gráfico força/deslocamento dos ensaios do novo plano de experiências

↓	C1	C2	C3	C4	✓
	RunOrder	Orientação_1	Folga_1	Angulo_1	
1	1	-1	-1	86	
2	2	-1	1	81	
3	3	1	1	77	
4	4	1	-1	87	
5	5	-1	-1	84	
6	6	-1	1	89	
7	7	1	1	77	
8	8	1	-1	80	
9	9	-1	-1	76	
10	10	-1	1	85	
11	11	1	1	80	
12	12	1	-1	84	

Figura 70 - Introdução da nova matriz de experiências no Minitab

O estudo é realizado novamente para um intervalo de confiança de 90%, sendo que a respectiva análise de variância se encontra na Tabela 25. Os resultados alcançados vão de encontro aos resultados obtidos anteriormente, pois através do gráfico de Pareto dos efeitos, apresentado na Figura 71, confirma-se a importância da orientação da matéria-prima e da folga de corte no desempenho do material quando sujeito a uma dobragem. Para além disso, não existe qualquer interação entre estes dois fatores, o que contraria o estudo anterior.

Tabela 25 - Tabela ANOVA para o segundo plano de experiências

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	125,667	41,8889	4,41	0,041
Linear	2	125,667	62,8333	6,61	0,020
A	1	85,333	85,3333	8,98	0,017
B	1	40,333	40,3333	4,25	0,073
2-Way Interactions	1	0,000	0,0000	0,00	1,000
A*B	1	0,000	0,0000	0,00	1,000
Error	8	76,000	9,5000		
Total	11	201,667			

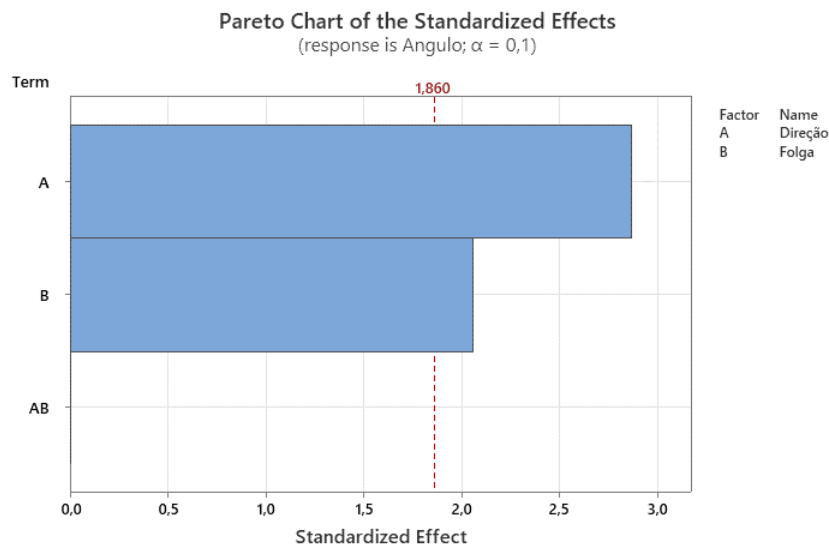


Figura 71 - Gráfico de Pareto normalizado dos efeitos de cada fator do novo plano de experiências

Os *factorial plots* confirmam os elevados valores que os pontos centrais apresentaram no plano de experiências inicial. Os níveis que agora estão definidos como “-1”, correspondem aos valores armazenados no nível “0” no plano anterior (45° e 10%, para a orientação da matéria-prima e folga de corte, respetivamente) – pontos centrais. Estes resultados provam que, apesar de no estudo anterior os pontos centrais estarem bem acima da linha de tendência (o que não seria de esperar), estes resultados estavam corretos uma vez que os valores do nível central destes fatores correspondem efetivamente às condições ótimas para alcançar o melhor desempenho. Isto é comprovado pela Figura 72, onde se observa que, no novo plano de experiências, a linha de tendência é decrescente do nível “-1” para o nível “+1”.

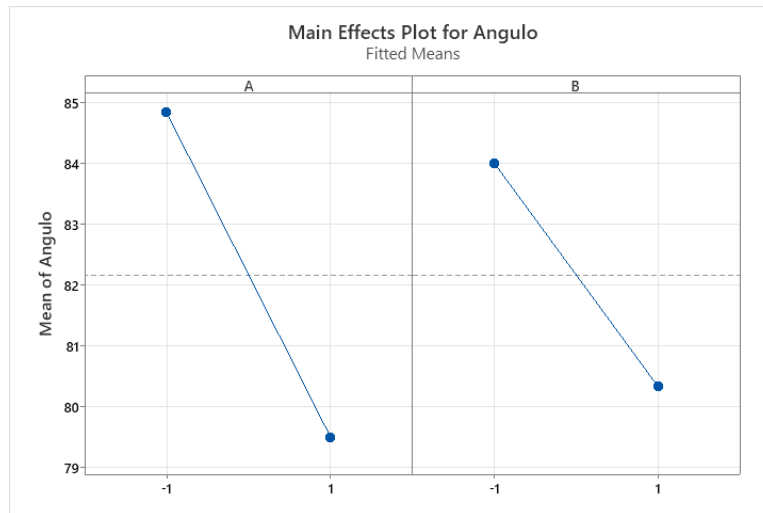


Figura 72 - *Factorial plots* dos efeitos de cada fator do novo plano de experiências

No gráfico de interação entre os dois fatores (Figura 73) não há aspetos relevantes a assinalar. As duas retas não se intercetam, sendo, aliás, praticamente paralelas. Deste modo, pode-se concluir que não existe interação entre a orientação da matéria-prima e a folga de corte. Estes resultados vão de encontro ao que seria expectável, pois as rebarbas presentes nos provetes (relacionadas com a folga de corte) não estão relacionadas de qualquer modo com a orientação do material.

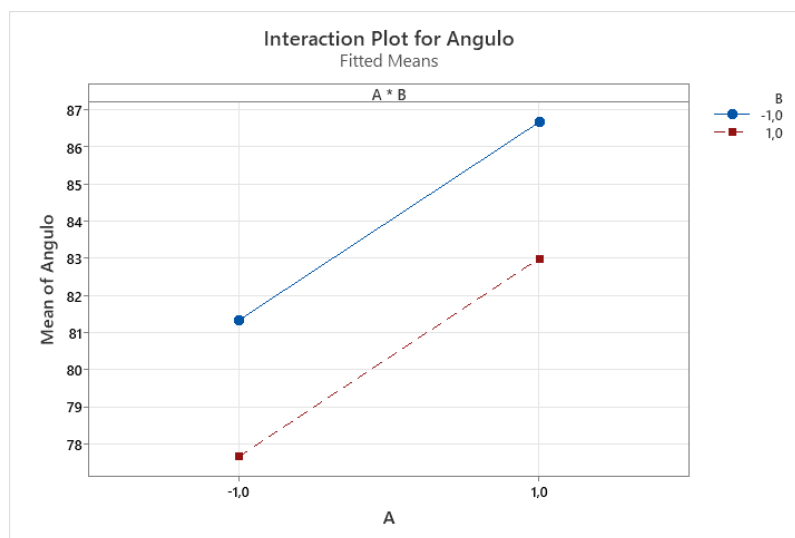


Figura 73 - *Interaction plots* do novo plano de experiências

### 3.3.5. Resultados dos ensaios

#### 3.3.5.1. Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram o ponto de partida na caracterização dos três materiais. O propósito destes ensaios foi, por um lado, quantificar as propriedades mecânicas dos materiais (para perceber se estas se encontram dentro das especificações técnicas dos materiais), o que permite fazer uma representação numérica mais precisa dos mesmos e, por outro lado, perceber se existe variância das propriedades entre lotes diferentes. Assim, durante o período de estágio na KIRCHHOFF foram recolhidas amostras de material provenientes de diferentes produções o que permitiu obter uma

ampla gama de dados e avaliar a variabilidade das propriedades do material ao longo do tempo e entre diferentes lotes de produção, nomeadamente a resistência, ductilidade e outras relevantes. Ao comparar os resultados obtidos, é possível identificar possíveis tendências e variações significativas e possíveis relações entre os parâmetros de produção e as propriedades do material.

### 3.3.5.1.1. Aço HR700LA

O aço HR700LA foi o material com uma maior amostra, uma vez que a empresa preservou material em *stock* que produzia sem qualquer problema. Assim, foram analisados materiais de 7 lotes diferentes, que correspondem a produções desde agosto de 2022 (altura onde o componente não apresentava defeitos) a abril de 2023. Deste modo, foram estudados lotes adquiridos anteriormente ao início das fissuras (lote 1, 2 e 3) e lotes adquiridos aquando do aparecimento de fissuras (lote 4 a 7). A cada lote realizaram-se 3 ensaios de tração e os gráficos tensão ( $\sigma$ ) - deformação ( $\epsilon$ ) obtidos encontram-se na Figura 74.

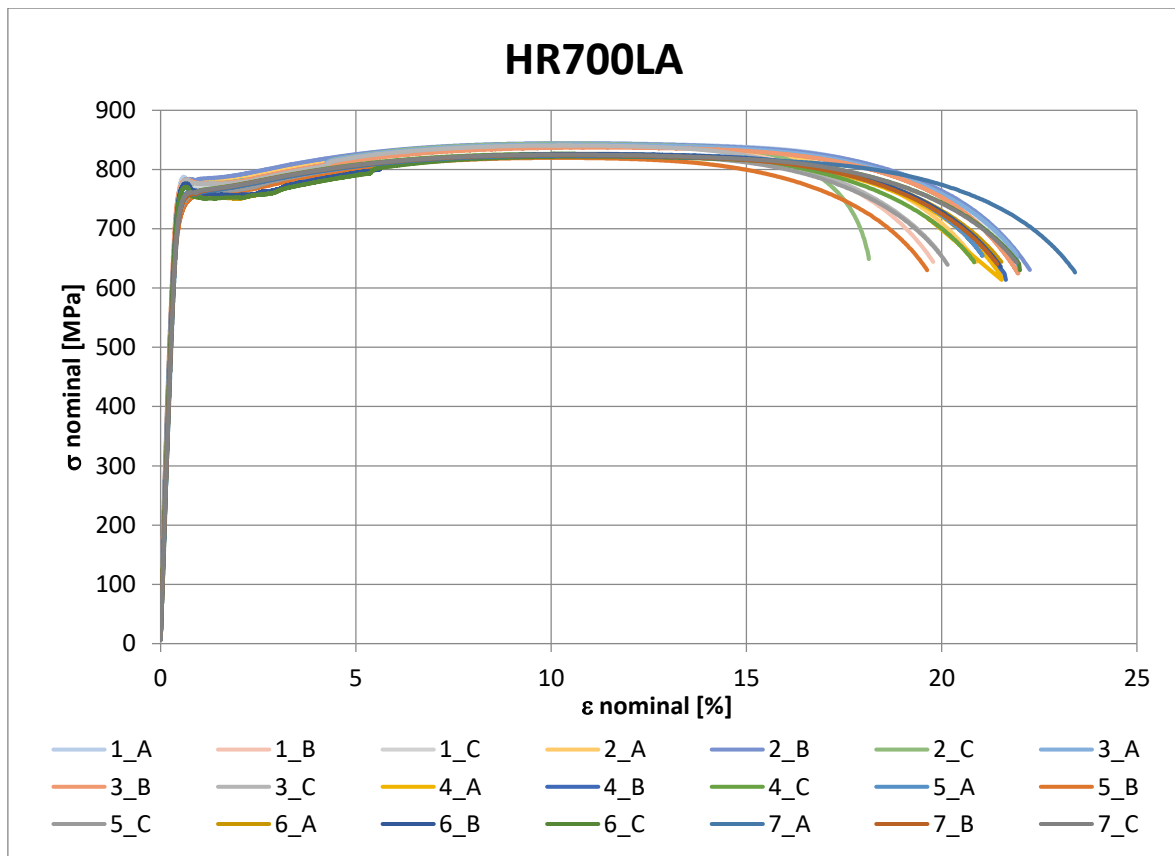
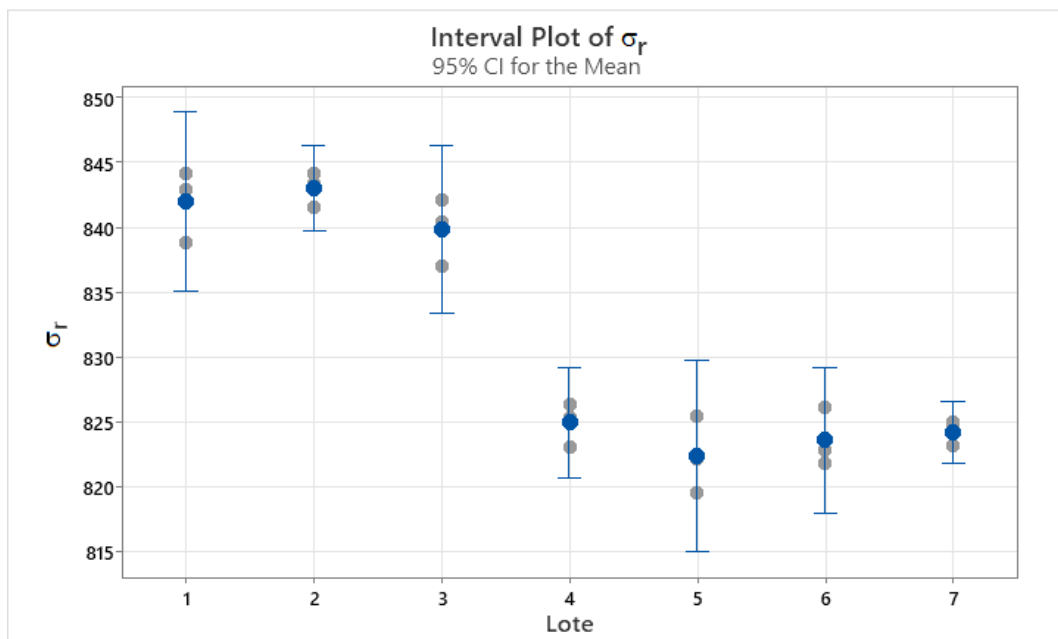
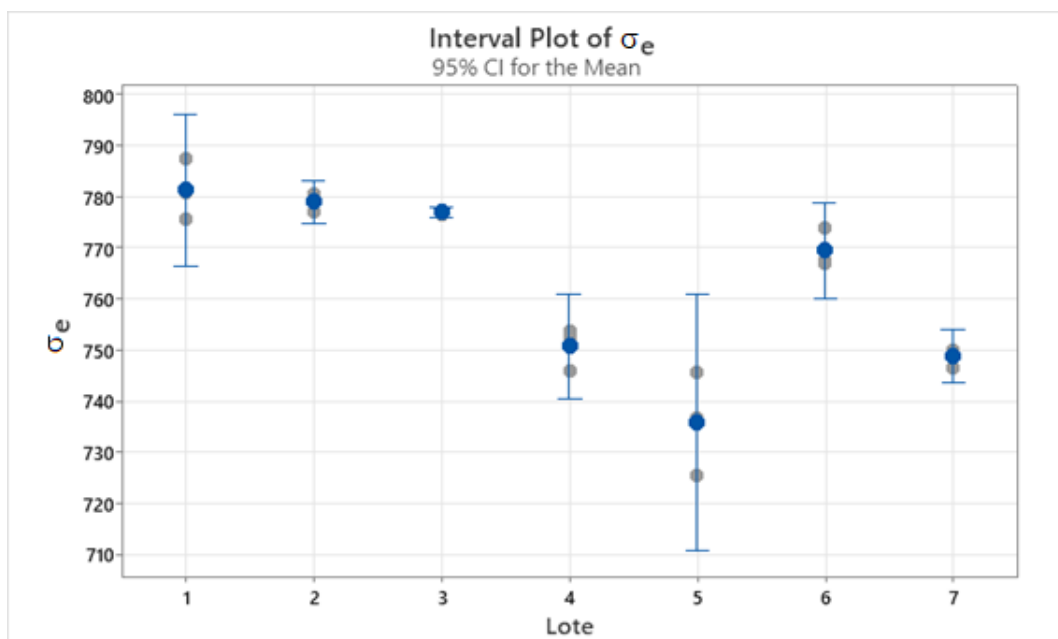


Figura 74 - Gráficos  $\sigma$ - $\epsilon$  dos vários lotes do aço HR700LA

Destes ensaios de tração foram registados os valores médios e desvios padrão da resistência mecânica ( $\sigma_r$ ), tensão de cedência ( $\sigma_e$ ) e alongamento (A), que se encontram na Tabela 26. Os coeficientes de variação (que se obtêm dividindo o desvio padrão médio pelo valor médio da respetiva propriedade) para a resistência mecânica, tensão de cedência e alongamento são 0,25%, 0,49% e 4,85%, respetivamente. Para além disso, efetuou-se uma análise ANOVA, através do *software* Minitab, para avaliar se a variância das propriedades entre lotes é significativa para um intervalo de confiança de 95%. Nas figuras seguintes (Figura 75, Figura 76 e Figura 77) são apresentados os gráficos de variância para as três propriedades.

Tabela 26 - Propriedades mecânicas médias do aço HR700LA

Lote/Data	$\sigma_r$ (MPa)		$\sigma_e$ (MPa)		A (%)	
	$\sigma_r$ médio	s	$\sigma_e$ médio	s	A médio	s
1 - 03/07/2022	841,98	2,77	781,33	5,98	20,78	1,13
2 - 02/08/2022	843,01	1,33	778,94	1,72	20,10	2,10
3 - 28/08/2022	839,82	2,60	776,94	0,54	20,66	1,40
4 - 03/10/2022	824,95	1,70	750,67	4,12	21,01	0,45
5 - 15/12/2022	822,99	2,67	735,58	8,27	19,82	0,67
6 - 09/02/2023	823,59	2,62	769,43	3,76	21,37	0,28
7 - 04/03/2023	824,20	0,95	748,78	2,05	21,93	1,03

Figura 75 -  $\sigma_r$  do aço HR700LA para os diferentes lotes testadosFigura 76 -  $\sigma_e$  do aço HR700LA para os diferentes lotes testados

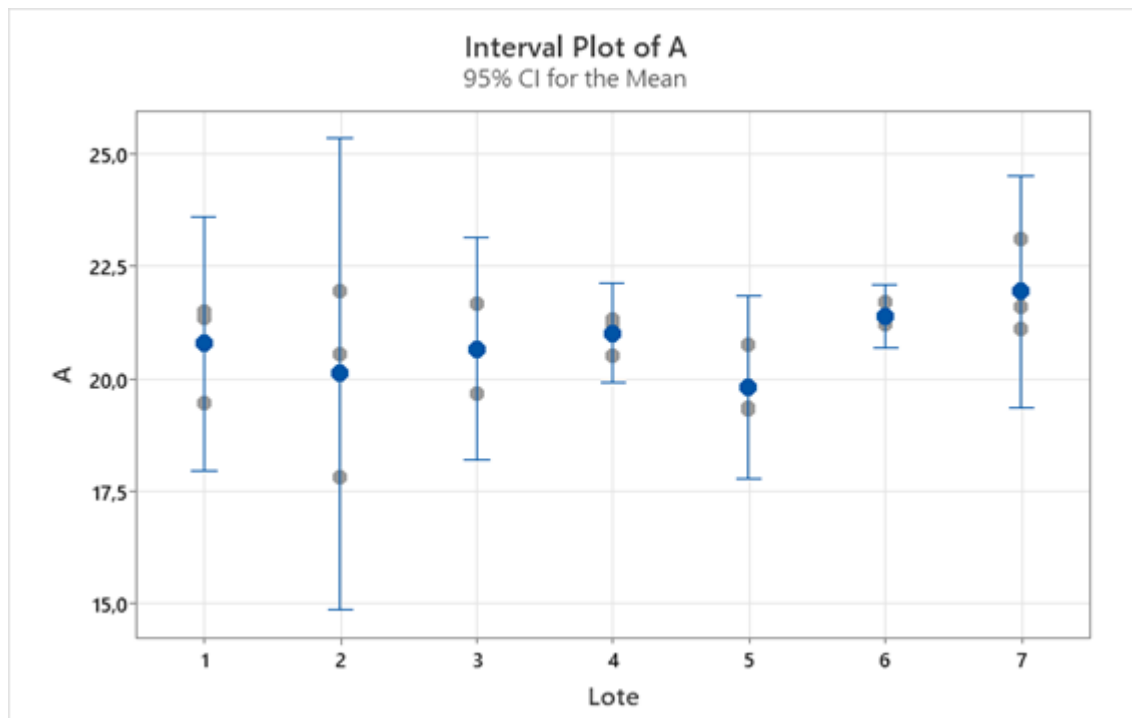


Figura 77 – A do aço HR700LA para os diferentes lotes testados

É possível afirmar que a variância na resistência mecânica e na tensão de cedência é relevante, pois graficamente as médias das propriedades não se encontram alinhadas horizontalmente. Esta ilação é reforçada pela análise da tabela ANOVA para um intervalo de confiança de 95% (Tabela 27), na qual se observa que o valor de  $p$  é inferior a 0,05, o que significa que se rejeita a hipótese nula de que a média de cada grupo é igual. O alongamento, por sua vez, apresenta pouca dispersão entre lotes e as médias estão sensivelmente alinhadas. Para além disso, analisando a tabela ANOVA, percebe-se que o valor de  $p$  é superior a 0,05 (0,336), o que significa que não existe variância significativa entre lotes.

É importante salientar que os grupos onde se observaram fissuras coincidem com os lotes que apresentam média de resistência mecânica e tensão de cedência mais elevada. No entanto, comparando estes valores com os valores referidos na especificação técnica do material (Tabela 15), concluiu-se que todas as propriedades se encontram dentro da normalidade.

Tabela 27 - Tabela ANOVA das propriedades mecânicas do aço HR700LA

#### Analysis of Variance $\sigma_r$

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Lote	6	1657,91	276,318	57,17	0,000
Error	14	67,67	4,833		
Total	20	1725,58			

#### Analysis of Variance $\sigma_e$

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Lote	6	5745,9	957,65	38,03	0,000
Error	14	352,5	25,18		
Total	20	6098,4			

#### Analysis of Variance A

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Lote	6	9,419	1,570	1,26	0,336
Error	14	17,435	1,245		
Total	20	26,854			

### 3.3.5.1.2. Aço CR340LA

Para o aço CR340LA, só foi possível recolher três amostras de matéria-prima. Estas amostras dizem respeito a lotes de material cuja utilização ficou bloqueada devido à alta taxa de sucata que se constatou nas peças produzidas por estes lotes. Deste modo, não é possível comparar estes resultados com um lote de material em conformidade. Posto isto, os gráficos  $\sigma$ - $\epsilon$  das amostras do aço CR340LA encontram-se na Figura 78.

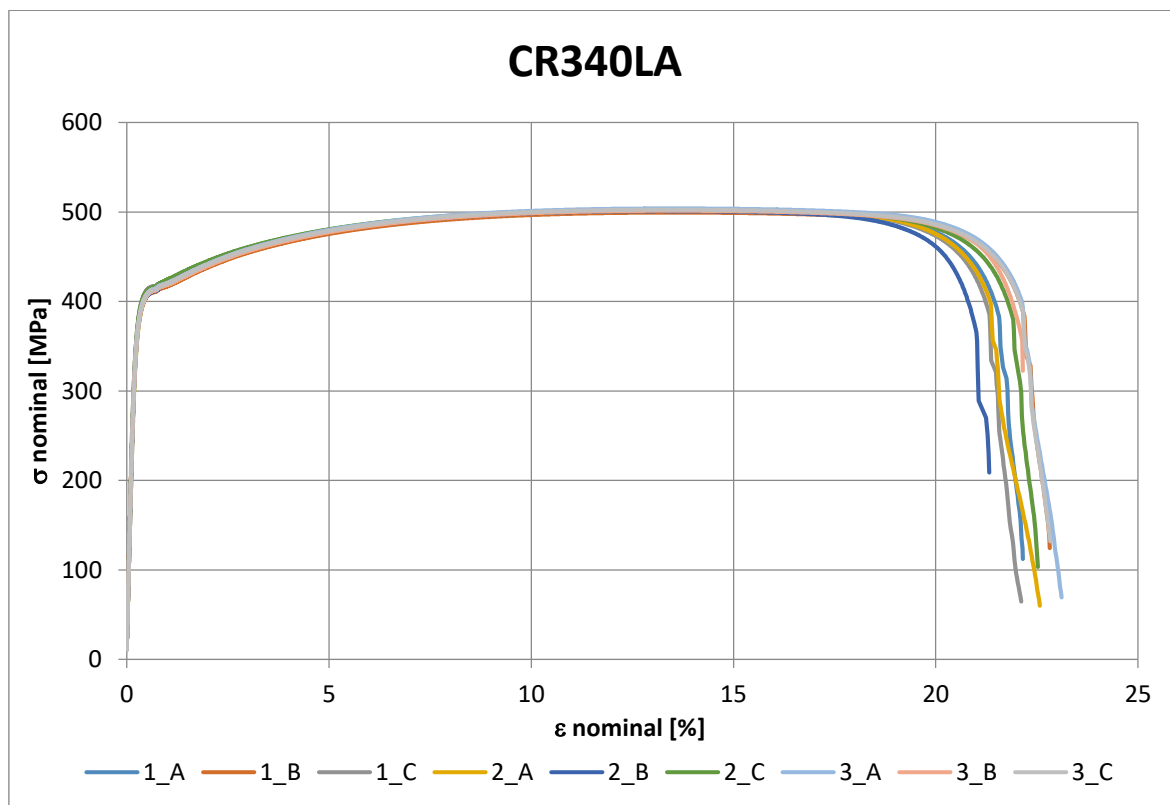


Figura 78 - Gráficos  $\sigma$ - $\epsilon$  dos vários lotes do aço CR340LA

Neste caso, uma vez que não há acesso a lotes de material anteriores (que não apresentaram fissuras), o mais importante não é analisar a variância dos resultados (que, novamente, é mínima e todos os valores se encontram dentro das especificações) mas aproveitar os resultados para fazer uma caracterização do material mais próxima da realidade no capítulo 3.4, referente à modelação numérica. Assim sendo, os valores médios das propriedades mecânicas, juntamente com os desvios padrão, são apresentados na Tabela 28, sendo que se pode constatar que os coeficientes de variação obtidos para  $\sigma_r$ ,  $\sigma_e$  e  $A$  dos três lotes deste material foram de 0,25%, 0,61% e 2,55%, respetivamente.

Tabela 28 - Propriedades mecânicas médias do aço CR340LA

Lote	$\sigma_r$ (MPa)		$\sigma_e$ (MPa)		A (%)	
	$\sigma_r$ médio	S	$\sigma_e$ médio	S	A médio	S
1	501,26	1,63	401,27	3,73	22,32	0,39
2	502,10	0,97	400,88	2,78	22,08	0,75
3	502,67	1,26	400,05	0,79	22,61	0,57

### 3.3.5.1.3. Aço DP 800

Por último, os ensaios de tração ao aço DP 800 foram também realizados a apenas três lotes de material em não conformidade com os requisitos de qualidade (devido ao aparecimento de fissuras), pelo que não foi possível comparar as propriedades mecânicas deste material com as propriedades de lotes passados. As curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  deste aço encontram-se na Figura 79.

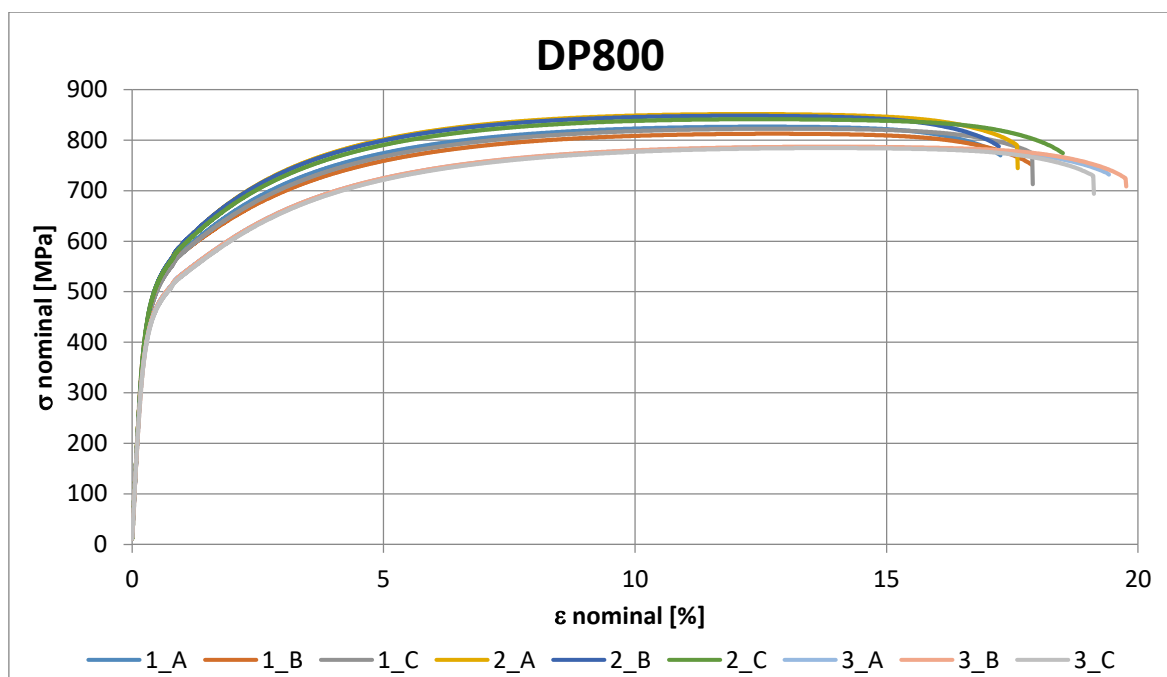


Figura 79 - Gráficos  $\sigma$ - $\epsilon$  dos vários lotes do aço DP800

Tal como nos restantes materiais, também as propriedades mecânicas do aço DP800 estão em conformidade com a sua norma, como se verifica na Tabela 29. Neste caso, obtiveram-se coeficientes de variação para  $\sigma_r$  de 0,56%, para  $\sigma_e$  de 0,63% e para A de 2,51%.

Tabela 29 - Propriedades mecânicas médias do aço DP800

Lote	$\sigma_r$ (MPa)		$\sigma_e$ (MPa)		A (%)	
	$\sigma_r$ médio	s	$\sigma_e$ médio	s	A médio	s
1	820,76	7,19	494,26	5,15	17,30	0,38
2	847,20	5,18	504,36	1,35	17,39	0,66
3	785,89	1,38	457,55	2,66	19,06	0,31

### 3.3.5.2. Ensaio de dobragem

Os ensaios de dobragem foram realizados com múltiplos propósitos. O ensaio permite adquirir informação sobre a ductilidade dos materiais e assim, mais tarde, validar o modelo teórico e a simulação numérica, confirmando a viabilidade do *software* utilizado. Com estes ensaios é possível também estudar as tensões e deformações locais, fazendo uma correlação com casos reais. Assim, foram preparados e ensaiados três provetes de cada material, cujo aspeto final é apresentado na Figura 80.

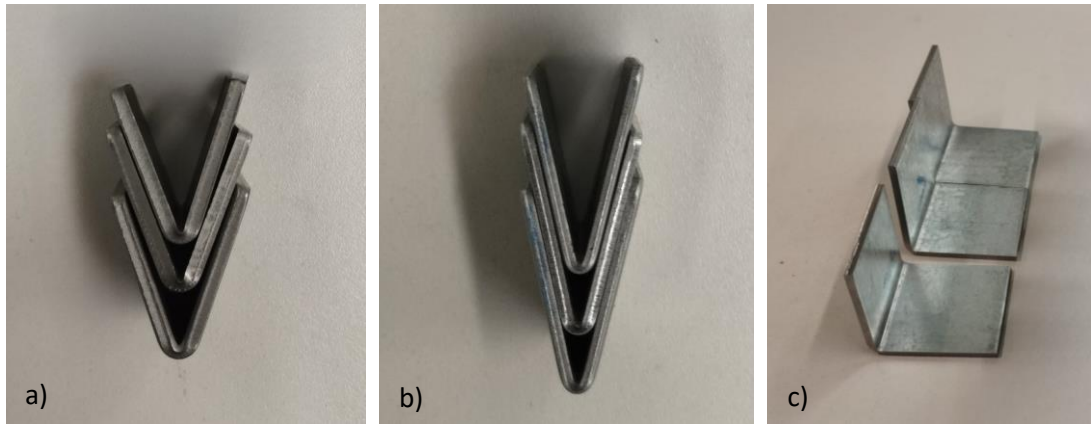


Figura 80 - Provetes após o ensaio de dobragem: a) HR700LA; b) CR340LA; c) DP800

Os respectivos gráficos força-deslocamento, elaborados pelo equipamento de ensaios, são apresentados na Figura 81, Figura 82 e Figura 83.

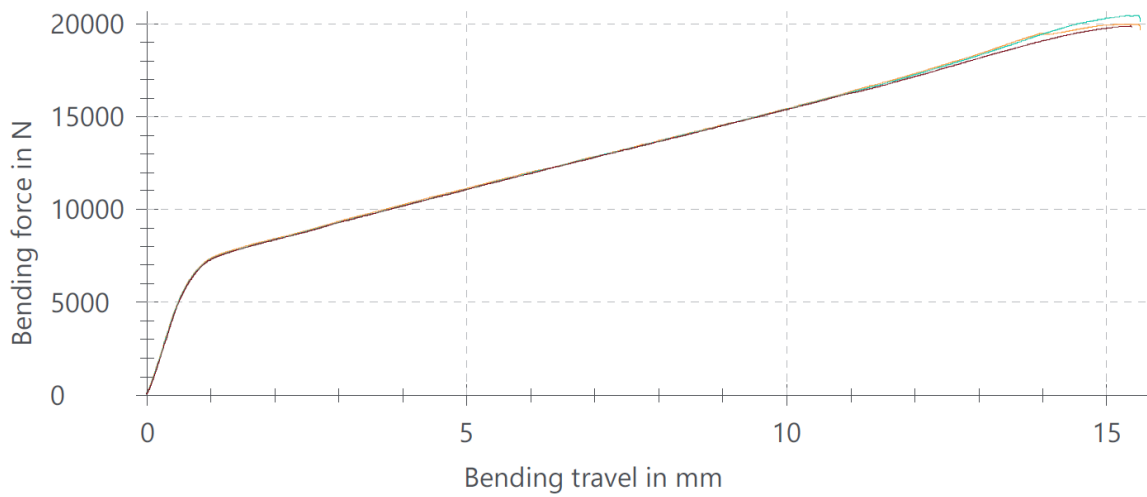


Figura 81 - Gráfico força-deslocamento dos provetes em HR700LA

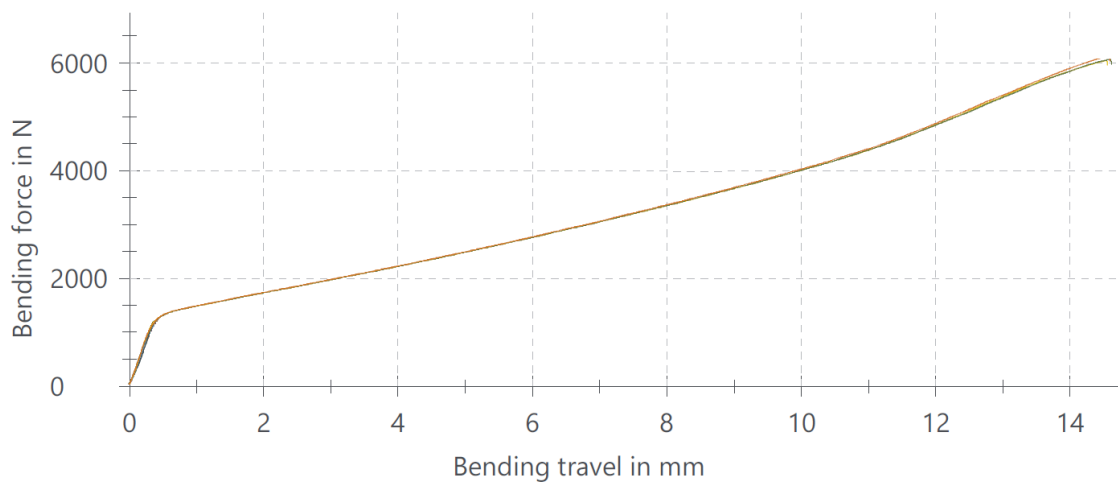


Figura 82 - Gráfico força-deslocamento dos provetes em CR340LA

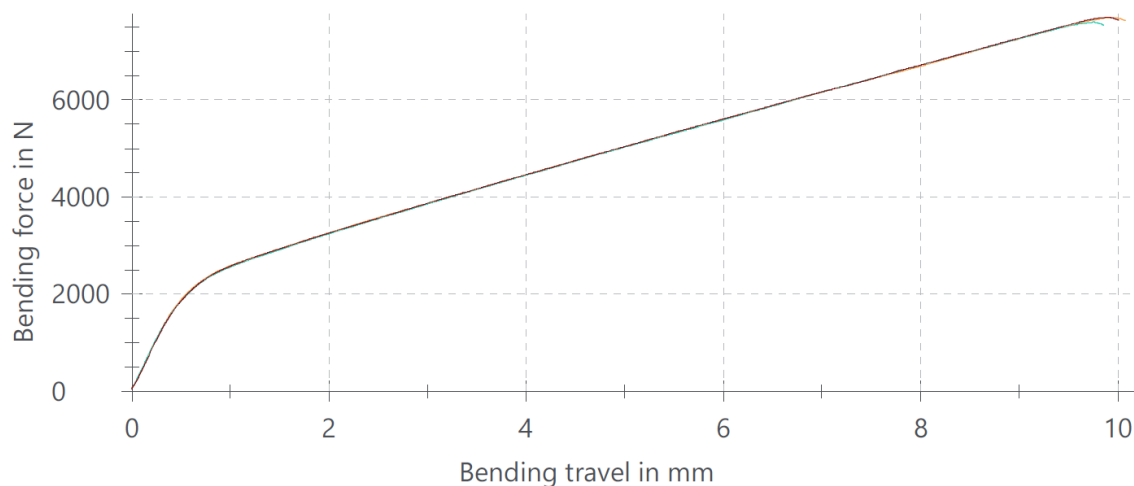


Figura 83 - Gráfico força-deslocamento dos provetes em DP 800

Para além disso, o equipamento calcula o ângulo de dobragem máximo atingido nos ensaios de forma analítica pela fórmula descrita na equação (28). Sendo que o ângulo é proporcional à distância percorrida pela punção, fica evidente pela análise das figuras que o aço DP 800 é o material com menos ductilidade. O ângulo mínimo atingido por este aço foi  $86^\circ$ . Relativamente aos aços HR700LA e CR340LA, o seu desempenho foi muito semelhante. O aço CR340LA atingiu o ângulo de dobragem máximo permitido pelas ferramentas, equivalente a  $150^\circ$ , sem fissurar, enquanto o aço HR700LA cedeu um pouco antes, no ângulo mínimo de  $148^\circ$ , como se pode observar na Tabela 30.

Tabela 30 - Ângulo de dobragem alcançado pelos diferentes materiais

Material	Ensaio	$\alpha$ ( $^\circ$ )
HR700LA	1	149
	2	148
	3	150
CR340LA	1	150
	2	150
	3	150
DP800	1	89
	2	89
	3	86

### 3.3.5.3. Ensaios químicos

Os ensaios químicos foram realizados a apenas uma amostra de cada um dos três materiais. No entanto, a composição química deve ser medida três vezes em cada amostra de forma a obter um valor médio, como se pode observar na Figura 84. Após a medição, registou-se a composição química dos materiais na Tabela 31.

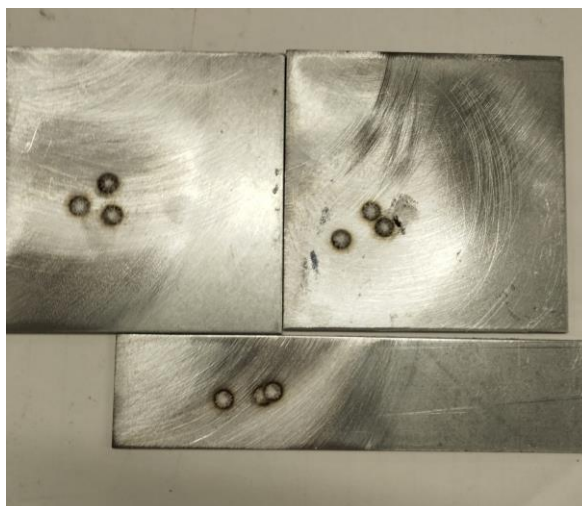


Figura 84 - Amostras dos três materiais onde se efetuou a leitura da composição química

Tabela 31 - Composição química dos três aços

Composição química (%)	HR700LA	CR340LA	DP800
Fe	97,8	99,3	97,4
C	< 0,00500	0,0216	0,0860
Si	0,102	0,0274	0,204
Mn	1,76	0,299	1,90
P	0,00720	0,00700	0,00730
S	< 0,0300	0,00790	< 0,0300
Cr	0,0136	0,0254	0,251
Co	0,0113	0,0520	0,00650
Cu	0,00510	0,0164	0,00620
Nb	0,0805	0,0397	0,0229
Ti	0,0876	< 0,00100	0,00110
V	0,0145	0,00920	0,00960
W	< 0,0250	0,0399	< 0,0250
Pb	< 0,0150	0,0197	0,0203
As	< 0,00500	< 0,00500	< 0,00500
Bi	0,0589	0,0450	0,0415

A análise da composição química dos três materiais confirma, mais uma vez, a conformidade destes com as especificações técnicas. Todos os valores da Tabela 31 cumprem os limites descritos pelas normas dos materiais na Tabela 16, Tabela 17 e Tabela 18. A satisfação destas especificações é essencial para garantir a confiança das propriedades mecânicas e o desempenho dos materiais em cenários práticos. Assim, pode-se concluir que a razão do aparecimento de fissuras não se deve a uma irregularidade na composição química dos aços.

### 3.3.5.4. Ensaios metalográficos

Os principais tópicos a investigar com os ensaios metalográficos foram a análise do tamanho do grão, a análise metalográfica e o mapeamento dos elementos químicos, de forma a prever o

comportamento da fratura do material e a compreender o desempenho macroestrutural dos metais [89].

Começando por observar o tamanho do grão das duas amostras, rapidamente se identifica uma diferença notória. Os grãos da amostra 1 (Figura 85) exibem um formato muito mais alongado e apresentam uma linha de progressão vertical. A orientação dos grãos revela que a laminagem foi realizada na direção vertical, relativamente à figura. Por outro lado, a microestrutura da amostra 2 (Figura 86) apresenta grãos com um formato equiaxial, quase não se distinguindo a fronteira entre cada grão. Com esta observação, conclui-se que um material com uma microestrutura idêntica à da amostra 1 tem uma baixa ductilidade e é mais facilmente suscetível ao aparecimento de fissuras, porque o alinhamento das fronteiras de grão é muito mais linear, possibilitando o fácil desenvolvimento e progressão de possíveis fissuras, quando o material é solicitado na direção menos conveniente. Já a microestrutura da amostra 2 contribui para um melhor comportamento à fratura do material, conferindo-lhe menor suscetibilidade à geração e, principalmente, progressão de fissuras, pois não existe uma linha evidente para a propagação de fissuras, pelo que a sua propagação é dificultada [90]. Para além disso, o formato equiaxial dos grãos indica que ocorreu recristalização do grão após a laminagem.

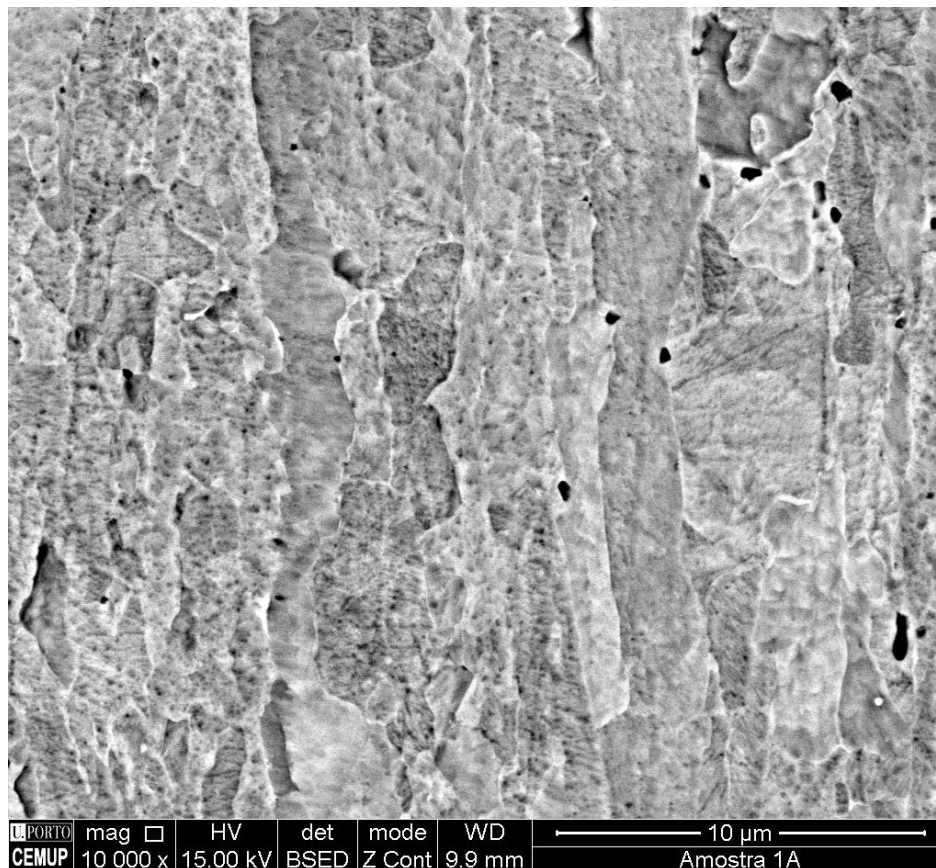


Figura 85 - Micrografia da amostra 1

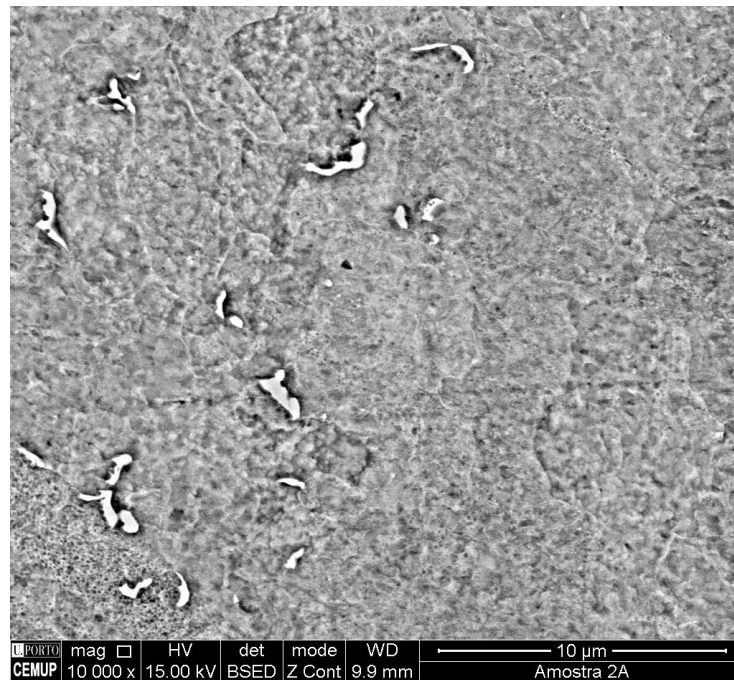


Figura 86 - Micrografia da amostra 2

A presença de inclusões/defeitos constitui outra diferença na microestrutura das duas amostras. Como se comprova, estas inclusões/defeitos (pontos negros) estão em maior quantidade na microestrutura da amostra 1 (Figura 87) do que na da amostra 2 (Figura 88). Mais uma vez, este fator ajuda a explicar o pior desempenho da amostra 1, pois as inclusões, partículas estranhas ou impurezas podem constituir heterogeneidades estruturais que induzem tensões e propiciam a nucleação de fissuras [91]. A presença destas inclusões em maior número na amostra 1 permite aferir que o vazamento após a fusão neste caso foi realizado com menos cuidado, pois a presença destas partículas estranhas advém principalmente das paredes do forno, eventualmente devido ao estado de limpeza do cadinho.

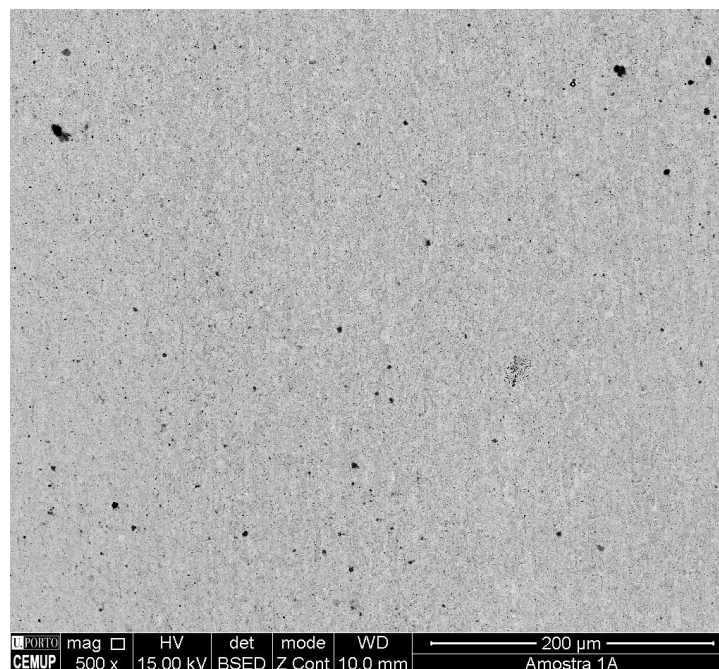


Figura 87 - Inclusões/defeitos da amostra 1

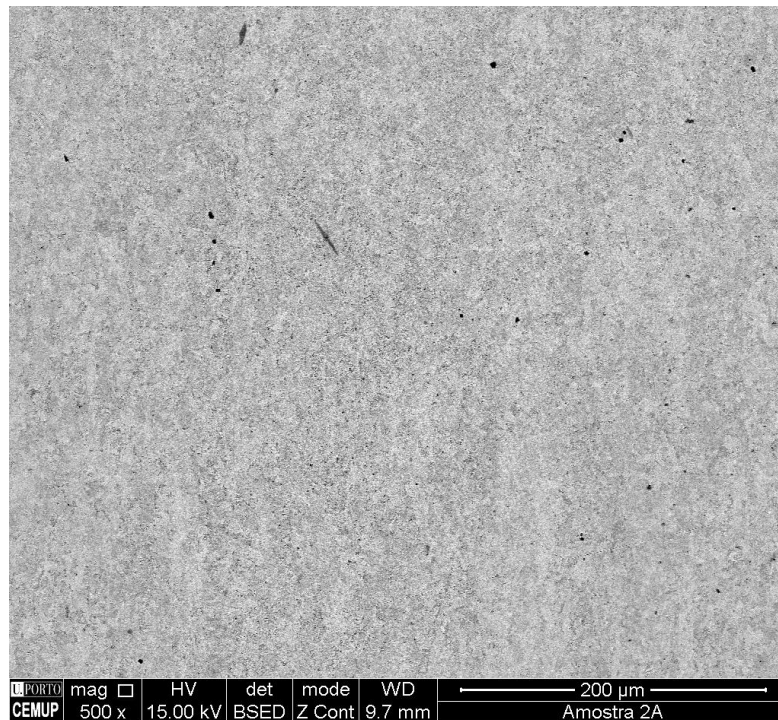


Figura 88 - Inclusões/defeitos da amostra 2

Para além das inclusões serem em maior quantidade, são também significativamente maiores (praticamente o dobro do tamanho), no caso da amostra 1, como se comprova pela comparação entre a Figura 89 e a Figura 90. Estas inclusões de grande tamanho revelam-se um corpo estranho ao material, não havendo simbiose entre as mesmas e a microestrutura do aço. Isto significa que, quanto maior a inclusão, maior o índice de fragilidade que a mesma promove [92]. Nestas figuras pode-se ainda identificar as diferentes fases presentes nas duas amostras, cuja composição química é posteriormente analisada.

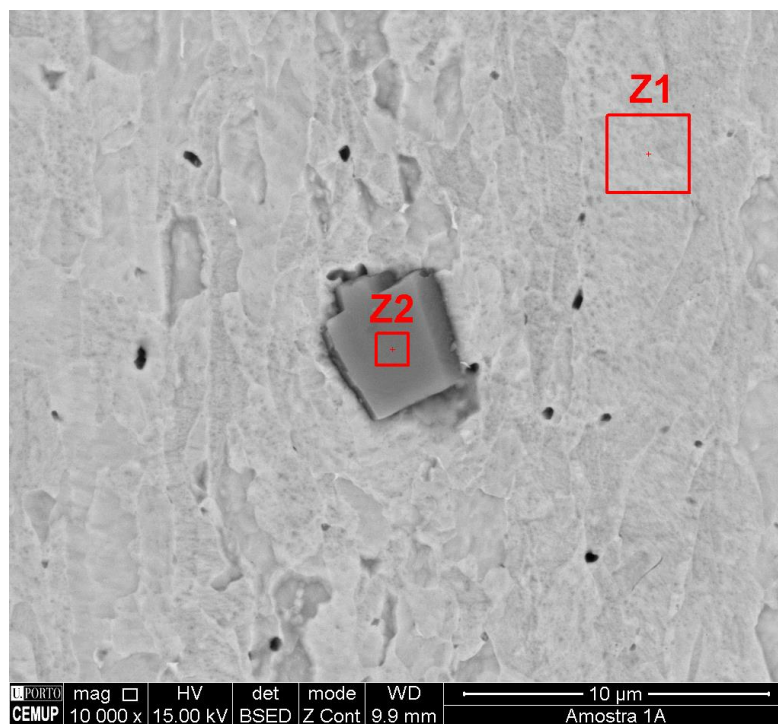


Figura 89 - Identificação das várias zonas que compõem a microestrutura da amostra 1

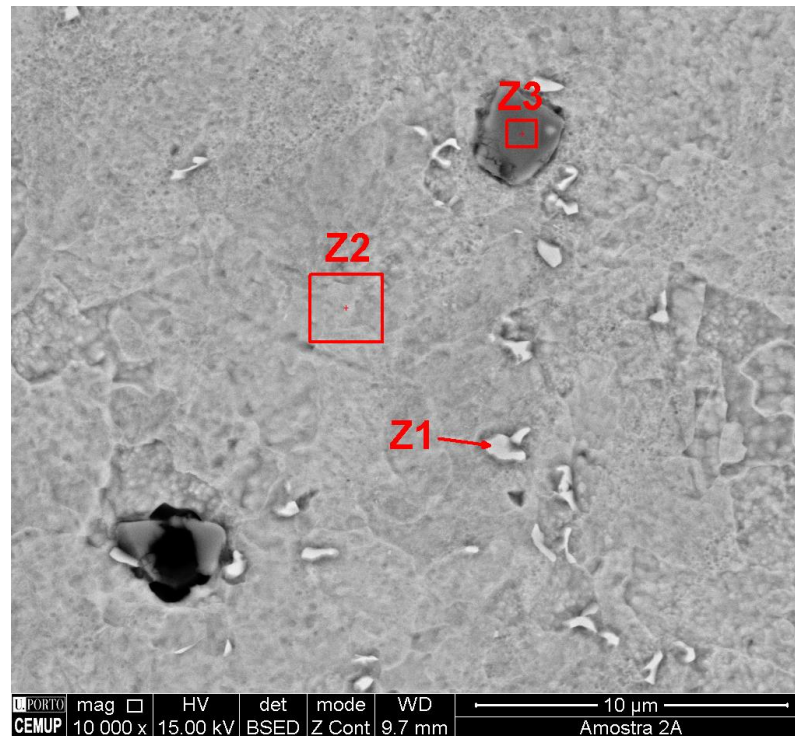


Figura 90 - Identificação das várias zonas que compõem a microestrutura da amostra 2

Na Figura 91 e Figura 92 estão presentes as composições químicas globais da amostra 1 e amostra 2, respetivamente, obtidas por *energy dispersive spectroscopy* (EDS). Como se constata, as composições são em tudo semelhantes, cumprindo com os valores referenciados na norma do material. Assim, se a composição química entre as duas amostras é efetivamente a mesma, a diferença significativa na microestrutura deve-se à temperatura à qual a laminagem, posterior arrefecimento e/ou tratamento térmico, foram conduzidos. É possível afirmar que houve condições de temperatura diferentes no processamento das duas amostras, o que permitiu a recristalização do grão no caso da amostra 2, enquanto os grãos da amostra 1 adquiriram um formato mais alongado resultante da direção de laminagem.

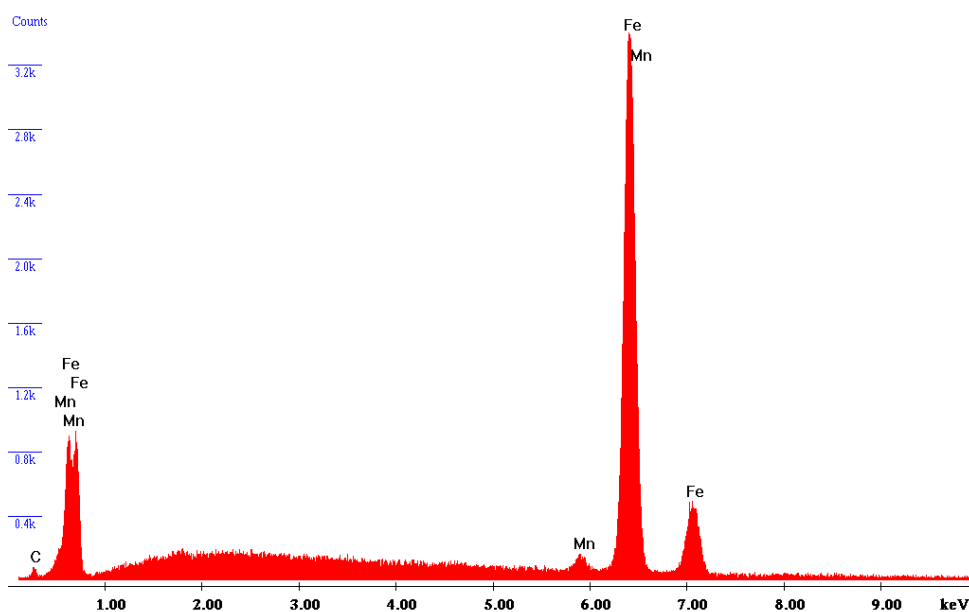


Figura 91 - Composição química global da amostra 1

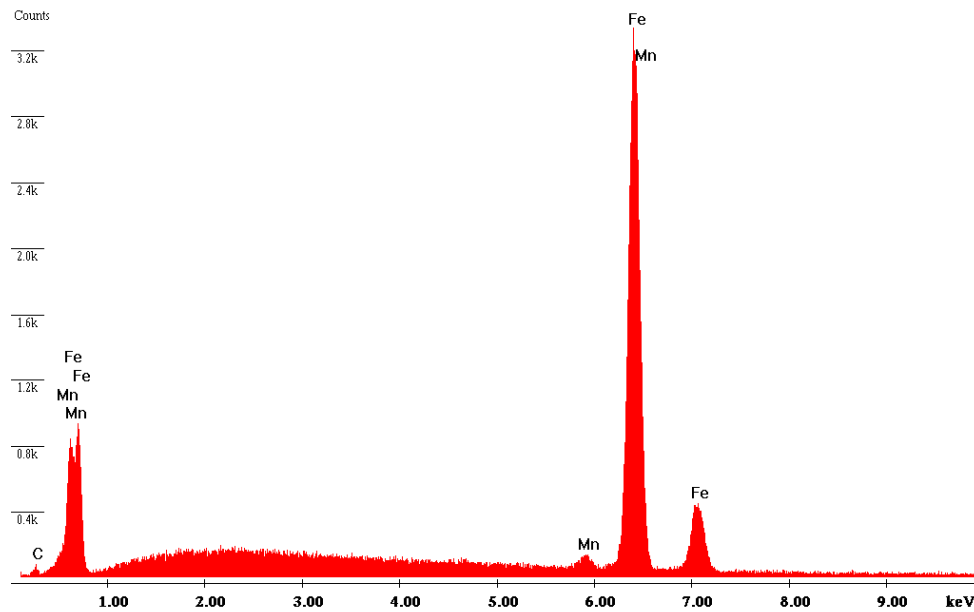


Figura 92 - Composição química global da amostra 2

É também pertinente analisar qual a composição das inclusões identificadas anteriormente, verificando-se que estas são muito semelhantes e são essencialmente compostos de nióbio. Contudo, destaca-se a presença de cálcio na amostra 1 (Figura 93) e um ligeiro pico de ferro na amostra 2 (Figura 94) que, no entanto, não são significativos para alterar o comportamento do material por si só.

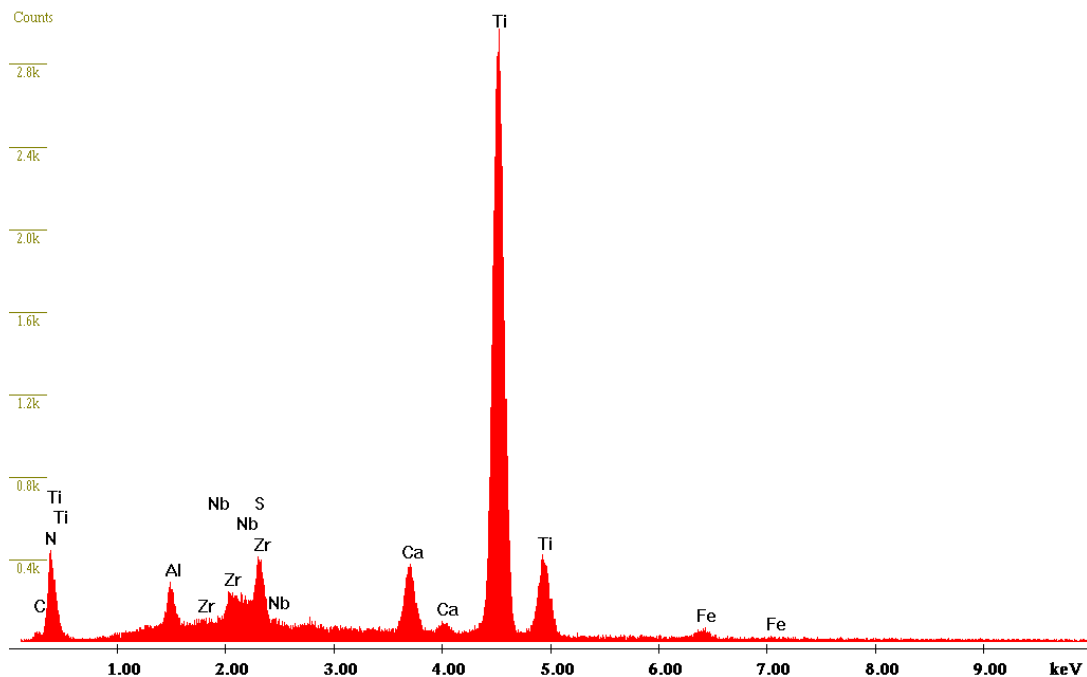


Figura 93 - Composição química das inclusões da amostra 1

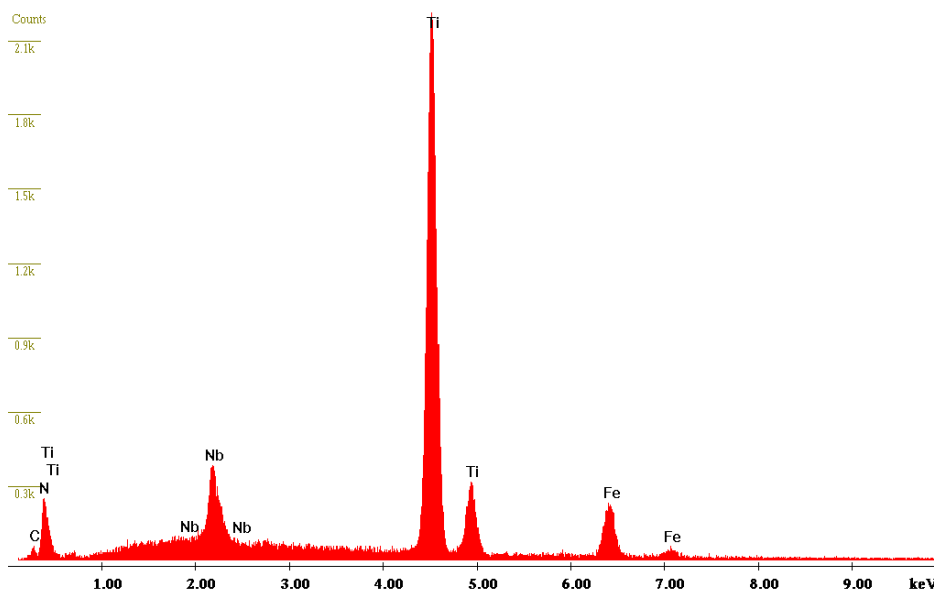


Figura 94 - Composição química das inclusões da amostra 2

Destaca-se ainda a presença de uma fase de cor branca na amostra 2 (que não existe na amostra 1), identificada como “Z1” na Figura 90. Esta fase poderia pôr em causa o comportamento do material caso se tratasse de calcetos [93], o que não é o caso, devido à inexistência de cálcio, como se observa na Figura 95.

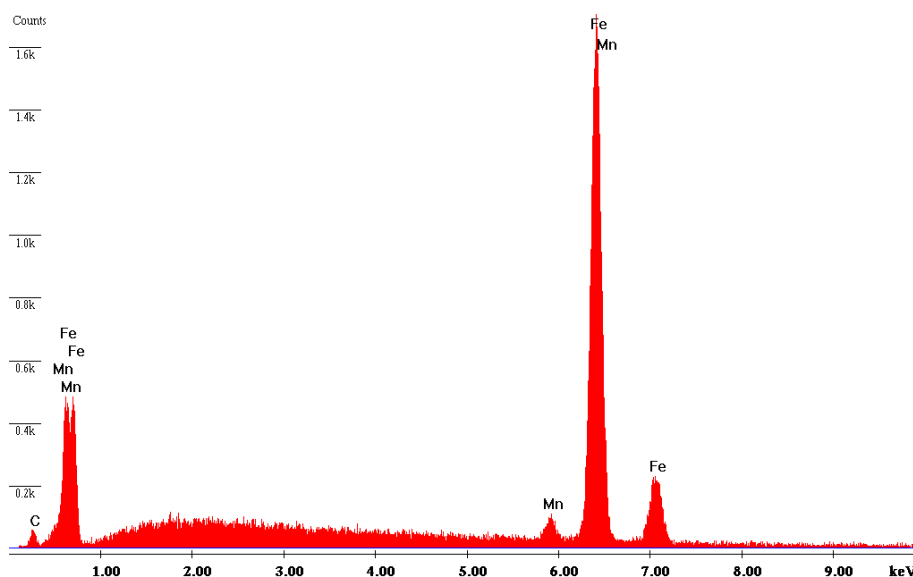


Figura 95 - Composição química da Z1 da amostra 2

### 3.3.5.5. Ensaios de dureza

Os ensaios de dureza foram realizados às mesmas amostras sobre as quais se fez a análise metalográfica. No entanto, foi feita a distinção entre zonas não solicitadas e zonas solicitadas de dois lotes diferentes de aço HR700LA, como já explicado no capítulo 3.3.1.5 (lote 1, correspondente ao material cujos componentes apresentam defeitos, e lote 2, correspondente ao material antigo, cujas peças produzidas não contêm qualquer fissura). Na realização do ensaio de dureza, tentou-se

executar uma distância constante entre cada indentação, como é indicado na norma do ensaio para evitar alteração dos valores devido a encruamento por deformação mecânica a frio, como se pode observar na Figura 96. Os valores de dureza foram registrados manualmente e encontram-se na Tabela 32 e Tabela 33, para as amostras do lote 1 e do lote 2, respectivamente.

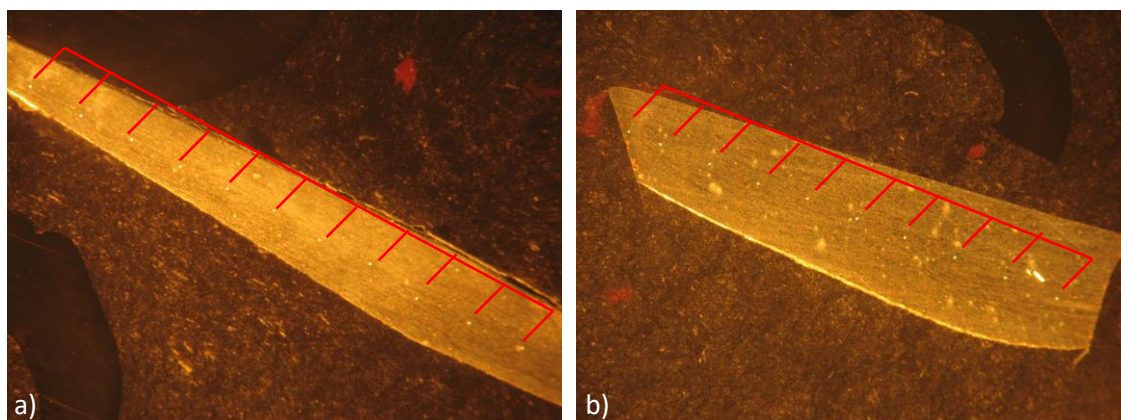


Figura 96 - Marcas de indentação: a) Amostra 1; b) Amostra 2

Tabela 32 - Valores de dureza HV das amostras do lote 1 (lote com fissura)

Pontos	Valor dureza HV	
	Zona não solicitada	Zona solicitada
1	330,2	296,7
2	320,1	301,2
3	320,1	301,2
4	313,3	307,3
5	313,6	307,3
6	313,6	320,3
7	315,2	325,1
8	305,8	337,2
9	313,6	344,5
10	325,1	350,0
11	323,4	344,3
12	328,5	305,1

Tabela 33 - Valores de dureza HV das amostras do lote 2 (lote sem fissura)

Pontos	Valor dureza HV	
	Zona não solicitada	Zona solicitada
1	293,9	296,8
2	279,9	292,4
3	268,4	291,0
4	279,9	286,7
5	270,7	293,9
6	274,6	289,5
7	264,5	291,0
8	270,8	289,5
9	270,9	301,2
10	275,9	293,3
11	274,6	298,3

A tendência para uma dureza superior na amostra 1 revela que a mesma sofre um encruamento superior, o que pode ser explicado por um processamento da amostra 1 a uma temperatura inferior ou um processamento a uma temperatura mais elevada, mas sujeita a um choque térmico de arrefecimento em seguida, incrementando a dureza e a fragilidade [94]. Estes resultados vêm comprovar as ilações retiradas no capítulo 3.3.5.4, nomeadamente que a temperatura de processamento dos dois lotes do mesmo material foi diferente. Mesmo que esta diferença não seja significativa, a dureza superior, aliada ao alto alongamento do grão e conseqüente facilidade de propagação de fissuras, pode explicar a razão pela qual o aço da amostra 1 se demonstrou menos dúctil ou mais frágil [95].

### 3.4. Modelação numérica

#### 3.4.1. Software a utilizar

As análises numéricas efetuadas no âmbito desta dissertação foram realizadas com auxílio do software Stampack Xpress®, cujo logótipo se encontra na Figura 97. O Stampack Xpress® é programa de fácil utilização de calculo numérico, que utiliza o método de elementos finitos para a realização de simulações que preveem com alta precisão o estado de tensão e deformação numa peça ao longo do seu processo de conformação, contribuindo para a identificação e prevenção de defeitos.



Figura 97 - Logótipo do Stampack Xpress [96]

O Stampack Xpress® foi desenvolvido especificamente para a simulação de processos de conformação plástica em chapa metálica. No entanto, as suas aplicações são altamente versáteis, desde a indústria automóvel e aeroespacial à indústria de eletrodomésticos e aparelhos eletrónicos, entre outras. As simulações permitem estudar em detalhe todo o processo sequencial de conformação, oferecem a possibilidade de prever o retorno elástico da matéria-prima e permitem ainda otimizar o contorno da banda metálica, reduzindo os custos para o cliente, pois exclui-se o processo iterativo experimental.

A KIRCHHOFF Automotive opta por utilizar esta ferramenta pois esta constitui o único *software* de simulação de conformação de chapa metálica que oferece a opção de simulação por elementos de casca ou elementos sólidos num único espaço e o único que possui uma interface direta com o software VISI de CAD/CAM. O alcance de aplicação do programa varia desde folhas de 0,01 mm de espessura a chapas conformadas com espessura de 6 mm. Por isso, os produtos tipicamente simulados podem ser componentes automóveis do BIW, painéis e acabamentos do interior de veículos, placas de suporte, conectores elétricos, recipientes metálicos, entre outros.

A interface do Stampack Xpress® é apresentada na Figura 98. Esta interface possui uma barra de ferramentas que permite aceder a comandos básicos para controlar as principais tarefas do *software*. O painel de visualização de dados/componentes permite atribuir, configurar e editar condições físicas para a análise do modelo. Por fim, o painel de navegação segue uma metodologia

sequencial para preparar, executar e analisar a simulação de forma simples e fácil, da seguinte forma:

- *Start* – Na primeira etapa é possível criar novos projetos ou abrir projetos já previamente gravados;
- *Blank* – Nesta secção é possível atribuir propriedades como espessura, tipo de análise, material, geometria e condições fronteira a considerar na simulação;
- *Process* – De seguida, para se proceder à simulação, é definida a sequência de operações de conformação e feita a importação dos corpos envolvidos (como punções, matrizes, pisadores, entre outros);
- *Calculation* – Nesta etapa o programa executa a simulação;
- *Results* – A última secção permite analisar vários resultados, como o estado de tensão e deformação ao longo da chapa, a sua forma final, fator de segurança de conformabilidade, variação da espessura, zonas suscetíveis a desgaste por atrito, entre outros.

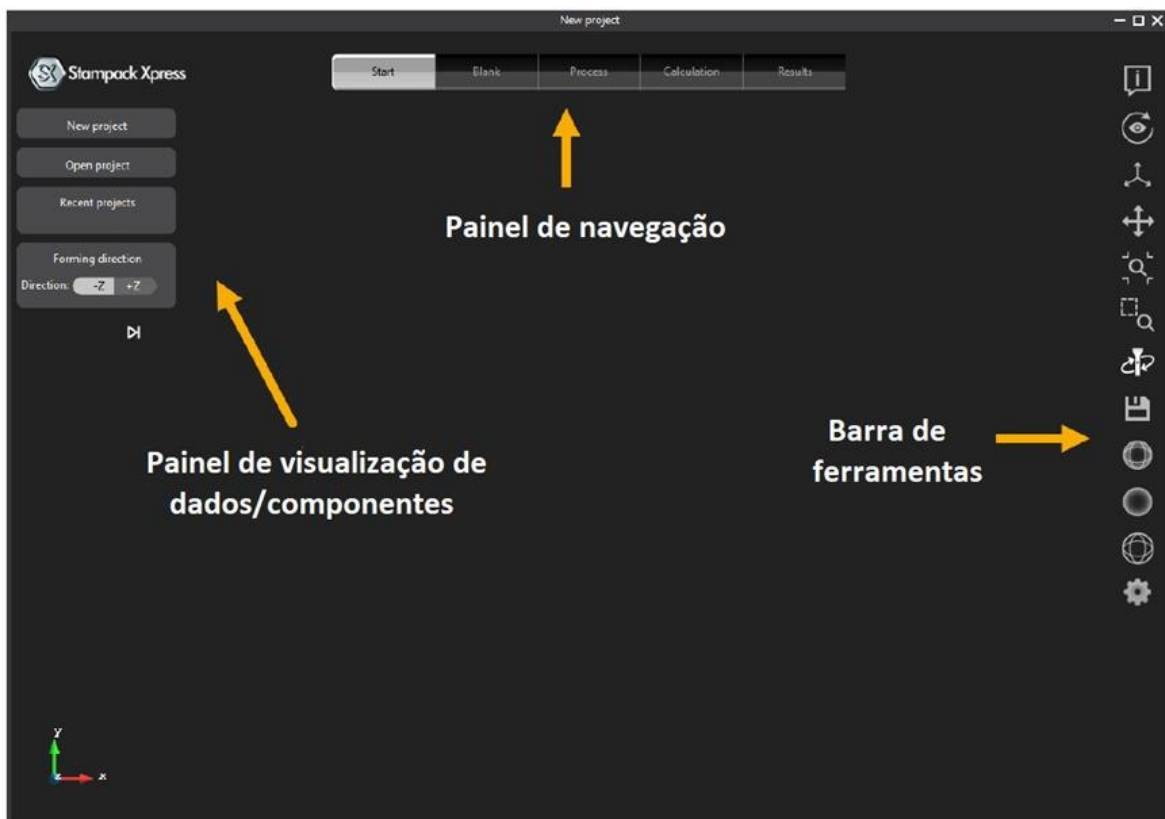


Figura 98 - Interface do *software* [96]

### 3.4.2. Benchmark S-rail

As análises de elementos finitos recorrendo à utilização de *softwares* de simulação numérica, ainda que se tenham comprovado de elevada utilidade, nem sempre apresentam resultados fidedignos. Isto acontece, pois, o cálculo numérico depende de vários fatores que afetam a precisão dos resultados. Cada *software* faz a discretização destes fatores de forma diferente consoante o seu código de cálculo, o que naturalmente significa que os resultados variam entre *softwares*. Assim

sendo, a comunidade científica sentiu a necessidade de estabelecer problemas padrão, para os quais se sabe se sabe à partida quais os resultados esperados, os chamados “*benchmarks*”, com o intuito de comparar e avaliar a análise de elementos finitos em programas computacionais diferentes e assim validar a precisão dos mesmos.

No âmbito da simulação numérica de operações de estampagem, a peça industrial S-Rail da Figura 99 é a principal referência para comparação. Esta peça revela-se bastante complexa e, por isso, muitas vezes surgem defeitos no decorrer do processo de conformação da chapa. Deste modo, os principais parâmetros da análise numérica a comparar são a distribuição da tensão equivalente de von Mises e o retorno elástico.

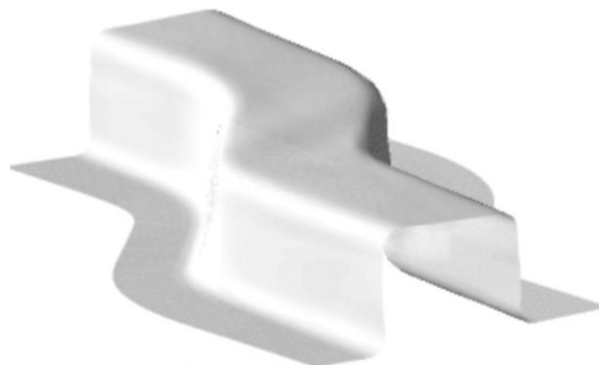


Figura 99 - *Benchmark* S-rail (adaptado de [97])

As ferramentas utilizadas para a estampagem da peça consistem num punção, uma matriz e um pisador. As dimensões da banda metálica são ainda apresentadas no anexo 1. Assim, o posicionamento de todos os componentes é demonstrado em vista explodida na Figura 100, sendo o curso de trabalho do punção igual a 37 mm. Após completo o processo de conformação, o punção recua, permitindo o retorno elástico natural do material.

A banda possui uma espessura de 0,92 mm e a estampagem acontece a uma velocidade constante de 5 mm/s, admitindo-se para efeitos de cálculo numérico um coeficiente de atrito ( $\mu$ ) entre a ferramenta e a chapa de 0,1 [98]. A simulação irá estudar o comportamento do alumínio Al 6111-T4, de acordo com a pesquisa realizada por Schwarze et al. [98], de modo a comparar os resultados obtidos com resultados de referência. Seguindo as referências deste trabalho, a força do pisador foi definida como sendo igual a 10 kN. As propriedades elásticas do material, assim como a lei adotada para prever o comportamento do mesmo, estão enunciadas na Tabela 34.

Tabela 34 - Propriedades mecânicas do Al 6111-T4 consideradas para a simulação do *benchmark*

Propriedade	Alumínio 6111-T4
Densidade	2710 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de elasticidade	0,69 GPa
Coefficiente de Poisson	0,33
Lei de encruamento	Hill48 (34)
$r_0$	0,89
$r_{45}$	0,61
$r_{90}$	0,66

Na Figura 100 podem também ser observadas as malhas de elementos finitos dos diferentes componentes. A matriz, o punção e o pisador são modelados como corpos rígidos e são compostos por elementos triangulares e possuem respetivamente 16735, 6707 e 204 nós. No caso da banda metálica, a chapa é modelada como um corpo sólido de espessura definida e a sua malha de elementos finitos é composta por elementos quadrangulares com 49216 nós.

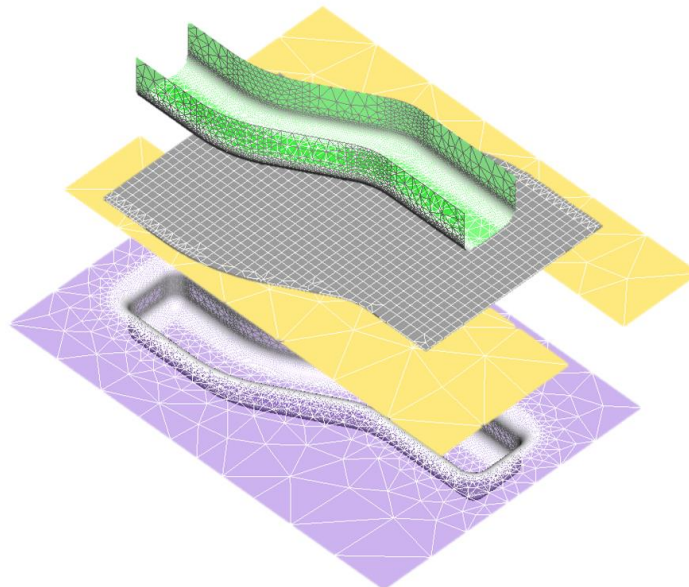


Figura 100 - Vista explodida das malhas dos elementos que compõe o *benchmark*

A distribuição da tensão equivalente de von Mises ao longo da peça é apresentada no instante correspondente ao final da conformação (quando o curso total do punção é completo), na Figura 101.

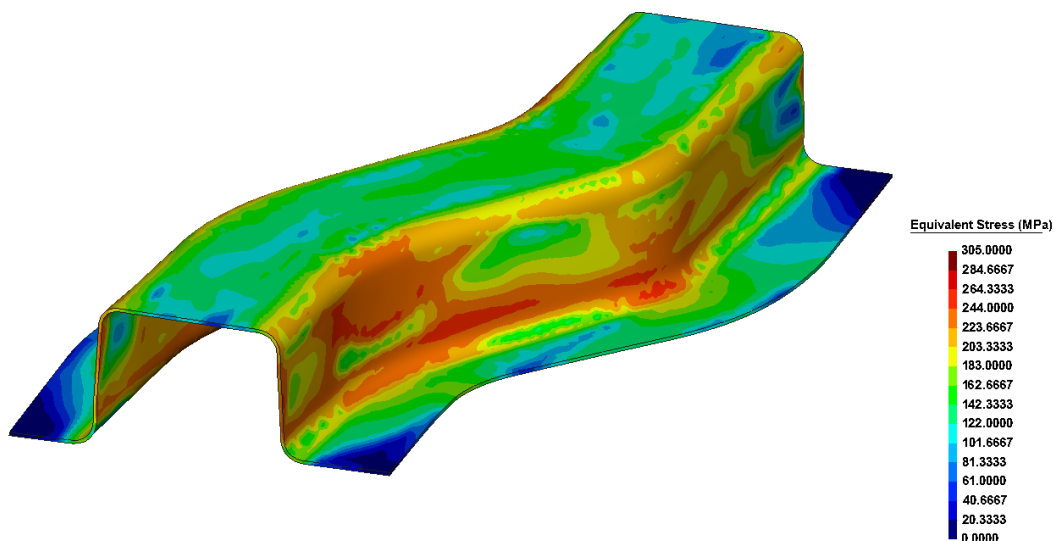


Figura 101 - Distribuição da tensão equivalente de von Mises no final da estampagem

Analisando os resultados da Figura 101, percebe-se que a tensão equivalente de von Mises está compreendida entre  $0 \leq \sigma_{VM} \leq 305$  MPa e o valor máximo (305 MPa) acontece na parede lateral da secção em U. Este valor é, no entanto, inferior ao valor da tensão de cedência do material, que é 368 MPa, pelo que não existe o risco do aparecimento de defeitos na peça. Deste modo, o erro relativo entre o presente estudo e o estudo de comparação é de 10,9%.

O *plot* da distribuição da tensão equivalente de von Mises após o retorno elástico é apresentado na Figura 102, juntamente com a Figura 103, onde se faz a comparação entre a deformação da chapa antes e após o retorno elástico.

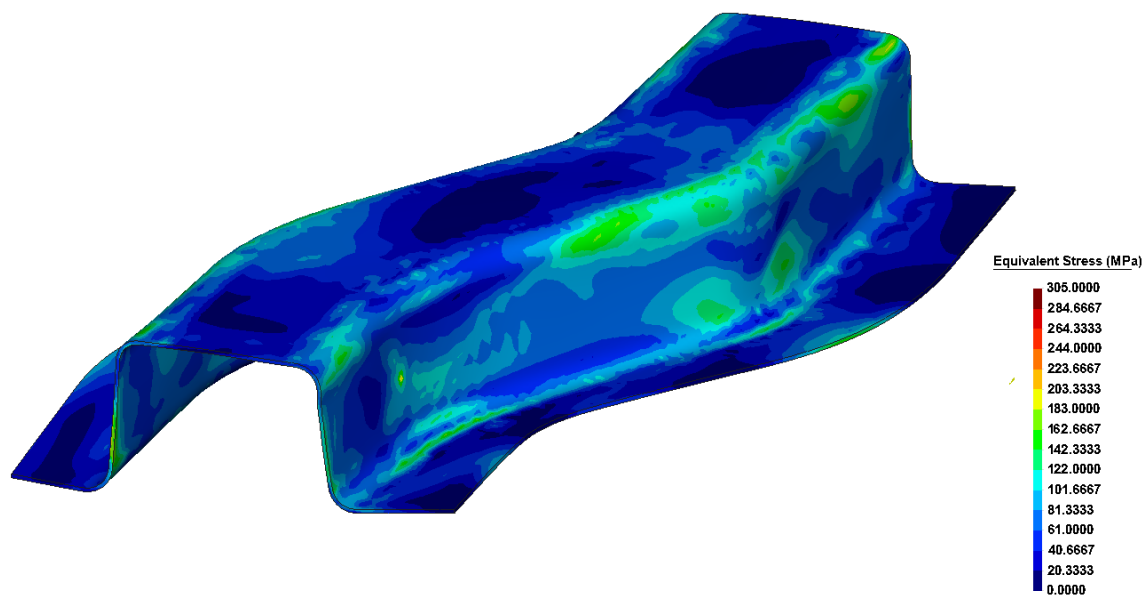


Figura 102 - Distribuição da tensão equivalente de von Mises após o retorno elástico

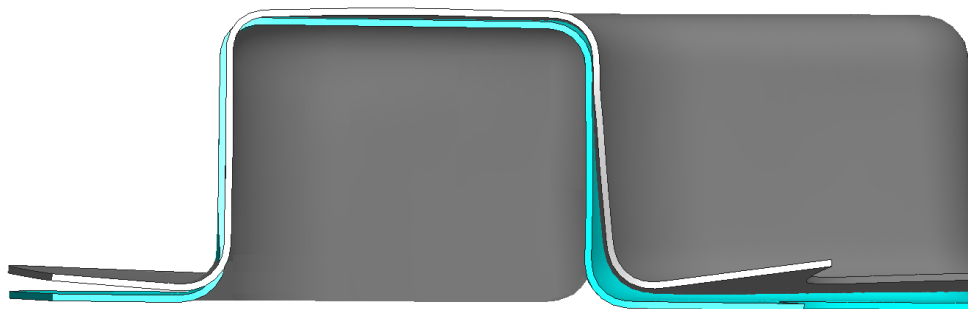


Figura 103 - Deformação da banda metálica antes e após o retorno elástico

Como seria de esperar, após o retorno elástico constata-se um alívio das tensões instaladas na peça. Os valores máximos da tensão equivalente de von Mises continuam a ter lugar na parede lateral da secção em U, onde se deteta o valor máximo de 220 MPa. Para esta situação, o erro relativo entre as duas análises numéricas é de 6,4%. Observando a vista frontal da secção em U apresentada na Figura 102, percebe-se que, quando o punção atinge o seu curso máximo (perfil a azul) e recua, aliviando a matéria-prima, o material recupera elasticamente e tende para a sua forma inicial (perfil a cinzento). Esta previsão do fenómeno de *springback* do material vai de encontro aos resultados apresentados no estudo de comparação.

Posto isto, é possível validar o Stampack enquanto um *software* rigoroso de modelação numérica de processos de conformação plástica, mesmo na simulação de um processo complexo como o de o S-rail, sendo que as ligeiras discrepâncias nos resultados podem ser justificadas por diferenças nos parâmetros de construção do modelo utilizado (como a construção da malha, por exemplo), relativamente ao modelo de comparação.

### 3.4.3. Simulações a realizar

Neste capítulo são realizadas uma série de simulações numéricas que abrangem diferentes processos. Para estabelecer um ponto de partida, decidiu-se iniciar as simulações pela análise do ensaio experimental de dobragem realizado no capítulo 3.3.1.2. Esta simulação fornece dados precisos sobre o comportamento estrutural e as propriedades do material, para além de validar o modelo numérico. Portanto, com base nestes resultados preliminares, é possível desenvolver outras simulações, explorando diferentes condições e cenários, a fim de obter *insights* valiosos.

De seguida, realiza-se a simulação numérica de duas peças produzidas pela KIRCHHOFF, nas quais foram identificados defeitos provocados por fissuras no decorrer da estampagem. O objetivo destes estudos é compreender os mecanismos de formação das fissuras e propor soluções para mitigar ou evitar este problema, contribuindo assim para o aprimoramento do processo de estampagem e a qualidade das peças produzidas.

#### 3.4.3.1. Ensaio de dobragem

O ensaio de dobragem decorre com o recuro a um punção e dois rolos que servem de suporte ao provete. Todos estes componentes foram modelados com o auxílio do Solidworks, respeitando as suas respetivas dimensões e a sua disposição é demonstrada na Figura 104. O punção é representado a laranja, o provete a cinzento e os rolos a amarelo. No caso de haver mais do que um punção ou matriz, para facilitar o processo de cálculo do Stampack, utilizou-se uma superfície virtual que une os dois corpos de forma a que o *software* trate os elementos como um corpo único. Em termos de resultados, os cálculos não são afetados pois os rolos são modelados como corpos rígidos e a superfície criada não tem contacto com o provete.

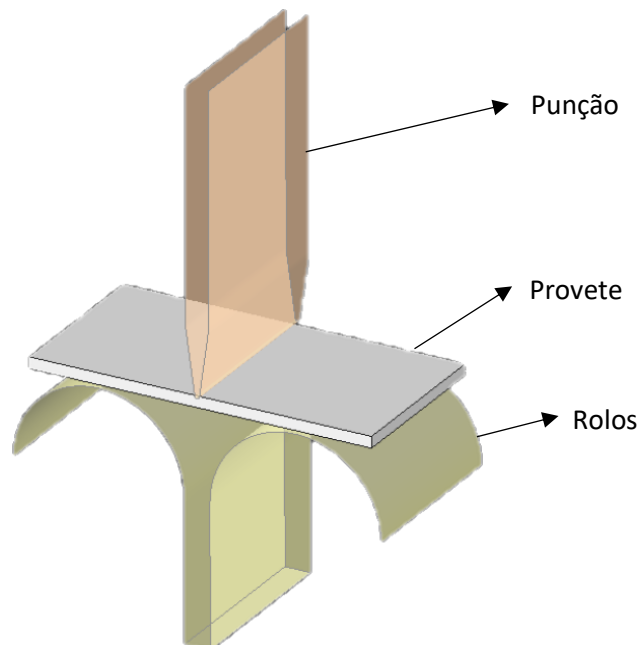


Figura 104 - Disposição dos componentes envolvidos no ensaio de dobragem no Stampack

A simulação é realizada até ao curso do punção correspondente ao ângulo máximo livre de dobragem. Deste modo, é possível perceber se o material suporta a deformação até ao ângulo de dobragem que é fisicamente permitido (devido à geometria do ensaio, momento após o qual existe

esmagamento do provete com os rolos - *clamping*) ou, pelo contrário, é possível identificar o momento em que o provete entra em rotura.

### 3.4.3.2. Peça 1 – 16365

A peça 16365, demonstrada na Figura 105, é desenvolvida para a Volkswagen e é alojada no para-choques traseiro. Para além do *design* discreto, a segurança é uma prioridade essencial no desenvolvimento desta peça pois a sua função é permitir o engate de atrelados.

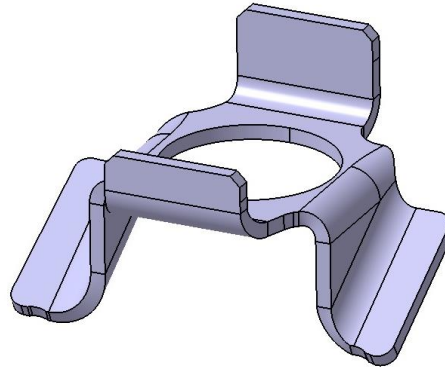


Figura 105 - Peça 16365

A ferramenta utilizada para a produção desta peça é uma ferramenta do tipo progressiva e todos os elementos que a constituem encontram-se na Figura 106. O processo é um processo de estampagem a frio, composto por 12 operações, explicadas na Figura 107 (onde se observa as transformações sofridas pela matéria-prima ao longo das mesmas), sendo que o processo se inicia, como é habitual, pela pilotagem na operação 1 (OP 10), para garantir o correto posicionamento da banda ao longo de todo o percurso na ferramenta.

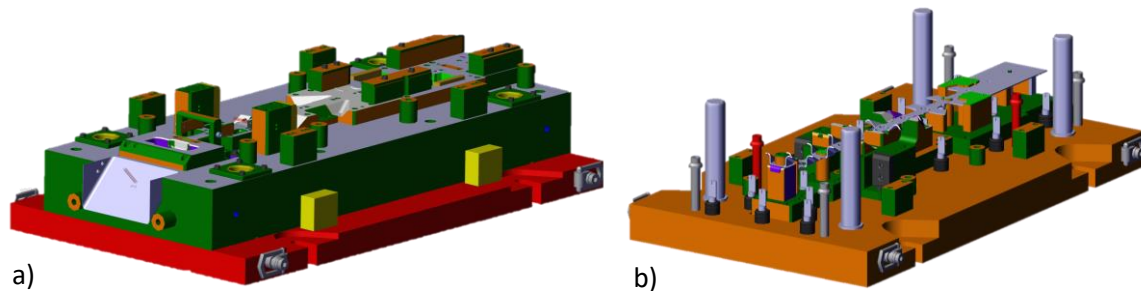


Figura 106 - Ferramenta da peça 16365: a) conjunto inferior; b) conjunto superior

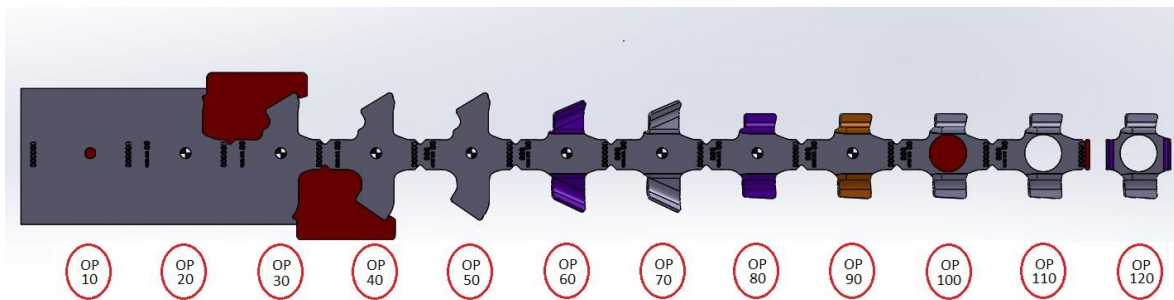


Figura 107 - Banda metálica da peça 16365

Durante a conformação deste componente, foi detetado a presença de fissuras de dimensão significativa em cerca de 60 a 90% das peças produzidas. Esta fissura, observável na Figura 108, é proveniente da conformação de uma das abas laterais da peça, que acontece desde a operação OP 60 à OP 80. Deste modo, para avaliar a origem ou evolução da fissura, pretende-se estudar o comportamento do material durante estas operações.



Figura 108 - Fissuras ocorridas na peça 16365

Assim sendo, para obter a geometria correspondente à aba lateral da peça, a conformação é realizada de uma forma progressiva, sendo realizado inicialmente uma estampagem a 45° (OP 70) e só depois, na OP 80, se realiza a estampagem a 90° da aba. Os componentes envolvidos na conformação da peça 16365 durante estas etapas correspondem a dois punções e uma matriz por etapa, bem como um calcador em comum, como demonstrado na Figura 109.

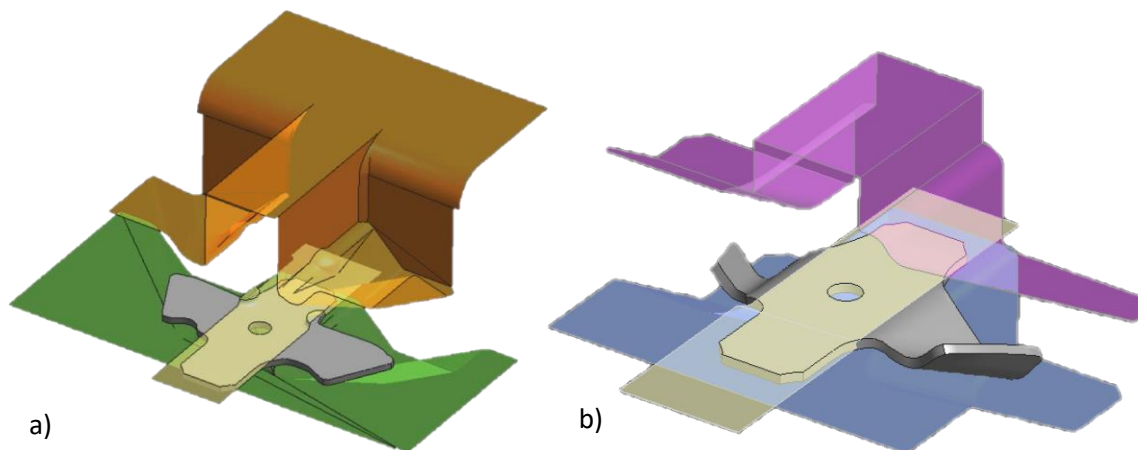


Figura 109 - a) Componentes utilizados na OP 70; b) Componentes utilizados na OP 80

### 3.4.3.3. Peça 2 – 14768

Esta peça, apresentada na Figura 110, é fabricado no aço CR340LA e diz respeito a um suporte do para-choques para a marca FORD. O processo corresponde a um projeto de peça esquerda e direita, isto é, ao longo do processo de estampagem a matéria-prima é conformada de forma a criar duas peças simétricas que se mantêm unidas até à última operação. Na última operação acontece a separação das peças com a geometria final à banda metálica.

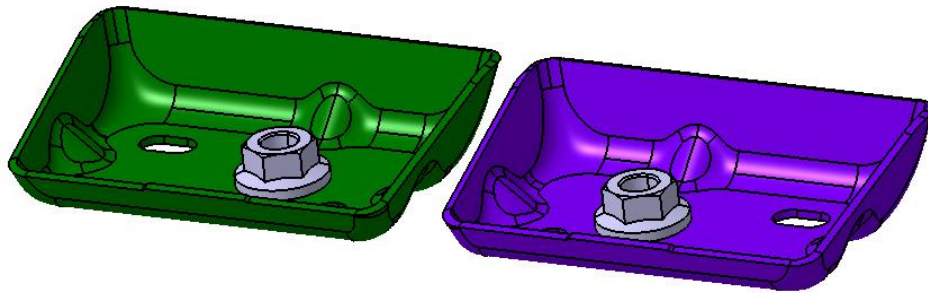


Figura 110 - Peça 14768

À semelhança da peça 16365, este componente é também produzido numa ferramenta progressiva (Figura 111) através de um processo de estampagem a frio, sendo que a banda metálica correspondente a esta peça é apresentada na Figura 112, ilustrando todas as operações que a matéria-prima é sujeita até atingir a forma final. Nesta figura é possível perceber que, no total, o processo de conformação da chapa é composto por 14 operações.

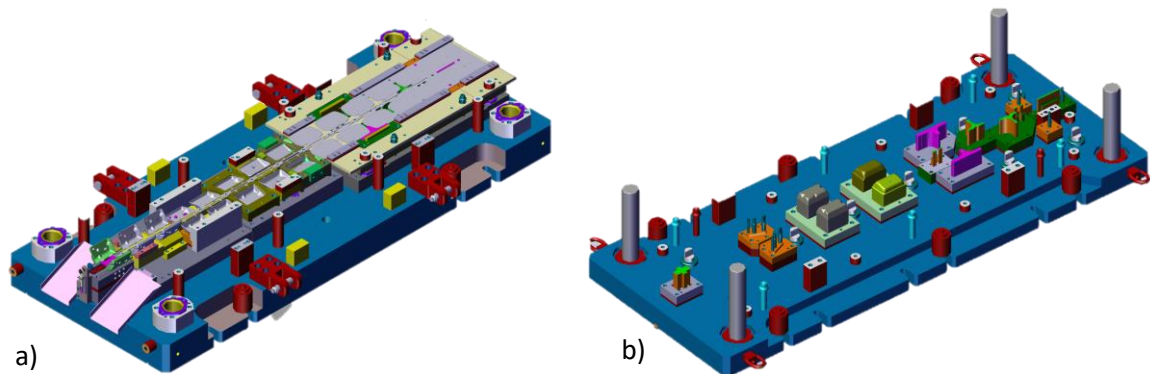


Figura 111 - Ferramenta progressiva referente à 14768: a) Bloco inferior; b) Bloco superior

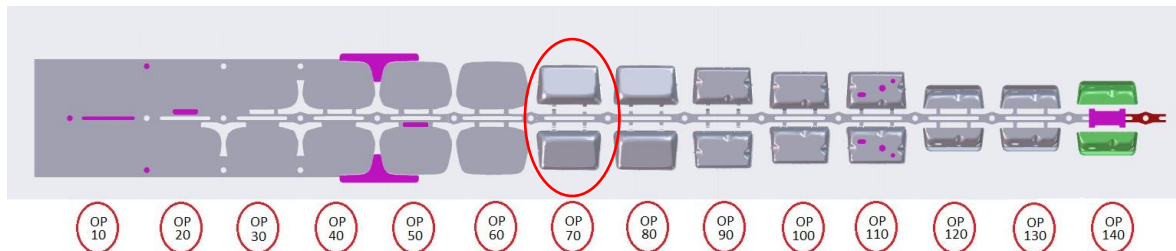


Figura 112 - Banda metálica da peça 14768

Acontece que, durante a sétima operação (OP 70), assinalada na Figura 112, os suportes que unem as peças à banda metálica fissuram e ocorre a separação prematura das duas peças. Ainda que estes suportes não façam parte da geometria final e sejam, na última operação, cortados e enviados para a sucata, estes são essenciais para o processo de conformação que ocorre nas operações seguintes. Devido à sua fissuração, as peças que se encontram ainda numa fase preliminar do fabrico, soltam-se da banda metálica e as restantes operações não são realizadas da forma correta, como demonstrado na Figura 113. Assim sendo, a análise numérica do processo de conformação da peça destina-se somente a estudar a OP 70, pois nas restantes etapas não se verifica qualquer tipo de problema.

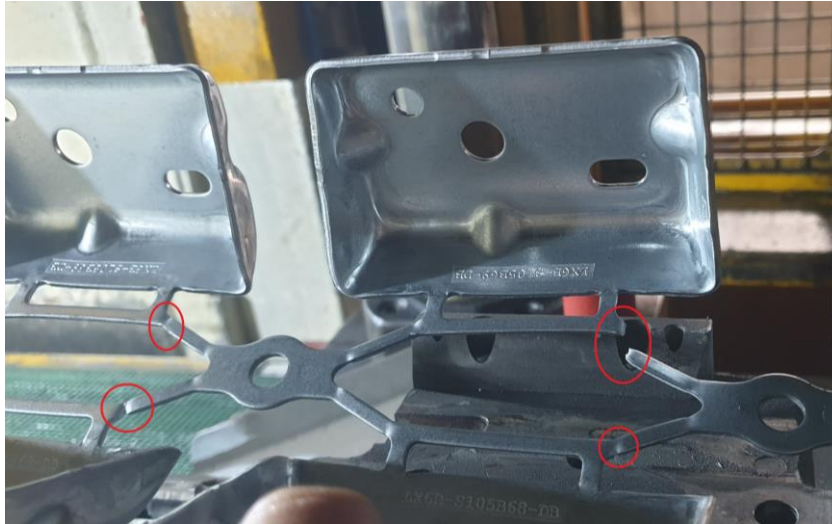


Figura 113 - Fissuras presentes na peça 14768

Esta operação consiste num punçionamento da chapa, cujos componentes envolvidos são dois punções (a laranja), uma matriz (a amarelo) e um pisador (a verde), apresentados em vista explodida na Figura 114. À semelhança do que já foi explicado anteriormente, existe uma superfície que na realidade não existe apenas para o *software* processar os punções como um único corpo.

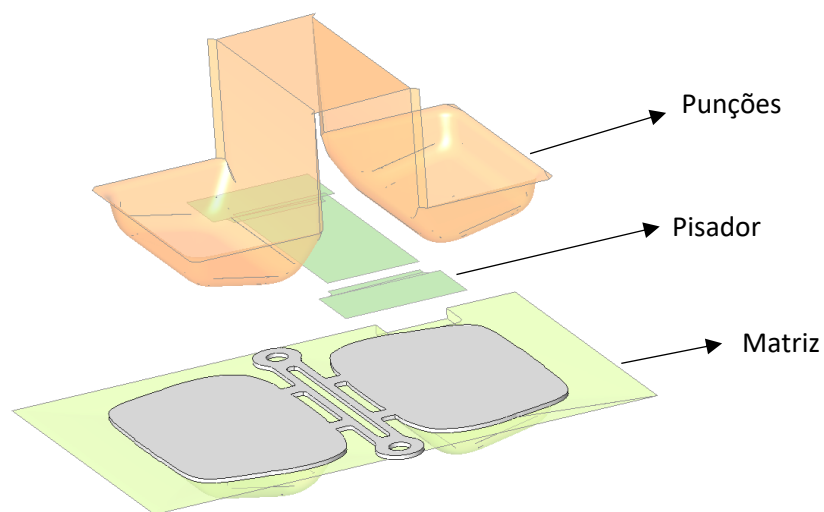


Figura 114 - Componentes envolvidos na OP 70

#### 3.4.4. Condições da análise numérica

O Stampack oferece a possibilidade de representar a chapa metálica através de elementos de casca (*shell*) ou elementos com espessura finita (elementos sólidos). A utilização de uma funcionalidade em detrimento da outra depende de várias considerações e fatores, na medida em que elementos *shell* são utilizados para modelar chapas cujos principais modos de deformação ocorrem no plano da chapa. Nestes casos, a espessura pode ser negligenciada e é possível utilizar um elemento simplificado que facilita e agiliza a simulação. Os elementos sólidos são utilizados quando há uma ação importante na direção da espessura da chapa durante o processo de deformação do metal, o que significa que é necessário representar a matéria-prima através de um modelo 3D completo.

O manual do *software* recomenda que, na prática, se utilize a funcionalidade de elementos sólidos quando o menor raio da geometria final é pelo menos 3 vezes menor do que a espessura da chapa, a folga de corte é menor do que a espessura da chapa ou ainda na previsão de fissuras. Por esta razão, em todas as simulações a chapa é representada como um elemento sólido.

Para além disso, é importante perceber que o programa dispõe de 3 modos de cálculo: rápido, preciso e ultra preciso, como apresentado na Figura 115. O modo rápido permite ao utilizador acelerar o tempo de CPU para uma verificação rápida do modelo. No entanto, este pode resultar em resultados instáveis, nomeadamente na previsão do retorno elástico, quando se trata de modelos complexos. Por esta razão, a simulação é sempre realizada no modo ultra preciso.

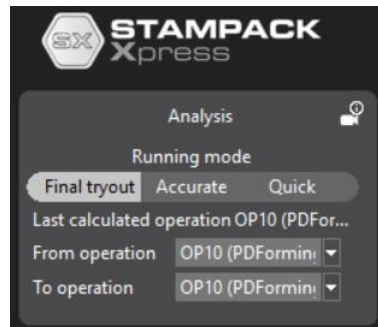


Figura 115 - Modos de simulação ao dispor no Stampack

No processo de cálculo, o programa utiliza uma abordagem de integração explícita dinâmica. Assim sendo, o amortecimento deve ser considerado para obter uma solução estável e limitar as oscilações numéricas. A determinação dos dois parâmetros usados para descrever o amortecimento, amplitude (A) e tempo (T), é bastante delicada e, por isso, é recomendado a utilização dos valores padrão constantes: A=5 e T=0,01 [96].

O comportamento do material é definido através das suas propriedades básicas (módulo de elasticidade longitudinal, densidade e coeficiente de Poisson), lei de encruamento e critério plástico. A lei de encruamento adotada é a lei de Ludwick-Nadai (ou lei de Swift), já abordada no capítulo 2.2.3.3, pois é o critério mais utilizado para aços, e a constante e expoente de encruamento serão automaticamente aproximados pelo *software* a partir das propriedades do material. Os dados do material são inseridos no modelo como demonstrado na Figura 116. Em relação ao comportamento em regime plástico existem quatro critérios disponíveis. No entanto, neste trabalho é considerado o critério “Hill 48” por, novamente, ser o critério geralmente mais utilizado [96]. O critério de cedência de Von Mises não é aplicável em materiais anisotrópicos, pois não é considerada a anisotropia. Assim, em 1948, Hill [99] modifica o critério de Von Mises, desenvolvendo um critério quadrático para descrever a deformação plástica em materiais anisotrópicos:

$$f(\sigma) = \bar{\sigma}^2 = (G + H)\sigma_{xx}^2 - 2H\sigma_{xx}\sigma_{yy} + (H + F)\sigma_{yy}^2 + 2N\sigma_{xy}^2, \quad (34)$$

onde  $\sigma_{xx}$  e  $\sigma_{yy}$  são as tensões normais ao longo da direção x (direção de laminagem) e direção y (direção transversal à laminagem), respetivamente,  $\sigma_{xy}$  é a tensão de corte e F, G, H e N são coeficientes do material estimados experimentalmente. Estes coeficientes são obtidos através de ensaios de tração em diferentes direções e em função dos valores de Lankford  $r_0$ ,  $r_{45}$  e  $r_{90}$  (segundo as direções de laminagem, a 45° e transversal, respetivamente, descritos explicados no capítulo 2.2.3.4). A biblioteca de materiais integrada no *software* dispõe de valores padrão para os

coeficientes de Lankford que são utilizados nas simulações numéricas, pois serão muito próximos dos valores reais. Estes coeficientes são inseridos no modelo novamente como demonstrado na Figura 116. Para além disso, todos os dados utilizados relativos aos materiais são apresentados mais tarde na Tabela 35.

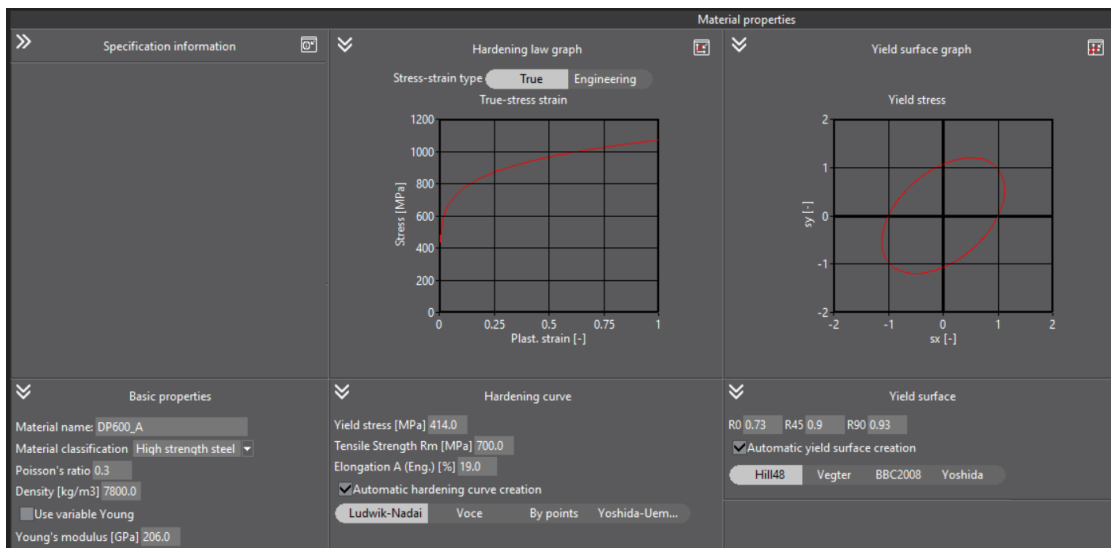


Figura 116 - Janela para a caracterização do material

No que diz respeito ao critério para prever as curvas limite de conformação dos materiais, é adotado o modelo desenvolvido por Cayssials [100]. No seu trabalho, o autor não disponibiliza as equações utilizadas na construção da CLR, o que significa que a utilização desta ferramenta apenas é possível com recurso a softwares de simulação por elementos finitos [101]. O modelo de Cayssials para prever a CLR é em função da resistência à tração, alongamento, coeficiente de Lankford e espessura do aço. Assim, o Stampack utiliza estes parâmetros, fornecidos pelo utilizador, para prever a CLR e também a Curva Limite de Ruptura Triaxial (CLRT), como demonstrado na Figura 117.

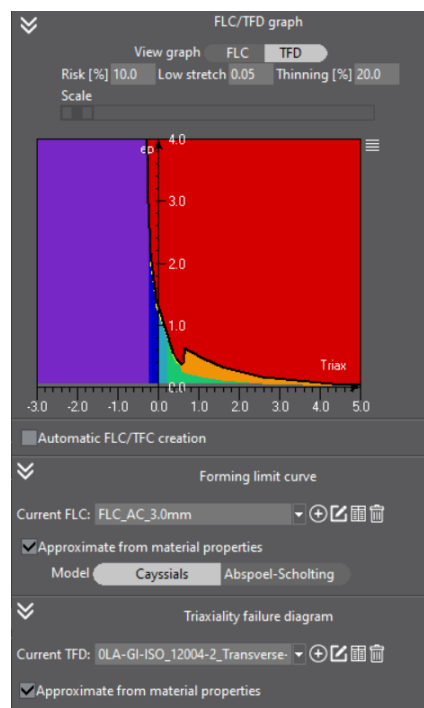


Figura 117 - Previsão da CLR/CLRT

Assim sendo, os valores das propriedades mecânicas utilizados para representar os 3 materiais constituem um valor médio dos valores obtidos no capítulo 3.3.5 e estão, juntamente com os coeficientes retirados da biblioteca do Stampack, apresentados na Tabela 35.

Tabela 35 - Definição das propriedades dos materiais para a simulação numérica

Propriedades/Material	HR700LA	CR340LA	DP800
Coeficiente de Poisson		0,3	
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	7900	7900	7683
Módulo de Young (MPa)	210	210	210
Tensão de cedência (MPa)	773,2	400	454
Resistência mecânica (MPa)	832,4	502,5	860
Alongamento (%)	20,7	22,5	15
r <sub>0</sub>	0,681	0,62	0,6
r <sub>45</sub>	1,144	1,24	0,933
r <sub>90</sub>	0,79	0,95	0,7

Após importar para o programa o contorno da matéria-prima, é necessário construir a malha de elementos finitos. O Stampack utiliza uma tecnologia de auto refinamento para acelerar os tempos de simulação, isto significa que inicia a simulação com elementos de maior tamanho (refinamento grosseiro) e refina-os automaticamente durante a simulação com base na topologia da ferramenta pois, durante a simulação, algumas zonas (por exemplo, pequenos raios de matrizes) requerem elementos de dimensões inferiores para definir corretamente a geometria da chapa. Quando as chapas são representadas como elementos sólidos, o *software* utiliza o hexaedro para construir a malha de elementos finitos. Os parâmetros que controlam a criação da malha estão ilustrados na Figura 118 e são: mínimo comprimento de elemento (*end element length*), número máximo de refinamentos (*max. refinements*), elementos ao longo da espessura (*element over thickness*) e tipo de malha (*mesh type*).

O primeiro parâmetro, mínimo comprimento de elemento, controla o tamanho mínimo de um elemento utilizado para representar a malha no plano da chapa. Este fator depende da geometria final e, geralmente, é recomendado considerar que é necessário um mínimo de 3 elementos para reproduzir o menor raio da peça final, ou seja, assumindo um valor igual ao menor raio/3. O número máximo de refinamentos controla a quantidade de refinamentos que um elemento inicial sofre até atingir o valor do comprimento mínimo de elemento. Este valor pode variar entre 5 e 0 (sem refinamento). É necessário ter em atenção que, para uma correta previsão de defeitos em zonas livres, que não estão em contacto com a ferramenta, é recomendado utilizar valores de número de refinamento baixos, geralmente iguais a 1 ou 2. Os elementos ao longo da espessura definem o número de divisões na direção da espessura. Para valores comuns de espessura da chapa, é necessário um mínimo de 2 elementos ao longo da espessura para obter resultados fidedignos, sendo que é recomendada a utilização de 3/4 elementos para obter resultados com média/alta precisão. Por fim, o tipo de malha controla a orientação dos elementos na malha inicial. Na prática, é recomendada a utilização de malhas circulares quando a banda metálica apresenta uma forma redonda, enquanto para os restantes casos, o procedimento correto consiste na utilização de malhas quadrilaterais.

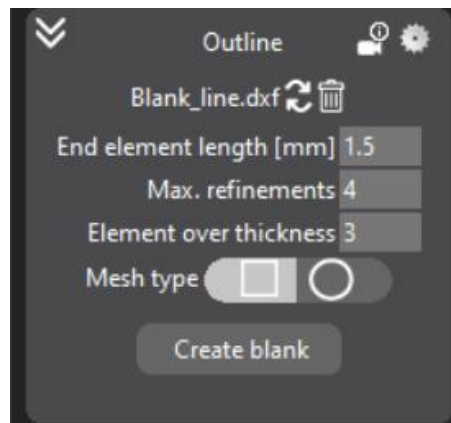


Figura 118 - Parâmetros que controlam a criação da malha

Os parâmetros utilizados para construir a malha de elementos finitos do provete do ensaio de dobragem foram mínimo comprimento de elemento igual a 0,4 (igual ao mínimo raio na geometria final), número máximo de refinamentos igual a 4 e três elementos ao longo da espessura, o que resultou num total de 3890 nós (Figura 119). Para além disso, não foram atribuídas nenhuma condição fronteira pois, tal como acontece na realidade, o provete é apenas posicionado nos rolos, sem qualquer tipo de restrição ao seu movimento.

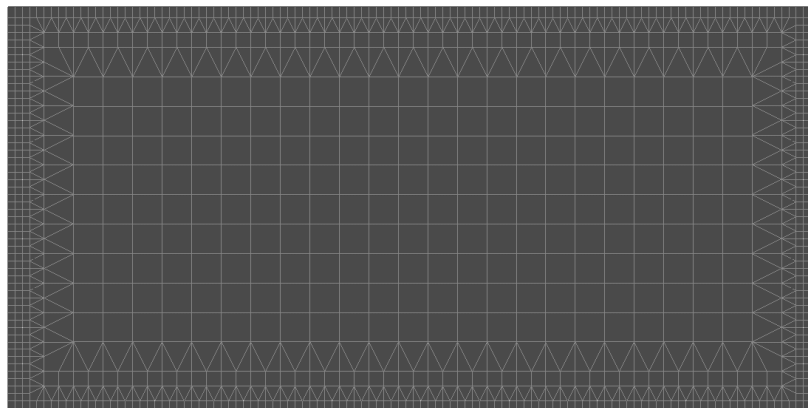


Figura 119 - Malha de elementos finitos do modelo de provete de ensaios

As malhas de elementos finitos dos componentes envolvidos no ensaio de flexão (Figura 120) foram obtidas num *software* externo (neste caso, o Solidworks) e depois importadas para o Stampack, de modo a combater algumas dificuldades demonstradas pelo Stampack em construir a malha de elementos finitos em zonas de raios pequenos, nomeadamente a representação do raio do punção que possui dimensões muito reduzidas (0,4 mm). É fundamental que a malha neste local seja devidamente construída para representar de forma correta o contacto entre o punção e o provete. O Stampack interpreta as ferramentas como corpo rígido, sendo que o punção possui 60606 nós e a matriz 7755 nós. Para além disso, o contacto entre a chapa discretizada por elementos finitos e as ferramentas é sempre do tipo “sem penetração” com  $\mu = 0,1$ , garantindo que os nós da chapa não se encontram em interferência em relação aos elementos de corpo rígido.

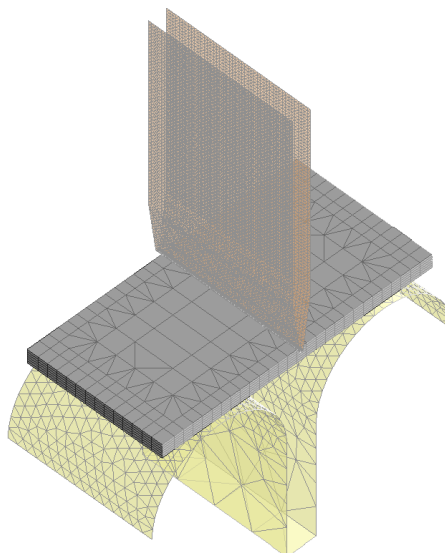


Figura 120 - Malha de elementos finitos dos restantes elementos envolvidos no ensaio de flexão

Para a peça 16365, começou-se por construir a malha de elementos finitos, aplicando uma malha de elementos quadrilaterais, com um mínimo comprimento de elemento igual a 2, número máximo de refinamentos igual a 4 e três elementos ao longo da espessura, resultando em 4244 nós. De seguida, foram atribuídas as condições fronteira. Assim, definiu-se a restrição de movimento nos eixos x e y dos nós que representam as furações de pilotagem e dos nós onde a chapa se encontra ligada à banda metálica, de forma a representar a realidade (nós assinalados a vermelho na Figura 121).

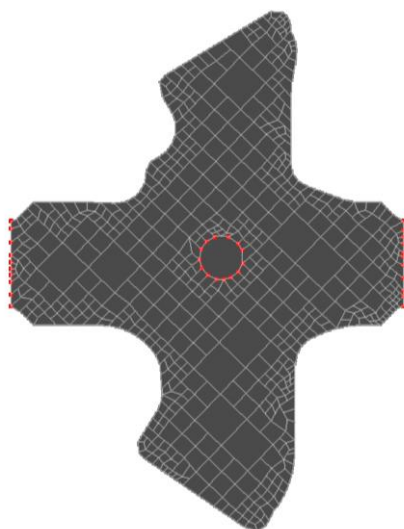


Figura 121 - Malha de elementos finitos do blank da peça 16365

Como já anteriormente referido no capítulo 3.4.3, a simulação do processo de conformação da peça 16365 abrange duas etapas distintas. Na primeira destas etapas a aba é conformada para um ângulo de 45°, ao mesmo tempo que se realiza a dobra na extremidade. Na segunda etapa, o punção completa a estampagem conferindo à peça a geometria desejada. Na Figura 122 encontram-se as malhas dos elementos envolvidos nas operações. As malhas de elementos finitos destes componentes foram importadas novamente para o Stampack do Solidworks, sendo que relativamente à etapa OP 70, o punção (a laranja) possui 3466 nós e a matriz (a verde) 1841. Já o

punção (a azul) e a matriz (a roxo) envolvidos na OP 80 apresentam 3289 nós e 3106 nós, respetivamente. O pisador (a amarelo), de geometria mais simples, é composto por 660 nós. Novamente, todas as ferramentas (punções, matrizes e pisador) são modelados como corpos rígidos e o contacto entre a chapa metálica e as ferramentas é do tipo “sem penetração”.

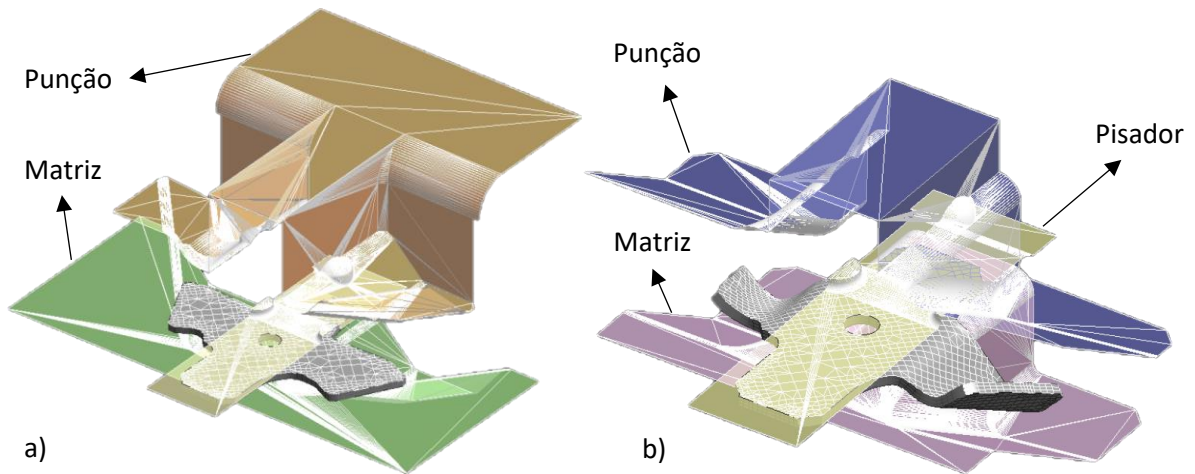


Figura 122 - Malha de elementos finitos: a) Componentes utilizados na OP 70; b) Componentes utilizados na OP80

As condições fronteira da peça 14768 correspondem, de igual modo, à restrição dos nós relativos às furações de pilotagem e nos locais onde a chapa se encontra ligada à banda metálica. Estes nós estão identificados a vermelho na Figura 123, onde está representada a malha da chapa metálica. A malha, com 27508 nós de geometria quadrilateral, foi obtida utilizando um mínimo comprimento de elemento igual a 1,4, número máximo de refinamentos igual a 2 (uma vez que a zona onde se prevê o aparecimento de fissuras não está em contacto com as ferramentas) e três elementos ao longo da espessura.

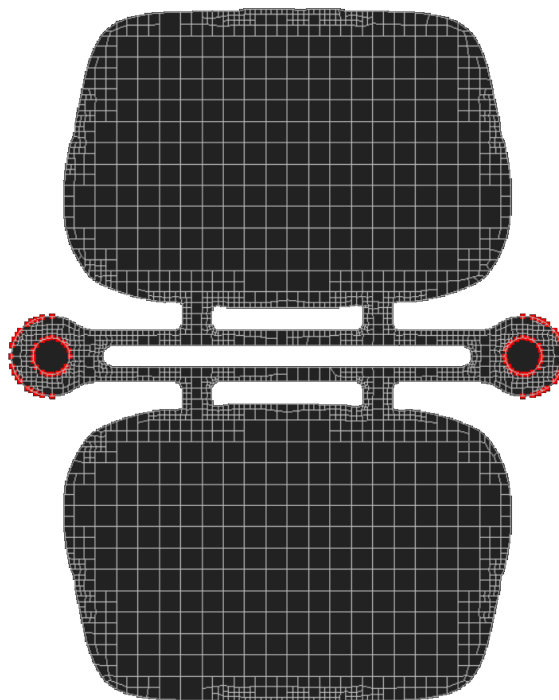


Figura 123 - Malha de elementos finitos do blank da peça 14768

A simulação do processo de conformação desta peça é mais simples do que o caso anterior, uma vez que as bossas são obtidas apenas numa etapa, utilizando apenas uma matriz, dois punções e um calcador. A malha de elementos finitos que representa os punções, a matriz e o calcador é apresentada na Figura 124. Estes elementos são modelados como corpos rígidos e são compostos por 9859, 9587 e 60 nós, respetivamente.

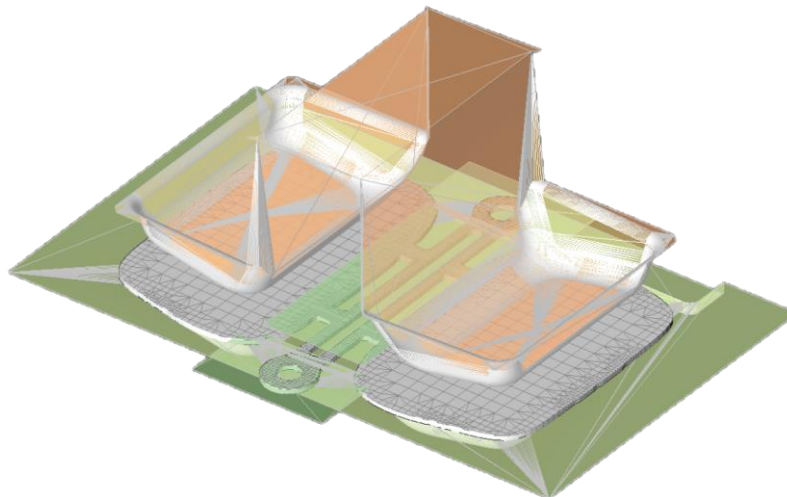


Figura 124 - Malha de elementos finitos dos restantes componentes envolvidos na simulação da peça 14768

### 3.4.5. Estudo paramétrico numérico

#### 3.4.5.1. Ensaio de dobragem

Este ensaio será reproduzido para os três materiais em estudo. Os componentes envolvidos são os mesmos, uma vez que a única diferença entre ensaios é a espessura dos materiais, o que faz com que o espaçamento entre rolos para os materiais com espessura de 2 mm seja ligeiramente inferior, segundo as especificações da norma. Como já referido anteriormente, a simulação é realizada para um curso correspondente ao ângulo de dobragem máximo, podendo se observar na Figura 125(a) o instante inicial e na Figura 125(b) o instante final da simulação.

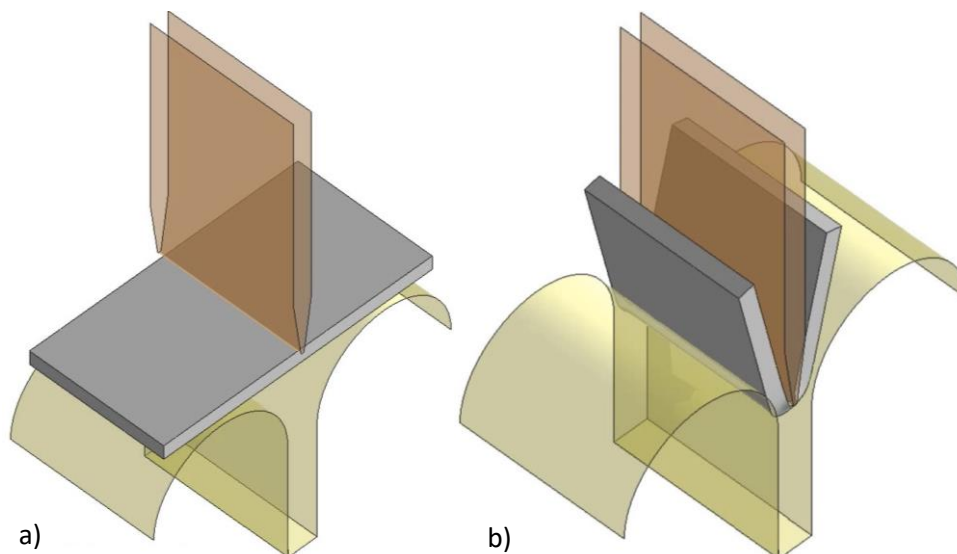


Figura 125 - a) Posição inicial; b) Posição final (final da simulação)

Na Figura 126, Figura 127 e Figura 128 estão apresentados o momento de rotura para as três simulações que dizem respeito a três materiais diferentes.

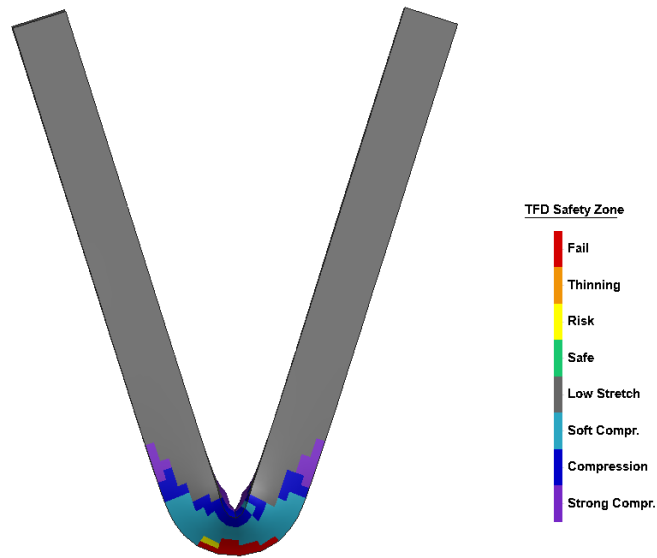


Figura 126 - Instante de rotura da simulação utilizando o aço HR700LA

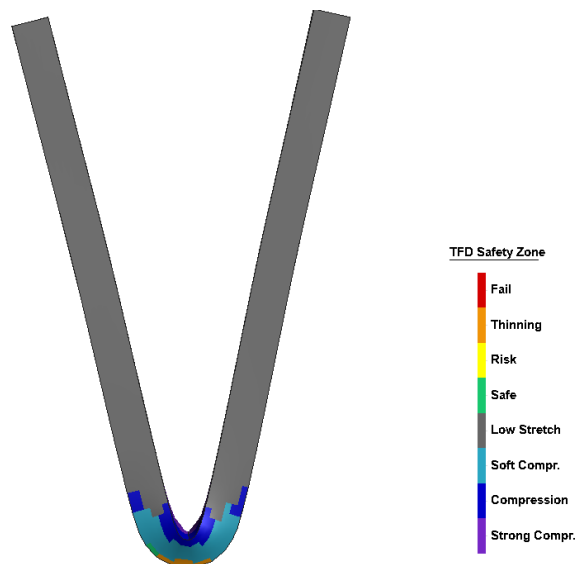


Figura 127 - Instante final da simulação utilizando o aço CR340LA

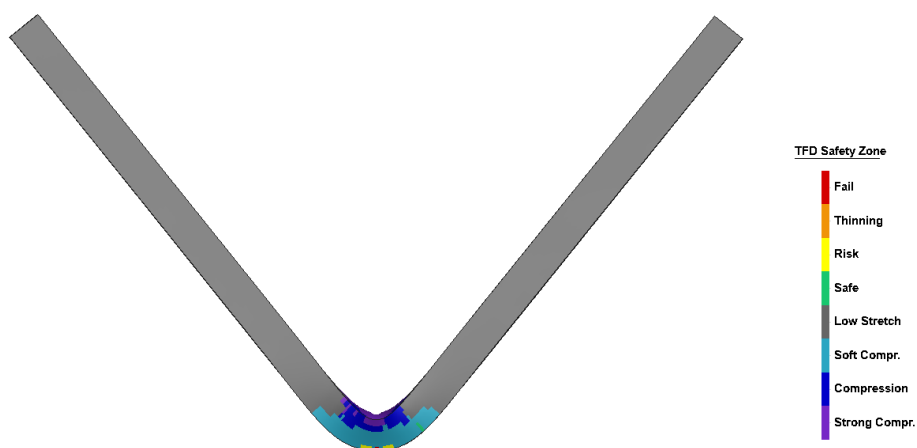


Figura 128 - Instante de rotura da simulação utilizando o aço DP800

Para o primeiro caso (aço HR700LA), o *software* identifica a rotura do material ligeiramente antes daquilo que acontece na realidade. Como se observa no capítulo 3.3.5, o material demonstrou capacidade de se deformar até muito perto dos 150°. No entanto, na simulação o material entra em rotura um pouco antes de atingir o instante correspondente ao ângulo de dobragem máxima. No caso do aço CR340LA, a simulação é representativa da realidade, constatando-se que o provete suporta a dobragem total sem entrar em rotura. Já no terceiro caso, verifica-se uma aproximação satisfatória da realidade. Ainda que os resultados do *software* sejam generosos (ângulo exterior ligeiramente superior) quando comparados com a realidade, esta diferença pode ser explicada por fatores que não são previstos pelo código de cálculo (como por exemplo por imperfeições no material ou na superfície do provete). A comparação entre os resultados experimentais e numéricos é apresentada na Tabela 36.

Tabela 36 - Comparação entre o ângulo de dobragem experimental e numérico para os diferentes materiais

Material	Ângulo Experimental	Ângulo Numérico	Diferença Relativa
HR700LA	148	144	2,70%
CR340LA	150	150	0,00%
DP800	86	99	15,11%

O Stampack possui uma funcionalidade que permite analisar o tipo de solicação presente ao longo da chapa metálica e, assim, analisar o tipo de solicação que leva à rotura do material. Como é possível observar na Figura 129 (exemplo representativo, referente à simulação do material HR700LA), na zona onde surge a rotura verifica-se que a solicação predominante é tração, realizada ao longo da superfície externa do raio de dobragem. Assim, como apresentado na Figura 130, a deformação principal  $\epsilon_1$  está em concordância com este estado de tensão, exibindo o mesmo sentido e direção do vetor que representa a tração na superfície do provete.

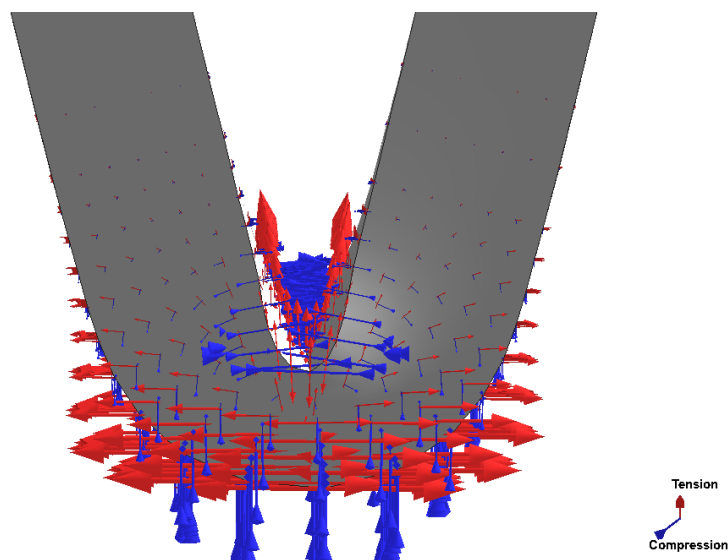


Figura 129 - Representação vetorial das solicações presentes no provete

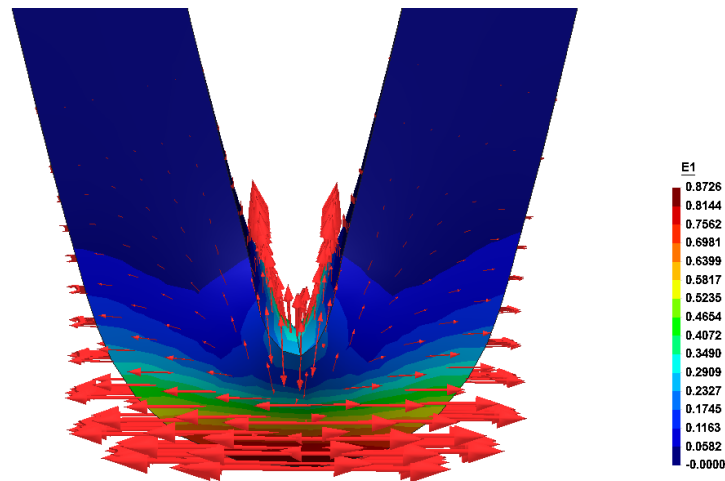


Figura 130 - Representação vetorial e quantitativa de  $\epsilon_1$

Outro fenómeno relevante para o estudo de estampagem diz respeito à identificação e representação de forma precisa do efeito do coeficiente de Poisson que acontece na zona de contacto com o punção. A força exercida pelo punção provoca uma deformação longitudinal e também uma deformação transversal, como se verifica na Figura 131.

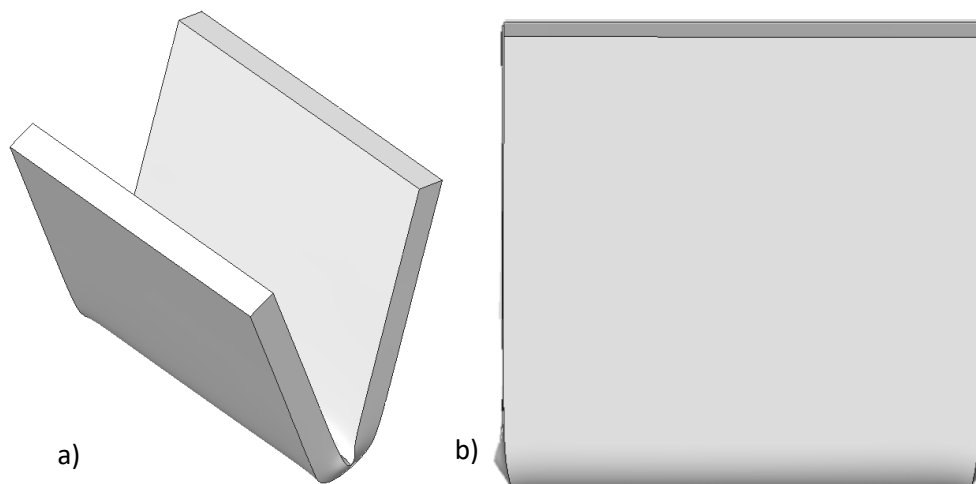


Figura 131 - Efeito de Poisson observável na simulação numérica: a) vista isométrica; b) vista lateral

O Stampack, para além de fornecer os valores das deformações principais  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$ , permite obter a deformação plástica equivalente. Esta métrica, apresentada nas figuras seguintes para cada material (Figura 132, Figura 133 e Figura 134) é posteriormente utilizada como referência para comparar e analisar situações de conformação de peças reais fabricadas nestes materiais em situações semelhantes, isto é, onde a solicitação predominante é tração ao longo da aresta da chapa.

Os valores obtidos foram substancialmente mais elevados para os dois primeiros materiais (HR700LA e CR340LA), uma vez que o ângulo de dobragem alcançado foi, de igual modo, bastante mais elevado (sensivelmente o dobro) em comparação ao aço DP800. A deformação plástica equivalente nos instantes de rotura dos provetes em HR700LA e CR340LA foi de 0,714 e 0,523, respetivamente, enquanto para o provete em DP800 o valor obtido foi de 0,373. Assim, estes valores serão utilizados como referência para analisar a rotura em processos de estampagem de geometrias mais complexas.

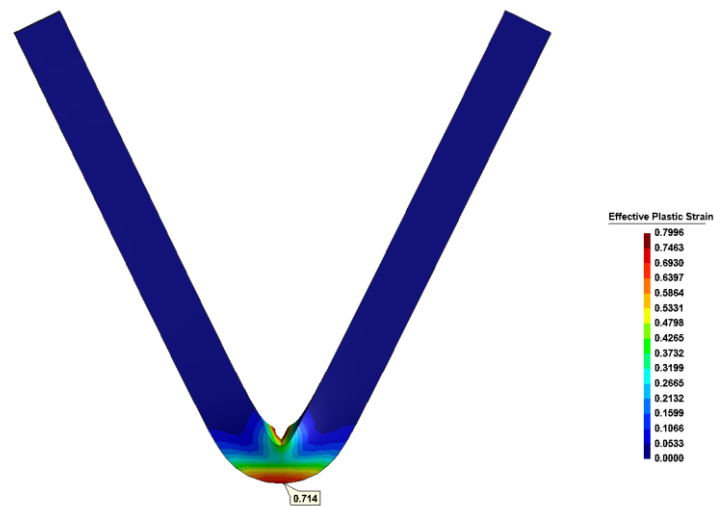


Figura 132 - Deformação plástica equivalente no instante de rotura do provete simulado em aço HR700LA

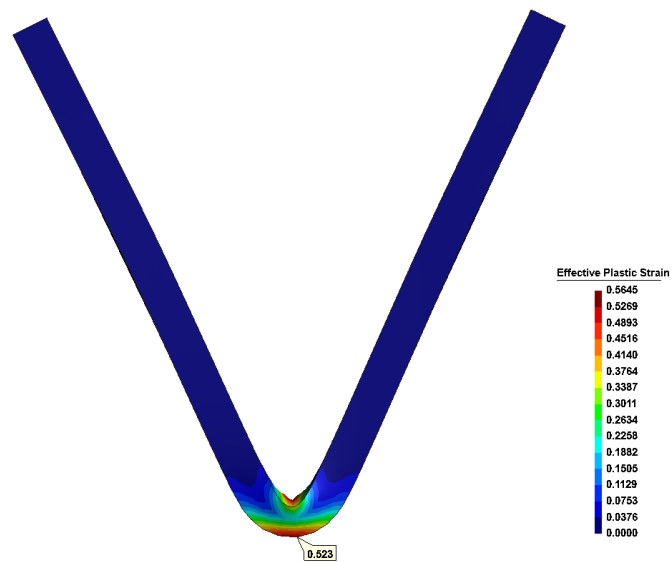


Figura 133 - Deformação plástica equivalente no instante de rotura do provete simulado em aço CR340LA

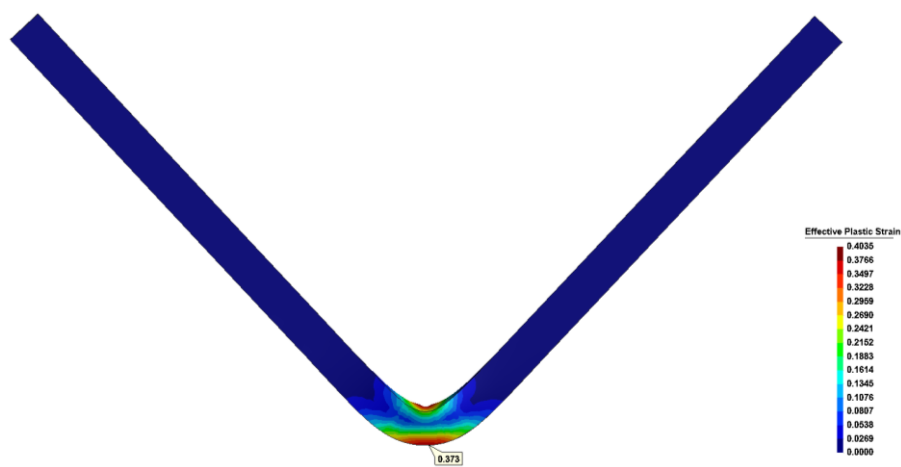


Figura 134 - Deformação plástica equivalente no instante de rotura do provete simulado em aço DP800

### 3.4.5.2. Peça 1 – 16365

Tendo em conta que a primeira operação simulada envolve esforços impostos à chapa substancialmente menores, não existe risco de falha e as tensões e deformações são facilmente comportadas pelo material. Por este motivo, é analisado o comportamento do material durante a segunda fase de conformação, para a qual os esforços instalados são mais severos. A primeira análise ao diagrama de rotura triaxial revela a existência de uma zona onde a chapa entra em rotura. Como se pode perceber na Figura 135, pela região representada a vermelho, este local coincide com a zona onde se relatou a presença de fissuras durante as produções da peça. Estes resultados são confirmados pelo mapa dos valores do coeficiente de rotura triaxial, apresentado na Figura 136, onde se pode observar neste local valores superiores a 100 (sendo que o valor máximo é mesmo 127), o que significa que o material ultrapassou a sua capacidade de conformação e entra em rotura (visto que um valor igual a 100 significa que atinge 100% da sua capacidade de deformação).

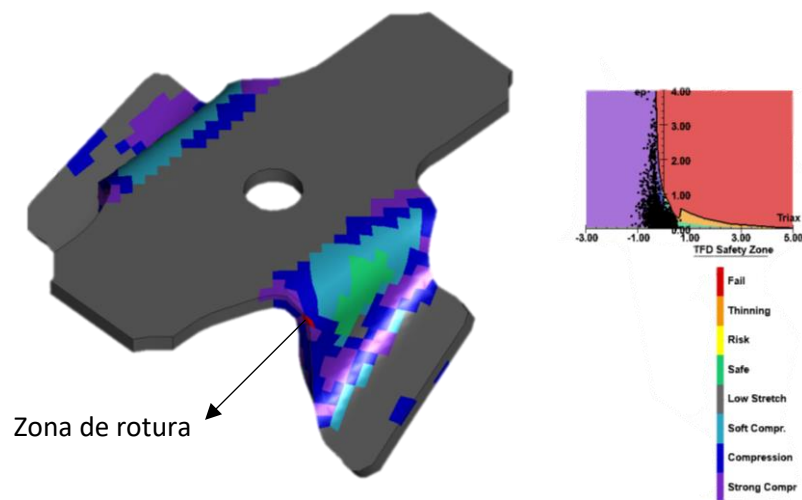


Figura 135 - Diagrama de rotura triaxial obtido pelo Stampack

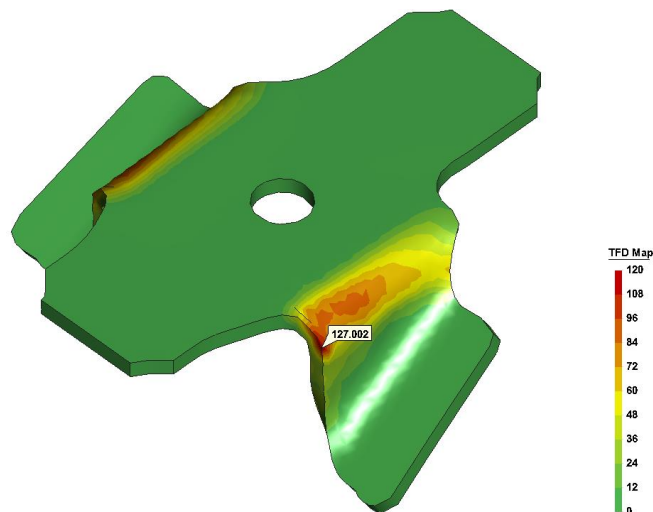


Figura 136 - Valores do coeficiente de rotura triaxial da peça 16365

Os esforços ao longo da peça podem ser observados na Figura 137, onde é apresentada a tensão equivalente de von Mises. A tensão equivalente obtida no local onde surgem as fissuras foi de 1028 MPa.

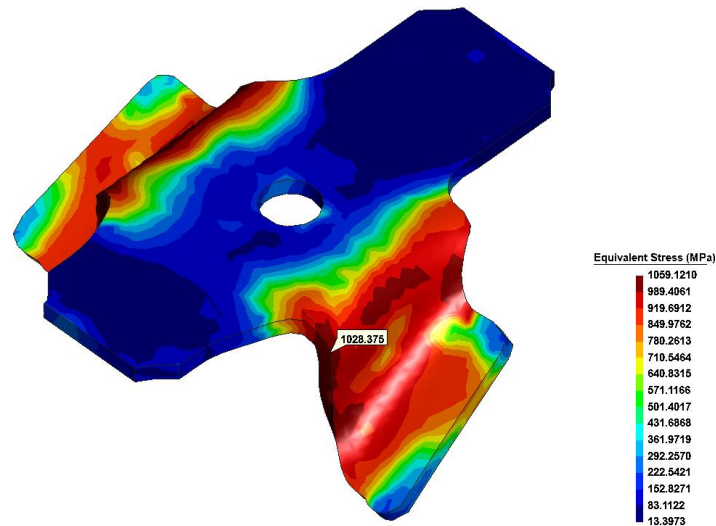


Figura 137 - Distribuição da tensão equivalente de von Mises ao longo da peça 16365

No que diz respeito às deformações principais  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  e  $\epsilon_3$ , os seus valores são apresentados na Figura 138, Figura 139 e Figura 140, respetivamente. Os resultados revelam que  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_3$  têm valores mais elevados, de 0,463 e -0,243, respetivamente, enquanto o valor de  $\epsilon_2$  é praticamente desprezável (-0,059). Por fim, na Figura 141 é apresentada a deformação plástica equivalente que, para a zona de rotura, corresponde a 0,67. Comparando este valor com a deformação plástica equivalente no instante de rotura no ensaio de dobragem para o HR700LA, ainda que os valores observados sejam muito semelhantes, verifica-se que na peça 16365, para uma deformação plástica equivalente 6,16% menor, acontece a rotura do material.

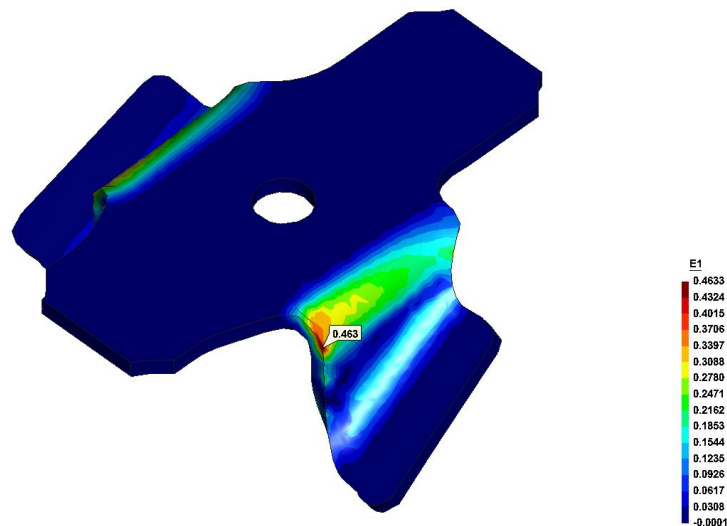


Figura 138 - Valor de  $\epsilon_1$  na zona de rotura

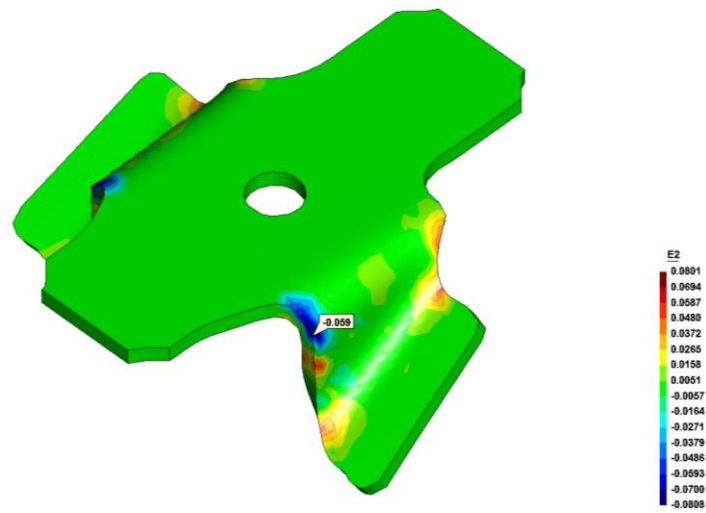


Figura 139 - Valor de  $\epsilon_2$  na zona de rotura

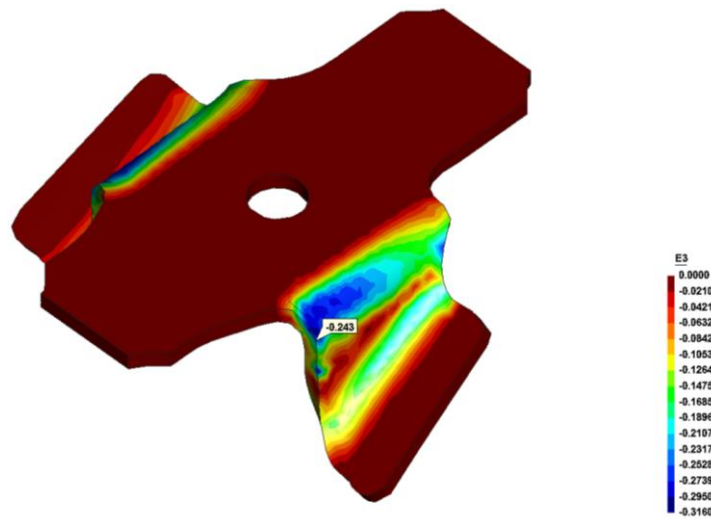


Figura 140 - Valor de  $\epsilon_3$  na zona de rotura

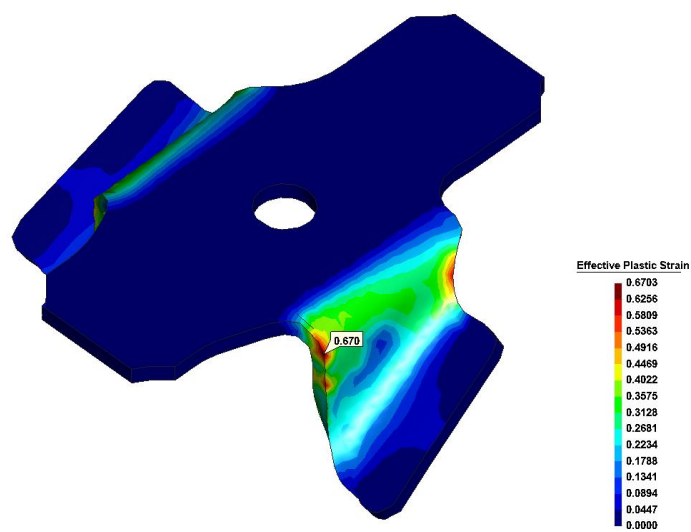


Figura 141 - Valor da deformação plástica equivalente na zona de rotura

Para além das variáveis apresentadas, é importante perceber as condições de carga às quais a zona de rotura é sujeita. Como se observa na Figura 142, pelas setas representadas a vermelho, o esforço predominante é novamente um esforço de tração registado ao longo da superfície exterior do raio de curvatura da aba lateral, o que coincide com os resultados obtidos no ensaio de dobragem.

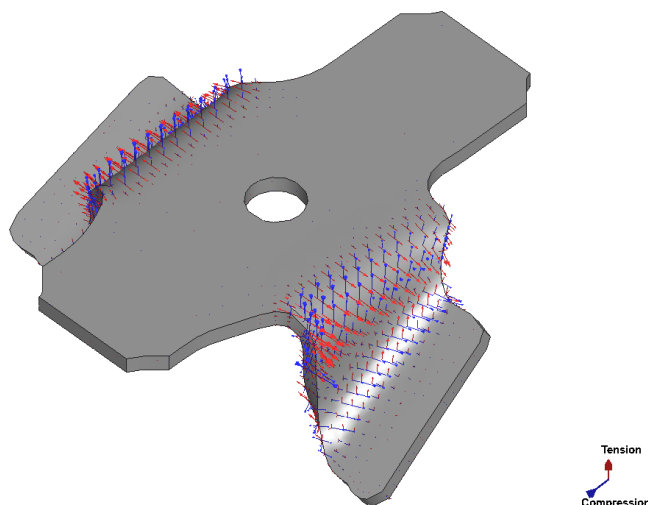


Figura 142 - Representação vetorial das solicitações ao longo da peça 16365

Após a análise destes resultados, fica evidente que a região crítica se encontra no raio de curvatura da aba lateral. Para tentar obter melhores resultados, a solução implementada consiste em alterar os raios de curvatura das abas, mas principalmente o raio onde se identifica a rotura. Assim, os raios de curvatura do *trim* original (Figura 143(a)) foram ligeiramente alterados, aplicando-se uma redução dos seus arcos, de forma a suavizar a geometria da banda metálica e conferir maior capacidade de conformação nestes locais, como demonstrado na Figura 143(b). Este processo é iterativo, procurando atingir os melhores resultados na simulação numérica antes de se efetuar as alterações às ferramentas. Como é obvio, esta alteração implica uma retificação da geometria dos punções e matrizes envolvidos no processo para estes estarem em concordância com a geometria da banda metálica pretendida. As alterações efetuadas à geometria da banda metálica podem ser encontradas em detalhe no anexo 2 e no anexo 3, que apresentam as dimensões do *blank* antes e após a alteração, respetivamente.

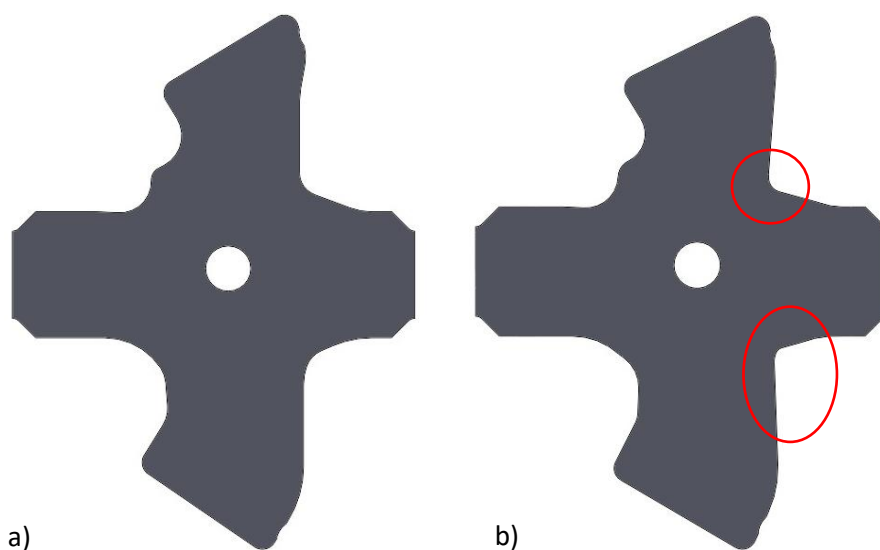


Figura 143 - a) *Trim* original da peça 16365; b) *Trim* após alterações

Os resultados após a alteração demonstram que a região que se comprovou crítica apresenta melhor comportamento, como demonstrado no diagrama de rotura triaxial da Figura 144. Esta região encontra-se inclusivamente fora da zona de rotura, ou até mesmo da zona de risco do componente alterado. No entanto, o valor do coeficiente de rotura triaxial, apresentado na Figura 145, é de 81, o que significa que a capacidade de conformação do material está perto do seu limite (ainda que este valor não exprima risco de rotura).

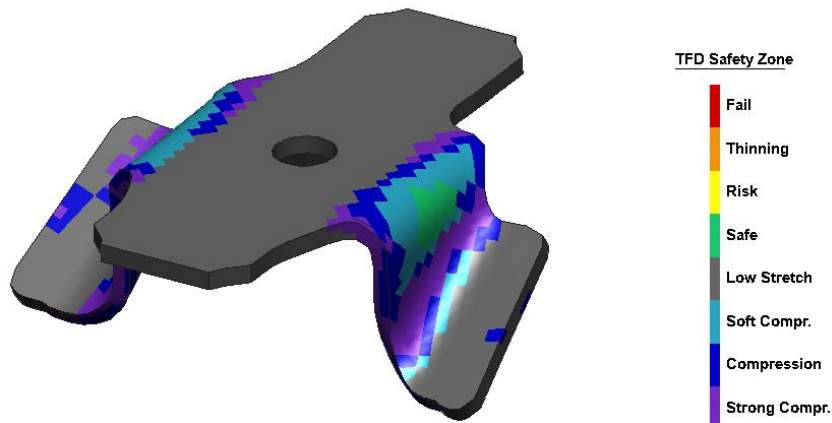


Figura 144 - Diagrama de rotura triaxial da peça 16365 após a alteração geométrica

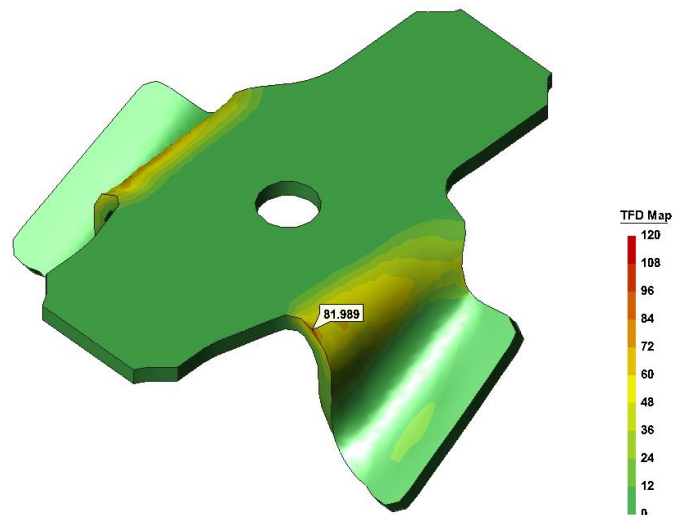


Figura 145 - Valores do coeficiente de rotura triaxial da peça 16365 após alteração

Para além disso, como se comprova pela Figura 146 e Figura 147, os esforços resultantes nesta região são significativamente menores. A tensão equivalente de von Mises diminuiu para 831 MPa e a deformação plástica equivalente para 0,473. Para a geometria otimizada, o valor máximo da deformação plástica equivalente é 33,75% inferior ao valor observado na rotura no ensaio de dobragem para este material, o que confirma as considerações anteriores de que o material não atinge o seu limite de conformação.

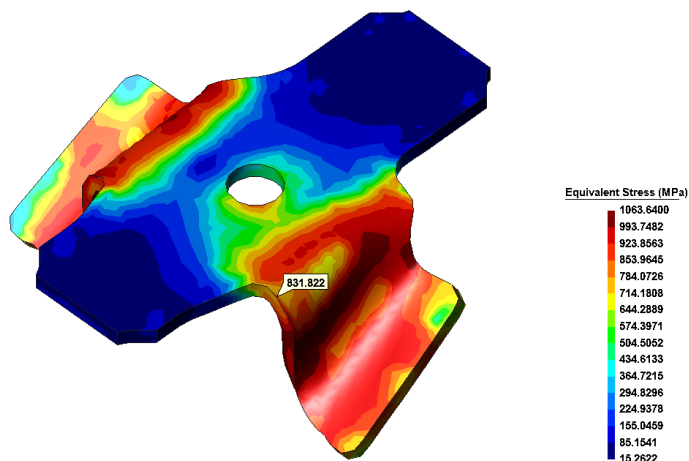


Figura 146 - Valores da tensão de von Mises da peça 16365 após alteração

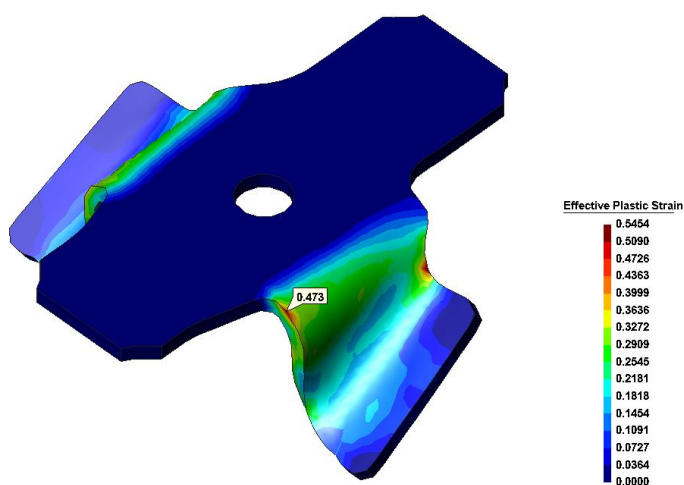


Figura 147 - Valor da deformação plástica equivalente na peça 16365 após alteração

### 3.4.5.3. Peça 2 – 14768

A estampagem da peça 14768 está completa quando o curso do punção atinge os 25 mm, valor necessário para a matéria-prima adquirir a forma final desejada. Assim, na Figura 148(a) está representada a posição inicial do punção e na Figura 148(b), a posição final, no final do curso do punção.

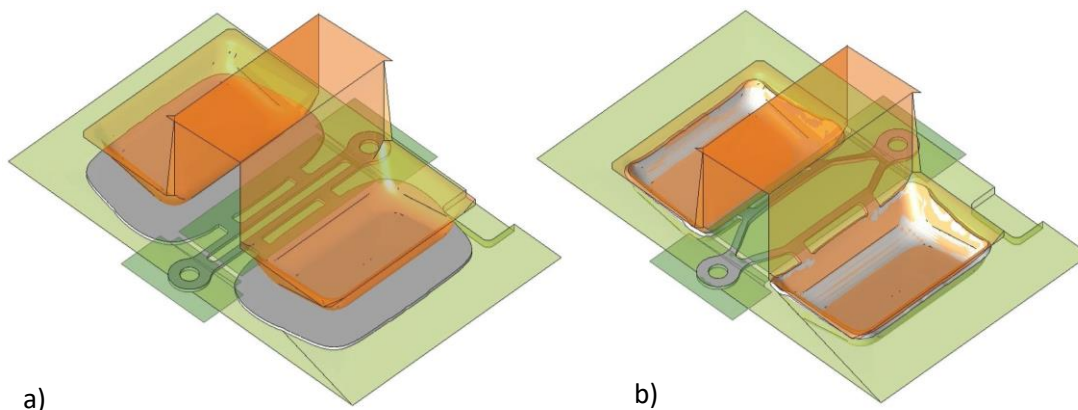


Figura 148 - a) Posição inicial dos componentes envolvidos na conformação da peça 14768; b) Posição final (final da simulação)

O diagrama de rotura triaxial (Figura 149) aponta para um estado de tensão ao longo da peça considerado seguro, pois todos os pontos se encontram abaixo da curva limite de conformação, inclusive nos locais onde se observou fissuras durante o processo de conformação, cujo coeficiente de rotura triaxial é igual a 57 e 50 (Figura 150). Assim sendo, estes resultados não representam o que acontece na realidade. A distribuição da tensão equivalente de von Mises, por sua vez, pode ser observada na Figura 151, onde se encontram assinalados dois pontos suscetíveis de fissuração.

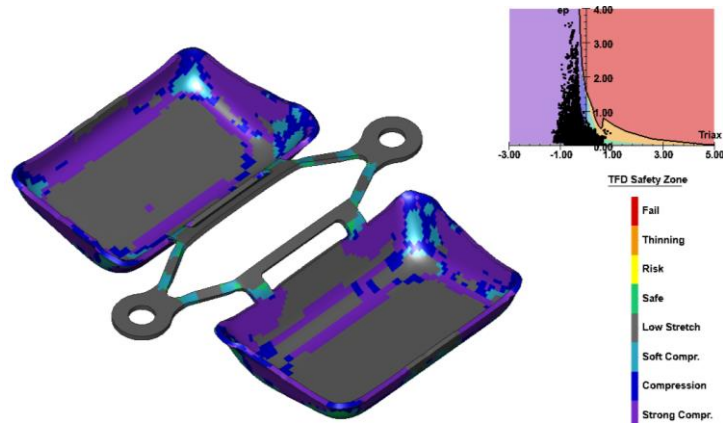


Figura 149 - Diagrama de rotura triaxial da peça 14768



Figura 150 - Valores do coeficiente de rotura triaxial da peça 14768

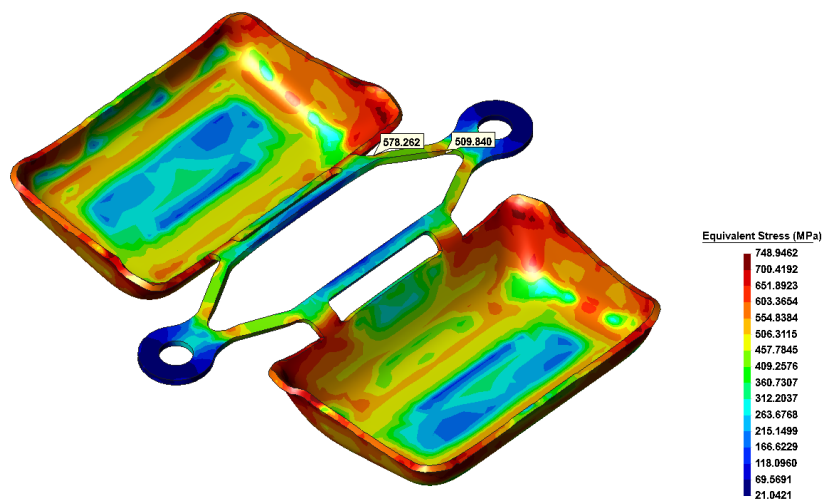


Figura 151 - Tensão equivalente de von Mises instalada na peça 14768

Ainda que a zona crítica da peça se localize na gama verde da legenda – zona segura – durante a estampagem acontecem fissuras. Isto significa que é necessária uma análise minuciosa aos fenómenos que acontecem durante a deformação da chapa, para perceber e identificar casos de potencial risco.

A análise das deformações principais  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  e  $\epsilon_3$ , apresentadas na Figura 152, Figura 153 e Figura 154, respetivamente, revela que a deformação maior  $\epsilon_1$  apresenta o seu valor mais elevado precisamente nos locais onde a banda fissura. Apesar de a relação entre as deformações principais não ser suficiente para atingir o limite de rotura (pois esta relação localiza-se abaixo da CLRT), o valor de  $\epsilon_1$  pode ser crítico. A deformação plástica equivalente nestes locais atinge o valor máximo de 0,44, como se constata na Figura 155. Este valor é 15,87% inferior ao valor da deformação plástica equivalente no momento de rotura para o ensaio de flexão do material CR340LA, que é de 0,523 (como se observou na Figura 133).

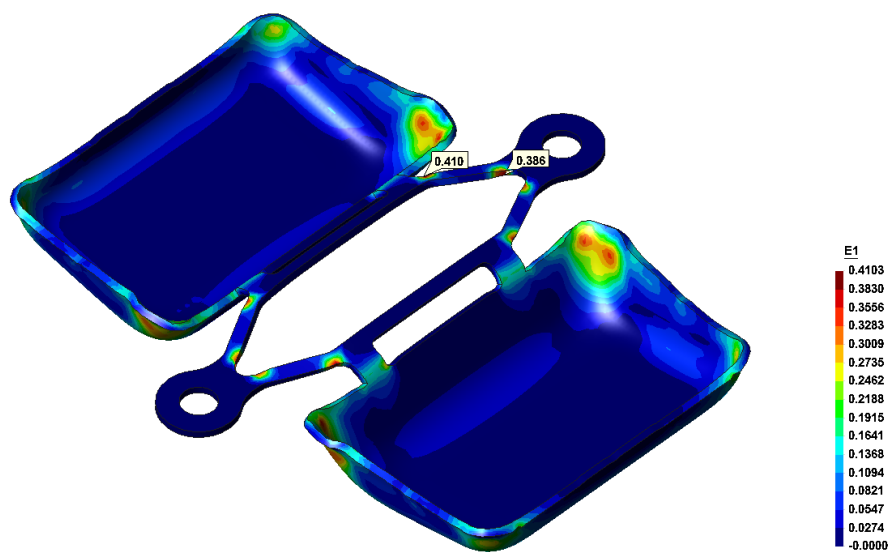


Figura 152 - Valor de  $\epsilon_1$  no local de rotura da peça 14768

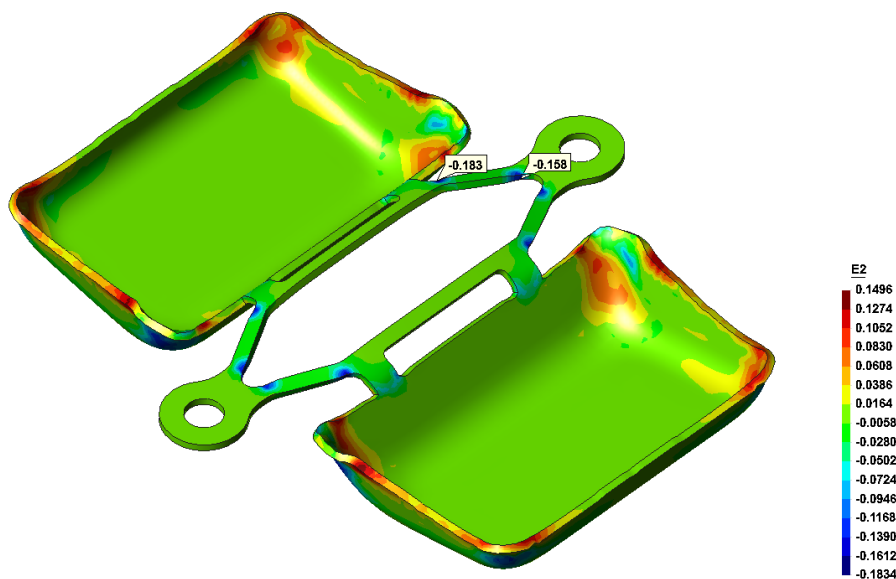


Figura 153 - Valor de  $\epsilon_2$  no local de rotura da peça 14768

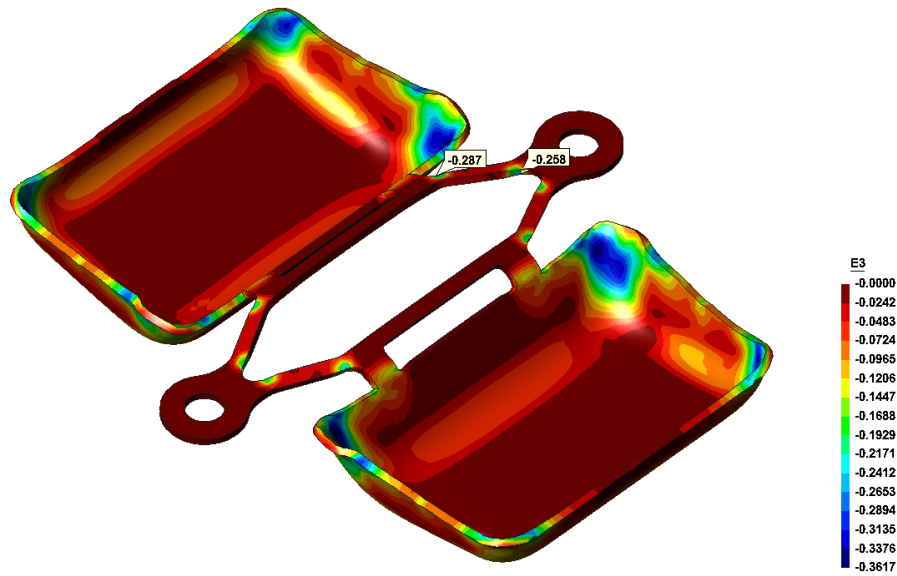


Figura 154 - Valor de  $\epsilon_3$  no local de rotura da peça 14768

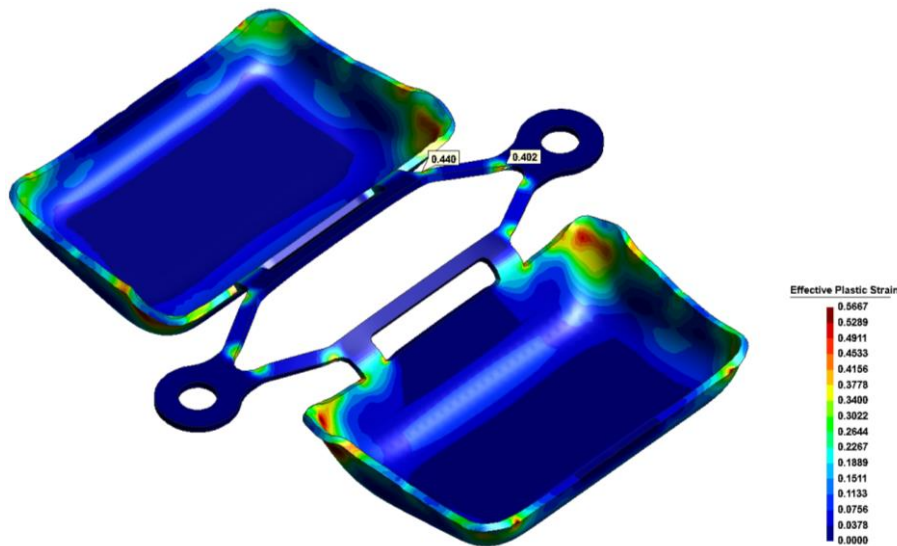


Figura 155 - Valor de deformação plástica equivalente no local de rotura da peça 14768

Existem outros fatores cuja importância não é tão óbvia mas, no entanto, podem explicar a discrepância de comportamento entre os resultados experimentais e a análise numérica. Em primeiro lugar, é de salientar a redução de espessura percentual que a peça sofre nos locais onde se verificaram fissuras durante o processo de conformação, demonstrada na Figura 156. Em segundo lugar, os vetores da deformação principal  $\epsilon_1$  (Figura 157) e os vetores de esforço de tração/compressão (Figura 158), demonstram que, à semelhança dos modos de rotura anteriores, ocorre tração na superfície externa do raio de curvatura.

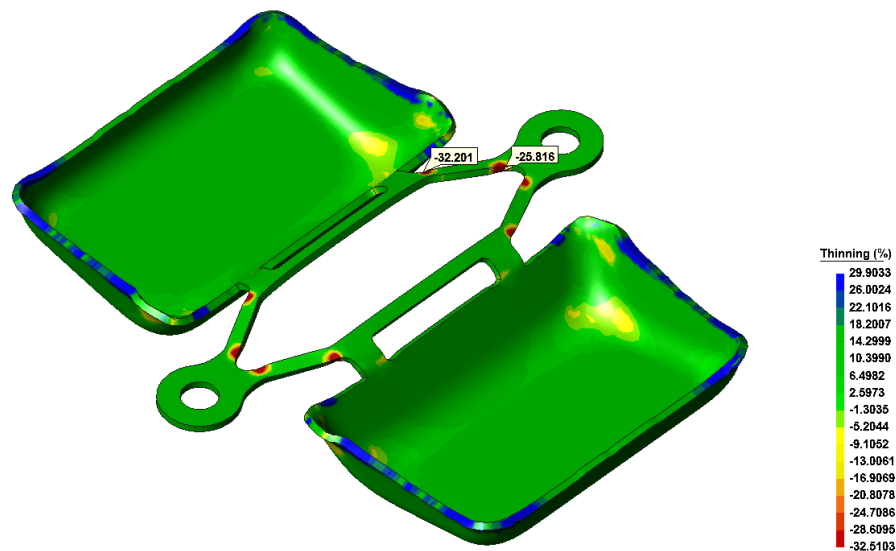


Figura 156 - Redução percentual de espessura nos locais de rotura da peça 14768

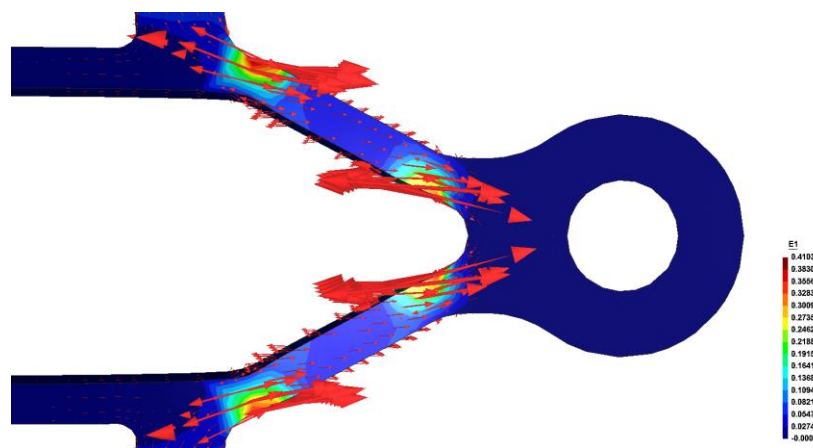


Figura 157 - Representação vetorial e quantitativa de  $\epsilon_1$  nos locais de rotura da peça 14768

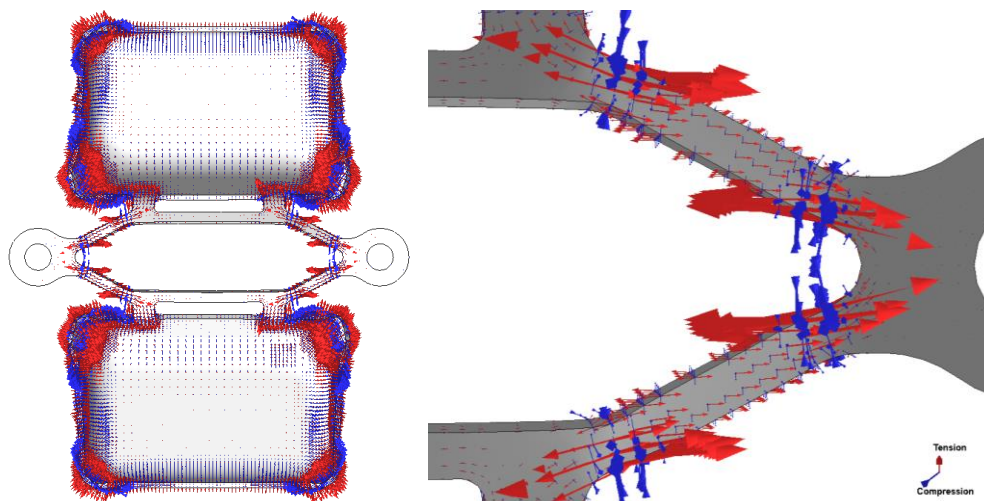


Figura 158 - Representação vetorial das solicitações ao longo da peça 14768

Posto isto, pode-se concluir que a junção de todos estes fatores é a razão pela qual o material entra em rotura. Verifica-se uma elevada deformação e redução de espessura que contribuem para a fragilização deste local. Para além disso, esforços de tração nas superfícies externas dos raios de

curvatura arestas, como já mencionado, contribuem significativamente para o aparecimento de fissuras nas peças durante a flexão. Aliando estes fatores a um possível acabamento superficial pobre devido à existência de rebarbas (que não é representado pelo *software*), uma vez que esta geometria é criada por um processo de corte em etapas anteriores, reúnem-se as condições para o aparecimento de fissuras.

Para solucionar a fissuração na zona central da peça 14768, o objetivo passou por fazer uma alteração geométrica do contorno (ou *trim*) da matéria-prima que permitisse à KIRCHHOFF produzir com o material original, imposto pelo cliente, sem que ocorra fissuras na banda metálica. A alteração tem em vista uniformizar a deformação do aço, para evitar a existência de zonas fragilizadas, principalmente nas extremidades da aba central.

A alteração do projeto é feita às operações que antecedem a OP 70, o que significa que esta operação e os componentes que a constituem se mantêm. Considera-se assim a alteração da geometria da banda metálica, nomeadamente a ligação das bossas à aba central. A proposta de alteração consiste em substituir a ligação central, que originalmente era feita em dois locais (Figura 159(a)), numa ligação única central (como se observa na Figura 159(b)), de forma mitigar o problema identificado anteriormente, evitando a concentração de esforços perto dos furos de pilotagem. Esta modificação é feita no corte da banda que acontece nas operações cinco e seis (OP 50 e OP 60), através da modificação do perímetro de corte dos punções envolvidos no processo (e respetivas matrizes). As dimensões do *blank* original e otimizado estão no anexo 4 e anexo 5, respetivamente.

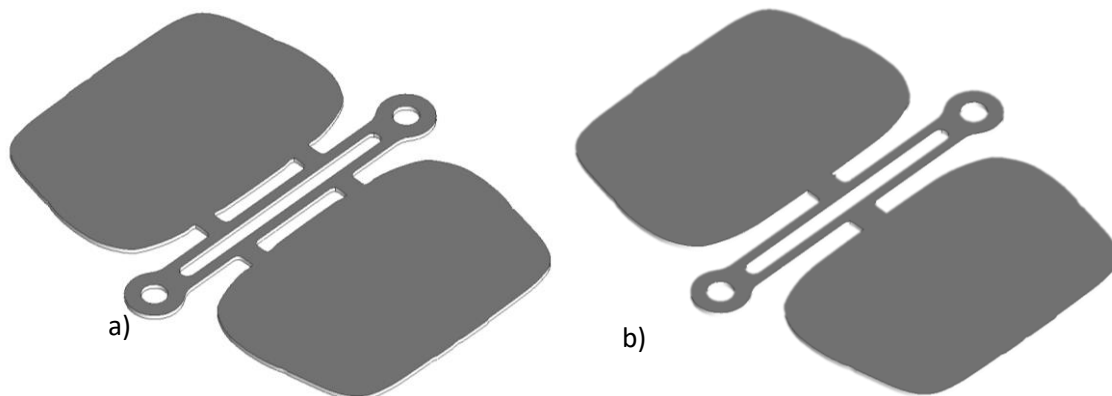


Figura 159 - a) *Trim* original da peça 14768; b) Proposta de alteração ao *trim* da peça 14768

Assim, as condições da simulação numérica mantêm-se iguais, com exceção da malha da chapa devido à modificação da geometria. A nova malha de elementos finitos é exposta na Figura 160, sendo que foi construída seguindo os mesmos princípios da malha de elementos finitos do *blank* original e possui 27512 nós.

Os resultados da segunda simulação, a nível da tensão equivalente de von Mises (Figura 161) e diagrama de rotura triaxial (Figura 162) são bastante similares ao estudo inicial e, tal como no primeiro caso, aparentemente satisfatórios. Contudo, o coeficiente de rotura triaxial na aba central desceu significativamente, atingido agora valores de 14 (Figura 163).

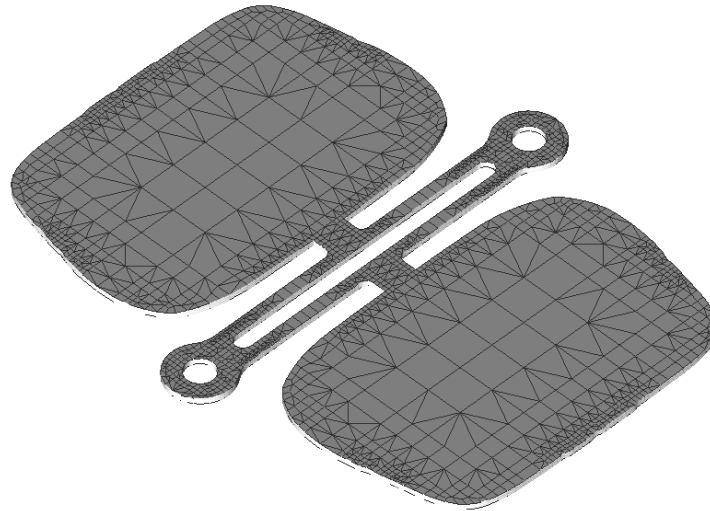


Figura 160 - Malha de elementos finitos do novo *blank* da peça 14768

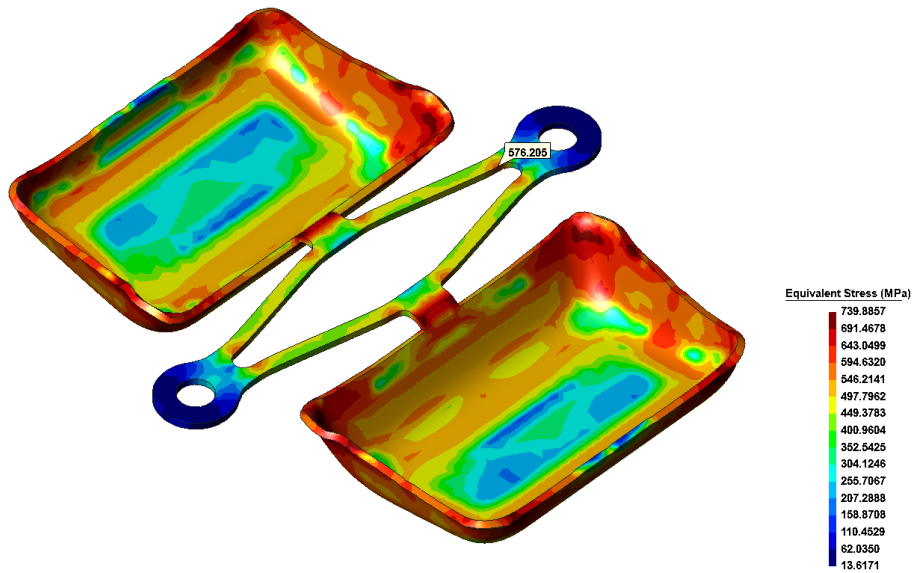


Figura 161 - Resultados da tensão de von Mises da peça 14768 após alteração

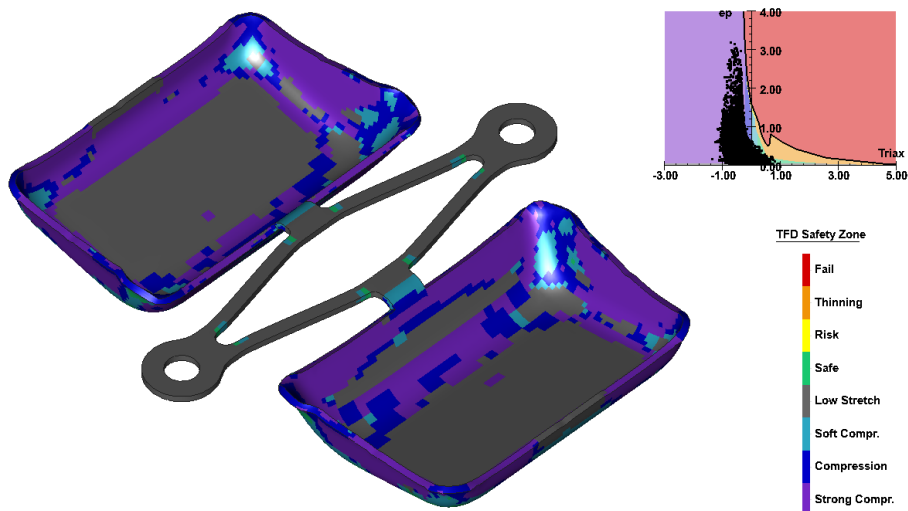


Figura 162 - Diagrama de rotura triaxial da peça 14768 após alteração

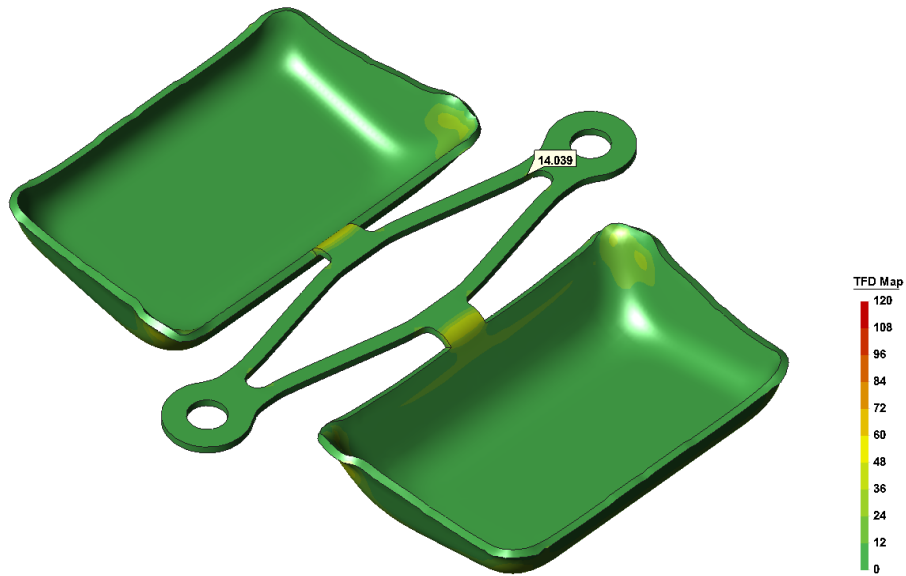


Figura 163 - Resultados do coeficiente de rotura triaxial da peça 14768 após alteração

Analisando os parâmetros que foram identificados como sendo de risco, existe uma diferença notória. A deformação plástica equivalente da banda na zona central é muito menor, atingindo o valor máximo na aba central de 0,119 (Figura 164), o que revela um alívio dos esforços que estavam localizados na ligação central e levava à fissuração (Figura 165). A diferença, por defeito, da deformação plástica equivalente em comparação ao valor registado no ensaio de dobragem foi de 77,25%, o que indica que o material está longe de atingir o seu limite de conformação.

Como resultado, a redução da espessura reduziu também significativamente (Figura 166). Estes indicadores apontam para que esta alteração seja uma solução viável, já que se verifica uma melhoria significativa dos locais que anteriormente apresentavam fragilidades evidentes.

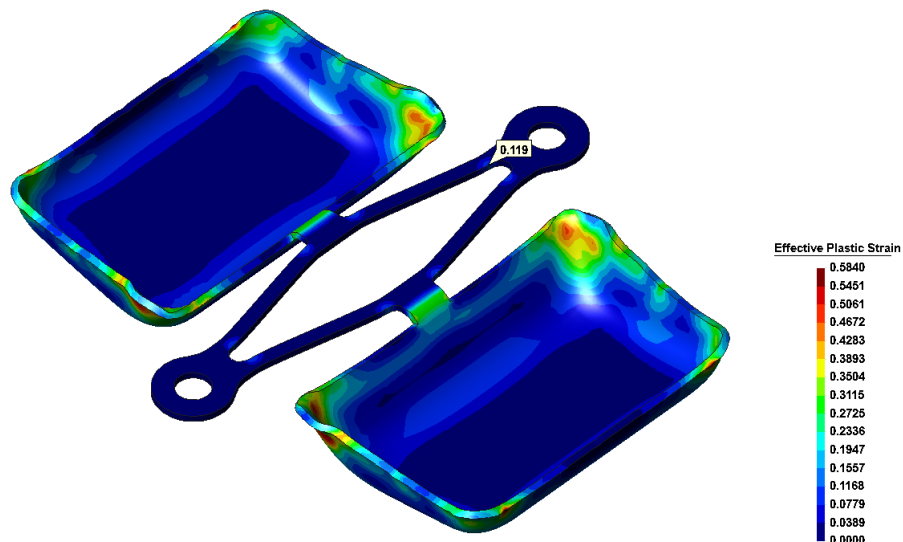


Figura 164 - Resultados da deformação plástica equivalente da peça 14768 após alteração

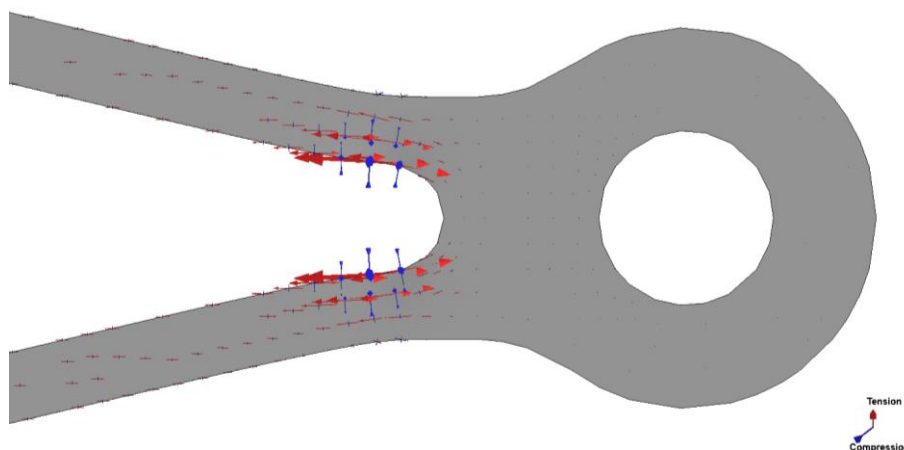


Figura 165 - Representação dos esforços resultantes na aba central após a alteração

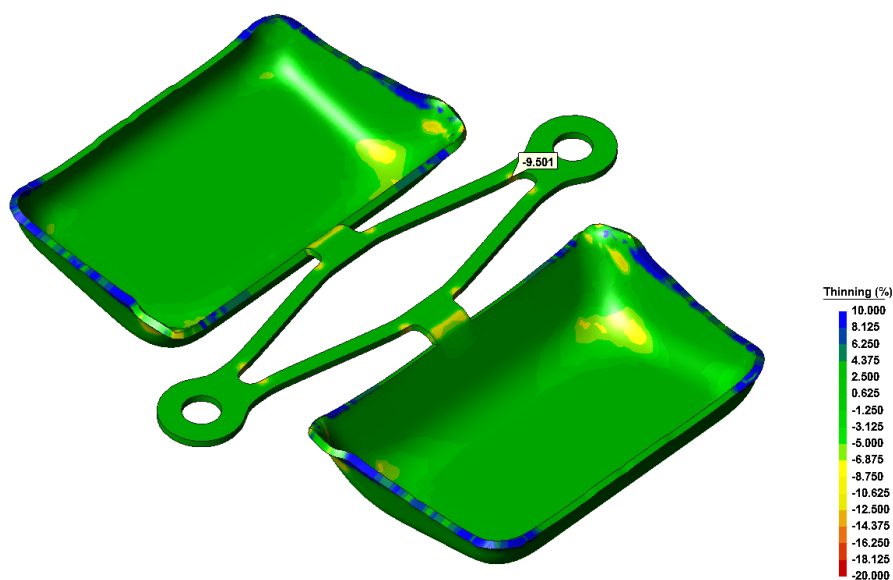


Figura 166 - Resultados da redução percentual de espessura da peça 14768 após alteração

### 3.4.6. Validação do modelo numérico

As soluções propostas nos capítulos 3.4.5.2 e 3.4.5.3 foram desenvolvidas e ensaiadas, seguindo as condições enumeradas no 3.3.1.6. A solução passa então por retificar a geometria dos punções e matrizes envolvidos nas respetivas etapas de conformação de forma a, no caso da peça 16365, obter um contorno otimizado através do aumento dos raios de curvatura e, no caso da peça 14768, alterar o perímetro de corte da ligação central. Após a retificação dos componentes, as ferramentas são montadas, como demonstrado nas Figura 167 e Figura 168, e prossegue-se com os ensaios de estampagem.

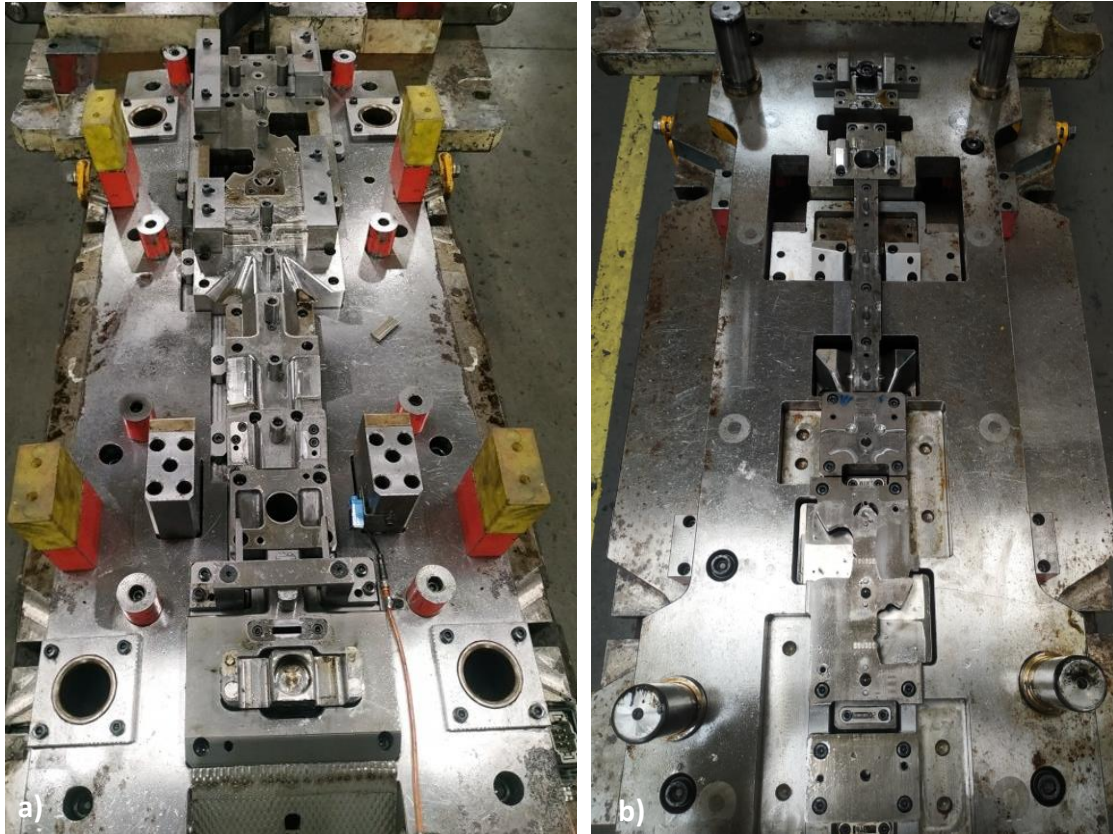


Figura 167 - Ferramenta da peça 16365 após a retificação para otimizar o *trim*: a) matrizes; b) punções

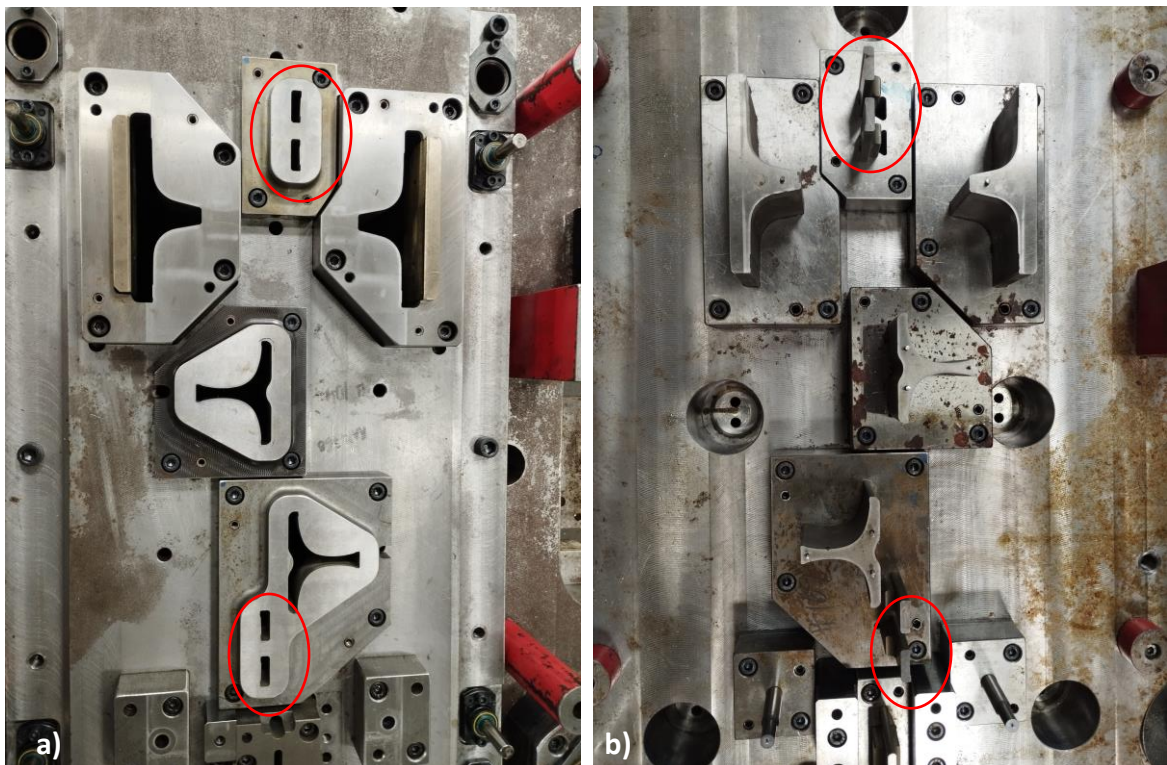


Figura 168 - Alteração da ferramenta da peça 14768 para efetuar o corte central: a) matrizes; b) punções

O procedimento de ensaio adotado foi o procedimento usualmente utilizado pela KIRCHHOFF durante a testagem do fabrico de um novo componente ou testagem de modificação às ferramentas. Assim, é realizada uma produção total de 60 componentes (de cada peça), sendo que

os primeiros 10 não são considerados (são sucitados) devido ao ajuste e calibração das ferramentas e devido ao desgaste inicial que pode ocorrer nas primeiras pancadas da prensa. Enquanto a produção acontece, a saída de peças é acompanhada para examinar cada peça e identificar fissuras, no caso de existirem. Desta forma, o resultado dos dois ensaios foi totalmente satisfatório, pois em nenhuma peça ocorreu fissuras. O aspeto da peça 16365 e da peça 14768 resultantes destes ensaios é apresentado na Figura 169 e Figura 170, respetivamente, onde se encontra assinalado as zonas onde anteriormente acontecia fissuração.



Figura 169 - Peça 16365 após a modificação proposta

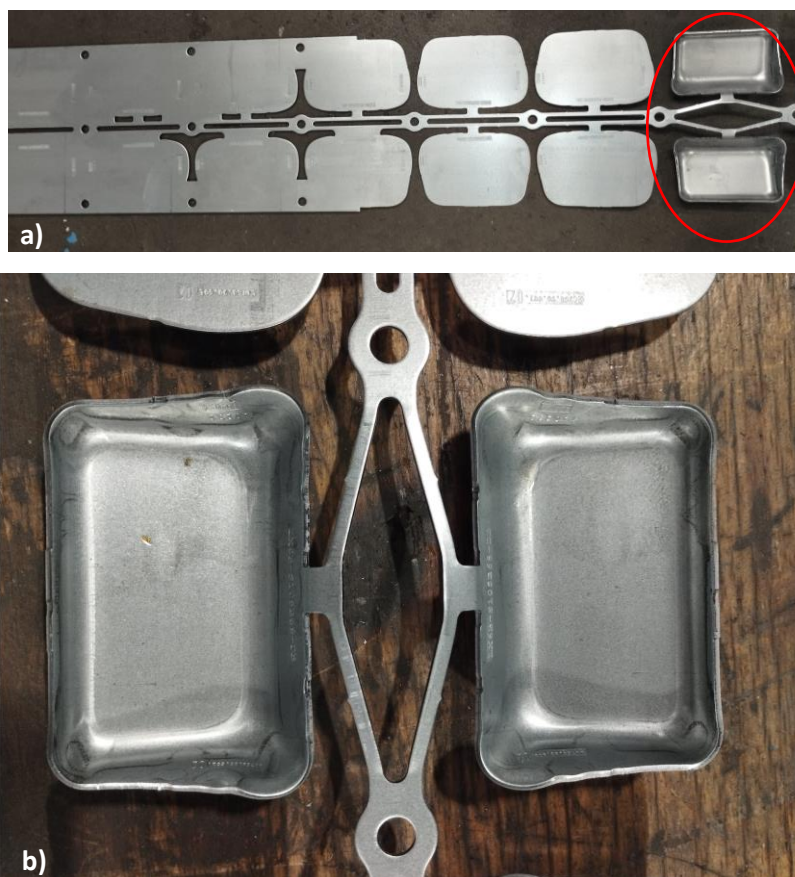


Figura 170 - Peça 14768 após a modificação proposta: a) banda metálica; b) OP 70

Assim sendo, considerando a ausência de qualquer fissuras em ambas as peças após a implementação das modificações, é possível afirmar que as soluções propostas resolveram com sucesso o problema. A utilização da simulação numérica desempenhou um papel crucial neste resultado ao oferecer uma análise de todos os fatores que sucedem durante a conformação da matéria-prima. Pode-se assim comprovar a eficácia da simulação numérica como ferramenta de engenharia.

### 3.4.7. Seleção das condições ótimas de estampagem

Do ponto de vista dos parâmetros do processo de estampagem, o estudo realizado no capítulo 3.3.4 permite concluir que a folga ideal de estampagem deve ter um valor intermédio, isto é, quer a utilização de folga insuficiente, quer a utilização de folga excessiva, favorecem o aparecimento de rebarbas no perímetro de corte da chapa metálica. No material estudado, o DP800, este valor foi 10% da espessura da chapa. Para além disso, para o melhor desempenho dos materiais é ideal o posicionamento da aresta da matéria-prima com rebarba do lado que contacta com o punção. Deste modo, as rebarbas não ficam localizadas na região interna da dobra e não estão sujeitas aos esforços de tração. Quando isto não é possível, recomenda-se a aplicação de chanfros nas arestas de corte que possuem rebarbas, para eliminar as rebarbas que facilitam e promovem a propagação de fissuras.

No que diz respeito aos casos de estudo analisados, é possível afirmar que as alterações descritas no capítulo 3.4.5.2 e 3.4.5.3 constituem as condições ótimas para o *trim* da chapa metálica. Na peça 16365 foi necessário aumentar os raios de curvatura para melhorar a capacidade de conformação local. Na peça 14768 alterou-se a configuração da ligação central de modo a reduzir a deformação e a concentração de esforços perto dos furos de pilotagem. O *trim* otimizado para as duas peças pode ser observado na Figura 171(a) e Figura 171(b), respetivamente.

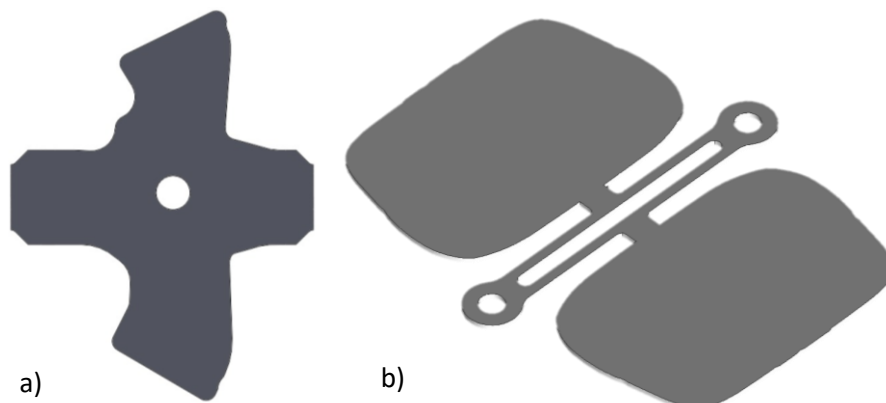


Figura 171 - *Trim* otimizado: a) Peça 16365; b) Peça 14768

É importante salientar que, enquanto na peça 16365 apenas houve a necessidade de retificar o perímetro dos punções e das matrizes para que estes componentes estejam em concordância com o raio de curvatura otimizado, na peça 14768 foi necessário fazer uma alteração dos componentes utilizados. Para obter o *trim* otimizado utilizam-se dois punções, cujo distanciamento determina a área de ligação da matéria-prima à aba central (Figura 172). As cavidades das matrizes, por sua vez, estão em conformidade com o novo perímetro dos punções, como se observa na Figura 173(a) e Figura 173(b).

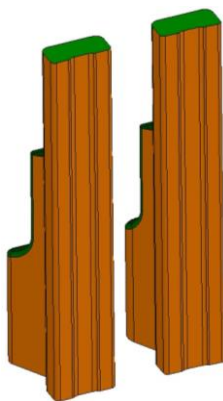


Figura 172 - Alteração aos punções de corte

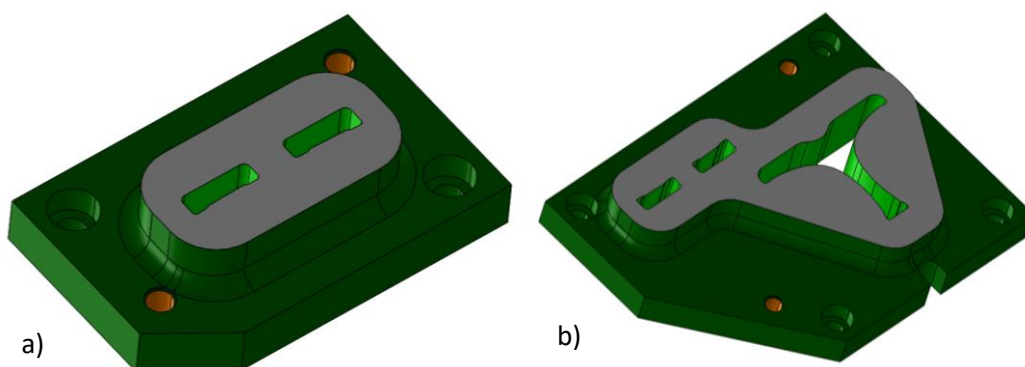


Figura 173 - Matrizes alteradas: a) primeira operação de corte; b) segunda operação de corte

### 3.4.8. Análise de custos

Neste capítulo é realizada uma análise de custos decorrente das soluções implementadas no âmbito deste trabalho. Foram utilizadas duas abordagens diferentes, pois a frequência de fissuras nos dois casos de estudo foi completamente diferente. Na peça 16365, durante as várias produções, a percentagem de componentes com defeitos foi variável (variando de forma irregular consoante o lote de material utilizado), obrigando a um processo de triagem para validar/sucatar todos os componentes fabricados. No caso da peça 14768, a percentagem de fissuras e de componentes sucitados foi total, obrigando a bloquear as bobines em *stock* deste material para evitar desperdícios.

Assim, começando pela peça 16365, começou-se por contabilizar o número de peças sucitadas durante o ano de 2022, acedendo aos registos de triagem da KIRCHHOFF. Este valor equivale a 15851 peças. Para além disso, o departamento de contabilidade da empresa avalia o custo de cada componente fabricado com base no custo de matéria-prima, custos de mão de obra direta e indireta, custos de equipamento, custos de energia, custos de qualidade, custos de logística, entre outros, resultando no valor de 0,3567 €. Multiplicando estes dois valores obtêm-se o prejuízo total provocado pelos defeitos deste componente:

$$15851 \times 0,3567 = 5.654,05 \text{ €} \quad (35)$$

Em relação aos custos da peça 14768, o processo passou por contabilizar o valor monetário de material retido e que, não sendo utilizado, seria desperdiçado. O material em questão diz respeito a cinco arcos de 930 kg. Novamente com o auxílio do departamento de contabilidade foi possível

obter o preço de aquisição do material por kg, que corresponde a 1,125 €. Deste modo, o valor total em material que foi possível resgatar equivale a:

$$930 \times 5 \times 1,125 = 5.231,25 \text{ €} \quad (36)$$

Com base na experiência da KIRCHHOFF, estas quebras de produção acontecem, de modo grosseiro, cerca de duas vezes por ano. Se for considerado o tempo médio de produção de componentes para automóvel, que equivale a cerca de 6 anos (ao fim do qual acontece troca de modelo/atualização de componentes), as soluções implementadas podem-se traduzir na poupança de valores relativos à produção das peças 16365 e 14768 de, respetivamente:

$$(5.654,05 \times 2) \times 6 = 67.848,60 \text{ €} \quad (37)$$

$$(5.231,25 \times 2) \times 6 = 62.775,00 \text{ €} \quad (38)$$

## 4. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

### 4.1. Conclusões

A indústria automóvel tem vindo a evoluir significativamente nos últimos anos. Constatou-se que os fabricantes foram obrigados a inovar e implementar novos materiais, entre os quais os AHSS, para se manterem competitivos. Estes aços possuem excelentes propriedades mecânicas e proporcionam segurança às estruturas automóveis, enquanto o peso das mesmas permanece reduzido. Os AHSS são aços desenvolvidos para aprimorar as propriedades de resistência, ductilidade, tenacidade e resistência à fadiga. No entanto, verificou-se que os aços de alto limite elástico apresentam algumas limitações no que diz respeito à capacidade de conformação. A realização deste trabalho permitiu concluir que o processo de estampagem é de elevada complexidade e requer elevada compreensão dos fenómenos que acontecem em conformação plástica. Este processo depende de diferentes variáveis, como temperatura, espessura da chapa, folga de corte, atrito, geometria, força de estampagem, raio do punção, raio da matriz, acabamento superficial, orientação do material, entre outros. Estas variáveis, em conjunto com a difícil conformabilidade dos AHSS, leva por vezes ao aparecimento de defeitos inesperados.

Os ensaios experimentais de dobragem que foram realizados seguindo a técnica DoE ajudaram a compreender a forma como alguns destes fatores têm grande influência no desempenho de um aço quando sujeito a flexão. O plano de experiências estuda o efeito da folga de corte, orientação da matéria-prima, chanfro e estado de superfície na variável de resposta, que corresponde ao ângulo de dobragem atingido por um provete submetido a ensaio de dobragem. A matriz de ensaios obtida foi uma matriz L12, constituída por 3 fatores a 3 níveis e 1 fator (estado de superfície) a 2 níveis. É ainda realizado um novo estudo DoE de confirmação dos resultados, no qual se fixou o estado de superfície no melhor nível e se estudou em detalhe a influência da folga de corte e da orientação da matéria-prima. Assim, obteve-se uma matriz L4, composta por 2 fatores a 2 níveis. Deste modo, ficou evidente que o estado de superfície pode afetar negativamente o comportamento do material se existirem rebarbas na face que suporta esforços de tração. Estas rebarbas surgem naturalmente no decorrer de processos de corte em ferramenta e, deste modo, podem contribuir para o aparecimento de fissuras em estampagens posteriores. Uma solução comum na indústria é aplicar chanfros nestas arestas fragilizadas de modo a eliminar as rebarbas e dificultar a propagação de fissuras. No entanto, neste estudo os efeitos dos chanfros não foram significativos. No que diz respeito à folga de corte, concluiu-se que o ideal é usar uma folga de corte intermédia, pois os efeitos de utilizar folga excessiva são os mesmos que utilizar folga insuficiente, originando rebarbas na face de corte que, como já se constatou, são prejudiciais ao desempenho dos materiais. A orientação da matéria-prima que apresentou melhores resultados corresponde à orientação de 45° (inclusive no segundo plano de experiências, de confirmação de resultados), ainda que este resultado vá contra os fundamentos presentes na bibliografia. Contudo, o facto de ter sido aplicado um intervalo de confiança de 90% na análise DoE e a amostragem ser reduzida, significa que há possibilidade de uma imprecisão dos resultados.

Os ensaios de tração realizados a diferentes amostras do mesmo material permitem concluir que a resistência mecânica e a tensão de cedência são substancialmente diferentes entre lotes. A análise ANOVA efetuada permitiu detetar uma diferença dos valores entre os diferentes lotes, com um

intervalo de confiança de 95%. No entanto, este não é motivo suficiente para o aparecimento de fissuras, uma vez que todas as amostras analisadas (dos três materiais) se encontraram dentro das especificações técnicas, sendo que os coeficientes de variação médios de  $\sigma_r$ ,  $\sigma_e$  e  $A$  variaram entre 0,25%-0,56%, 0,49%-0,63%, e 2,51%-4,85%, respetivamente. Estas ligeiras flutuações são intrínsecas a qualquer processo de fabrico e são influenciadas por diversos fatores, como a composição química do material, a temperatura de tratamento térmico e outros parâmetros de processamento.

No entanto, pode-se constatar que, mesmo que os materiais cumpram os requisitos relativos às propriedades mecânicas e à composição química, a qualidade da sua microestrutura é fundamental para que ele seja apto para processos de conformação plástica. Como demonstrado através da análise metalográfica efetuada no capítulo 3.3.5.4 a duas amostras de HR700LA, ainda que as propriedades mecânicas destes lotes sejam semelhantes, existe uma clara diferença entre as suas microestruturas. A tradicional caracterização através de ensaios de tração não permite avaliar parâmetros como inclusões, morfologia e dimensão de grão, que influenciam o comportamento do material. Desta forma, conclui-se que o facto de um material respeitar as características da sua família não é suficiente para que este apresente um desempenho competente.

Para além disso estudou-se de que forma a utilização de *softwares* de simulação numérica pode ajudar na previsão e deteção de defeitos, quando aplicados a processos de conformação plástica. Estes *softwares* revelam-se ferramentas úteis e de crescente utilização pois oferecem inúmeras vantagens à indústria e a sua aplicação ao estudo da estampagem é de particular interesse pois esta indústria revela-se ainda bastante dependente de ciclos de tentativa e erro no início de um processo de produção. Apesar do crescente desenvolvimento da modelação numérica de conformação plástica, continua a ser difícil prever com precisão o comportamento plástico de um material a deformar. Uma das razões para estas dificuldades de precisão é a dificuldade em definir fatores práticos intrínsecos dos materiais e relacionados com o processo, como a microestrutura, estado de superfície, orientação do material, folga de corte, entre outros.

No entanto, o Stampack demonstrou-se bastante eficaz na prevenção e resolução de defeitos que surgem durante a estampagem. Através do vasto conjunto de recursos que o Stampack oferece, é possível reconhecer a eventual rotura do material e fatores que são de risco. Após as análises efetuadas, a geometria das peças foi otimizada e os ensaios de estampagem comprovaram a veracidade dos resultados numéricos, registando-se uma taxa de aproveitamento dos componentes produzidos de 100%.

No estudo numérico, foi feita uma tentativa de utilizar a deformação plástica equivalente no instante de rotura, obtida através da simulação numérica dos ensaios de dobragem para cada material (instante esse validado pelos ensaios experimentais), como forma de identificar se estes materiais atingem o seu limite de deformação em processos práticos de estampagem. No entanto, a simulação numérica das peças 16365 e 14768 revelou que, para os aços HR700LA e CR340LA, a rotura acontece para valores de deformação plástica equivalente de 6,16% e 15,87% inferiores ao verificado nos ensaios de dobragem, respetivamente. Contudo, esta ligeira diferença é aceitável uma vez que pode ser explicada pelo facto de os processos de estampagem envolverem fenómenos mais complexos, nos quais as deformações são significativas ao longo das três direções principais e pelo facto de, em situações práticas de estampagem, a matéria-prima muitas vezes apresentar

defeitos (a nível de microestrutura ou de estado de superfície) que favorecem a rotura dos materiais.

Em suma, os esforços empregues neste trabalho visaram expandir não só o conhecimento sobre as nuances microestruturais e fenómenos físicos subjacentes, mas também contribuir para o desenvolvimento de métodos de análise e previsão de defeitos em processos de estampagem. Combinando os conhecimentos das duas abordagens, procurou-se estabelecer uma ponte sólida entre as observações empíricas fornecidas pelos ensaios metalográficos e as previsões teóricas das simulações numéricas.

## **4.2. Propostas de trabalhos futuros**

Em trabalhos futuros será interessante aplicar o desenho de experiências a outros materiais, para perceber se diferentes materiais apresentam diferentes desempenhos face aos fatores selecionados. Assim, será oportuno perceber se diferentes famílias de aço apresentam diferentes condições ótimas de estampagem. No seguimento deste estudo, é importante avaliar que outros fatores, que não foram considerados, podem ter impacto no desempenho do material. Deste modo, pode ser repetido o estudo para tentar explicar os 22,5% não considerados no estudo DoE. Para além disso, num trabalho futuro, é ideal que a amostragem seja ampliada para aumentar o grau de confiança da experiência.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. C. Miranda, *Diagnóstico da Indústria Automóvel em Portugal*. Lisboa: INTELI, 2005.
- [2] C. Chandra e A. K. Kamrani, «Knowledge management for consumer-focused product design», *J Intell Manuf*, vol. 14, n. 6, pp. 557–580, 2003.
- [3] G. Michalos, S. Makris, N. Papakostas, D. Mourtzis, e G. Chryssolouris, «Automotive assembly technologies review: challenges and outlook for a flexible and adaptive approach», *CIRP J Manuf Sci Technol*, vol. 2, n. 2, pp. 81–91, 2010.
- [4] J. Krüger, T. K. Lien, e A. Verl, «Cooperation of human and machines in assembly lines», *CIRP annals*, vol. 58, n. 2, pp. 628–646, 2009.
- [5] OICA (2022), «Production statistics», OICA. Acedido: 14 de Novembro de 2022. [Em linha]. Disponível em: <https://www.oica.net/production-statistics/>
- [6] K. Natarajan, «Coronavirus: impact of the pandemic on automobile industry - an overview», 2020, pp. 65–74. doi: 10.5281/zenodo.6330795.
- [7] L. P. Féria, «A história do sector automóvel em Portugal (1895-1995)», *Documento de Trabalho*, pp. 19–99, 1999.
- [8] AFIA (2022), «Situação dos Fabricantes para a Indústria Automóvel», AFIA. Acedido: 14 de Novembro de 2022. [Em linha]. Disponível em: <https://afia.pt/estatisticas/>
- [9] Gekatex Group, «Automotive process». Acedido: 4 de Dezembro de 2022. [Em linha]. Disponível em: <https://www.gekatex.com/en/news/News/automotive-process>
- [10] A. Pereira, A. Ribeiro, B. Maia, I. Neves, e P. Moreira, «Materiais usados na concepção de um automóvel - Materiais metálicos e respectivos componentes», FEUP, Porto, 2010.
- [11] Dawang Steel Casting (2022), «O que é Casting?», Dawang Steel Casting. Acedido: 4 de Dezembro de 2022. [Em linha]. Disponível em: <https://dawangcasting.com/pt/blog/what-is-casting/>
- [12] T. P. Hovorun, K. V. Berladir, V. I. Pererva, S. G. Rudenko, e A. I. Martynov, «Modern materials for automotive industry», *Journal of Engineering Sciences*, vol. 4, n. 2, pp. 8–18, 2017.
- [13] S. Keeler e M. Kirnchi, «Advanced High-Strength Steels Application Guidelines V6; WorldAutoSteel», *World Steel Association: Brussels, Belgium*, 2017.
- [14] R. J. Orsato e P. Wells, «U-turn: the rise and demise of the automobile industry», *J Clean Prod*, vol. 15, n. 11–12, pp. 994–1006, 2007.
- [15] D. Andre *et al.*, «Future generations of cathode materials: an automotive industry perspective», *J Mater Chem A Mater*, vol. 3, n. 13, pp. 6709–6732, 2015.
- [16] Q. Zhang *et al.*, «The battery technologies that could power future electric mobility», *Cell Rep Phys Sci*, vol. 4, n. 7, p. 101503, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2023.101503>.
- [17] V. Chiaverini, *Tecnologia Mecânica*, 2.ª ed., vol. II. São Paulo: McGraw Hill, 1986.
- [18] S. Gatea, H. Ou, e G. McCartney, «Review on the influence of process parameters in incremental sheet forming», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 87, n. 1–4, pp. 479–499, Out. 2016, doi: 10.1007/s00170-016-8426-6.
- [19] Coemjr (2021), «Conformação a frio ou quente? Qual devo escolher?» Acedido: 6 de Dezembro de 2022. [Em linha]. Disponível em: <https://coemjr.com.br/conformacao/>
- [20] Z. Gronostajski *et al.*, «Recent development trends in metal forming», *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 19, n. 3, pp. 898–941, 2019.
- [21] G. Schuler, «Metal forming handbook». Springer, Berlin, 1998.
- [22] O. M. Ikumapayi, S. A. Afolalu, J. F. Kayode, R. A. Kazeem, e S. Akande, «A concise overview of deep drawing in the metal forming operation», *Mater Today Proc*, vol. 62, n. 6, pp. 3233–3238, 2022.
- [23] J. Hu, Z. Marciniak, e J. Duncan, *Mechanics of sheet metal forming*. Elsevier, 2002.
- [24] W. F. Hosford e R. M. Caddell, *Metal forming: mechanics and metallurgy*, 4.ª ed. Cambridge university press, 2011.

- [25] P. Chen e M. Koc, «Simulation of springback variation in forming of advanced high strength steels», *J Mater Process Technol*, vol. 190, n. 1–3, pp. 189–198, 2007.
- [26] J. Rodrigues e P. Martins, *Tecnologia mecânica: tecnologia da deformação plástica*, 2.<sup>a</sup> ed., vol. 1. Escolar Editora, 2010.
- [27] W. T. Lankford, «New criteria for predicting the press performance of deep drawing sheets», *Trans. ASM*, vol. 42, pp. 1197–1232, 1950.
- [28] H. Lundh, P.-A. Bustad, e B. Carlsson, *Sheet Steel Forming Handbook: Size Shearing and Plastic Forming*. SSAB, 1998.
- [29] I.-I. Ailinei, S.-V. Galatanu, e L. Marsavina, «Influence of anisotropy on the cold bending of S600MC sheet metal», *Eng Fail Anal*, vol. 137, p. 106206, 2022.
- [30] A. D. Santos, J. F. Duarte, e A. B. da Rocha, *Tecnologia de Embutidura-Princípios e Aplicações*. INEGI, 2005.
- [31] K. Lange, «Forming handbook», *Ed. McGraw Hill and SME, New York*, 1993.
- [32] S. P. Keeler, «Determination of Forming Limits in Automotive Stampings», *SAE Transactions*, vol. 74, n. 1, pp. 1–9, 1966, [Em linha]. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/44554191>
- [33] G. M. Goodwin, «Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop», *SAE Transactions*, vol. 77, n. 1, pp. 380–387, 1968, [Em linha]. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/44565070>
- [34] Q.-C. Hsu, «Comparison of different analysis models to measure plastic strains on sheet metal forming parts by digital image processing», *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 43, n. 5, pp. 515–521, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00241-9](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00241-9).
- [35] T. B. Stoughton, «A general forming limit criterion for sheet metal forming», *Int J Mech Sci*, vol. 42, n. 1, pp. 1–27, 2000.
- [36] J. Cao e M. Banu, «Opportunities and challenges in metal forming for lightweighting: review and future work», *J Manuf Sci Eng*, vol. 142, n. 11, p. 110813, 2020.
- [37] «Forming», WorldAutoSteel. Acedido: 6 de Janeiro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://ahssinsights.org/forming/>
- [38] G. F. BATALHA, «Introdução à Manufatura Mecânica», *Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*, 2003.
- [39] I. Suchy, *Handbook of die design*, II. McGraw-Hill Education, 2006.
- [40] H. Tschachtsch, *Metal forming practise: processes—machines—tools*. Springer, 2006.
- [41] SCHULER, «The entire world of metal forming». Acedido: 9 de Dezembro de 2022. [Em linha]. Disponível em: [https://www.schulergroup.com/major/download\\_center/broschueren\\_uebersichten/download\\_uebersichten/uebersicht\\_broschuere\\_produkte\\_blechumformung\\_e.pdf?shortcut=sheetforming](https://www.schulergroup.com/major/download_center/broschueren_uebersichten/download_uebersichten/uebersicht_broschuere_produkte_blechumformung_e.pdf?shortcut=sheetforming)
- [42] Y. Horie, «Aida digital servo former NC1, NS1-D series using direct driving», *Press Working*, vol. 44, n. 9, pp. 30–31, 2006.
- [43] «Ferramentas utilizadas no processo de estampagem». Acedido: 5 de Dezembro de 2022. [Em linha]. Disponível em: <https://ferramentasparacomponentesdecaladodesegu.weebly.com/ferramentas-utilizadas-no-processo-de-estampagem.html>
- [44] A. D. Santos, A. B. Da Rocha, e J. F. Duarte, *Tecnologia mecânica - Corte em ferramenta*, vol. Vol 1. INEGI, 2005.
- [45] «3 Tipos de Estampos Progressivo, Transfer e Tandem: Qual a diferença, como são e onde são usados?», Fit Tecnologia. Acedido: 5 de Dezembro de 2022. [Em linha]. Disponível em: <https://fit-tecnologia.com.br/tipos-estampos-progressivo-transfer-tandem/>
- [46] A. D. dos Santos, J. Ferreira Duarte, e A. Barata da Rocha, «Tecnologia da embutidura», *Coleção Tecnologia Mecânica*, vol. 1, 2005.
- [47] K. Lange, *Handbook of metal forming*, 1.<sup>a</sup> ed. Society of Manufacturing Engineers, 1995.

- [48] C. R. M. Silva, F. J. G. Silva, e R. M. Gouveia, «Investigations on the edge crack defect in Dual Phase steel stamping process», *Procedia Manuf*, vol. 17, pp. 737–745, 2018.
- [49] S. Huang, Y. Zhao, e C. He, «Shear fracture of advanced high strength steels», *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 21, n. 10, pp. 938–944, 2014.
- [50] P. R. Tiwari, A. Rathore, e M. G. Bodkhe, «Factors affecting the deep drawing process—A review», *Mater Today Proc*, vol. 56, pp. 2902–2908, 2022.
- [51] M. Ganapathy, N. Li, J. Lin, M. Abspoel, e D. Bhattacharjee, «Experimental investigation of a new low-temperature hot stamping process for boron steels», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 105, n. 1, pp. 669–682, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04172-5.
- [52] W. Ritz, «Über eine neue Methode zur Lösung gewisser Variationsprobleme der mathematischen Physik.», *ournal für die reine und angewandte Mathematik*, vol. 1909, n. 135, pp. 1–61, 1909.
- [53] M. D. de Campos, «O Método de Elementos Finitos aplicado à simulação numérica de escoamentos de fluidos». Universidade Federal do Mato Grosso, Dissertação de Mestrado, 2006.
- [54] R. W. Clough, «The finite element method in plane stress analysis», em *Proceedings of 2nd ASCE Conference on Electronic Computation, Pittsburgh Pa., Sept. 8 and 9, 1960*, 1960.
- [55] PJ, «Como o método dos Elementos Finitos te pode ajudar». Acedido: 10 de Dezembro de 2022. [Em linha]. Disponível em: <https://pjufmg.com.br/o-que-e-o-metodo-dos-elementos-finitos/>
- [56] Á. F. M. Azevedo, «Método dos elementos finitos», Porto, 2003. [Em linha]. Disponível em: <http://www.fe.up.pt/~alvaro>
- [57] R. Campilho, «Método de Elementos Finitos-Ferramentas para Análise Estrutural», *Júlia Guimarães, Publindústria Edições Técnicas, Porto*, 2012.
- [58] J. Fish e T. Belytschko, *A first course in finite elements*, vol. 1. John Wiley & Sons New York, 2007.
- [59] DASSAULT SYSTEMES, «Crashworthiness/safety simulation», DS. Acedido: 17 de Dezembro de 2022. [Em linha]. Disponível em: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/solutions/transportation-mobility/crashworthiness/>
- [60] J. P. Elm e J. E. Robert, «Integration of computer-aided design and finite element analysis tools in a small manufacturing enterprise», *CARNEGIE-MELLON UNIV PITTSBURGH PA SOFTWARE ENGINEERING INST*, 2003.
- [61] Lucas Carolo, «Best CAE Software of 2022 (2022)», *ALL3DP*. Acedido: 17 de Dezembro de 2022. [Em linha]. Disponível em: <https://all3dp.com/2/best-cae-software/>
- [62] A. D. dos Santos, «Tool descriptions and contact strategies used in the static explicit fem code ITAS3D for simulation of 3-D sheet metal forming processes», Tese de mestrado em Engenharia Mecânica, Riken Institute, Saitama, 1993.
- [63] E. A. de Souza Neto, D. Peric, e D. R. J. Owen, *Computational methods for plasticity: theory and applications*. John Wiley & Sons, 2011.
- [64] C. H. Chou, J. Pan, e S. C. Tang, «An anisotropic stress resultant constitutive law for sheet metal forming», *Int J Numer Methods Eng*, vol. 39, n. 3, pp. 435–449, 1996.
- [65] N. Rebelo, J. C. Nagtegaal, e H. D. Hibbitt, «Practical aspects of modeling sheet forming processes», em *Numiform*, 1989, pp. 31–43.
- [66] J. M. F. Duarte, «Conformação plástica de chapas metálicas: simulação numérica e caracterização mecânica», Tese de mestrado em Engenharia Mecânica, FEUP, Porto, 1997.
- [67] N. Rebelo, J. C. Nagtegaal, e H. D. Hibbitt, «Finite element analysis of sheet forming processes», *Int J Numer Methods Eng*, vol. 30, n. 8, pp. 1739–1758, 1990.
- [68] J. Rojek, O. C. Zienkiewicz, E. Oñate, e E. Postek, «Advances in FE explicit formulation for simulation of metalforming processes», *J Mater Process Technol*, vol. 119, n. 1, pp. 41–47, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00894-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00894-9).

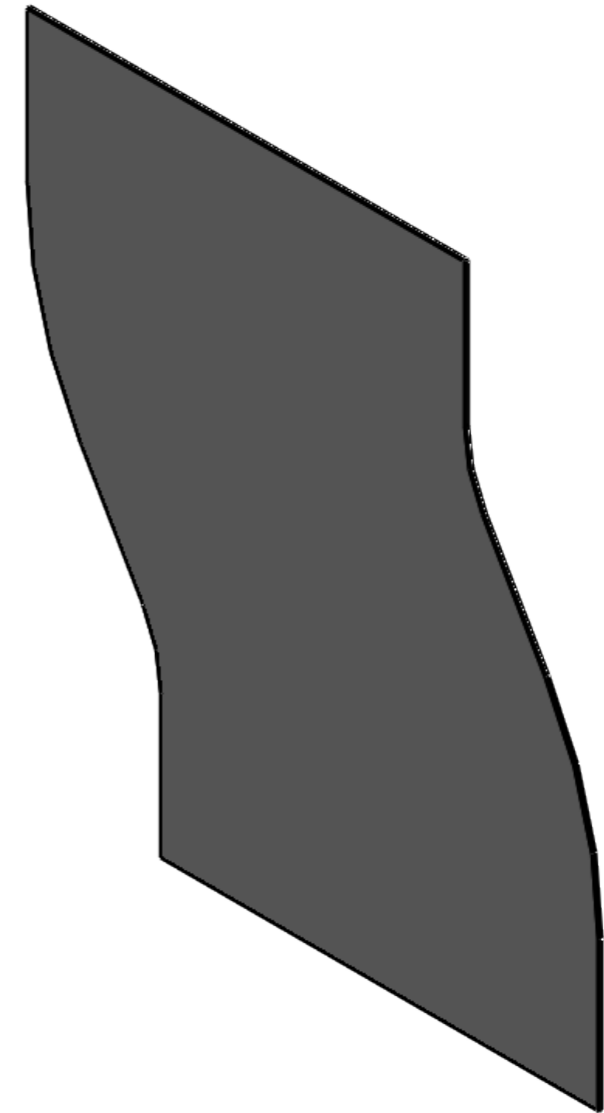
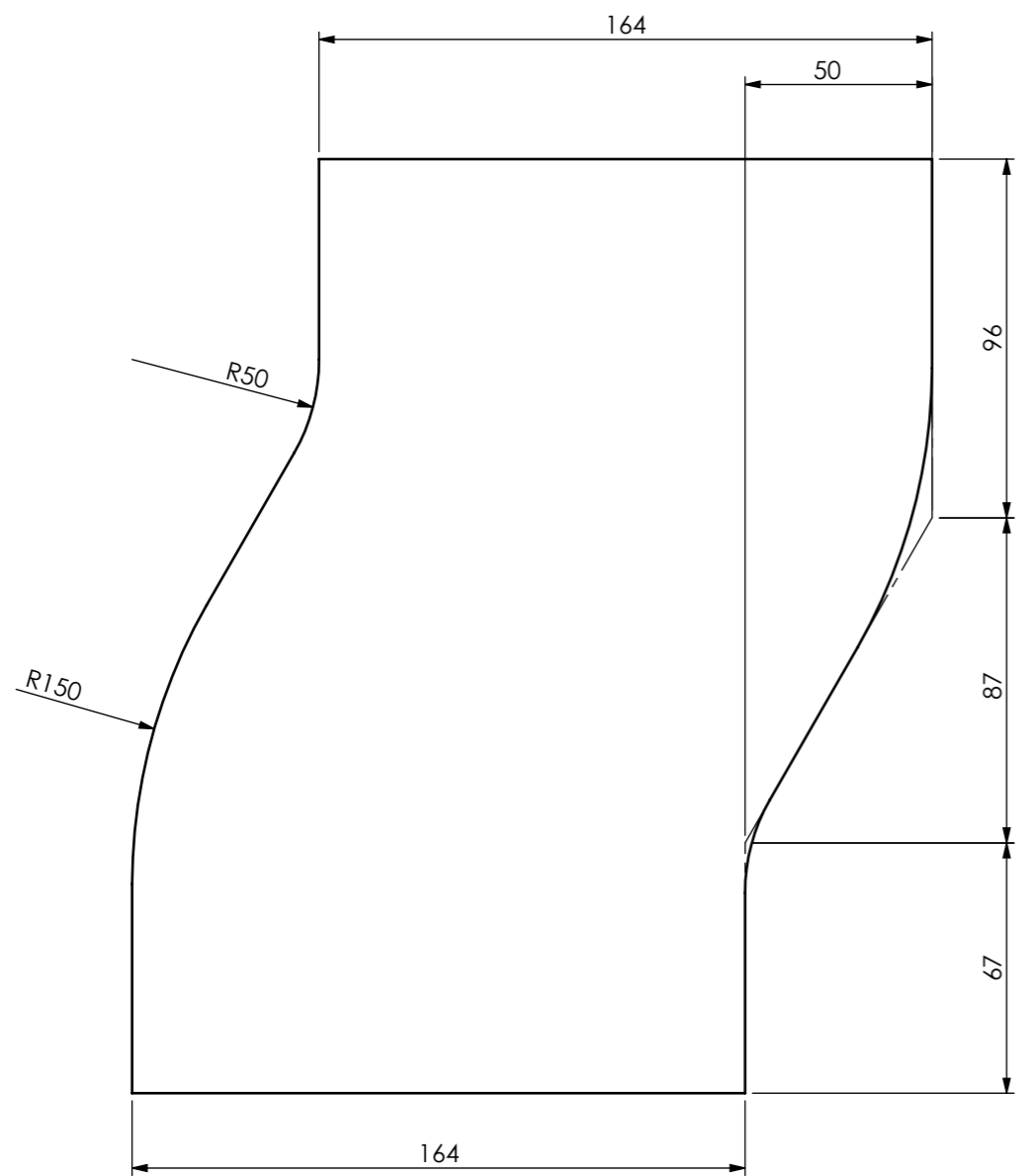
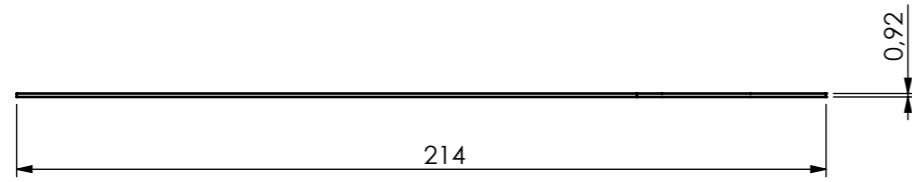
- [69] R. Kergen e P. Jodogne, «Computerized control of the blankholder pressure on deep drawing presses», SAE Technical Paper, 1992.
- [70] N. Sridhar, M. S. A. Vallavi, e T. Mugilan, «An integrated approach of FEM analysis using DEFORM 3D and experimental investigation of forces developed in Al-Si7Mg», *Mater Today Proc*, 2022.
- [71] M. Sigvant *et al.*, «Friction in sheet metal forming: Influence of surface roughness and strain rate on sheet metal forming simulation results», *Procedia Manuf*, vol. 29, pp. 512–519, 2019.
- [72] A. E. Tekkaya, «State-of-the-art of simulation of sheet metal forming», *J Mater Process Technol*, vol. 103, n. 1, pp. 14–22, 2000.
- [73] S.-Y. Yoon, F. Barlat, S.-Y. Lee, J.-H. Kim, M.-S. Wi, e D.-J. Kim, «Finite element implementation of hydrostatic pressure-sensitive plasticity and its application to distortional hardening model and sheet metal forming simulations», *J Mater Process Technol*, vol. 302, pp. 1–16, 2022.
- [74] T.-T. Luyen, V.-C. Tong, e D.-T. Nguyen, «A simulation and experimental study on the deep drawing process of SPCC sheet using the graphical method», *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, n. 3, pp. 2472–2483, 2022.
- [75] «KIRCHHOFF GROUP». Acedido: 3 de Março de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.kirchhoff-group.com/pt>
- [76] A. F. G. Barbosa, R. D. S. G. Campilho, F. J. G. Silva, I. J. Sánchez-Arce, C. Prakash, e D. Buddhi, «Design of a Spiral Double-Cutting Machine for an Automotive Bowden Cable Assembly Line», *Machines*, vol. 10, n. 9, p. 811, 2022.
- [77] L. J. Freeman, A. G. Ryan, J. L. K. Kensler, R. M. Dickinson, e G. G. Vining, «A Tutorial on the Planning of Experiments», *Qual Eng*, vol. 25, n. 4, pp. 315–332, Out. 2013, doi: 10.1080/08982112.2013.817013.
- [78] C. Gatti, *Design of experiments for reinforcement learning*. Springer, 2014.
- [79] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*. John Wiley & sons, 2017.
- [80] J. M. Wilson, «Gantt charts: A centenary appreciation», *Eur J Oper Res*, vol. 149, n. 2, pp. 430–437, 2003.
- [81] E. N. ISO 6892-1: 2019, «Metallic materials–tensile testing», vol. 1, pp. 6891–6892, 2019.
- [82] IT.LMat. 002, «Provetes\_máquina\_tração». norma interna KIRCHHOFF, 2019.
- [83] V. D. A. 238-100, «Test Specification. Plate Bending Test for Metallic Materials». German Association of the Automotive Industry, 2010.
- [84] ASTM E1476-04, «Standard Guide for Metals Identification, Grade Verification, and Sorting», 1997.
- [85] Aços Roman, «Espectrometria de Emissão Ótica – Análise Química do Aço». Acedido: 29 de Abril de 2023. [Em linha]. Disponível em: [https://aco.com.br/aco/espectrometria-de-emissao-otica-analise-quimica-do-aco/?utm\\_source=Mel](https://aco.com.br/aco/espectrometria-de-emissao-otica-analise-quimica-do-aco/?utm_source=Mel)
- [86] H. Colpaert e A. L. V da Costa, *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns*. Editora Blucher, 2008.
- [87] ASTM E384, «Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials», *Annual Book of ASTM Standards, PA: ASTM International, West Conshohocken*, pp. 1–42, 2016.
- [88] H. Kuhn e D. Medlin, «Mechanical Testing and Evaluation (Vol. 8). ASM Handbook», *International, Materials Park (OH) USA*, 2000.
- [89] V. Isteri *et al.*, «Ferritic calcium sulfoaluminate belite cement from metallurgical industry residues and phosphogypsum: Clinker production, scale-up, and microstructural characterisation», *Cem Concr Res*, vol. 154, p. 106715, 2022.
- [90] Y. Yang, M. Liu, S. Zhou, W. Ren, Q. Zhou, e L. Shi, «Breaking through the strength-ductility trade-off in graphene reinforced Ti6Al4V composites», *J Alloys Compd*, vol. 871, p. 159535, 2021.

- [91] H. Tervo, A. Kaijalainen, T. Pikkarainen, S. Mehtonen, e D. Porter, «Effect of impurity level and inclusions on the ductility and toughness of an ultra-high-strength steel», *Materials Science and Engineering: A*, vol. 697, pp. 184–193, 2017.
- [92] V. Bertolo *et al.*, «A comprehensive quantitative characterisation of the multiphase microstructure of a thick-section high strength steel», *J Mater Sci*, vol. 57, n. 13, pp. 7101–7126, 2022.
- [93] M. L. Tims e Q. Diao, *Sand Casting*. CRC Press, 2001.
- [94] P. Jovičević-Klug, G. Puš, M. Jovičević-Klug, B. Žužek, e B. Podgornik, «Influence of heat treatment parameters on effectiveness of deep cryogenic treatment on properties of high-speed steels», *Materials Science and Engineering: A*, vol. 829, p. 142157, 2022.
- [95] A. S. Yildiz, K. Davut, B. Koc, e O. Yilmaz, «Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 108, pp. 3391–3404, 2020.
- [96] Stampack GmbH, «Sheet Metal Forming Simulation for Every Tool Designer Software Guide V-2020.1», 2019. [Em linha]. Disponível em: [www.stampack.com](http://www.stampack.com)
- [97] E. Oñate, G. Duffet, M. Chiumenti, J. Rojek, e F. Flores, *Advances in stabilized finite element methods for bulk and sheet metal forming processes*, vol. 712. 2004. doi: 10.1063/1.1766494.
- [98] M. Schwarze, I. N. Vladimirov, e S. Reese, «Sheet metal forming and springback simulation by means of a new reduced integration solid-shell finite element technology», *Comput Methods Appl Mech Eng*, vol. 200, n. 5, pp. 454–476, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2010.07.020>.
- [99] R. Hill, «A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals», *Proc R Soc Lond A Math Phys Sci*, vol. 193, n. 1033, pp. 281–297, 1948.
- [100] F. Cayssials, «A new method for predicting FLC», em *Proc. 20th Biennial IDDRG Congress*, 1998, pp. 443–454.
- [101] M. Abspoel, M. E. Scholting, e J. M. M. Droog, «A new method for predicting Forming Limit Curves from mechanical properties», *J Mater Process Technol*, vol. 213, n. 5, pp. 759–769, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.11.022>.



## **ANEXOS**





PROJECTOU			André Barros 1181167	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431 4200-072 Porto WWW.DEM.ISEP.IPP.PT																			
DESENHOU				Desenho nº1																			
COPIOU																							
VERIFICOU																							
ESCALA	1:2	S-rail		<table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </table>																			
TOLER.				SUBSTITUI SUBSTITUIDO																			







