FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Processo de Industrialização de um Componente Automóvel Através da Conformação Metálica em Estampagem a Frio

Relatório Final do Projeto de Dissertação

Ricardo Augusto José



Mestrado em Mecânica Computacional

Orientador na U. Porto: Prof. Marco Paulo Lages Parente

Orientador na Gestamp: Pedro Rodrigues Mina

29 de julho de 2024

Resumo

A conformação de metais pelo processo de estampagem a frio representa grande parte dos processos de produção de componentes metálicos para a indústria automóvel, especialmente com a utilização do aço como matéria-prima. O uso de aços de alta resistência, como os Aços Dual Phase, é cada vez mais comum, visto que oferecem diversos benefícios, como a redução do peso do veículo e o aumento da segurança e resistência dos componentes produzidos.

Este relatório apresenta uma abordagem detalhada do processo de industrialização de duas longarinas, estampadas a frio numa chapa de aço de alta resistência (DP800), com 2 mm de espessura. O estudo foi inteiramente desenvolvido nas instalações da empresa Gestamp Cerveira, pelo que, faz-se uma descrição detalhada dos processos realizados na empresa.

O relatório apresenta um breve panorama da indústria automóvel e a sua evolução, associados aos principais desafios que a indústria tem vivenciado, bem como a integração de processos tecnológicos fruto da revolução 4.0, como as simulações computacionais. A caracterização do Aço Dual Phase foi outro tema abordado, especialmente o aço DP800, no qual são apresentadas as suas propriedades mecânicas, como resistência e ductilidade, e como essas características influenciam na conformabilidade e performance dos componentes metálicos produzidos.

A integração dos métodos numéricos pelos métodos dos elementos finitos com os processos de produção de componentes metálicos representa o ponto-chave deste estudo, destacando-se como a utilização do software Autoform pode prever e auxiliar nos processos de tomada de decisão, visando à implementação de melhorias nos processos. O ciclo produtivo é detalhado desde a fase inicial da simulação no Autoform até a configuração final do layout das longarinas, incluindo aspetos críticos do projeto, como a preparação e testes de ferramentas, bem como as especificações da prensa ideal para o projeto.

No final do estudo, é feita uma análise comparativa dos resultados obtidos na simulação e os resultados obtidos nas primeiras peças produzidas, apresentando os níveis de discrepância entre os modelos real e computacional. Também é realizada uma análise quantificada e distribuída de todos os custos associados ao processo de produção dos componentes.

Palavras-chave: Conformação, Dual Phase, Simulação, Spring back.

Abstract

Metal forming by cold stamping is a major part of the production processes for metal components in the automotive industry, especially with the use of steel as a raw material. The use of high-strength steels, such as DP800, is becoming increasingly common due to the various benefits they offer, such as vehicle weight reduction and increased safety and strength of the produced components.

This report presents a detailed approach to the industrialisation process of two beams, cold stamped from a high-strength steel sheet with a thickness of 2 mm. The study was entirely developed at the facilities of Gestamp Cerveira, thus a detailed description of the processes performed at the company is provided.

The report offers a brief overview of the automotive industry and its evolution, addressing the main challenges the industry has been facing, as well as the integration of technological processes resulting from Industry 4.0, such as computational simulations. The characterisation of Dual Phase Steel, particularly DP800 steel, was another topic covered. The mechanical properties, such as strength and ductility, and how these characteristics influence the formability and performance of the produced metal components, are presented. The key point of this study is the integration of numerical methods, specifically finite element methods, with the production processes of metal components. It highlights how the use of Autoform software can predict and assist in decision-making processes, aiming at process improvement. The production process is detailed from the initial simulation phase in Autoform to the final configuration of the beam layout, addressing critical project aspects such as tool preparation and testing, as well as the specifications of the ideal press for the project.

At the end of the study, a comparative analysis of the results obtained in the simulation and the results obtained from the first produced pieces is conducted. The levels of discrepancy between the real and computational models are presented, as well as a quantified and distributed analysis of all the costs associated with the production process of the components.

Keywords: Forming, Dual Phase, Simulation, Spring back.

Agradecimentos

Gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos à direção da empresa Gestamp Cerveira pelo apoio e confiança durante todo o desenvolvimento deste projeto. Agradeço especialmente aos meus orientadores, Prof. Marco Parente, Eng. Pedro Mina, cujas orientações e experiência foram fundamentais para a conclusão desta tese.

A toda a equipa do departamento de projetos, Eng. Tiago Rocha, Eng. João Pinto, Eng. João Duro, Eng. Tiago Gomes, Eng. Pedro Mina, Eng. Miguel Docamiño, Eng. Gabriel Costa, Eng. Hélder Alves e Eng(a). Diana Graça, agradeço pelo trabalho árduo, pela colaboração e pelo espírito de equipa que tornaram possível a realização deste trabalho.

Aos meus familiares, professores e colegas da U.Porto, amigos, sou imensamente grato pelo apoio incondicional, compreensão e incentivo ao longo de todo este percurso.

Por fim, a todas as pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a execução deste projeto, deixo o meu muito obrigado. Sem o apoio e a colaboração de cada um de vocês, este trabalho não teria sido possível.

Conteúdo

Resumo i

Abstract ii

Agradecimentos iii

Conteúdo vii

Lista de Figuras xii

Lista de Tabelas xiii

Lista de Símbolos xiv

1 Introdução 1
- 1.1 Contexto e Motivação . . . 1
  - 1.1.1 Produção . . . 5
  - 1.1.2 Estampagem . . . 6
- 1.2 Objetivos . . . 7

2 Indústria Automóvel 9
- 2.1 Introdução . . . 9
- 2.2 Evolução da Indústria . . . 9
  - 2.2.1 A Indústria 4.0 no Setor Automóvel . . . 10
    - 2.2.1.1 Robôs, Cloud e Monitorização . . . 11
    - 2.2.1.2 Simulações e Realidade Virtual . . . 12
    - 2.2.1.3 Fábricas Inteligentes e Impressão 3D . . . 14
- 2.3 Normas da Indústria Automóvel . . . 14
  - 2.3.1 Norma IATF 16949 . . . 15
  - 2.3.2 Norma ISO 9001 . . . 16
  - 2.3.3 Norma ISO 14001 . . . 16

3 Conformação Metálica 18
- 3.1 Conformação Metálica de Chapas . . . 18
  - 3.1.1 Deformação e Tensão na Conformação Metálica . . . 19
    - 3.1.1.1 Tensão . . . 19

3.1.1.2 Transformação da Tensão 20
3.1.1.3 Deformação 21
3.1.1.4 Transição Elástica-Plástica 21
3.1.1.5 Elasticidade Isotrópica 22
3.2 Estampagem Metálica 23
3.2.1 Operação de Corte 24
3.2.2 Operação de Dobra 25
3.2.3 Operação de Embutidura 26
3.2.3.1 Diagrama Limite de Embutidura 27
3.2.3.2 Cerra-chapas 28
3.2.3.3 Punção 29
3.2.3.4 Defeitos de Embutidura 30
3.2.4 Estampagem a Frio 32
3.2.4.1 Estampagem em Ferramentas Progressivas 32
3.2.4.2 Estampagem em Ferramentas Transfer e Tandem 33
3.2.4.3 Força de Estampagem 35
3.2.4.4 Vantagens e Desafios da Estampagem a Frio 36

4 Aços Dual Phase 37
4.1 Caracterização dos Aços Dual Phase 37
4.2 Composição Química dos Aços Dual Phase 38
4.2.1 Carbono 38
4.2.2 Manganês 39
4.2.3 Crómio e Molibdénio 40
4.3 Microestrutura dos Aços Dual Phase 40
4.3.1 Elementos de Microliga 41
4.4 Propriedades Mecânicas 41
4.4.1 Conformabilidade 42
4.4.2 Soldabilidade 43
4.4.3 Resistência à Compressão 44
4.4.4 Resistência à Fadiga 44
4.4.5 Aços Dual Phase em Simulações Computacionais. 45
4.5 Seleção do Aço Dual Phase 46
4.5.1 Aço Dual Phase 800 48
4.5.1.1 Caraterização Estrutural do Aço DP800 49
4.5.1.2 Retorno Elástico em Aços DP800 50
4.6 Propriedades Desejáveis e Limitações para Estampagem 52

5 Modelação Numérica 54
5.1 Método dos Elementos Finitos 54
5.2 Fundamentos Matemáticos 55
5.2.1 Equações Diferencias e Parciais 55

5.2.1.1 Princípios dos Trabalhos Virtuais . . . 56
5.2.2 Discretização do Domínio . . . 57
5.2.3 Formulação do Problema . . . 59
5.2.4 Sistemas de Equações Envolvidas . . . 62
5.2.5 Solução dos Sistemas de Equações . . . 64
5.3 Análise dos Métodos dos Elementos Finitos . . . 65
5.3.1 Análise Dinâmica ou Estática . . . 65
5.3.2 Análise da não Linearidade . . . 65
5.3.2.1 Não Linearidade Geométrica . . . 66
5.3.2.2 Não Linearidade do Material . . . 66
5.3.2.3 Não Linearidade Devido a Condições de Fronteiras . . . 68
5.3.3 Avaliação e Interpretação . . . 68
5.4 Apresentação do Software . . . 70
5.4.1 AutoForm . . . 70
5.4.1.1 AutoForm-StampingAdviser . . . 72
5.4.1.2 AutoForm e Gestamp . . . 73
5.4.2 Solução Implícita . . . 74
5.4.2.1 AutoForm Model Spring Back . . . 76

6 Desenvolvimento do Processo de Produção do Componente 80
6.1 Descrição do Componente . . . 80
6.2 Simulação do Processo de Estampagem . . . 82
6.2.1 Modelo do Material . . . 82
6.2.1.1 Superfície de Cedência . . . 83
6.2.1.2 Curva de Ensaio Tração-Deformação . . . 84
6.2.1.3 Curva Limite de Embutidura . . . 85
6.2.1.4 Anisotropia . . . 86
6.2.2 Modelo Constitutivo do Material Discretizado . . . 88
6.2.3 Time Step . . . 90
6.2.4 Plano de Produção AutoForm . . . 91
6.2.5 Ferramentas de Estampagem AutoForm . . . 92
6.2.6 AutoForm Resultados . . . 94
6.2.6.1 Variação de Espessura na chapa . . . 95
6.2.6.2 Tensões . . . 96
6.2.6.3 Deformações . . . 96
6.2.6.4 SpringBack . . . 99
6.2.6.5 Compensação do SpringBack . . . 100
6.2.6.6 Força Exercida Pela Ferramenta . . . 101
6.3 Layout do Processo de Estampagem . . . 103
6.3.1 Longarina Esquerda . . . 103
6.3.2 Longarina Direita . . . 107
6.4 Molde de Estampagem do Componente . . . 110

6.4.1 Ferramenta para Produção do Componente 110
6.4.1.1 Projeto de Ferramenta Transfer 111
6.4.2 Testes e Ajustes das Ferramentas 113
6.4.3 Maquete 114
6.4.4 Custos Associados com a Ferramenta 116

7 Industrialização de um Componente Automóvel 118
7.1 Preparação para Produção 118
7.1.1 Configuração da Prensa de Estampagem 118
7.1.2 Alinhamento e Fixação dos Moldes 119
7.1.3 Calibração do Equipamento 120
7.2 Execução da Estampagem 122
7.2.1 Ciclo de Estampagem 122
7.2.1.1 Primeiras Peças Produzidas 125
7.2.2 Análise de Eficiência do Processo 126
7.2.3 Gestão de Resíduos e Rebarbas 129
7.3 Controlos de Qualidade 130
7.3.1 Manutenção Preventiva das Máquinas 132
7.4 Pós-Processamento em processos de produção de componentes metálicos 133
7.4.1 Logística e Transporte 133
7.5 Implementação de Melhorias Tecnológicas 134
7.6 Valorização Económica 135

8 Conclusões 137
8.1 Trabalhos Futuros 138

Referências Bibliográficas 145

A Anexos 146
A.1 Layout Gestamp Cerveira 146
A.2 Longarina Esquerda 148
A.3 Longarina Direita 151

Lista de Figuras

1.1 Logos Gonvarri Steel Services, Gestamp Automoción e Gestamp Renewables respetivamente [35]. 2

1.2 Instalações Gestamp Cerveira [35]. 2

1.3 Evolução da faturação na Gestamp Cerveira [35]. 3

1.4 Portefólio de produtos da Gestamp Cerveira [35]. 4

1.5 Disposição das UAP's na Gestamp Cerveira [35]. 4

1.6 Evolução da mão de obra na Gestamp Cerveira [35]. 5

1.7 Principais clientes da Gestamp Cerveira [35]. 5

1.8 Divisão da fábrica por zonas de operações [35]. 6

1.9 Prensa Servo de 15000 kN presente na Gestamp Cerveira [35]. 7

2.1 Previsão da Produção Mundial de Veículos Ligeiros [84]. 10

2.2 Fábricas de automóveis em toda a Europa [12]. 11

2.3 Análise computacional para garantir que os sistemas estruturais têm a resistência, a rigidez e a vida útil necessárias para evitar falhas que comprometam o funcionamento e a segurança do chassis [39]. 13

2.4 Ciclo da indústria 4.0. 15

3.1 Nove componentes da tensão a atuar sobre um elemento infinitesimal. . . 20

3.2 A tensão que atua num plano, $A^{'}$, ao abrigo de uma tensão normal, σ_y [40]. 20

3.3 Deformação, translação e rotação de uma linha em um material [40]. . . . 21

3.4 Alteração na razão de tensão, $\alpha = \frac{\sigma_y}{\sigma_x}$, para deformação plana, $\varepsilon_y = 0$, em função da deformação [40]. 22

3.5 **a)** Curva de carga-extensão e tensão-deformação de um metal dúctil; **b)** Expansão da parte inicial da curva [40]. 22

3.6 Peça metálica obtida pelo processo de estampagem. 24

3.7 Ilustração de corte em ferramentas de estampagem [52]. 25

3.8 Operação de dobra de chapa metálica [26]. 26

3.9 Operação de embutidura. 27

3.10 Diagrama de embutidura [52]. 27

3.11 Círculos usados na análise de conformabilidade: a forma original, a deformação no plano, embutido e expansão biaxial [52]. 28
3.12 Localização do cerra chapa no conjunto de ferramentas de estampagem. . 29
3.13 Diferentes formatos de punções. 30
3.14 Aparecimento de orelhas nas peças [40]. 30
3.15 Influência do valor de $\bar{r}$ na formação de orelhas de embutidura [40]. . . . 31
3.16 Sequência (direita à esquerda) de operações numa ferramenta progressiva [15]. 33
3.17 Ilustração de uma ferramenta transfer [76]. 34
3.18 Ilustração de uma ferramenta transfer tandem [35]. 34

4.1 Curva TTT mostrando várias taxas de arrefecimento levando a microestruturas diferentes [44]. 39
4.2 Imagens da microestrutura dos aços DP600, DP800 e DP1000. 40
4.3 Comparação das propriedades mecânicas dos aços DP relativamente a outros aços avançados de alta resistência. **a)** Alongamento total para falha relativamente a resistência à tração máxima. **b)** Resposta quase estática à tensão de tração e deformação a níveis de resistência à tração finais semelhantes para aço perlita-ferrita, aço HSLA [74]. 42
4.4 Potencial de redução de peso relativamente a um aço HSLA 380 [4]. . . . 44
4.5 Curvas de Wölher ou curvas SN de distintos aços Dual Phase em tração repetida R=0.1 [4]. 45
4.6 Curvas de Wölher ou curvas SN de distintos aços Dual Phase em tração alterna simétrica R=1 [4]. 45
4.7 Nível de elongação da resistência à tração dos aços DP [60]. 47
4.8 Diferentes tipos de aço que compõe o chassi do veículo [14]. 47
4.9 Bobina de aço DP800 de 2 mm de espessura. 48
4.10 Ocorrência de springback 50
4.11 Dobra do eixo neutro [45] 51
4.12 Fenómeno de retorno elástico no mesmo componente fabricado em DP600, DP800 e DP1000 [46] 51
4.13 Parachoques estampado com um aço DP1000 numa chapa de 1,35 mm de espessura [4]. 52
4.14 Estampagem de peças complexas com o aço DP [4]. 53

5.1 Elemento triangular de três nós. 54
5.2 Elemento finito típico, 1 elemento e 2 nós. 57
5.3 Discretiazação de um elemento bidimensional. 57
5.4 Discretiazação de um elemento tridimensional. 59
5.5 Principais tipos de elementos isoparamétricos utilizados en 3D [81]. . . . 60

5.6 Elemento finito unidimensional de dois nós. 63
5.7 Gráfico tensão-deformação específica para um material submetido a um ensaio de tração [10]. 67
5.8 Análise não linear das tensões de contacto [18]. 68
5.9 Viga em contacto com o seu engate [18]. 68
5.10 Esquema dos processos de verificação e validação no MEF. Fluxograma conceito retirado de [65]. 69
5.11 Etapas da simulação de um componente metálico [56]. 71
5.12 Análises do Processo de estampagem no AutoForm [6]. 71
5.13 Modificação rápida da geometria [6]. 73
5.14 Esquema da curva tensão-compressão com inversão de tensão e deformação. 77
5.15 Esquema de ilustração do armazenamento superfície g [8]. 78
5.16 Resultados durante a compressão para o aço DP600 calculadas com o modelo AutoForm juntamente com resultados experimentais [8]. 79

6.1 Geometria dos componentes. 80
6.2 Localização das longarinas no chassis do automóvel. 81
6.3 Dimensões das Longarinas. 81
6.4 Modelo do material DP800 utilizado na simulação. 83
6.5 Superfície de Cedência. 84
6.6 Curva de encruamento. 85
6.7 Curva Limite de Embutidura. 86
6.8 Eixos de ortotropia das chapas laminadas: ND-Direção Normal; TD-Direção Transversal; LD-Direção Longitudinal [8]. 87
6.9 Níveis de refinamento de malha no AutoForm. 88
6.10 Discretização da Longarina esquerda. 88
6.11 Ajuste de malha ao longo da simulação. 89
6.12 Configurações de malha padrão do AutoForm. 90
6.13 O springback calculado, varia com o time step [8]. 91
6.14 Plano de produção definido no Autoform. 91
6.15 Ferramentas de estampagem gerada no AutoForm. 92
6.16 Ferramenta de corte gerado no AutoForm. 93
6.17 Ferramenta para Longarina esquerda. 94
6.18 Variação da espessura na longarina direita. 95
6.19 Variação da espessura na longarina esquerda. 95
6.20 Variação das tensões na Longarina direita. 96
6.21 Variação das tensões na Longarina esquerda. 96

6.22 Deformações na Longarina direita. 97
6.23 Deformações na Longarina esquerda. 97
6.24 Conformabilidade Avançada. 98
6.25 Curva de limite de conformação das duas longarinas, obtidas no AutoForm. 98
6.26 SpringBack na Longarina direita. 99
6.27 Springback na Longarina esquerda. 99
6.28 Diferença entre geometria padrão e a geometria gerada em ferramenta compensada. 100
6.29 Secção dianteira da longarina esquerda com compensação geométrica. . . 101
6.30 Força em cada etapa quando do módulo superior da ferramenta está em descenso. 103
6.31 Sequência de operações definidas para Longarina esquerda. 104
6.32 Operações realizadas no passo 1 e 2 (Longarina esquerda). 105
6.33 Operações realizadas no passo 3 e 4 (Longarina esquerda). 105
6.34 Operações realizadas no passo 5 e 6 (Longarina esquerda). 106
6.35 Operações realizadas no passo 7 e 8 (Longarina esquerda). 106
6.36 Sequência de operações definidas para Longarina direita. 107
6.37 Operações realizadas no passo 1 e 2 (Longarina direita). 108
6.38 Operações realizadas no passo 3 e 4 (Longarina direita). 108
6.39 Operações realizadas no passo 5 e 6 (Longarina direita). 109
6.40 Operações realizadas no passo 7; 8 e 9 (Longarina direita). 109
6.41 Módulo de ferramentas, para estampagem da longarina direita. 111
6.42 Módulo 1 de ferramentas, para estampagem da longarina esquerda. 111
6.43 Elementos de guia de um módulo de ferramentas. 112
6.44 Dimensões do módulo da ferramenta da longarina esquerda. 113
6.45 Dimensões do módulo da ferramenta da longarina direita. 113
6.46 Maquete Longarina direita. 114
6.47 Plano 2D da longarina esquerda. 115
6.48 Maquete Longarina esquerda. 115
6.49 Calibres de controlo dimensional. 116

7.1 Prensas presente nas instalações da Gestamp Cerveira, com capacidade de prensado para produzir as longarinas [35]. 119
7.2 Módulo completo da ferramenta a ser instalado. 120
7.3 Barras transfer. 120
7.4 Pinça de sujeição da peça na ferramenta. 121
7.5 Ferramenta de estampagem para produção das longarinas 121

7.6 Módulo superior da ferramenta de estampagem da Longarina esquerda. . 123
7.7 Módulo superior da ferramenta no ponto médio (Ferramenta aberta). . . . 123
7.8 Módulo superior da ferramenta no ponto inferior (Ferramenta Fechada). . 124
7.9 Início e o final do processo de produção da peça. 124
7.10 Passos de produção da longarina direita resumida em 4 etapas. 125
7.11 Longarina direita 125
7.12 Longarina Esquerda 126
7.13 Comparação dos resultados obtidos na MMC e os resultados da simulação para o springback na Longarina Esquerda 127
7.14 Comparação dos resultados obtidos na MMC e os resultados da simulação para o springback na Longarina Direita 128
7.15 Sucata de Aço (Processo) (t)/VAB (%) [35]. 129
7.16 Destino dos resíduos em (%) [35]. 130
7.17 Maquete de controlo de qualidade para Longarina direita. 131
7.18 Controle de qualidade de componentes em produção. 131
7.19 Armazenamento de peças validadas no centro logístico. 134

A.1 Layout Gestamp Cerveira [35]. 146
A.2 Processos na Gestamp Cerveira [35]. 147
A.3 Marcos importantes desde a fundação da Gestamp Cerveira até o ano 2008 [35]. 147
A.4 Marcos importantes Gestamp Cerveira, período 2017-2023 [35]. 147
A.5 Planning Longarina Esquerda. 148
A.6 Distribuição da pressão na ferramenta de produção da longarina esquerda. 148
A.7 Relatório de medição 9/42 da longarina esquerda. 149
A.8 Relatório de medição 29/42 da longarina esquerda. 150
A.9 Planning Longarina Direita. 151
A.10 Punção para Longarina Direita. 151
A.11 Relatório de medição 30/41 da longarina direita. 152
A.12 Relatório de medição 10/41 da longarina direita. 153

Lista de Tabelas

1.1 Marcos Importantes na história da Gestamp Cerveira [35]. 3
1.2 Operações realizadas nas diferentes UAPs. 6
1.3 Distribuição das prensas existentes na Gestamp Cerveira [35]. 6

3.1 Fator corretivo da tensão de rotura em função da relação de estampagem [52]. 35

4.1 Composição química dos aços DP590, 600 e 800 [44]. 38
4.2 Propriedades mecânicas de diferentes tipos de aço DP [3]. 41
4.3 Propriedades de soldabilidades de pontos do aço dual Phase laminados a frio [4]. 43
4.4 Caraterísticas da chapa (Aço DP800) do componente estudado. 49

5.1 Parâmetros de encruamento cinemático para aço DP600 [8]. 78

6.1 Variáveis de entrada necessárias para definir os modelos de critérios de cedência [15]. 86
6.2 Força por cada operação necessária para produzir a longarina direita. . . . 101
6.3 Força por cada operação necessária para produzir a Longarina esquerda. . 102

7.1 Equivalência dos sistemas de coordenadas da MMC e AutoForm 127
7.2 Comparação dos desvios obtidos no AutoForm e os da MMC. 129
7.3 Fatores aproximados que podem influenciar o custo da peça. 136

Lista de Símbolos

Siglas e acrónimos

AHSS - Advanced High Strength Steel

BIW - Body in whit

CPK - Índice de Capacidade do Processo

CP - Capacidade do Processo

CAD - Computer-Aided Design

CAE - Computer-Aided Engineering

CVD - Chemical Vapour Deposition

DP - Dual-Phase

DOE - Design of Experiments

EMAS - Eco-Management and Audit Scheme

EDM - Electrical Discharge Machining

FEM - Finite Element Method

FLD - Forming limit diagram

GNL - Gás Natural Licuado

HSLA - High Strength Low-Alloy Steel

IATF - International Automotive Task Force

ISO - International Organization for Standardization

MAG - Metal Active Gas

MIG - Metal Inert Gas

MEF - Método dos Elementos Finitos

MMC - Máquina de Medição por Coordenadas

PVD - Physical Vapour Deposition

SGA - Sistema de Gestão Ambiental

TBC - Two Boundary control

TTT - Temperatura, Tempo, Transformação

TRIP - Transformation Induced by Plastic Deformation

UAP - Unidade Autónoma de Produção

VAB - Valor Agregado Bruto

3D XRD - Three-Dimensional X-Ray Diffraction

3D EBSD - Three-Dimensional Electron Backscatter Diffraction

Abreviaturas

K^e - Matriz de rigidez

f^e - Vetor de forças nodais

g - Aceleração de gravidade

H - Altura do triângulo

L_i - A longitude de cada elemento ou barra do triângulo

m - relação de estampagem

M_1 - Coeficiente limite de estampagem

d_p - diâmetro do punção

$\bar{d}$- discrepância média

σ - Tensão

N_i - Função de forma i de um Elemento

N - Coordenadas Nodais de um Elemento

ε - Deformação de um Elemento

σ_R - Tensão de Rotura do material

σ_F - Tensão de Fluência

A_{80} - Ductilidade relativa do material para uma amostra de ensaio de 80 mm

σ_{min} - Tensão de cedência mínima

1 Introdução

Com os avanços da indústria automóvel, em busca por processos de fabricação mais eficientes, económicos, seguros e ecológicos, a conformação metálica em estampagem a frio emerge como uma técnica de destaque, oferecendo vantagens significativas em termos de custo, qualidade e tempo de produção.

A produção de componentes metálicos para indústria automóvel está a vivenciar um crescimento considerável nos últimos anos, frutos dos avanços tecnológicos, é comum cada vez mais as empresas a apostarem no desenvolvimento e inovação de produtos mais sustentáveis seguros e ligeiros, com objetivo de aumentar autonomia, menor consumo de energia, entre outros fatores que influem positivamente no rendimento do automóvel e no meio ambiente.

Durante todo o processo de industrialização, é importante garantir a precisão, consistência e eficiência para proporcionar a qualidade e a integridade dos componentes automóveis fabricados. O controlo de qualidade e a otimização dos parâmetros dos processos são fundamentais para alcançar estes objetivos.

O uso de materiais leves e de alta resistência é definitivamente uma das maneiras de lidar praticamente com os requisitos de economia de combustível melhorados no desenvolvimento de carroçarias de automóveis com gestão eficiente de energia de colisão [15].

1.1 Contexto e Motivação

A GESTAMP CERVEIRA, LDA. faz parte da CORPORACIÓN GESTAMP S.L., uma multinacional espanhola, líder nos setores do aço, componentes de automóvel, armazenamento e logística. Esta corporação tem como suas principais atividades industriais centralizadas em três grandes áreas de negócios (ver Figura 1.1):

1. Componentes Automóveis $\longrightarrow$ GESTAMP AUTOMOCIÓN
2. Centros de Serviço de Aço $\longrightarrow$ GONVARRI
3. Energias Renováveis $\longrightarrow$ GESTAMP SOLAR e GESTAMP EÓLICA

A Gestamp Cerveira, LDA. integra-se na área da Gestamp Automoción, que se dedica ao desenho, desenvolvimento e fabrico de componentes e conjuntos metálicos para o setor

Figura 1.1: Logos Gonvarri Steel Services, Gestamp Automoción e Gestamp Renewables respetivamente [35].

automóvel, tais como chassis e mecanismos, aplica uma ampla gama de tecnologias e foca-se também no objetivo de reduzir o peso e aumentar a segurança dos componentes metálicos que fabrica, tendo atualmente uma forte presença mundial na América, Europa e Ásia. Atualmente, a Gestamp conta com mais de 100 Centros Produtivos e 13 centros de Investigação e Desenvolvimento, empregando mais de 40.000 trabalhadores [68].

A Gestamp Cerveira (Figura 1.2) está de certo modo ligada à Gestamp Vigo, visto que, foi a partir desta que a Gestamp Cerveira foi criada em 1995 (na altura com o nome Gestamp Portugal Lda.), pela necessidade de expansão das suas instalações, tendo em conta a proximidade geográfica a que estas se encontram e o bom relacionamento existente entre os países a que pertencem, (Portugal e Espanha). Posteriormente, em 2008, a Gestamp Cerveira tornou-se independente, mantendo boas relações com a até então "fábrica mãe", mas criando os próprios escritórios e departamentos, tornando-se totalmente autónoma. Mais tarde, em 2013, mudou definitivamente de nome para o atual Gestamp Cerveira [56].



Figura 1.2: Instalações Gestamp Cerveira [35].

Possui certificações ISO 9002–Sistema de Gestão de Qualidade, ISO/TS 16949, ISO 14001– Sistema de Gestão Ambiental e EMAS. Foi galardoada ainda, em 2014, 2015,

2016 e 2017, com o prémio "Best Plant", e ainda com o prémio "Best of the Best Plant" em 2016, em consequência de ter ganho por três anos consecutivos os prémios anteriormente referidos, atribuídos pelo grupo PSA–Peugeot Citröen S.A. tal como indicado na tabela 1.1.

Tabela 1.1: Marcos Importantes na história da Gestamp Cerveira [35].

Datas	**Marcos Importantes.**
1995	Fundação da empresa.
1997	Início da produção.
2000	Certificação em Qualidade pelas: ISO 9002, QS 9000 e EAFQ 94.
2002	Duplicação da superfície coberta de fábrica.
2003	Instalação das primeiras células de soldadura robotizada e início de montagem de pedaleiras.
2003	Certificação em Qualidade pela ISO TS 16949.
2004	Certificação em Ambiente pela ISO 14001.
2005	Produção das primeiras peças produzidas em Alumínio.
2006	Certificação em Ambiente EMAS.
2008	Criação de departamentos próprios, deixando de reportar à Gestamp Vigo.
2012	Instalação da primeira prensa de 12.500 kN e das primeiras células de soldadura Laser.
2014	Atribuição do prémio: "Best Plant" 2014 pela PSA.
2015	Atribuição do prémio: "Best Plant" 2015 pela PSA.
2016	Atribuição do prémio: "Best Plant" 2016 pela PSA; GM Supplier Quality Excellence Award 2015 pela GM.
2017	Atribuição do prémio: "Best of the Best Plant" 2017 pela PSA.
2019	Instalação de uma prensa servo tranfer/progressiva de 15.000 kN e estampagem de aços de 3ª Geração (UHSS).

Relativamente à faturação, a Gestamp Cerveira tem evoluído de forma constante, atingindo a máxima faturação no ano 2019, conforme os dados obtidos de [35] e como mostra o gráfico da Figura 1.3.

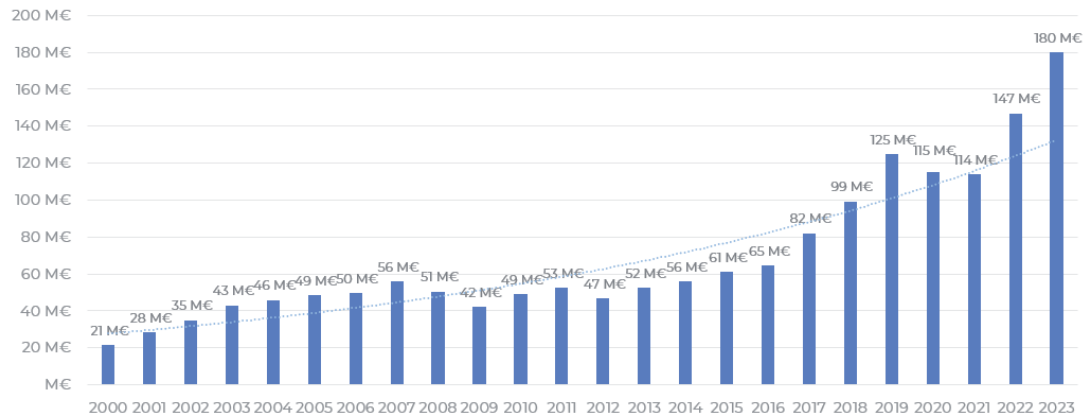


Figura 1.3: Evolução da faturação na Gestamp Cerveira [35].

A pequena queda nos anos seguintes é justificada pelas sucessivas paragens devido à pandemia e, também, das sucessivas paragens dos clientes. Nos anos de 2022 e 2023 voltou a registar máximos históricos.



Figura 1.4: Portefólio de produtos da Gestamp Cerveira [35].

A fábrica está dividida em 8 UAP's (Unidades Autónomas de Produção), sendo 3 dedicadas à estampagem, 2 à soldadura manual e por resistência (pedestal), 2 às células de soldadura por resistência e MIG/MAG, e 1 à montagem de pedaleiras, conforme ilustrado na Figura 1.5.

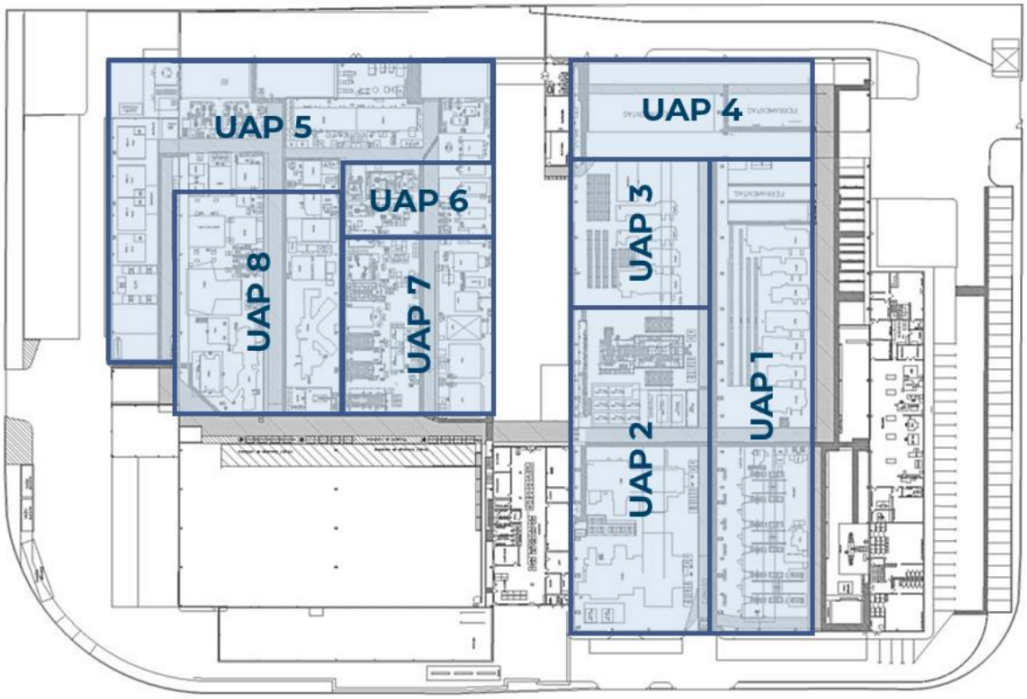


Figura 1.5: Disposição das UAP's na Gestamp Cerveira [35].

A Gestamp Cerveira conta atualmente com mais de 500 trabalhadores, porém, antes

da situação pandémica vivida no início do ano de 2020, a Gestamp Cerveira contava com mais de 640 colaboradores, como se pode verificar no gráfico da Figura 1.6.

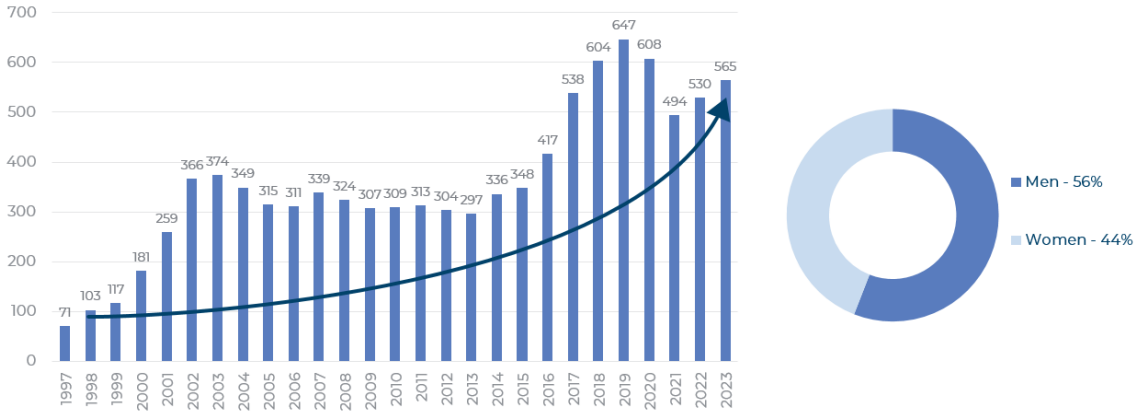


Figura 1.6: Evolução da mão de obra na Gestamp Cerveira [35].

Os principais clientes da Gestamp Cerveira, tal como se verifica na Figura 1.7, são a Stellantis (antiga PSA), com um volume de negócios de mais de 50% dos produtos da Gestamp, Renault/Nissan com mais de 3% de volume de negócios, Volkswagen com um volume de aproximadamente 3%, outras fábricas do grupo Gestamp que representam mais de 30%, entre outros.

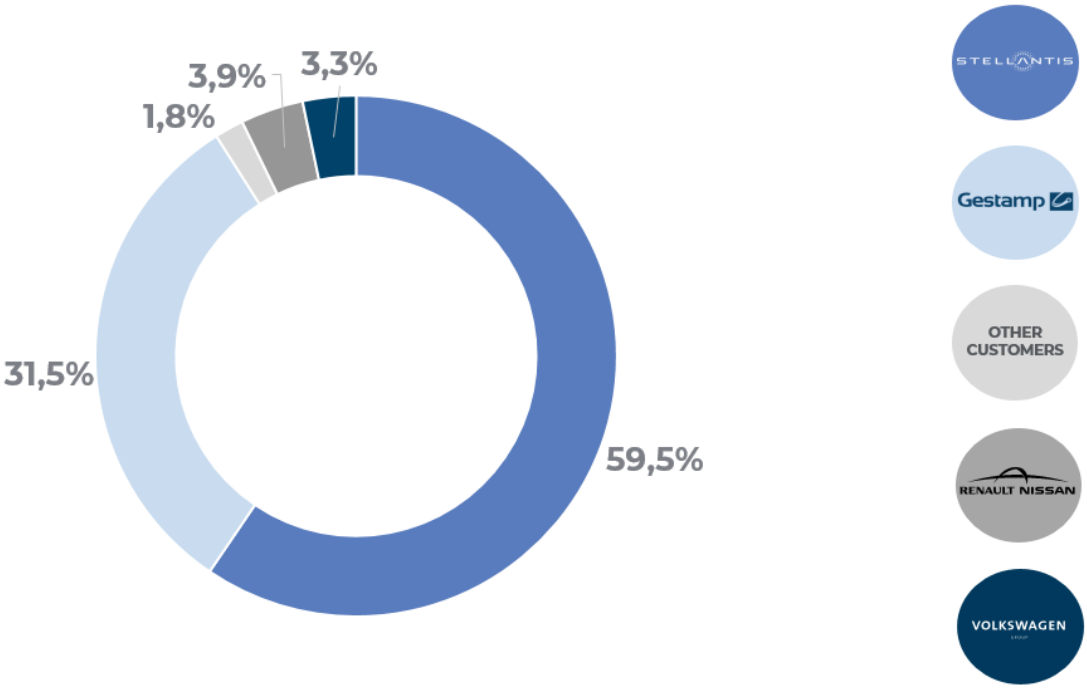


Figura 1.7: Principais clientes da Gestamp Cerveira [35].

1.1.1 Produção

O setor produtivo está dividido em oito Unidades Autónomas de Produção (UAP) que executam diferentes tarefas distribuídas, conforme mostra a Figura 1.8.

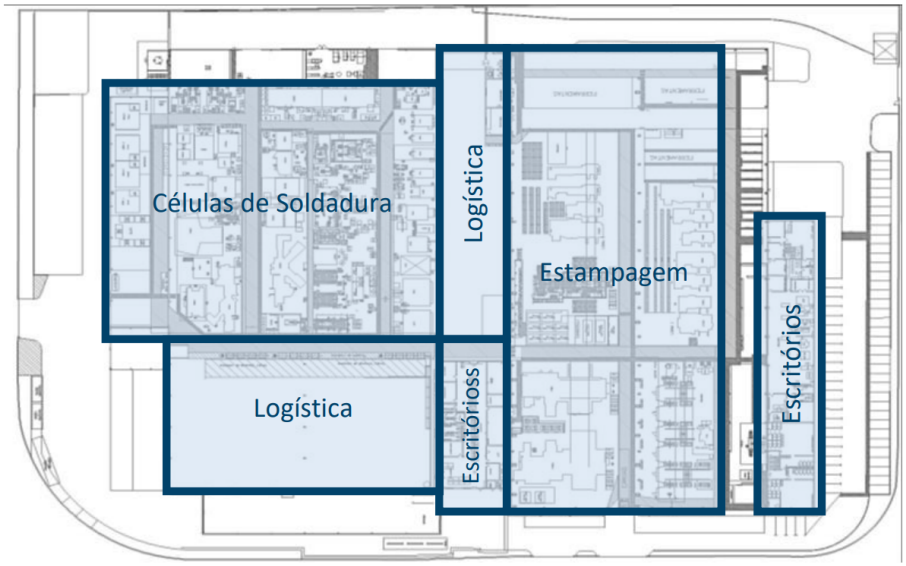


Figura 1.8: Divisão da fábrica por zonas de operações [35].

As operações de estampagem, soldadura e montagem de pedaleiras, são realizadas nas UAPs de acordo com a distribuição da tabela 1.2:

Tabela 1.2: Operações realizadas nas diferentes UAPs.

UAP	Operações
1,2 e 3	Estampagem
4	Soldadura manual
6	Montagem das pedaleiras
5,7 e 8	Células de soldadura

1.1.2 Estampagem

A Gestamp Cerveira detém uma vasta gama de prensas para o seu processo de estampagem, desde prensas manuais, progressivas, transfer e tandem de acordo com a tabela 1.3.

Tabela 1.3: Distribuição das prensas existentes na Gestamp Cerveira [35].

Prensa	800 kN	1250 kN	2500 kN	3000 kN	4000 kN	6300 kN	12500 kN	15000 kN
Manual	1	1	-	2	-	-	-	-
Progressiva	-	3	-	-	4	3	1	2
Transfer	-	-	-	-	-	1	1	2
Tandem	-	-	-	1	-	-	-	-

Para além destes quatro tipos de prensa de estampagem, a empresa tem ainda processos como a roscagem em prensa automática, cravagem em prensa automática, soldadura



Figura 1.9: Prensa Servo de 15000 kN presente na Gestamp Cerveira [35].

em prensa automática, peças Tailor Rolled Blank (TRB) e Tailor Welded Blank (TWB) que representam laminados com espessuras diferentes e formatos soldados com espessuras diferentes, respetivamente [56].

1.2 Objetivos

O estudo foi inteiramente desenvolvido nas instalações da empresa Gestamp Cerveira (Departamento de Projeto). O departamento de projetos na Gestamp Cerveira desempenha um papel fundamental na inovação e desenvolvimento de novos produtos e processos na empresa. É responsável por planear, executar e gerir todos os aspetos relacionados ao desenvolvimento de processos para produção de novos componentes logo após a adjudicação do projeto. Este estudo investiga o processo de industrialização de um componente automóvel estampado a frio, num aço de alta resistência (DP800) com chapa de 2 mm de espessura e para tal foram definidos os seguintes objetivos:

- Explorar as oportunidades e desafios associados ao uso do software AutoForm para simulação de processos de conformação de chapas metálicas;
- Investigar a conformação de metais por estampagem a frio para a produção de peças para automóveis, analisando as suas características, vantagens e limitações;

- Compreender o processo de industrialização de peças metálicas para automóveis, desde a conceção do projeto até a produção em massa, abrangendo todos os aspetos de design, engenharia e fabricação;
- Identificar os desafios técnicos, económicos e operacionais da industrialização e desenvolver estratégias para os superar;
- Avaliar como a conformação de metal por estampagem a frio afeta a eficiência da produção, a qualidade do produto e a sustentabilidade ambiental em comparação com outros métodos de fabricação;
- Propor recomendações para otimizar os processos industriais e maximizar os seus benefícios em termos de custo, qualidade e sustentabilidade;
- Contribuir no avanço do conhecimento da conformação de metais por estampagem a frio, fornecendo informações valiosas para a indústria automóvel e instituições académicas.

2 Indústria Automóvel

2.1 Introdução

A indústria automóvel assume a responsabilidade primária com a fabricação, venda, reparação e outros serviços de produtos automóveis, como máquinas agrícolas e veículos motorizados, entre outros. A indústria automóvel é um dos maiores setores industriais do mundo. Há mais de quinhentos milhões de carros de passageiros registados em todo o mundo. Até 2030, o seu número terá triplicado e continuará a aumentar. Em mais de 100 anos de existência, a fabricação de automóveis tem passado por múltiplas mudanças abruptas. Mudanças na oferta e procura, bem como avanços tecnológicos e mudanças nos métodos de produção. Os automóveis são peças-chave nas atividades da vida moderna, por serem usados para transporte e lazer. De forma resumida, os automóveis são veículos de várias rodas que possuem um motor e são usados para transportar pessoas e mercadorias em terra, excluindo trilhos, pois os automóveis são limitados ao uso em estradas [58].

As crescentes ofertas e exigências no mercado automóvel, têm proporcionado maior competitividade entre os fabricantes, influenciando nos últimos anos as empresas apostarem na implementação de grandes inovações, reduzindo custos e apostando na investigação de novas formas de produção, melhoria contínua nos seus processos produtivos, procurando maior eficiência, satisfação por parte dos clientes e cumprimento das regulamentações governamentais.

2.2 Evolução da Indústria

A indústria automóvel tem progredido, desde a Indústria 1.0 até à Indústria 5.0.

A Indústria 1.0 começou no século XVIII e era caracterizada por sistemas de produção artesanais, por mercados simples e pela energia a vapor. A utilização da energia a vapor na indústria, permitiu um avanço na produtividade humana [83].

Em seguida, a Indústria 2.0, que começou no século XIX, ficou marcada não só pelo descobrimento da eletricidade, que permitiu que as máquinas fossem mais eficientes,



Figura 2.1: Previsão da Produção Mundial de Veículos Ligeiros [84].

como também pelas linhas de montagem, que possibilitaram a produção em massa dos produtos. Nesta época, o estudo de Fredrick Taylor contribuiu para que passasse a existir o conceito de divisão do trabalho, onde cada trabalhador tinha a sua função [84]. Surgiu depois a Indústria 3.0 (século XX), onde começaram a existir novas tecnologias, a passagem de analógico para digital, permitindo um melhor uso da informação existente [83]. A indústria 3.0 é marcada pelos avanços na indústria eletrónica, começando a existir uma integração de 'hardware' e 'software' eletrónicos nos sistemas de fabrico que possibilitaram a implementação de processos mais eficientes de gestão, como a gestão de inventários, a programação do fluxo de produtos, a logística de transporte, entre outros, tornando a indústria mais automatizada [84].

De seguida, surge a Indústria 4.0, fase em que nos encontramos atualmente, com sistemas de produção iguais aos da Indústria 3.0, mas com um mercado intitulado como um mercado inteligente. A tecnologia evoluiu para veículos elétricos, impressões 3D, inteligência artificial, entre outros [83]. A Indústria 4.0 passa a ter máquinas inteligentes capazes de monitorizar continuamente todos os processos produtivos, detetar e prever falhas de forma a sugerir medidas de prevenção e de correção, por exemplo. Desta forma, as indústrias conseguiram tirar vantagens destas evoluções, reduzindo, por exemplo, o seu tempo de inatividade. As pessoas, as máquinas, as infraestruturas e os processos passaram a estar todos interligados numa única rede, permitindo a existência de uma gestão global extremamente eficiente [84].

2.2.1 A Indústria 4.0 no Setor Automóvel

Atualmente, fica fácil perceber que a indústria 4.0 está totalmente conectada com o setor automóvel. O setor que começou com Henry Ford introduzindo uma forma mo-

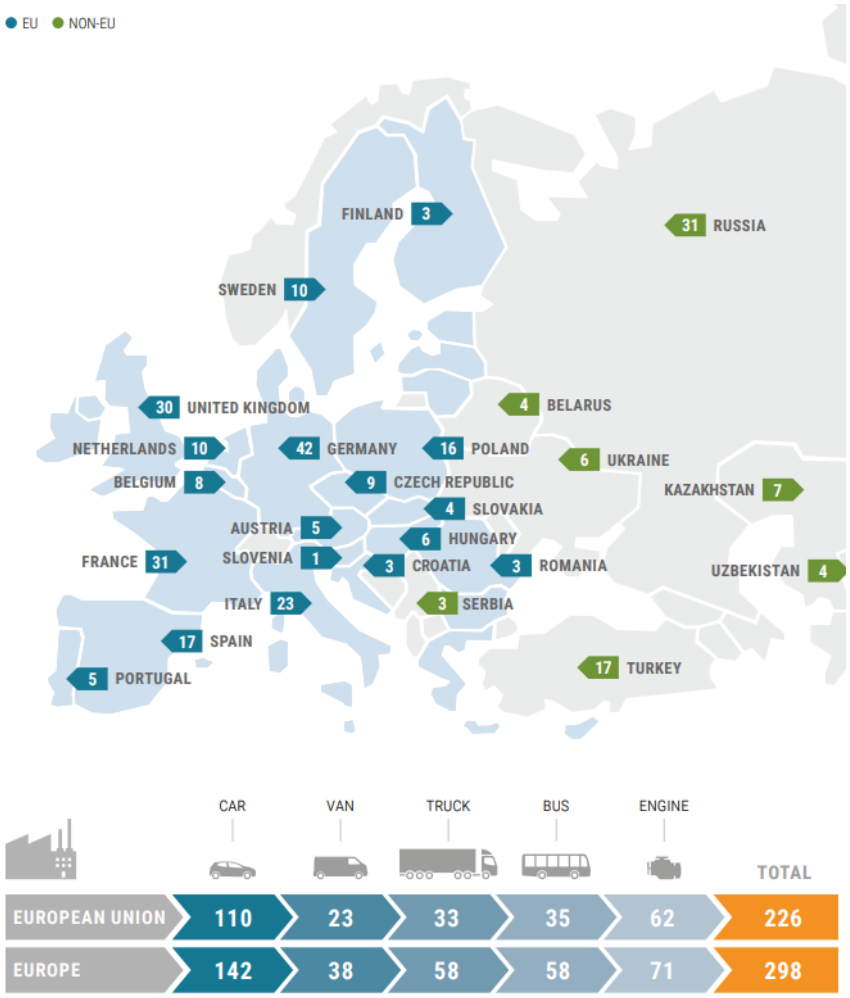


Figura 2.2: Fábricas de automóveis em toda a Europa [12].

derna de produção em massa já passou por várias mudanças, inclusive com a adoção de máquinas no ambiente fabril [29].

Esse nicho apresenta alguns desafios, como a gestão dos processos complexos e a falta de investimento em tecnologia. Apesar disso, os impactos da quarta revolução industrial são visíveis [29].

2.2.1.1 Robôs, Cloud e Monitorização

Segundo, Marcelo [29] um dos principais impactos da tecnologia 4.0 é o uso de robôs cada vez mais inteligentes. Eles auxiliam nas operações quotidianas, liberando os funcionários, e também cooperam com a superação de certas limitações, como as barreiras de espaço. Robôs podem se movimentar para pegar certos equipamentos ou posicionar peças específicas em determinados lugares, por exemplo.

Inclusive, um robô inteligente é muito útil na gestão da cadeia de suprimentos, uma das partes da indústria automóvel. Toda a logística e a gestão de itens podem ser operacionalizadas, de forma a diminuir os custos e melhorar a segurança para os funcionários

[29].

Outra aplicação interessante é a monitorização de toda a cadeia produtiva por meio de sensores e de outros recursos. Isso se dá pela utilização de sistemas integrados, da computação em nuvem com a virtualização da infraestrutura computacional e da IoT (internet of Things) [29].

Esse controle permite, inclusive, identificar problemas em tempo real e resolvê-los de forma mais simples. Assim, a gestão mantém a produtividade interna e os resultados de acordo com o que foi planeado, atendendo à procura [29].

A cloud permite que todos dentro da fábrica tenham acesso aos mesmos sistemas de forma centralizada, sem depender da infraestrutura interna. A integração das aplicações faz com que as ferramentas estejam sincronizadas para favorecer o controlo da gestão, possibilitando que o gestor saiba tudo o que ocorre dentro do ambiente industrial [29].

Em complemento, a internet das coisas conecta sensores em todo o lugar para gerar dados úteis para a tomada de decisão. Por exemplo, com o apoio dos sensores distribuídos, é viável acompanhar o estado das máquinas e as suas condições de operacionalidade. Nesse sentido, a empresa pode implementar manutenções preditivas, antes de algum problema desencadear uma parada nas operações [29].

Além disso, as aplicações com os sensores também permitem gerir os recursos utilizados. É possível monitorizar o uso de energia elétrica, por exemplo, para otimizar e maximizar a eficiência [29].

2.2.1.2 Simulações e Realidade Virtual

A indústria automóvel está passando por uma transformação significativa impulsionada por inovações tecnológicas, e duas dessas inovações que se destacam são as simulações e a realidade virtual (RV). Essas tecnologias estão revolucionando a maneira como veículos são projetados, testados e produzidos, trazendo benefícios consideráveis em termos de eficiência, segurança e custos.

As simulações permitem que engenheiros e designers criem modelos digitais de veículos e componentes, possibilitando testes e ajustes num ambiente virtual antes da construção de protótipos físicos. Isso não só acelera o processo de desenvolvimento, mas também reduz significativamente os custos associados a erros de design e testes físicos. Por exemplo, simulações aerodinâmicas permitem otimizar o design de veículos para melhorar a eficiência de combustível e o desempenho, sem a necessidade de testes extensivos em túnel de vento.

A realidade virtual, por sua vez, oferece uma plataforma imersiva onde designers e engenheiros podem interagir com modelos tridimensionais de veículos em escala real. Isso facilita a identificação de problemas ergonómicos, a avaliação de componentes de design

e a realização de revisões colaborativas em tempo real, independentemente da localização geográfica dos membros da equipe. A RV também é usada para treinar operários de linha de montagem, permitindo que eles pratiquem e se familiarizem com processos complexos num ambiente seguro e controlado.

É importante também citar o uso de simulações e de realidade virtual/aumentada para produzir carros. Isso envolve também a tecnologia de gémeos digitais. Com eles, torna-se viável criar um projeto virtual de um carro que mistura peças reais com partes simuladas, de modo a visualizar um possível resultado. Além disso, a fábrica pode realizar testes (ver Figura 2.3) para assegurar a consistência do produto, mesmo antes dele existir de fato [29].

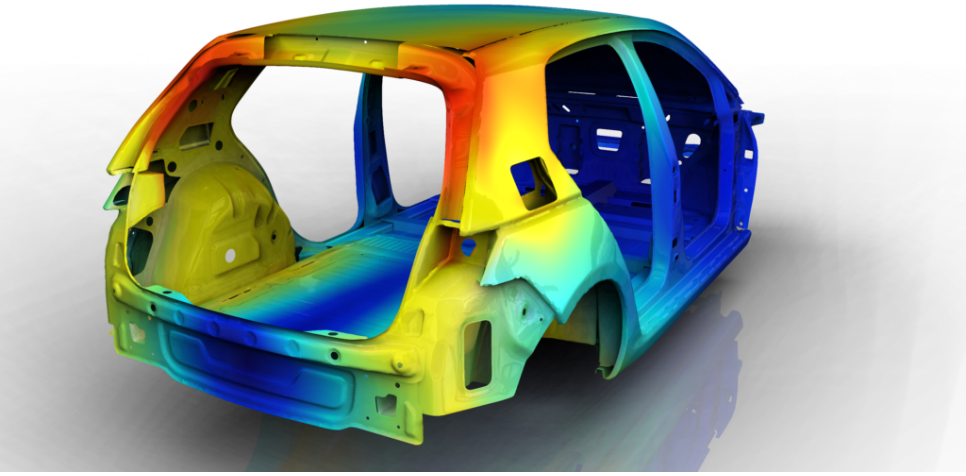


Figura 2.3: Análise computacional para garantir que os sistemas estruturais têm a resistência, a rigidez e a vida útil necessárias para evitar falhas que comprometam o funcionamento e a segurança do chassis [39].

Isso também favorece a experiência do utilizador comprador: as pessoas podem agora criar um produto sob procura segundo as suas preferências e obter o resultado. A indústria consegue ser flexível o suficiente para lidar com personalização do produto ao mesmo tempo, em que mantém uma produção em massa [29].

O uso da simulação na indústria automóvel é frequente, principalmente para analisar a quantidade de equipamentos necessários, o tempo de ciclo, a linha de produção, a programação da produção, o stock em processo, layout, de entre outras questões [9].

Estudos de simulação realizados por Pinho [23], numa empresa do setor automóvel, com o objetivo de aumentar a produtividade de uma linha de chassis. Como resultado, chegou-se a uma proposta de aumentar a produtividade da linha em 10%. Já, Gonçalves [37] e outros realizaram um estudo numa empresa de logística automóvel. A empresa era responsável pela movimentação de materiais e o abastecimento de uma linha de produção de veículos.

Outros pesquisadores como Dengiz [24], realizaram um estudo de simulação numa

linha de pintura de uma empresa do setor automóvel da Turquia. Assim como no estudo realizado por Montevechi [57] e Pinho [23] também foi utilizada a técnica DOE (design of experiments). Nobre [63] e outros aplicaram a simulação computacional para analisar o sistema de emissão de ordens two boundary control (TBC) numa linha de produção de uma empresa automóvel. Como resultados, observou-se que o TBC permitiu que o sistema funcionasse com baixos stocks intermediários.

A inspeção de sistemas é um das principais áreas de aplicação da simulação computacional, por exemplo, Santos [27] e outros, utilizaram a simulação computacional para analisar o sistema de inspeção de torques de uma montadora de veículos. Com o estudo, foi possível identificar oportunidades de melhorias no sistema. Bem como estudos feitos por Alpan [50] e outros, analisaram, por meio da simulação, a cadeia de abastecimentos de uma empresa automóvel. Foi proposto um novo método para planear as vendas de veículos com as compras de componentes para estes e, dessa forma, reduzir o custo logístico e o *lead time*.

2.2.1.3 Fábricas Inteligentes e Impressão 3D

Dentro das grandes inovações no sector automóvel não podemos deixar de fora alguns dos principais pilares da revolução 4.0 na indústria automóvel, como os casos de; as fábricas inteligentes (ou Smart factories), e a impressão 3D.

A fábrica inteligente é um conceito geral para a automatização do ambiente fabril, com sistemas autónomos e integrados (ver Figura 2.4). É uma fábrica controlada por dados, de modo a maximizar a eficiência [29].

Já a impressão 3D é uma tecnologia que permite produzir e imprimir novas peças para auxiliar nas necessidades do setor automóvel. Ajuda a reduzir os custos e os prazos ao projetar protótipos virtualmente e possibilitar a impressão de forma prática [29].

2.3 Normas da Indústria Automóvel

As certificações ISO na indústria automóvel garantem que as empresas deste setor atinjam um padrão elevado de qualidade nos seus produtos, aumentando a sua produtividade e competitividade. Além disso, essas certificações promovem a constante evolução dos processos de fabricação.

A indústria automóvel tem um papel significativo no PIB industrial a nível global, a importância do setor não é apenas em termos de geração de empregos e faturação, mas também na produção de veículos.

Atualmente, o sector automóvel a nível mundial está em constante crescimento, que englobam produtores de veículos, máquinas agrícolas e rodoviárias, além das fabricantes



Figura 2.4: Ciclo da indústria 4.0.

de peças para montadoras e reposição para veículos em circulação (manutenção), e conta com uma rede de milhares de concessionárias em todo mundo.

As certificações no setor automóvel pretendem estabelecer padrões para os conceitos e documentação do sistema de gestão da qualidade. Elas também promovem a melhoria contínua, com foco na prevenção de defeitos e na redução de variações e desperdícios em toda a cadeia de fornecimento, além de incentivarem a preservação ambiental e outros aspetos relevantes [78].

2.3.1 Norma IATF 16949

A IATF 16949 foi publicada pela International Automotive Task Force (IATF) em 2016. É uma especificação técnica ISO que se alinha as normas norte-americana, alemã, francesa e italiana existentes de sistemas de qualidade dentro da indústria automóvel global [78].

Esta norma procura garantir a qualidade dos produtos automóveis, reduzindo a variação do produto e o desperdício em toda a cadeia de fornecimento. Ela estabelece os requisitos do sistema de qualidade para o desenvolvimento, produção, instalação e manutenção de produtos para indústria automóvel.

À aplicação da IATF 16949 é destinada apenas às empresas que fabricam peças para o mercado de equipamento original, seja para produção ou serviços.

As vantagens de obter a certificação IATF incluem [78]:

- Acesso a licenças para negociações internacionais e expansão dos negócios.
- Melhoria dos processos para redução de desperdícios e prevenção de defeitos.

- Eliminação da necessidade de múltiplos certificados para a fabricação de veículos.
- Integração da IATF 16949 com outros sistemas de gestão.
- Demonstração de conformidade para atrair novos negócios e oportunidades de investimento.

2.3.2 Norma ISO 9001

A norma ISO 9001 certifica o Sistema de Gestão da Qualidade e é aplicável a qualquer organização, independentemente do seu porte, setor ou localização.

O seu principal objetivo é melhorar a satisfação dos clientes por meio de melhorias contínuas nos processos e na avaliação da conformidade.

Com a certificação na norma ISO 9001 a empresa consegue melhorar a gestão da sua fábrica e aumentar a satisfação dos clientes, já que a implementação da ISO 9001 assegura que todas as etapas de produção foram realizadas adequadamente e dentro dos parâmetros de qualidade e segurança pré-estabelecidos [78].

A obtenção de um selo de certificação ISO 9001 vai muito além de ser um simples reconhecimento. Na verdade, ele é um símbolo de que os produtos e serviços respeitam padrões rigorosos de qualidade, transmitindo confiança aos consumidores.

Além disso, a posse dessa certificação pode fazer toda a diferença ao buscar parcerias comerciais. O reconhecimento internacional que ela proporciona confere maior credibilidade à marca, o que pode ser um diferencial significativo na hora de estabelecer relações comerciais com potenciais parceiros de negócios [78].

Ao estabelecer um padrão de qualidade, a ISO 9001 induz as empresas a se adaptarem para cumprir os seus requisitos. Isso resulta na padronização dos processos, tornando-os mais fluidos e eficazes, além de reduzir erros e custos de produção.

2.3.3 Norma ISO 14001

A ISO 14001 estabelece os requisitos para a implementação de um Sistema de Gestão Ambiental (SGA).

Essa norma possibilita que as empresas adotem práticas sustentáveis nas suas operações, promovendo a proteção do meio ambiente, a prevenção da poluição e o uso responsável dos recursos naturais.

A nova versão ISO 14001, publicada em setembro de 2015, tem como destaques: o alinhamento da Gestão Ambiental à estratégia da empresa, a gestão de riscos e a busca pela maior compatibilidade com as demais normas ISO. Isso quer dizer que as empresas

certificadas com a ISO 14001, na nova versão da norma, possuem uma maior preocupação na gestão dos aspetos ambientais durante o ciclo de vida do produto ou serviço da organização [78].

O principal foco da ISO 14001 é a melhoria do desempenho ambiental das organizações, em vez de apenas aprimorar o sistema de gestão em si. Isso significa que à análise se concentra mais nas reduções efetivas de emissões, efluentes e resíduos alcançadas pela empresa por meio da implementação do Sistema de gestão ambiental (SGA). Por outras palavras, o objetivo principal é garantir que as empresas estejam a adotar práticas que resultem em impactos ambientais positivos tangíveis.

3 Conformação Metálica

3.1 Conformação Metálica de Chapas

A conformação metálica é definida pela alteração de forma geométrica de um corpo metálico geralmente plano, mediante aplicação de um esforço mecânico, com objetivo de obter uma forma desejada, seja esta plana ou com volume, por outros termos, a chapa é submetida a esforços mecânicos que geram a deformação elásticas ou plásticas. Estas operações são efetuadas com dispositivos especiais denominados matrizes e punções, montados numa máquina chamada prensa, segundo o objetivo pretendido.

As operações de conformação de chapas metálicas estão geralmente subdivididos em três operações importantes, como afirma Rui [20]:

- Corte;
- Dobragem;
- Embutidura.

Na classificação dos processos de conformação, em geral, estão sempre presentes na zona de deformação da peça, esforços de flexão que dobram a região a ser deformada, criando tensões de tração numa superfície e de compressão na superfície oposta. Na estampagem profunda estão associados aos esforços típicos desse processo, os esforços que caracterizam os processos de conformação em geral [31]. Nesse processo, verifica-se invariavelmente a ação de um dispositivo da ferramenta denominado cerra-chapas ou sujeitador, que ocasiona o surgimento de esforços adicionais. Esforços gerados nas operações de conformação têm natureza complexa e variam com o decurso da operação. Tipicamente, as operações de conformação de chapas são realizadas a frio, utilizando como matéria-prima, chapas metálicas de aço, ligas de alumínio, ligas de cobre e outros materiais. Uma descrição da natureza do processo e das formas obtidas proporciona, compreender melhor a classificação dos diferentes processos de conformação de chapas metálicas.

3.1.1 Deformação e Tensão na Conformação Metálica

Para a conformação metálica ser executada, é necessário um conjunto de condições que podem ser verificadas antes do processo, para garantir tolerâncias exigidas e uma maior qualidade nas peças terminadas.

A compreensão da tensão e da deformação é essencial para a análise da conformação de metais. Muitas vezes, as palavras deformação e tensão são usadas como sinónimo pela comunidade não científica. No uso da engenharia, no entanto, a tensão (esforço) é a intensidade da força / unidade de área e a deformação é uma medida da quantidade de deformação [40].

3.1.1.1 Tensão

A tensão σ, é definida como a intensidade da força num ponto [40].

$$\sigma = \frac{\partial F}{\partial A} \quad \text{como} \quad \partial A \longrightarrow 0 \tag{3.1}$$

em que (F) é a força que atua num plano de área, (A). Se a tensão é a mesma em todos os lugares de um corpo, obtém-se:

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{3.2}$$

Existem nove componentes de tensão, como mostra a Figura 3.1. Uma componente de tensão normal é aquele no qual a força atua perpendicular ao plano. Pode ser de tração ou compressão. Um componente de tensão de corte é aquele onde a força atua paralelamente ao plano [40].

Os componentes da tensão são definidos de duas formas. O primeiro denota a normal para o plano sobre o qual a força atua e o segundo é a direção da força [40]. Por exemplo, σ_{xx} é uma tensão de tração na direção x. Uma tensão de corte que atua no plano x na direção y é denotado por σ_{xy}.

Formas repetidas (por exemplo, $\sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}$) indicam tensões normais. Eles são denotadas se tanto o plano como a direção são positivos ou ambos são negativos. Se um for positivo e o outro é negativo, são compressivos. Uma descrição mista (por exemplo, $\sigma_{zx}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}$), denotam tensões de corte. Um estado de tensão na notação tensor é expresso como [40]:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

O uso da convenção oposta não deve causar nenhum problema, porque: $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$

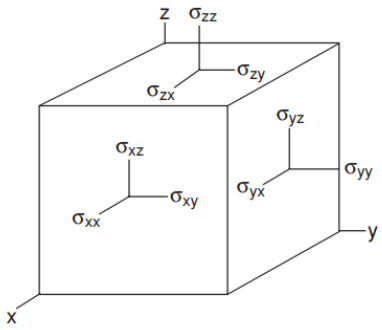


Figura 3.1: Nove componentes da tensão a atuar sobre um elemento infinitesimal.

Onde i e j são iterados sobre x, y e z. Exceto quando a notação tensor é necessária, é mais simples usar uma única forma para uma tensão normal e denotar uma tensão de corte por τ. Por exemplo, $\sigma_x \equiv \sigma_{xx}$ e $\tau_{xy} \equiv \sigma_{xy}$.

3.1.1.2 Transformação da Tensão

Os componentes da tensão expresso ao longo de um conjunto de eixos ortogonais podem ser expressos ao longo de qualquer outro conjunto de eixos [40]. Consideremos a resolução do componente da tensão, $\sigma_y = \frac{F_y}{A_y}$, para o eixos $x^{'}$ e $y^{'}$ como mostra a Figura 3.2.

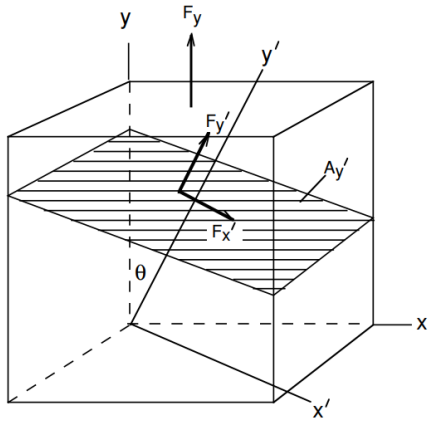


Figura 3.2: A tensão que atua num plano, $A^{'}$, ao abrigo de uma tensão normal, σ_y [40].

A força, $F_y^{'}$, atua na direção $y^{'}$ é $F_y^{'} = F_y cos(\theta)$ e a área normal a $y^{'}$ é $A_y^{'} = \frac{A_y}{cos(\theta)}$, então:

$$\sigma_{y'} = \frac{F_{y'}}{A_{y'}} = \frac{F_y cos\theta}{(\frac{A_y}{cos\theta})} = \sigma_y cos^2\theta \tag{3.4}$$

$$\tau_{x'y'} = \frac{F_{y'}}{A_{y'}} = \frac{F_y sen\theta}{(\frac{A_y}{cos\theta})} = \sigma_y cos\theta sen\theta \tag{3.5}$$

3.1.1.3 Deformação

A deformação imposta num material descreve a quantidade de deslocamento num ponto. Quando um corpo está deformado, as extremidades nesse corpo são deslocados. A Figura 3.3 mostra uma linha num material que foi deformado. A linha foi transladada, girada e deformada. A deformação é caracterizada na prática pelo deslocamento nominal e [40].

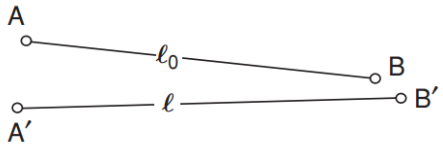


Figura 3.3: Deformação, translação e rotação de uma linha em um material [40].

$$e = \frac{(l - l_0)}{l} = \frac{\Delta l}{l} \tag{3.6}$$

Uma definição alternativa é a de raiz verdadeira ou logarítmica, ε definida por:

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l}; \tag{3.7}$$

que na integração, $\int d\varepsilon = \int (\frac{1}{l}) dl$, resulta:

$$\varepsilon = ln(\frac{l}{l_0}) = ln(1 + e) \tag{3.8}$$

3.1.1.4 Transição Elástica-Plástica

A transição do fluxo elástico para o plástico é gradual, como ilustrado na Figura 3.4 para deformação plano-deformação, com $\varepsilon_y = 0$ e $\sigma_z = 0$. Para a deformação elástica, $\alpha = \nu$ e para deformação totalmente plástica $\alpha = 0.5$. Nesta Figura, o ε_x é normalizado pela razão da resistência de escoamento ao módulo. Note-se que 95% da mudança de elástico para plástico a deformação ocorre quando a deformação plástica é 3 vezes a deformação elástica [40].

Para um material que endurece, há deformação elástica adicional após cedência do material. A deformação total é a soma das partes elástica e plástica, $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$. Mesmo embora a deformação elástica possa ser muito pequena relativamente à tensão plástica, existe recuperação elástica nos controlos de descarga, tensões residuais e springback.

A Figura 3.5 mostra que, após a produção inicial, a deformação adicional requer um aumento de tensão. Embora a tensão do material endureça à medida que é estendida, a sua área de secção transversal diminui. Estes dois fatores controlam a forma da curva

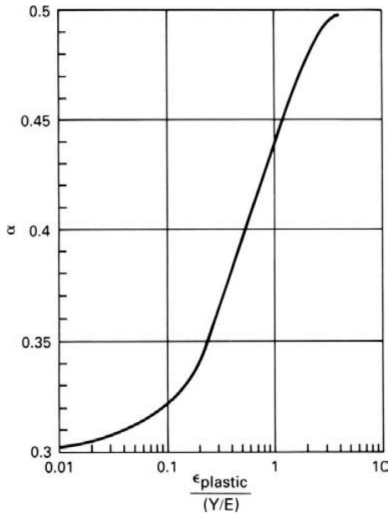


Figura 3.4: Alteração na razão de tensão, $\alpha = \frac{\sigma_y}{\sigma_x}$, para deformação plana, $\varepsilon_y = 0$, em função da deformação [40].

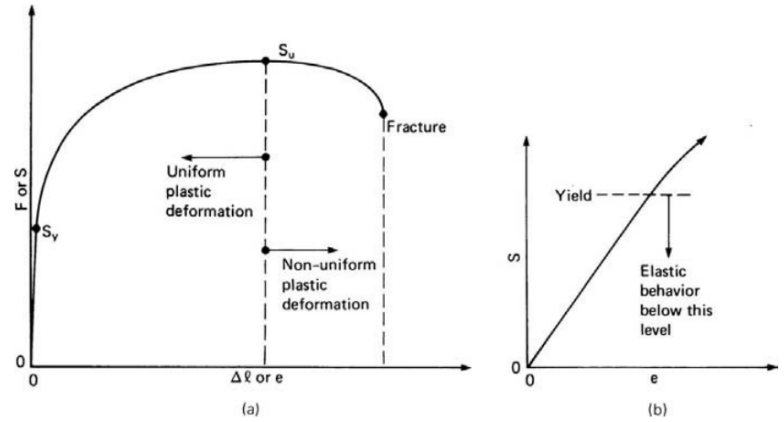


Figura 3.5: **a)** Curva de carga-extensão e tensão-deformação de um metal dúctil; **b)** Expansão da parte inicial da curva [40].

de extensão de carga. Eventualmente existe um máximo quando a taxa de redução da capacidade de carga causada pela redução da área, é igual à taxa de endurecimento por deformação. Até este ponto a deformação ao longo da secção transversal é uniforme. No entanto, após a carga máxima ser atingida, a deformação localizar-se-á e formar-se-á uma garganta. Com extensão contínua, a deformação é restrita na região da garganta [40].

3.1.1.5 Elasticidade Isotrópica

Num sólido deformável isotrópico (o seu comportamento é igual em todas as direções), a elongação é proporcional a força durante o percurso do comportamento linear, tal e como aconteceria numa mola. A este fenómeno se conhece como lei de Hooke generalizada.

As leis de Hook podem ser decomposta como:

$$\begin{aligned} e_x &= (\frac{1}{E})[\sigma_x - \upsilon(\sigma_y - \sigma_z)], \\ e_y &= (\frac{1}{E})[\sigma_y - \upsilon(\sigma_z - \sigma_x)], \\ e_z &= (\frac{1}{E})[\sigma_z - \upsilon(\sigma_x - \sigma_y)], \end{aligned} \tag{3.9}$$

e

$$\begin{aligned} \gamma_{yz} &= (\frac{1}{G})\tau_{yz}, \\ \gamma_{zx} &= (\frac{1}{G})\tau_{zx}, \\ \gamma_{xy} &= (\frac{1}{G})\tau_{xy}, \end{aligned} \tag{3.10}$$

onde E é o módulo de Young, υ é o coeficiente de Poisson e G é o módulo de corte. Para um material isotrópico, E, υ e G estão inter-relacionados por:

$$E = 2G(1 + \upsilon), \tag{3.11}$$

ou

$$G = \frac{E}{(2 + 2\upsilon)}. \tag{3.12}$$

3.2 Estampagem Metálica

A estampagem metálica, refere-se ao processo de fabrico de componentes metálicos, através da deformação, corte ou perfuração da chapa, numa operação de estampagem entre duas superfícies (matriz e punção).

Também se refere a um conjunto de operações executadas na matéria-prima bruta, de forma que geralmente se obtém, ao final do processo, um produto acabado em termos de forma e dimensões. As operações são executadas geralmente com auxílio de ferramentas, instaladas em prensas. A estampagem é um processo de fabrico realizado frequentemente a frio, no qual uma chapa é colocada sobre uma matriz e submetida a uma força de um punção, de maneira a adquirir a forma geométrica da matriz. A estampagem da chapa pode ser simples, quando se executa uma só operação, ou combinada. Com a ajuda da estampagem de chapas, fabricam-se peças de aço com baixo nível carbono, aços inoxidáveis, alumínio, cobre e de diferentes ligas não ferrosas [19].

A estampagem, cujo processo é geralmente realizado a frio, é um processo de fabrico que tem por finalidade o corte, a dobra e a embutidura de um material metálico, e com espessura praticamente uniforme [26, 30]. Por convenção, quando se pensa em estampagem estão a se referir ao uso de dispositivos totalmente metálicos ou, no mínimo,

de material em grande parte metálico, matrizes complexas e máquinas de grande porte (puncionadeiras, prensas, quiandoras e guilhotinas hidráulicas), embora existam equipamentos menos complexos (viradeiras de chapas e de tubos, etc.). Dessa forma, devemos procurar a diferenciação e caracterização clara destes sub-processos que formam a família da estampagem convencional.

O processo de estampagem normalmente é dividido por alguns processos principais como são os casos de: conformação por estampagem (Figura 3.6) , conformação rasa com estampagem e reestampagem de chapas, bem como estampagem profunda de chapas [33].

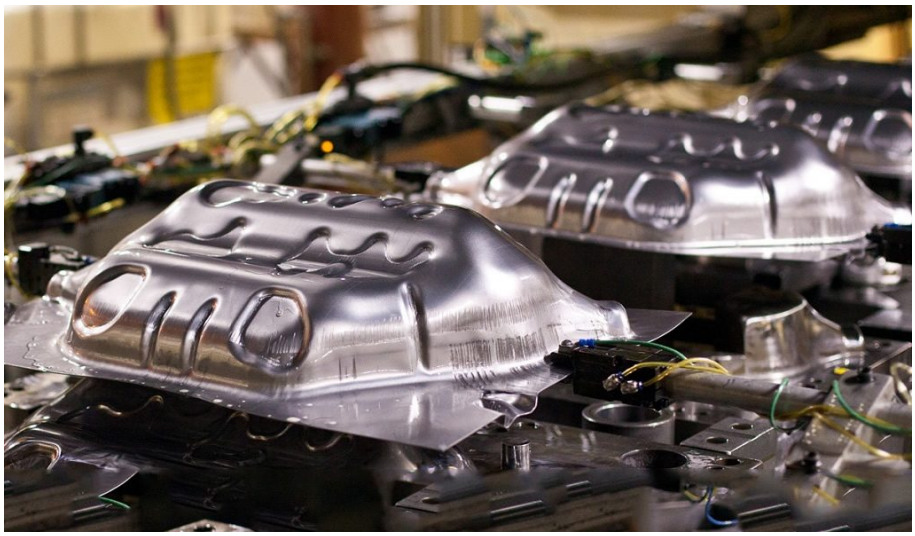


Figura 3.6: Peça metálica obtida pelo processo de estampagem.

As operações de estampagem podem ser resumidas em três operações básicas descritas no princípio deste capitulo. Enquanto as operações de corte e dobragem ou flexão são realizadas normalmente a frio, o de embutidura pode eventualmente ser a quente, dependendo da necessidade [19].

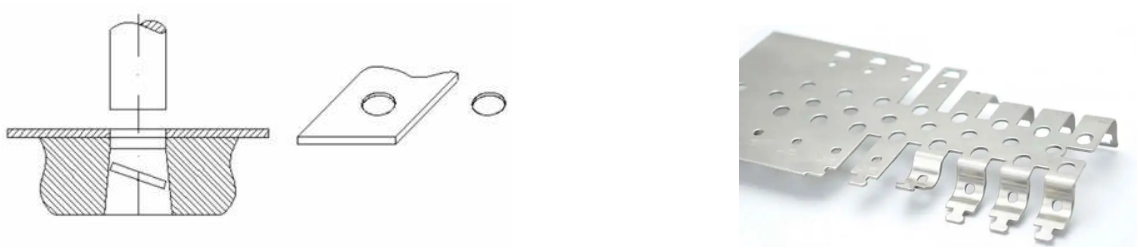
3.2.1 Operação de Corte

Nos processos de estampagem, o corte, como o próprio nome sugere, tem como objetivo cortar a matéria-prima visando obter o produto final ou um pré-produto, esta operação normalmente esta no início e no final do processo de estampagem. Geralmente, possui três etapas típicas, que são influenciadas diretamente pela folga deixada entre o punção e a cavidade da matriz, conforme destaca, Dieter [26].

As matrizes envolvidas nestes processos, em geral, são complexas, principalmente para estampagem em ferramentas progressivas, exigem rigidez e precisão dimensional elevada. Portanto, devem ser fabricadas com aço de alta resistência mecânica ou ligas, denominados “aços ferramentas”, conforme destacam, Filho [30] e Dieter [26], e apresentar excelente acabamento superficial e dimensional. Estes dispositivos exigem ainda

tratamento térmico (têmpera e revenido) e/ou superficial (recobrimento por PVD, CVD, etc.), visando aumentar a sua dureza e evitar o seu desgaste prematuro, já que este processo é indicado para uma elevada taxa de produção.

As ferramentas compõem-se de um conjunto de peças ou placas que, associado as prensas ou balancins, executam operações de corte (Figura 3.7a) e de dobra para produção de peças em série. Durante o processo, o material é cortado de acordo com as medidas das peças a serem estampadas, a que se dá o nome de tira. Quando se corta numa tira de material as formas de que se necessita, a parte útil obtida recebe o nome de peça. O restante de material que sobra chama-se sucata [26].



(a) Operação de corte numa prensa

(b) Corte progressivo

Figura 3.7: Ilustração de corte em ferramentas de estampagem [52].

3.2.2 Operação de Dobra

A dobra de metal (quinagem ou flexão) consiste em conformar um material numa peça útil pela sua dobragem num ângulo e/ou raio de curvatura predeterminado em projeto, resumido por Dieter [26] e Filho [30]. Para o seu desempenho são utilizadas máquinas quiandoras, recomendando-se o uso de matrizes semelhantes às da estampagem de corte em prensa, com vista à produção em série, contudo projetadas para dar a dobra com apenas um golpe, ou ainda, equipamentos automatizados como quiandoras hidráulicas de configuração rápido. Para pequenos lotes de produção, utilizam-se quiandoras manuais (ou viradeiras) que exigem menor investimento e tem fácil operação. A ferramenta (matriz e punção) utilizado nestas máquinas devem ser de aço, ferramenta temperada e retificada, visando garantir sua vida útil e precisão dimensional, bem como, acabamento adequado.

A operação de dobra é também conhecido como o processo de flexão do metal. É formado de um punção e uma matriz, geralmente, guiado pela parte superior da prensa ou placa-guia, como é o caso do punção. O punção é uma peça de aço endurecido e temperado, cuja parte inferior é moldada para corresponder à superfície interna do componente.

Existem estampagens mistas cujas estruturas são o resultado da união da operação de corte e de dobra. As ferramentas de estampagem mista efetuam operações de corte e de dobragem.

A operação de dobra (Figura 3.8), em dobradeira, pode ser classificada como “dobra livre” ou “em vazio”, pois o material que sofre a deformação não entra em contacto com

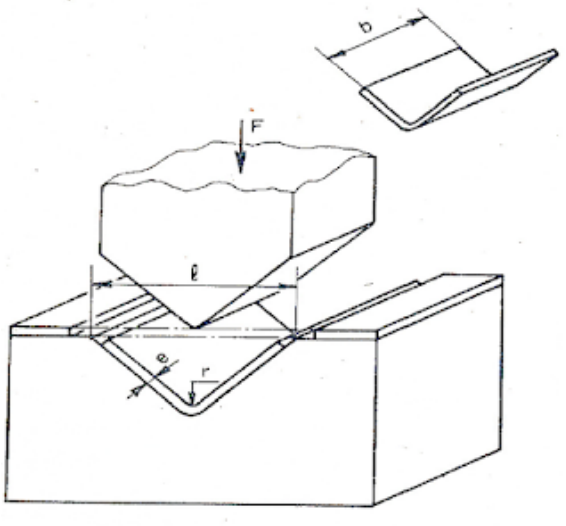


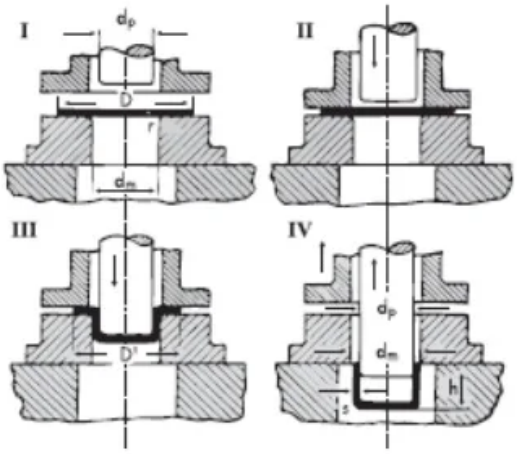
Figura 3.8: Operação de dobra de chapa metálica [26].

o fundo do canal da matriz em "V". Sendo apoiado em três pontos: nas bordas do canal da matriz e no raio da ponta do punção, os quais se encarregam de dar o raio interno da dobra. Como o contacto entre o material e as ferramentas é pequeno, também será menor a força exigida para a operação, apresentando baixo atrito. Este tipo de dobra também fornece as melhores condições de verificar e corrigir o efeito da recuperação elástica do material (springback) conforme destacam Dieter [26] e Ivan [19] . Fenómeno este que ocorre em todos os processos de conformação de chapas metálicas.

3.2.3 Operação de Embutidura

A operação de embutidura em prensa (ou embutimento, ver Figura 3.9a), que em muitas bibliografias também é denominada estampagem profunda, ex.: [30, 26], consiste naquele processo que visa transformar uma chapa plana num corpo oco (semelhante a um copo, de formato cilíndrico, cónico ou parecido a estes), através de uma ou mais etapas. Como exemplo, cita-se o fabrico de latas de refrigerantes, utensílios domésticos (panelas, baixelas e formas diversas), etc. [19].

As matrizes utilizadas também são de materiais de alta dureza como aço ferramenta, com tratamento térmico e/ou superficial adequado, visando aumentar sua vida útil e minimizar o desgaste e as condições de atrito. Neste processo o material escoa para dentro da cavidade da matriz, exigindo geralmente um cerra-chapas (sujeitador) para evitar o enrugamento e/ou outros defeitos das bordas ou flanges da peça final, descrito por Dieter et al [26, 19] e Filho [30]. Salientam que os processos por matriz metálica (ex.: estampagem convencional) conseguem obter elevados índices de produtividade, maior do que aqueles processos que utilizam matrizes flexíveis, como o processo Guérin (Elastoformação), que ao contrário dos processos convencionais utiliza ferramentas flexíveis (matrizes ou punções) para realizar a conformação do material [26].



(a) Operação de embutidura numa secção circular.



(b) Embutidura de uma superfície irregular

Figura 3.9: Operação de embutidura.

3.2.3.1 Diagrama Limite de Embutidura

A avaliação da conformabilidade do material quando sujeito as operações de estampagem, é realizada através do diagrama limite de embutidura (FLD ou FLC siglas em inglês), que fornecem os limites das duas deformações principais (ε_1 e ε_2) levando à fra-

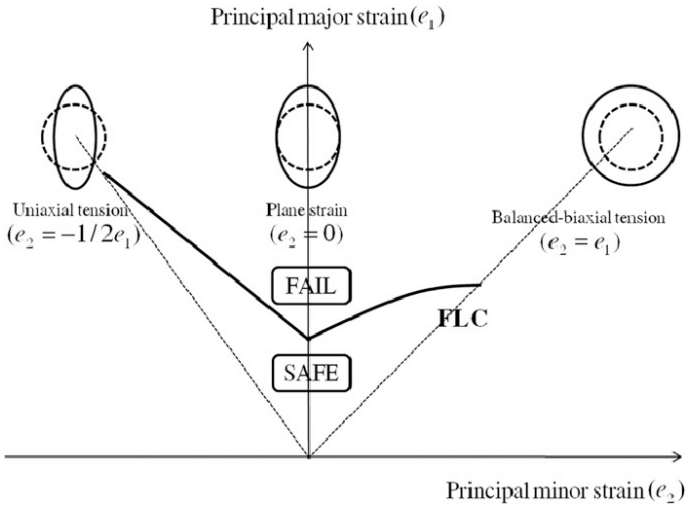
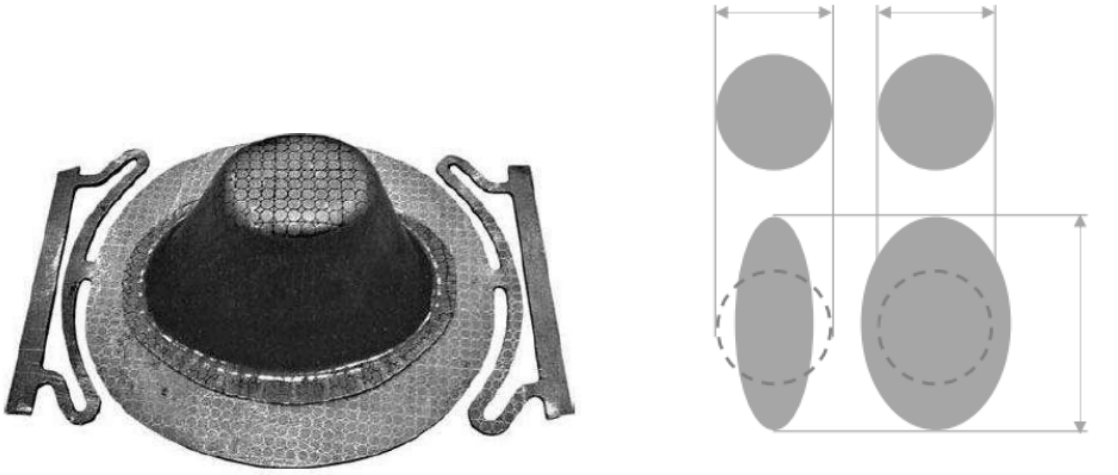


Figura 3.10: Diagrama de embutidura [52].

tura. Os diagramas cobrem uma grande variedade, de formas com deformações típicas de processos de estampagem, desde tração biaxial e deformação de tração uniaxial [52].

Para determinar a falha numa determinada região, é realizada um teste mecânico que consiste em colocar uma marca circular na peça, antes de ser deformada, e de seguida, mede-se a elipse gerada após a deformação (ver as Figuras 3.11b e 3.11a)

Ao repetir o teste para inúmeras marcas, gera-se uma gama de estados de tensão a partir dos quais é possível criar o diagrama limite de embutidura como mostra a Figura 3.10, uma linha a partir da qual a rotura se inicia.



(a) Planificado gravado com marcas circulares

(b) Modos de deformação por extensão (esquerda) e por expansão (direita)

Figura 3.11: Círculos usados na análise de conformabilidade: a forma original, a deformação no plano, embutido e expansão biaxial [52].

3.2.3.2 Cerra-chapas

O cerra-chapas é o componente ativo de uma ferramenta de estampagem que tem como função principal, controlar o escoamento da chapa através da aplicação de uma pressão sobre a sua superfície. O cerra-chapas previne também o surgimento do fenómeno indesejado de enrugamento na aba, sendo este um dos fatores mais importantes na decisão de aplicar cerra-chapas ou não, uma vez que existem materiais em que a propensão para o enrugamento é muito baixa, podendo tornar o cerra-chapas dispensável [52]. Segundo Rodrigues [70], as variáveis processuais que mais contribuem para estas condições são a espessura da chapa, a relação de estampagem e as propriedades mecânicas do material. Neste sentido, optar pela aplicação do cerra-chapas dependerá de ensaios experimentais e/ou de simulações computacionais através da análise por elementos finitos.

Dependendo do sistema construtivo da ferramenta, existem vários tipos de cerra-chapas, em que se distinguem os fixos, os que são acionados pela ferramenta e os independentes. Os fixos podem ter a superfície direita quando interessa obter um aumento de espessura na aba, e para isso deve-se deixar uma folga entre a superfície do cerra-chapas e a superfície inicial do esboço. O valor dessa folga é crucial e muito complexo de calcular. Segundo Magalhães [52], esse valor corresponderia de 25 a 50% da diferença entre o valor da espessura inicial da chapa e o da espessura estimada para a operação realizada sem cerra-chapas. A superfície cónica é utilizada para evitar o problema da folga, e tem a vantagem de aplicar uma força decrescente à medida que a aba escoa para o interior da matriz.

A pressão nominal do cerra-chapas é vital para o correto controlo do escoamento da chapa para evitar o surgimento de problemas já mencionados neste capítulo. Vários autores como, Dieter et al [26, 30] e Hosford [40] referem que o valor, em geral, está entre

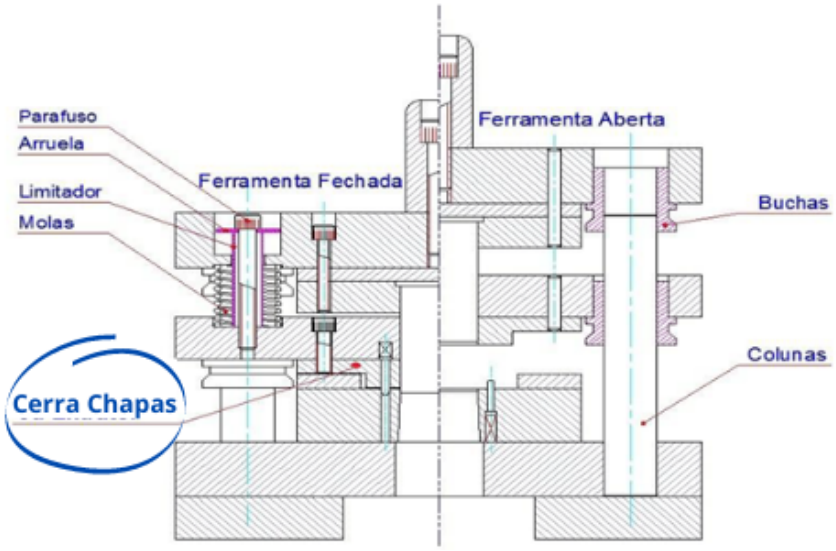


Figura 3.12: Localização do cerra chapa no conjunto de ferramentas de estampagem.

os 0,5 e os 0,7% da soma do valor da tensão de cedência e o valor da tensão de rotura do material [52].

3.2.3.3 Punção

Nos processo de estampagem metálica o punção é um material feito de aço de alta resistência e endurecido por algum tipo de tratamento térmico com objetivo de cortar, dobrar, perfurar e moldar chapas metálicas.

Para aumentar a vida útil dos punções e melhorar o seu desempenho, eles podem ser revestidos com materiais como nitreto de titânio (TiN), carboneto de titânio (TiC), nitreto de alumínio (AlN) ou revestimentos de diamante. Esses revestimentos reduzem o atrito e o desgaste durante a estampagem [66].

Os punções devem ser fabricadas com tolerâncias precisas para garantir a qualidade das peças estampadas.

Além disso, o acabamento da superfície do punção é importante para evitar imperfeições na peça final. Também devem ser suficientemente resistentes para suportar as forças aplicadas durante a estampagem, evitando deformações ou quebras. A dureza adequada também é importante para evitar desgaste prematuro, como afirma [66].

Importa destacar que a função exata de um punção de estampagem depende do projeto da peça a ser estampada e do processo de fabrico usado. Os punções para estampagem metálica são projetadas para serem precisos, duráveis e capazes de suportar as cargas e tensões que surgem durante a operação de estampagem.



Figura 3.13: Diferentes formatos de punções.

3.2.3.4 Defeitos de Embutidura

A embutidura é um processo complexo ao qual podem estar associados defeitos. Os defeitos de embutidura podem ser classificados em três categorias: defeitos de forma ou dimensionamento, defeitos na peça ou na sua superfície e propriedades não satisfatórias. As principais causas para a ocorrência de defeitos na embutidura são: um material de base defeituoso, um projeto deficiente da peça (desenho, escolha de material, etc.) ou procedimento incorreto (máquina, ferramentas, processo, etc.). Os defeitos mais comuns deste processo são o aparecimento de rugas e fissuras (tanto na parede lateral como no bordo), conhecido como *wrinkling*, roturas, a formação de orelhas (ver Figura 3.14), conhecido como *earing*, aparecimento de riscos na superfície e o retorno elástico [40].

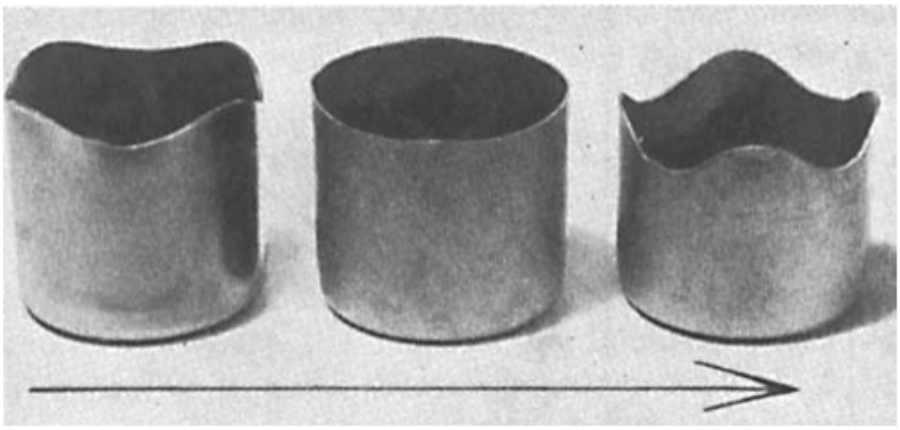


Figura 3.14: Aparecimento de orelhas nas peças [40].

Com este tipo de defeito, o topo das peças embutidas não fica totalmente plano. Em

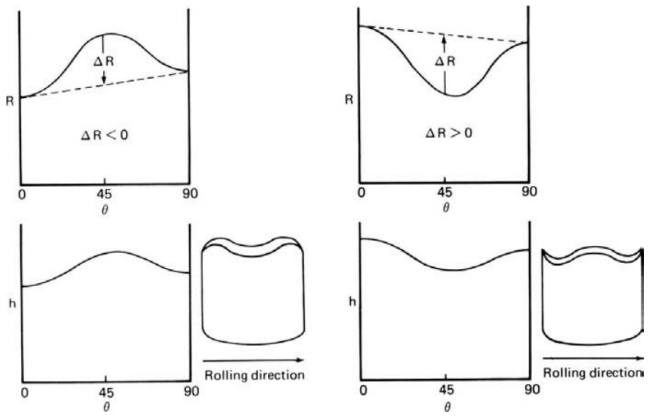


Figura 3.15: Influência do valor de $\bar{r}$ na formação de orelhas de embutidura [40].

vez disso, aparecem elevações ou orelhas com vales, entre elas. Geralmente aparecem quatro orelhas, mas também podem ser encontradas peças com duas, seis ou oito. O aparecimento de orelhas de embutidura é indesejável, uma vez que aumenta a quantidade de metal que deve ser cortado, resultando num elevado custo de produção. Este defeito deve-se à anisotropia planar do material e está relacionado com o parâmetro r: em posições angulares que apresentam um baixo valor de r, as paredes são mais espessas e baixas; em posições angulares com um r elevado as paredes são mais altas e finas. Assim, uma análise da formação de orelhas na embutidura é importante para avaliar as propriedades anisotrópicas do material e controlar o desenvolvimento de orelhas. Se o valor de $\triangle r$ for positivo, as orelhas formam-se a $0°$ e a $90°$ da direção de laminagem e no caso de $\triangle r$ ser negativo as orelhas aparecem a $45°$ [40].

A dependência do ângulo na formação de orelhas pode ser estimada assumindo que o estado de tensão na borda externa da peça é de compressão uniaxial, deforma que a resistência à compressão é a mesma ao longo de toda a parte superior do copo final. Assim, a deformação ao longo da espessura é $\left(\varepsilon_{z\theta} = \frac{-\varepsilon_y}{R_\theta+90+1}\right)$, e o valor de ($R$) medido num teste de tração normal a θ. A variação da espessura ao longo do topo do copo é descrita por [40]:

$$t_\theta + t_0 e^{\varepsilon_{z\theta}} = t_\theta e^{\left(\frac{-\varepsilon_y}{R_\theta+90+1}\right)} = t_0 \left(\frac{d_1}{d_0}\right)^{\frac{-\varepsilon_y}{R_\theta+90+1}} \tag{3.13}$$

Assume-se ainda, que apesar de, o valor da espessura da parede variar linearmente com a altura, o valor de:

$$\frac{h_\theta(t_0+t_\theta)}{2} = \frac{h_\theta t_0 \left[1 + \left(\frac{d_1}{d_0}\right)^{\frac{-\varepsilon_y}{R_\theta+90+1}}\right]}{2} \tag{3.14}$$

não varia ao longo do topo da parede. Portanto:

$$h_{45}\left[1+\left(\frac{d_1}{d_0}\right)^{\left(\frac{1}{R_{45}+90+1}\right)}\right]^{-1} = h_0\left[1+\left(\frac{d_1}{d_0}\right)^{\left(\frac{1}{R_{90}+90+1}\right)}\right]^{-1} \tag{3.15}$$

$$= h_{90}\left[1+\left(\frac{d_1}{d_0}\right)^{\left(\frac{1}{R_{90}+90+1}\right)}\right]^{-1} \tag{3.16}$$

Para uma dada relação de embutidura β, pode-se estimar a altura relativa da orelha $\left(\frac{2h_{45}}{h_0+h_{90}}\right)$ partir da eq. 3.15.

3.2.4 Estampagem a Frio

A estampagem a frio ou estampagem a temperaturas a baixo da temperatura de recristalização (temperatura que os metais detêm quando renovam a sua microestrutura após sofrerem deformação plástica) é um processo que ocorre sem adição de calor na matéria-prima (ver Figura 3.6). Desta forma a peça é conformada sob condições do meio ambiente, exigindo maior aplicação de esforços mecânicos em chapas com espessura relativamente superiores a 1 mm. Este processo é comummente aplicado para obtenção de componentes ou chapas de menor espessura, como os componentes metálicos da superfície externa das viaturas (chapa de carroçaria).

Normalmente, como as superfícies em contacto apresentam atrito entre si, é utilizada um fluido para reduzir os efeitos do atrito e obter um acabado superficial mais uniforme, bem como se evita o desgaste prematuro das ferramentas.

3.2.4.1 Estampagem em Ferramentas Progressivas

As ferramentas progressivas são utilizadas para executar uma sequência de operações, como corte, conformação e dobra de metal numa única ferramenta no processo de conformação a frio. A bobina de chapa desenrola-se e a tira entra na ferramenta passo a passo em cada curso. Desta forma, existem várias peças dentro da ferramenta ao mesmo tempo, mas em diferentes fases de fabrico [15]. A peça permanece geralmente ligada à tira até à última operação. Nas primeiras etapas são normalmente efetuadas operações de corte (ver Figura 3.16), é o caso do corte da guia de tira e perfurações, a operação de corte neste tipo de estampagem sempre está na primeira e na última operação onde a peça final é separada da tira terminado a sequência da produção.

O movimento de progressão da tira metálica dentro da ferramenta é conhecido como movimento de avanço, ao qual está associado um determinado comprimento, o comprimento de avanço, este terá de ser obrigatoriamente igual à distância entre todas as etapas da ferramenta, caso contrário o alinhamento entre as geometrias já conformadas e os constituintes da ferramenta ficarão comprometidos [2].

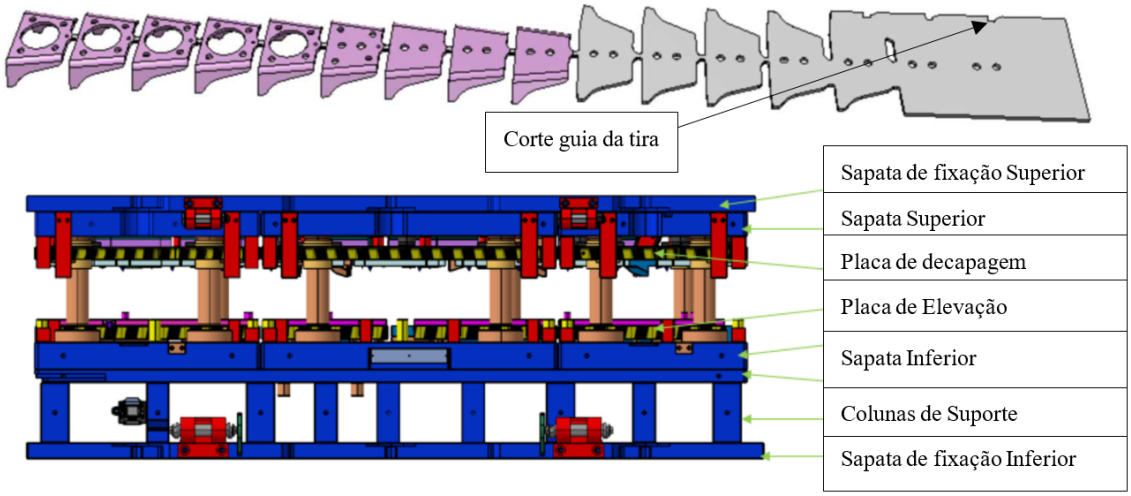


Figura 3.16: Sequência (direita à esquerda) de operações numa ferramenta progressiva [15].

O movimento de avanço é proporcionado por um dispositivo chamado alimentador, que se encontra fora da ferramenta e empurra a chapa de matéria-prima para dentro da mesma, sendo que, só se torna possível realizar o movimento de avanço nas etapas posteriores da ferramenta, se existir uma conexão entre toda a chapa metálica, esta conexão é conhecida por "rede" da tira metálica, e é a principal responsável por mover a peça inacabada presente numa etapa, para a etapa seguinte, para além disso, também garante um correto alinhamento das peças através dos furos-guia que nela constam. No final de todas as etapas a peça finalizada é cortada da tira e a rede é descartada (sucata) [2].

3.2.4.2 Estampagem em Ferramentas Transfer e Tandem

As ferramentas transfer são caraterizados por produzirem peças de maiores dimensões e podem ser construído num único módulo ou módulos separados (tandem), em caso dos módulos serem separados ou ferramentas tandem, como mostra a Figura 3.18, geralmente eles funcionam com auxílio de braços robóticos para efetuarem a transferência ou avanço das peças pré-acabadas de um módulo para outro. No caso de ferramentas transfer de módulo único como da Figura 3.17, geralmente requer um mecanismo transfer que funciona como uma mesa balanceadora que se move de baixo para cima e de esquerda a direita movendo as peças de um passo para o outro sucessivamente.

As várias operações destas ferramentas encontram-se dispostas sequencialmente na ferramenta tal como nas ferramentas progressivas, separadas entre si por uma distância pré-definida, o passo da ferramenta, no entanto, a progressão da chapa no interior da ferramenta é conseguida à custa de um sistema automatizado, que por intermédio de barras que servem de suporte às sobre-barras ao qual são aparafusadas as diferentes tipologias de transferência entre estações, às quais podemos destacar as pinças, colheres ou palas e ventosas. Esta atuação de movimentação de formatos ao longo da ferramenta é sincronizada com o funcionamento da prensa, de modo a que se consiga reduzir os tempos mortos

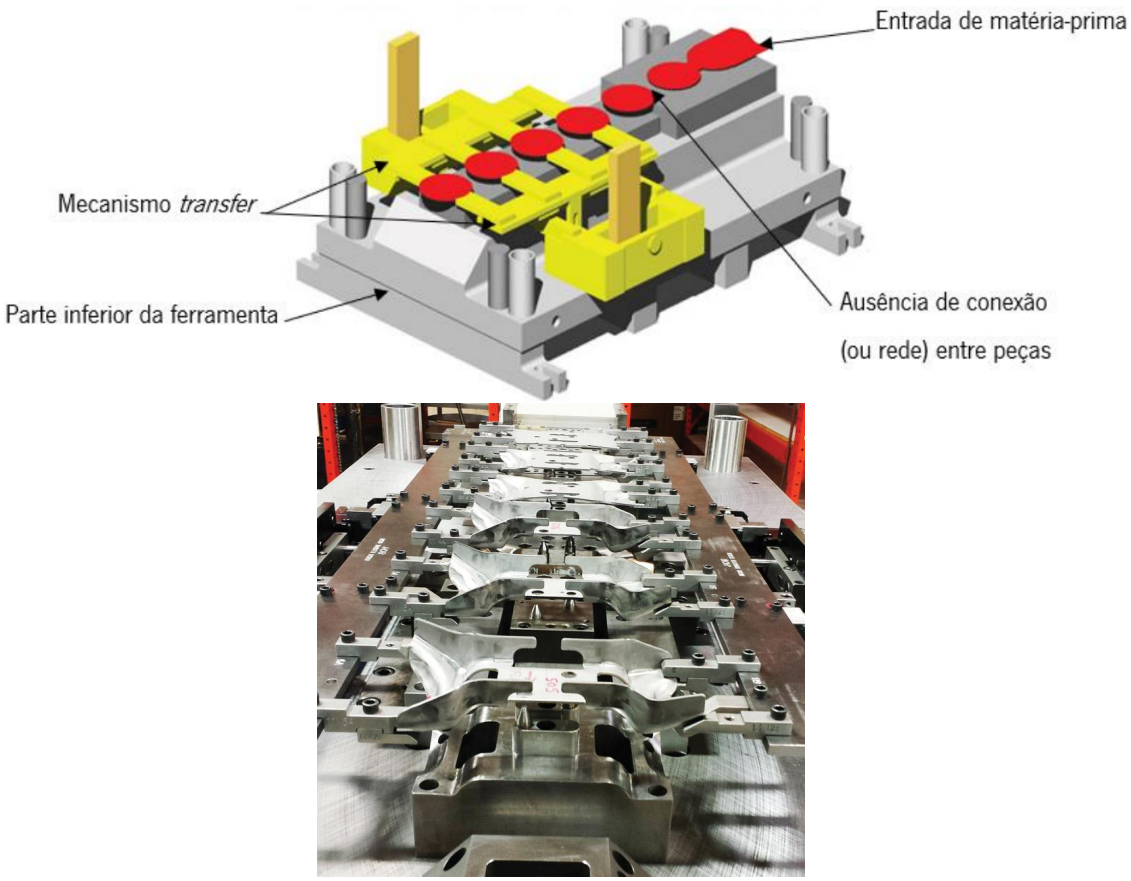


Figura 3.17: Ilustração de uma ferramenta transfer [76].

e assim rentabilizar o funcionamento da mesma [59].

Na Figura 3.18, se observa uma ferramenta (transfer tandem) nas instalações da empresa Gestamp Cerveira, a mesma possui 6 módulos separados, que efetuam estampagem de componentes com um máximo de 6 passos, como se observa entre módulos existe um braço robótico para efetuar o avanço das peças de um módulo para o outro, a sua alimentação normalmente pode ser efetuado com a presença de um técnico que adiciona as chapas cortadas em pré-formato da peça numa zona determina, junto ao primeiro braço robótico, logo, o primeiro braço robótico retira as chapas desta zona, e coloca no primeiro módulo.

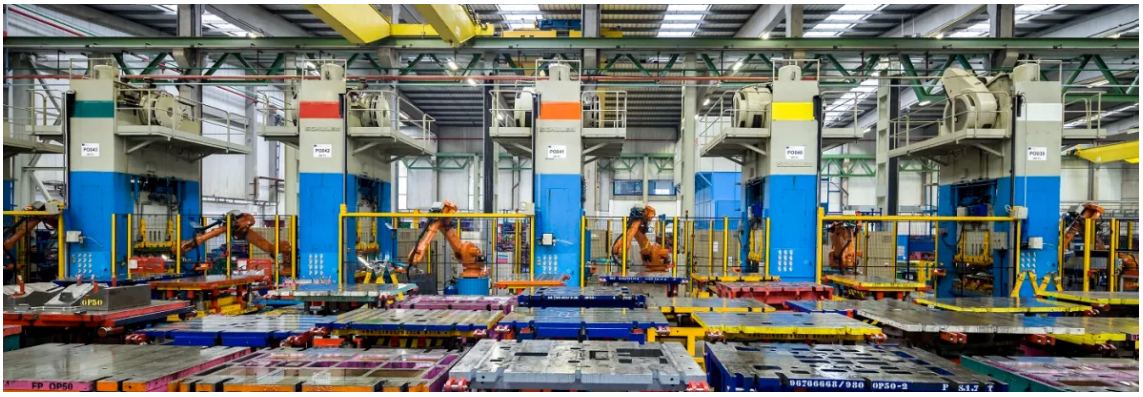


Figura 3.18: Ilustração de uma ferramenta transfer tandem [35].

Este tipo de ferramentas surgiu da necessidade de produzir peças com geometria mais complexas e de maiores dimensões (ao não possuir uma ligação física entre as operações, torna-se possível a colocação de punções, cunhos, matrizes e restantes dos componentes inerentes ao processo de estampagem em locais que numa ferramenta progressiva seriam mais complexas a sua colocação), e também da necessidade crescente de reduzir o consumo de matéria-prima (as ferramentas *transfer e tandem* possuem valores tipicamente de aproveitamento de matéria-prima superiores devido a dispensarem ligações físicas entre operações), como afirma [59].

3.2.4.3 Força de Estampagem

As expressões que determinam a força ao longo do processo de estampagem são algo complexas devido à intervenção de variáveis com valores não conhecidos, como a tensão radial e o atrito, por exemplo, devido à variação não linear do valor da força e às diferentes fases de comportamento ao longo do processo, a utilização de ferramentas CAE é essencial no projeto e fabrico de peças com geometria complexa. Desta forma, alguns autores propõem expressões mais simples e menos rigorosas para o cálculo da força de estampagem. Rodrigues [70], propõe a seguinte equação para calcular a força máxima de estampagem:

$$F_{max} = 2\pi r_m h \sigma_r Q_f \tag{3.17}$$

por outro lado, Shuler propõem a seguinte equação para cálculo de força máxima de estampagem:

$$F_{max} = 1,2\pi(d_p + h)h\sigma_R \left(\frac{m-1}{M_1 - 1}\right) \tag{3.18}$$

em que:

- r_m, raio médio da parede da taça;

- m, relação de estampagem;

- d_p, diâmetro do punção;

-M_1, Coeficiente limite de estampagem para a primeira fase;

- h, espessura da chapa metálica;

- $\sigma_r = \sigma_R$, a tensão de rotura do material;

- Q_f, um fator corretivo da tensão de rotura que depende da relação de estampagem (ver tabela 3.1).

Tabela 3.1: Fator corretivo da tensão de rotura em função da relação de estampagem [52].

r_i/r_0	0,55	0,575	0,6	0,625	0,65	0,675	0,7	0,725	0,75	0,775	0,8
Q_f	1	0,93	0,86	0,79	0,72	0,66	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4

3.2.4.4 Vantagens e Desafios da Estampagem a Frio

A estampagem a frio é um dos processos mais utilizados na indústria automóvel fruto da sua eficiência, baixo consumo energético, e outros fatores, como a possibilidade de conformar peças de maiores dimensões a tolerâncias relativamente baixas.

Emprega-se a estampagem a frio de chapas para se fabricar peças com paredes finas feitas de chapa ou de diversos metais e ligas. Devido às suas características este processo de fabrico é apropriado, preferencialmente, para as grandes séries de peças, obtendo-se grandes vantagens, tais como: alta produção, reduzidos custos por peças, bom acabamento, não necessitando processamento posterior; maior resistência das peças devido à conformação, que causa o encruamento no material, baixo custo de controlo de qualidade devido à uniformidade da produção e a facilidade para a deteção de desvios [62].

No entanto, é importante ressaltar que a estampagem também apresenta desafios e limitações. É necessário investimento em equipamentos de alta tecnologia, treinamento adequado dos operadores e controle de qualidade rigoroso para garantir a excelência do processo. Além disso, as constantes mudanças nas demandas de mercado e nos requisitos de segurança também exigem adaptações na forma como a estampagem é realizada [61].

Por isso, é fundamental que os fabricantes de automóveis estejam atentos às novas tendências e avanços na área da estampagem. Investir em pesquisa e desenvolvimento, bem como estabelecer parcerias estratégicas com fornecedores de equipamentos e tecnologias, são ações essenciais para se manter competitivo no mercado automóvel, como afirma [61].

4 Aços Dual Phase

4.1 Caracterização dos Aços Dual Phase

Nos últimos anos, tem surgido um esforço significativo da indústria automóvel para reduzir o peso das peças estampadas, aumentando simultaneamente a sua resistência. Esse tema leva à difusão de materiais como aços de alta resistência (TRIP, DP etc.) e ligas leves. Em particular, os AHSS provaram a sua adequação para várias partes da carroçaria e estrutura do automóvel, uma vez que proporcionam baixa massa, custos acessíveis e desempenho aumentado. De facto, a microestrutura desses materiais permite alcançar altas resistências sem um agravamento excessivo das performances de conformabilidade, em relação às fornecidas pelos aços comuns. Na verdade, a taxa de endurecimento por trabalho mais a excelente elongação, conferem aos aços DP resistências à tração final muito mais altas do que os aços convencionais de resistência ao escoamento semelhante [71].

Um grande esforço está sendo desenvolvido atualmente por investigadores para aumentar a aplicabilidade e o desempenho desses materiais. Em particular, alguns investigadores focam-se no desenvolvimento de materiais, enquanto outros analisaram as propriedades de encruamento por deformação desses materiais, também considerando as mudanças na microestrutura. Os aços de alta resistência são caracterizados por maior resistência em relação aos aços macios, portanto, as cargas de processo em operações de estampagem também são maiores, implicando maior desgaste e redução da vida útil das ferramentas, de facto, as condições de lubrificação também foram estudadas [71].

Os aços Dual Phase (DP) representam uma estrutura dos aços avançados de alta resistência (AHSS), que a produção requer transformações de fases específicas. Exibindo um grande equilíbrio de forças e ductilidade, permitindo uma boa formabilidade. A sua resistência à tração varia de 450 até 1350 MPa, segundo [4]. As vantagens significativas destes aços incluem um endurecimento por deformação extremamente elevado e um aumento da resistência durante o tratamento térmico de componentes acabados devido ao endurecimento no forno [64].

4.2 Composição Química dos Aços Dual Phase

Os aços são caraterizados pela união entre Ferro e Carbono, geralmente estes representam a maior cifra na composição química desses metais, bem como a presença de outros elementos em pequenas porções. Os aços DP seguem o mesmo padrão, considerados um aço de baixo e médio carbono, os aços DP possuem componentes que os tornam mais leves e resistente na sua estrutura, a compreensão da estrutura química foi clave para o desenvolvimento desses metais que a sua utilização na indústria automóvel é cada vez mais comum.

O design da liga dos aços Dual Phase é guiado pelos seguintes requisitos:

1. A fase de ferrite em aços Dual Phase deve ser macia e dúctil. Portanto, uma liga não deve causar endurecimento substancial da solução sólida na ferrita.
2. Um elemento de liga deve estabilizar a austenita e promover a partição de carbono para austenita, de forma que a martensita de alta resistência possa ser produzida, após o arrefecimento a partir das duas fases, região austenita-ferrita.
3. Uma vez que a formação de martensita é desejada nos aços Dual Phase, um elemento de liga deve retardar as temperaturas de início de bainita (Bs) e de fim de bainita (Bf), de modo que, de austenita à martensita promove-se a transformação.

As adições de *C, Si, Mn, Cr, Mo* e microligas são elementos de liga comuns presentes na maioria dos aços Dual Phase, como mostra a tabela 4.1. O papel destes elementos de liga no controlo da microestrutura, propriedades e o desempenho são descritos da seguinte forma [44].

Tabela 4.1: Composição química dos aços DP590, 600 e 800 [44].

Aço	*C*	*Si*	*Mn*	*Ni*	*P*	*Cu*	*Cr*	*Mo*
DP450	0.05	0.44	1.04	0.48	0.005	0.18	0.04	0.05
DP600	0.072	0.25	1.58	0.024	0.015	0.01	0.055	0.09
DP800	0.11	0.23	1.41	0.03	<0.02	<0.01	0.02	-

4.2.1 Carbono

Em geral, os aços Dual Phase inserem-se na categoria dos aços hipocarbónicos, e portanto, contêm menos de 0,2% C. O baixo teor de carbono melhora a soldabilidade e maleabilidade dos aços Dual Phase; as propriedades que são particularmente importantes para aplicações estruturais de automóveis. A temperatura de recozimento intercrítico é geralmente selecionado de modo que, o arrefecimento rápido subsequente conduza à formação

da microestrutura com as quantidades variáveis de ilhas discretas de martensita distribuídas na matriz de ferrita topologicamente contínua. É importante reconhecer que a resistência dos aços Dual Phase depende do teor de carbono, da martensita e das quantidades relativas de ferrita e martensita na microestrutura. Portanto, o nível de força necessário pode ser obtidos em aços Dual Phase de baixo teor de carbono, simplesmente aumentando a fração de volume de martensita, que pode ser alcançada através do aumento da temperatura de recozimento intercrítica. Em aços Dual Phase de alta resistência, a fração de volume de martensita pode ser alta o suficiente para ser a fase topologicamente contínua na qual as regiões de ferrite estão disperso. O aço Dual Phase (DP800) pertence a esta categoria [44].

4.2.2 Manganês

Os aços Dual Phase contêm 1 a 1,6% de *Mn*. A adição de *Mn* nestes níveis transmite endurecibilidade suficiente à austenita para à formação de martensita após o recozimento intercrítico. A endurecibilidade da austenita é aumentada porque *Mn* desloca o TTT curva para a direita, desencorajando assim a formação de ferrite e perlita, facilitando a formação martensita. A Figura 4.1 ilustra o efeito do *Mn* no processamento da fase dupla dos aços DP.

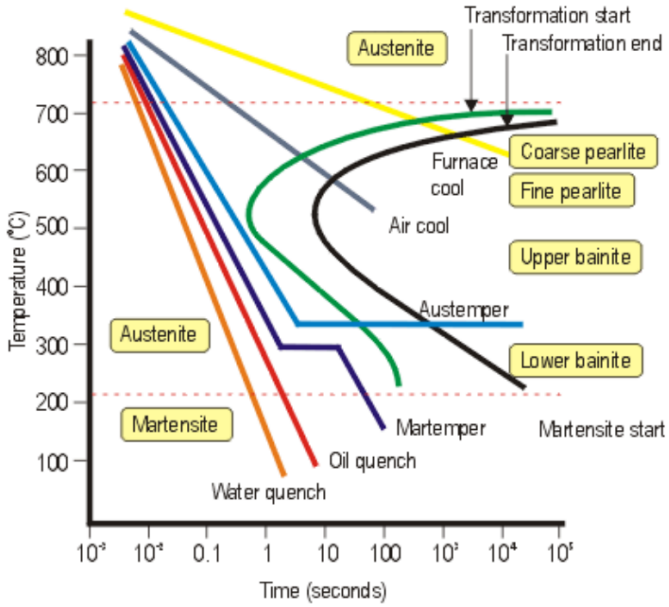


Figura 4.1: Curva TTT mostrando várias taxas de arrefecimento levando a microestruturas diferentes [44].

É importante salientar que uma diminuição no teor de carbono de um aço diminui a sua temperabilidade. Portanto, o teor de *Mn* de aços Dual Phase de baixo carbono é aumentado para compensar a diminuição da temperabilidade resultante de um nível de carbono mais baixo (para uma determinada taxa de arrefecimento ou se o processo for limitado à taxa de arrefecimento) [44].

4.2.3 Crómio e Molibdénio

Alguns aços Dual Phase contêm adições de liga Cr e/Mo. Estes elementos deslocam a curva TTT para a direita e, assim, diminuir a taxa crítica de arrefecimento (ou seja, a taxa mínima de arrefecimento para assegurar que a austenita é convertida em martensita durante têmpera) que, por sua vez, aumenta a endurecibilidade. Em geral, o teor de carbono puro e quantidades de elementos de liga, temperatura de recozimento intercrítica, e extinguir a taxa subsequente ao recozimento subcrítico, para formar martensita afeta as propriedades mecânicas dos aços Dual Phase. Portanto, diferentes combinações destes processos variáveis podem ser usadas para alcançar as propriedades necessárias na fase dupla do processamento dos aços [44].

4.3 Microestrutura dos Aços Dual Phase

A microestrutura dos aços Dual Phase, contém dois constituintes principais, ferrita e martensita temperada. Além disso, carburetos muito finamente dispersos dos elementos de microligas (V, Ti e/ou Mo) estão presentes na microestrutura. Estes carburetos não estão situados nos contornos de grão ou nas interfaces, ferrita-martensita. As frações volumétricas de martensita e ferrita (ver Figura 4.2) são governadas pela química do aço e pela temperatura de recozimento intercrítico. Na maioria dos aços Dual Phase, onde a fração volumétrica de martensita temperada está na faixa de 20-30%, a ferrita é topologicamente contínua e contém regiões discretas dispersas de martensita temperada. Por outro lado, nos aços Dual Phase (como o aço DP800) contendo alta fração volumétrica da martensita temperada, a martensita temperada é topologicamente contínua e contém regiões dispersas de ferrita [44].

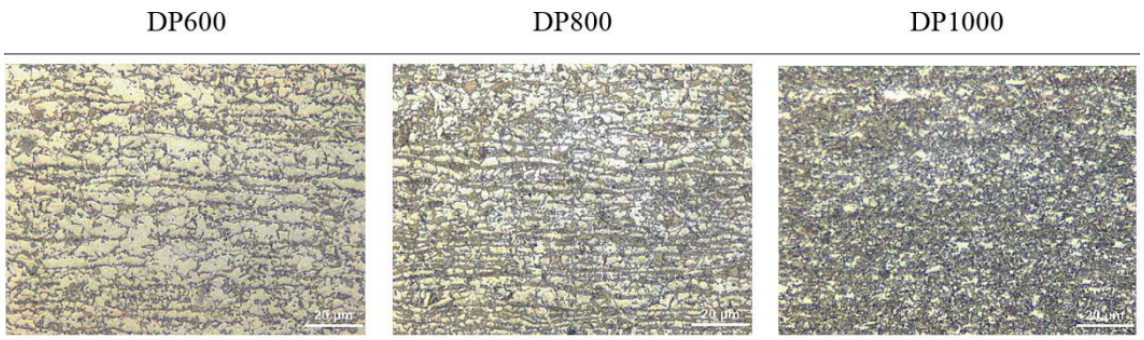


Figura 4.2: Imagens da microestrutura dos aços DP600, DP800 e DP1000.

Nas ilustrações da Figura 4.2, a microestrutura dos aços Dual Phase (DP600, 800 e 1000), os campos claros indicam a fase ferrite, enquanto os campos escuros indicam a fase de martensita. Estes aços são de fase dupla com diferentes frações de volume de martensita.

4.3.1 Elementos de Microliga

Os aços de fase dupla também contêm quantidades muito pequenas de elementos de microliga adicionados intencionalmente, como V, Ti e/ou Nb. Estes elementos são carboneto formadores de microestruturas muito forte. Eles formam carbonetos de limite de grãos muito finos que são estáveis a temperaturas de ordem de 1200°C. A presença destes carbonetos nos limites de grãos de austenita retarda o crescimento de grãos de austenita durante as etapas de processamento, como laminação a quente e limites granulometria de austenita no aço laminado a quente, o que facilita a formação de grãos finos ferrite durante o recozimento intercrítico subsequente que produz a fase dupla da microestrutura.

4.4 Propriedades Mecânicas

A variação da proporção de martensita e as características microestruturais da distribuição de martensita afetam as propriedades mecânicas macroscópicas do aço DP, como a resistência à tração e a elongação. A tabela 4.2, resume os requisitos de propriedades do produto para vários tipos de aços DP, de acordo com o padrão da [3], para corpos de prova de tração ISO de 20×80 mm (espessura: inferior a 3 mm) [3].

Tabela 4.2: Propriedades mecânicas de diferentes tipos de aço DP [3].

Grau do Aço	Limite de Escoamento [MPa]	Tensão de Rotura [MPa]	Elongação Total (%)	Direção
DP450	280-340	450-530	≥ 27	Transversal
DP500	300-380	500-600	≥ 25	Longitudinal
DP600	330-410	600-700	≥ 21	Longitudinal
DP800	450-550	780-900	≥ 15	Longitudinal
DP780 Y500	500-600	780-900	≥ 13	Longitudinal
DP980 Y700	700-850	980-1100	≥ 8	Longitudinal
DP1180	900-1100	1180	≥ 5	Longitudinal

Em comparação com os aços tradicionais de alta resistência e baixa liga (HSLA), os aços Dual Phase apresentam um comportamento mais uniforme durante a deformação inicial. Nos aços convencionais, é comum observar uma deformação intermitente, o que resulta na formação de bandas de Lüders ao longo do material durante o processo de conformação. Essa intermitência na deformação ocorre devido a um fenómeno conhecido como envelhecimento por deformação, causado pela segregação de átomos intersticiais ao redor das deslocações no material e pela formação de atmosferas de Cottrell [4].

Por outro lado, os aços Dual Phase apresentam um comportamento mais consistente durante a deformação inicial. Isso significa que eles tendem a se deformar de maneira mais uniforme, sem os picos de resistência típicos dos aços convencionais. Além disso, eles exibem uma taxa de endurecimento mais alta à medida que são deformados, o que

significa que a sua resistência aumenta de forma mais significativa com o aumento da deformação.

Essas características tornam os aços Dual Phase uma escolha atraente em várias aplicações, especialmente aquelas que envolvem processos de conformação complexos. A sua capacidade de deformação mais uniforme e previsível permite um melhor controle sobre o processo de fabricação, resultando em peças finais de maior qualidade e desempenho.

4.4.1 Conformabilidade

Os aços da linha Dual Phase oferecem um equilíbrio excelente entre resistência e estampabilidade. Isto se deve a sua grande ductilidade e sua elevada capacidade de consolidação desde o princípio da deformação, que garante uma distribuição homogénea das deformações reduzindo as perdidas de espessura. Assim, no caso de um aço Dual Phase DP500, o limite elástico pode aumentar em torno a 120 MPa após uma deformação plástica de 2% por tração uniaxial, fenómeno descrito como "Endurecimento por deformação (work hardening ou WH2)". O limite elástico (Figura 4.3) se pode aumentar ainda mais por "Endurecimento ao forno (bake hardening)" depois do cozimento da pintura (BH2) [4].

O Aço Dual phase (DP500), também permite fabricar peças de capa (chapa de carroçaria), graças a seu excelente comportamento em expansão e em tração transversal [3].

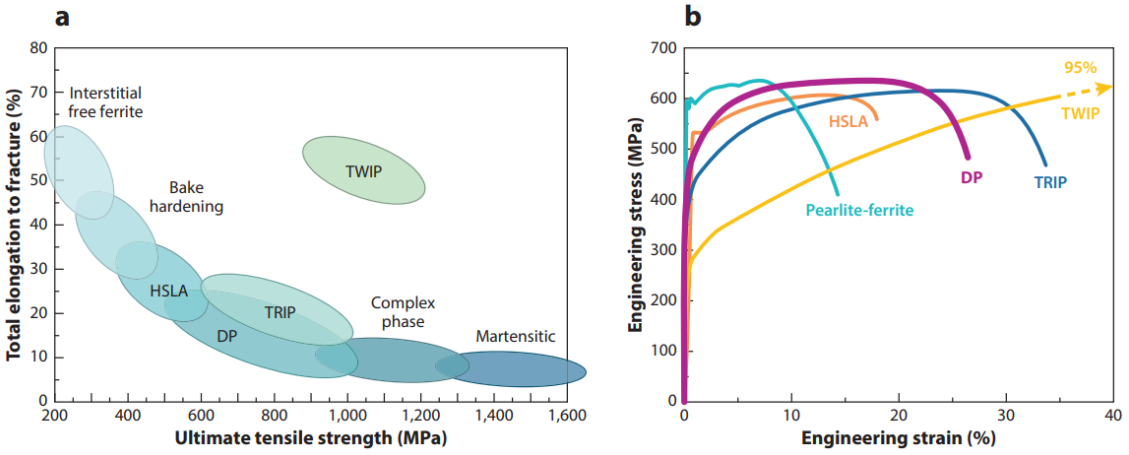


Figura 4.3: Comparação das propriedades mecânicas dos aços DP relativamente a outros aços avançados de alta resistência. **a)** Alongamento total para falha relativamente a resistência à tração máxima. **b)** Resposta quase estática à tensão de tração e deformação a níveis de resistência à tração finais semelhantes para aço perlita-ferrita, aço HSLA [74].

A gama dos aços Dual Phase se pode estampar em prensas clássicas otimizando os ajustes. Assim, em caso de um aço DP600, os esforços de estampagem serão em torno a uns 20% superiores aos de um aço de tipo micro aliado (HSLA) da mesma espessura. Importa referir que estes aços, sobre todos os de melhores qualidades, são sensíveis ao

fenómeno conhecido como "springback". Ademais, é preciso ter em conta o controlo da geometria da peça durante o desenho (raios de matriz pequenos, reforços perpendiculares ao dobrar para dar rigidez as peças abertas, etc.) e também durante a definição da gama de estampagem (redobrado, calibrado, aplicação de forças de retenção mais altas na garra de sujeição, etc.).

A este respeito [4] há desenvolvido um saber fazer específico do controlo do springback mediante o desenho de peças e matrizes de estampagem (método OUTIFO) [3].

4.4.2 Soldabilidade

Os aços Dual Phase, mesmo os que estão mais ligados dos que os aços HSLA, soldam-se muito bem por resistência por pontos com os procedimentos clássicos, mediante uma adaptação dos parâmetros em condições indústrias. A tabela 4.3 oferece, a título indicativo, algumas propriedades de pontos soldados do aço Dual Phase em combinações homogéneas segundo a norma ISO 18278-2.

Tabela 4.3: Propriedades de soldabilidades de pontos do aço dual Phase laminados a frio [4].

Denominação	**Revestimento**	**Espessura (mm)**	**Diâmetro de soldadura (mm)**	**σ de tração a cizalhamento**[MPa]
DP500	Uncoated	1.5	8.8	300
DP600	Extragal	1.5	9.5	315
DP780 Y440	Extragal	1.5	9.4	370
DP780 Y440	Uncoated	1.5	6.6	660
DP980 Y590	Extragal	1.5	10.1	400

Na soldadura por arco MAG (Metal Active Gas) a tope ou a solape, a dureza máxima da zona fundida não supera os 300 HV no caso de DP600, independentemente dos parâmetros utilizados. As formas dos cordões de soldadura respondem à qualidade B da norma ISO 25817. Se recomenda utilizar os seguintes materiais [4].

- Metal de aporte: Arame tipo G_3 Si_1 NF EN 440;
- Gas de proteção: Ar + 8% CO_2

Os aços Dual Phase apresentam uma resistência mecânica excelente na soldadura laser com isolamento. Sobre a base da sua experiência (caracterização dos seus produtos), [4] proporciona mais informações técnica necessária para adaptar os parâmetros de soldadura aos aços Dual Phase.

4.4.3 Resistência à Compressão

Pela sua alta resistência à rotura, os aços Dual Phase são especialmente bons para peças que devem absorver energia durante um impacto.

Os aços da família Dual Phase são caracterizados em compressão axial a uma velocidade de impacto de 56 km/h. Para o mesmo, se utilizam mostras de geometria ómega [4], fechadas com uma placa soldada por pontos (ver Figura 4.4). Estes ensaios demonstraram um excelente comportamento ao impacto do aço Dual Phase. O gráfico seguinte mostra, a título indicativo, o potencial de redução do peso mínimo de vários aços Dual Phase relativamente a um aço HSLA 380 [3].

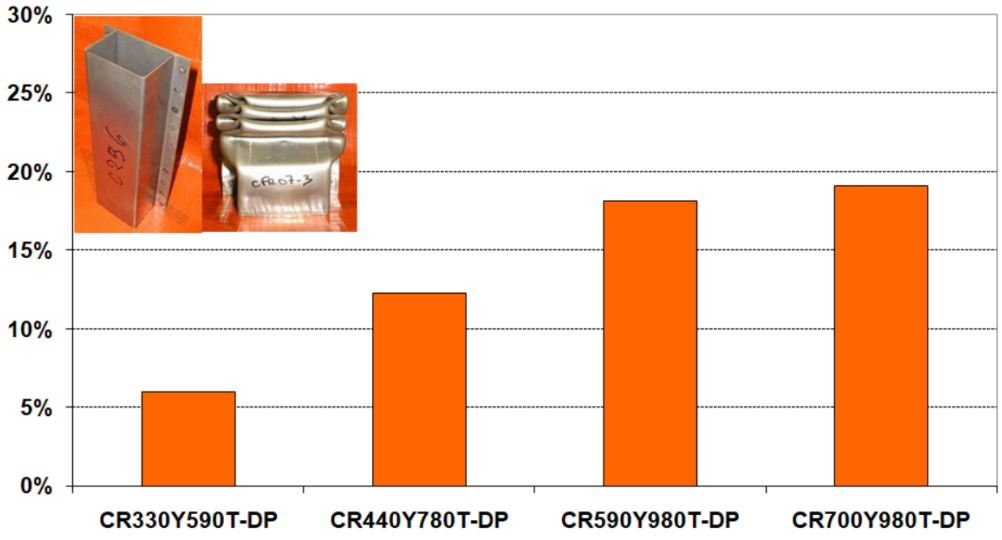


Figura 4.4: Potencial de redução de peso relativamente a um aço HSLA 380 [4].

4.4.4 Resistência à Fadiga

Pela sua elevada resistência mecânica, os aços Dual Phase oferecem boas propriedades de resistência à fadiga. Por exemplo, os gráficos das Figuras 4.5 e 4.6 mostram as curvas de Wöhler de distintos aços Dual Phase. Estas curvas expressam-se em termos de esforço máximo em função de número de ciclos aplicados e se obtém segundo duas relações de carga, em tração alterna simétrica $R=1$, o em tração repetida $R=0.1$ [4].

A resistência à fadiga dos aços dual phase (DP) é um aspeto crucial no desempenho desses materiais em aplicações estruturais em automóveis, onde são submetidos a cargas cíclicas (ver o gráfico ilustrado na Figura 4.5). Os aços dual phase são caracterizados por uma microestrutura composta por ferrita e martensita, que proporciona uma combinação única de alta resistência e boa ductilidade.

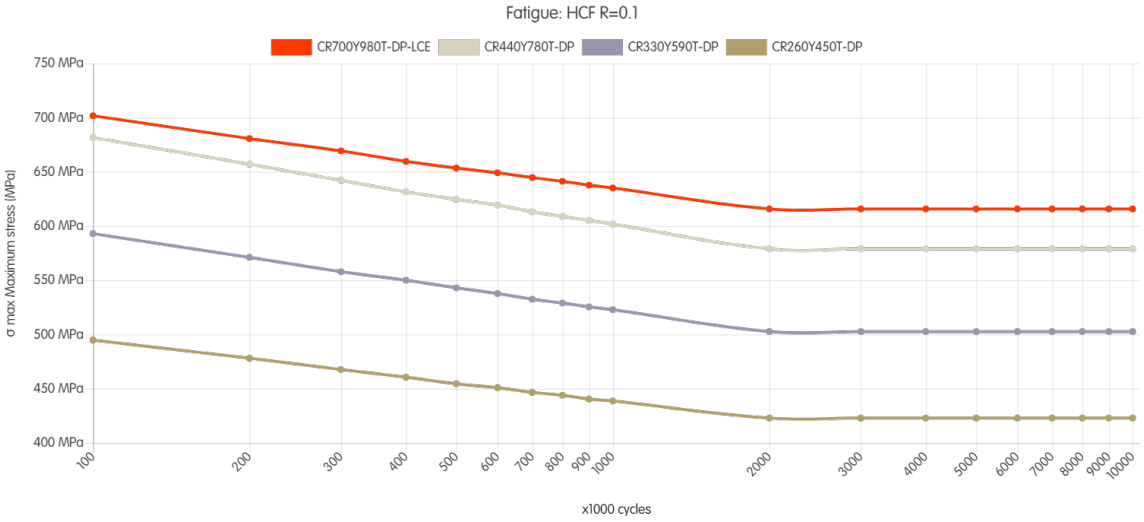


Figura 4.5: Curvas de Wölher ou curvas SN de distintos aços Dual Phase em tração repetida R=0.1 [4].

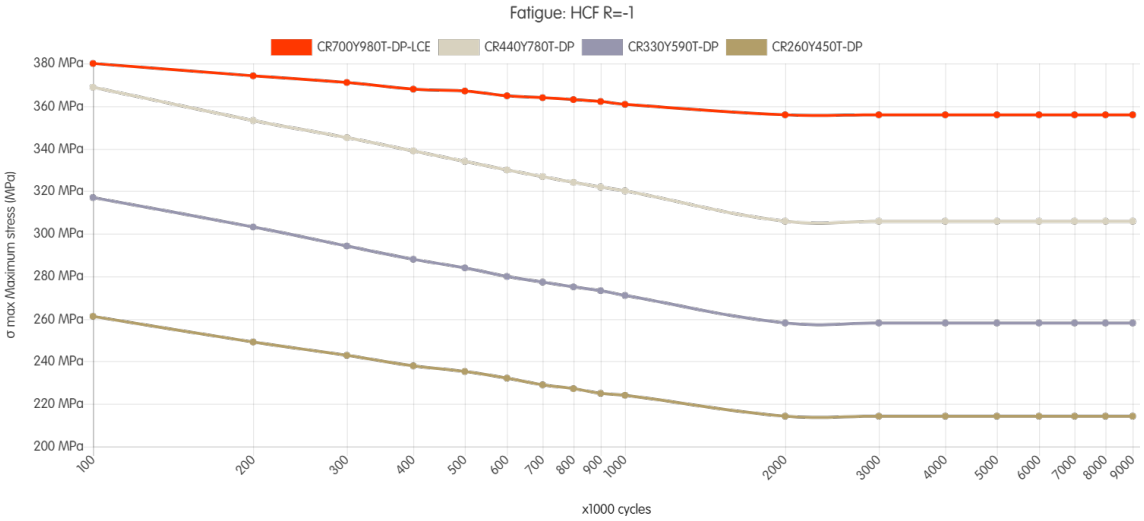


Figura 4.6: Curvas de Wölher ou curvas SN de distintos aços Dual Phase em tração alterna simétrica R=1 [4].

4.4.5 Aços Dual Phase em Simulações Computacionais.

A capacidade preditiva das simulações dos aços DP melhorou significativamente nos últimos anos, possibilitada por modelos constitutivos mais precisos, incorporação morfológica de maior fidelidade e acoplamento completo a experimentos. Dois desafios remanescentes para a qualidade dos modelos são as determinações de propriedades individuais de fase e 'interface' e aquisição de 3D realista, dando ênfases a microestruturas destes metais [74].

Muitos esforços experimentais e teóricos foram feitos, e os métodos de ajuste analítico foram utilizados (por exemplo) para obter as propriedades mecânicas das duas fases [77]. Uma vez que é difícil produzir amostras monofásicos de ferrita e martensita a granel que se assemelham ao estado constitutivo das fases encontradas em microestruturas reais de um aço DP, uma abordagem comum é realizar testes seletivos em pequena escala dire-

tamente em porções representativas da microestrutura, em investigação Tasan [74] e João [64] apresentaram uma abordagem baseada na nanoindentação. Isto, no entanto, limita-se à determinação das propriedades da ferrita, Chen [17] e outros, apresentaram modelação de ensaios de compressão de micropilares utilizando um sofisticado modelo computacional. Esta abordagem também é aplicável aos pilares martensíticos; No entanto, devido à escala fina na martensita, a abordagem não permite que se sonde o comportamento de uma orientação de cristal único como é o caso da ferrite em [74].

No que diz respeito à incorporação de características topológicas realistas, microestruturas cada vez mais complexas estão sendo usadas para simulações, que no futuro não devem ser apenas computacionalmente geradas, mas obtidas a partir de experiências. Neste contexto, a microtomografia 3D EBSD e XRD, são opções viáveis. Alguns estudos feitos por investigadores são apresentados e baseiam-se em microestruturas reais, utilizam uma técnica de varredura de superfície para obter dados de entrada experimentais. No entanto, como mostrado por Tasan [74], a resposta de uma estrutura 3D real pode diferir da resposta de fatias 2D. Diferentes investigadores e Tasan [74] discutiram as razões para esta diferença. Para construir as simulações representativas em microestruturas, a obtenção do conjunto de dados experimentais 3D completos é, portanto, necessária. Isto não é apenas experimentalmente desafiador, mas também aumentará drasticamente os custos computacionais quando são utilizadas estruturas suficientemente grandes para representar corretamente todas as características de uma microestrutura do aço DP. A geração assistida por computador de RVEs realistas, com combinações geométricas e metalúrgicas, representa o princípio para simular microestruturas [53], é uma tarefa importante para superar desafios experimentais. Relacionada a esta questão do pós-processamento de dados experimentais para melhorar a convergência e omitir artefactos nos resultados da simulação. Tais melhorias incluem métodos para suavizar os limites [74].

4.5 Seleção do Aço Dual Phase

Como se poderia esperar de um material com alta resistência à tração, os aços Dual Phase são adequados para peças de automóveis (ver Figura 4.8) que se destinam a absorver muita energia durante um impacto.

Os aços Dual Phase são frequentemente utilizados nas seguintes aplicações automóveis [60]:

- **DP300/500** - Exterior; Telhado; Porta Exterior; Exterior Lado Corpo; Painel Chão.
- **DP350/600** - Painel de Chão; Capa Exterior; Exterior Lateral do Corpo; Cowl; Para-lamas; Reforços de Chão.

- **DP500/800** - Lado da carroçaria interior; quadro do painel interior; Trilhos traseiros; Reforços de choque.
- **DP600/980** - Pilar-B; Painel de piso; base do motor; Longarinas; Trilhos do assento.
- **DP700/1000** -Trilhos de telhado.

As classes DP estão sendo produzidas atualmente de 500 a 1200 MPa de resistência mínima à tração com 5-35% de alongamento total.

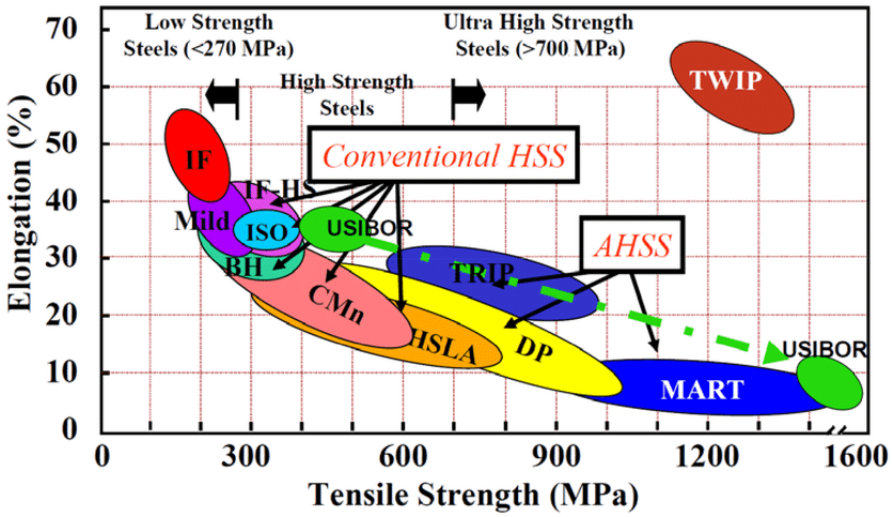


Figura 4.7: Nível de elongação da resistência à tração dos aços DP [60].

Como se pode observar o gráfico da Figura 4.7 as variações na estrutura conferem aos aços DP um amplo espectro de resistência e ductibilidade. Os aços DP são conhecidos por serem capazes de absorver grandes quantidades de energia. Combinadas com um baixo custo de produção, essas propriedades tornam os aços DP altamente desejáveis para aplicações automóveis.

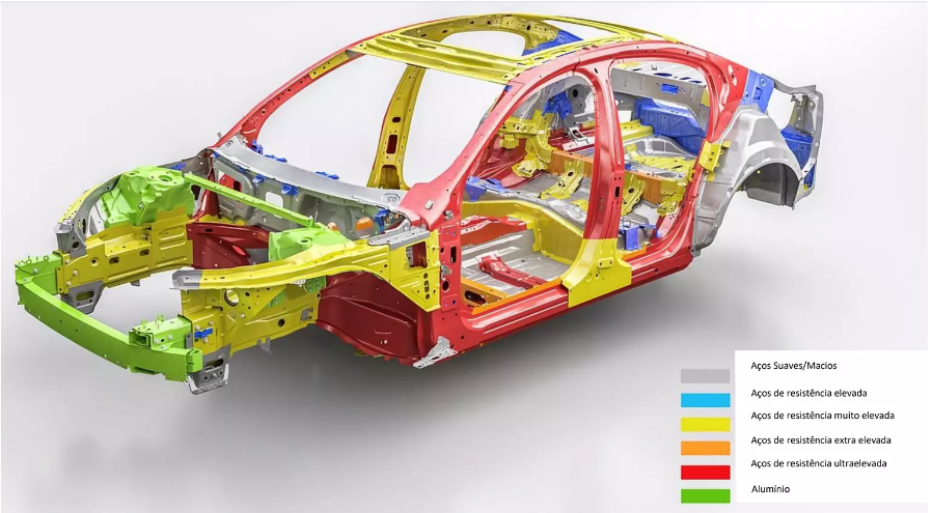


Figura 4.8: Diferentes tipos de aço que compõe o chassi do veículo [14].

4.5.1 Aço Dual Phase 800

Importa destacar que o aço DP800 (CR440Y780T-DP-GI) é o aço do componente estudado neste relatório, pela sua importância e propriedades que o tornam viável para este tipo de componente, podemos ressaltar algumas das características mais importantes, deste aço, o qual a sua obtenção é normalmente feita pelo processo de laminação a frio (ver Figura 4.9).

O Aço DP800 é um aço moderno de alta resistência com uma pequena variação de espessura, excelente formabilidade e boa soldabilidade com aços extremamente forte com formabilidade média, resistente à abrasão com boa resistência ao desgaste, aço extra duro e resistente à corrosão atmosférica [51].

As vantagens do uso do aço DP800 incluem:

- Excelente formabilidade devido à sua elevada resistência;

- Baixas variações de espessura;

- Boa soldabilidade;

- Adequado para corte a laser.

O portal SoLuckySteel [72] afirma que o aço DP800 é um tipo de aço laminado em frio que ganhou grande popularidade nos últimos anos. É um material de alta resistência e baixa aleação (HSLA) que contém microestruturas de dupla fase na sua composição. O Dual Phase significa, que tem dos tipos diferentes de estruturas de cristais presentes dentro do mesmo metal.



Figura 4.9: Bobina de aço DP800 de 2 mm de espessura.

O processo de fabrico do aço DP800 implica o uso de tecnologia para combinar resistência e ductilidade numa solução sólida. Esta combinação única o converte num material ideal para aplicações que requerem resistência e flexibilidade, como componentes para automóveis e equipamentos industriais [72].

Um aspeto que diferencia o aço DP800 de outros aços, são suas propriedades de conformabilidade, durante o processo de prensado. A sua capacidade para sofrer deformações sem sofrer roturas nem rachaduras o convertem numa solução ideal para desenhos complexos [72, 44].

Desta forma podemos concluir, que o aço DP800 é um material de alta resistência (HSLA), com dupla fase na sua microestrutura, laminados de forma a obter propriedades excecionais de resistência, ductilidade e conformabilidade, com elevada importância para diversas indústrias, como as do setor automóvel, metalomecânica e outras.

4.5.1.1 Caraterização Estrutural do Aço DP800

O aço DP800 é um tipo de aço de Dupla fase que tem se tornado cada vez mais popular na indústria automóvel e manufatura devido as suas propriedades desejáveis. O DP800 é um material moldável de alta resistência com uma excelente capacidade de absorção de energia e baixa carga de impacto. Esta propriedade única o torna imprescindível para usar em componentes de veículos como para-choques, Longarinas, Pilar B, entre outros componentes [72].

Uma das vantagens significativa do aço DP800 sobre outros materiais é sua excelente relação peso-resistência, que permite desenhos mais ligeiros sem pôr em causa a estrutura do automóvel. Por outro lado, este aço oferece resistência à tração superior em comparação com os aços tradicionais, mantendo uma boa tenacidade e ductilidade [72].

Ainda podemos destacar outra propriedade notável do aço DP800 é sua resistência à corrosão, o que lhe torna adequado para seu uso em entorno pouco comum, onde há humidade ou elementos corrosivos. Ademais este aço se pode soldar ou unir facilmente utilizando técnicas padrão sem comprometer as suas propriedades mecânicas [72].

Tabela 4.4: Caraterísticas da chapa (Aço DP800) do componente estudado.

Espessura	2 mm
Tensão de Cedência	515 MPa
Tensão de Rotura	800 MPa
Elongação Uniforme	15%
Densidade	7,85 Kg/m³
Módulo de Young	2,5E+5 MPa
Coeficiente de Poisson	0,3

A combinação de alta resistência, formalidade, capacidade de absorção de energia e

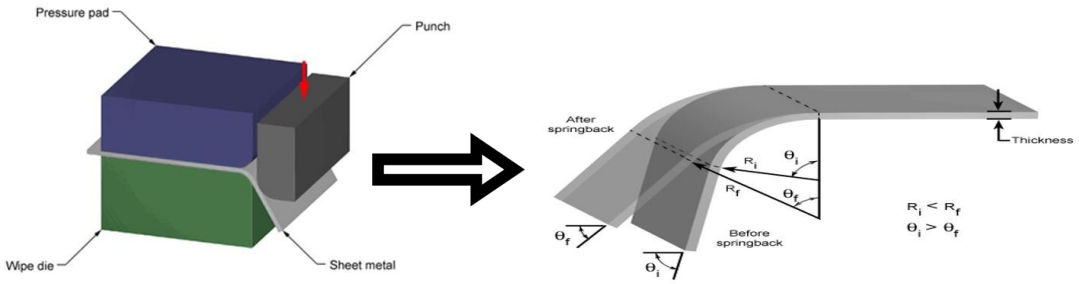
resistência à corrosão faz com que o aço DP800 seja uma opção atrativa para os fabricantes que buscam produzir componentes ligeiros e duradouros [72].

Quanto à sua composição química, podemos destacar que o aço DP800 tem uma composição muito similar ao DP600, mas com maior quantidade de Carbono que vai desde (0,08% a 0,2%) ver tabela 4.1 e Manganês com cerca de 2% isto proporciona-lhe maior resistência em comparação ao aço DP600.

4.5.1.2 Retorno Elástico em Aços DP800

No processo de estampagem dos aços de alta resistência, o springback (retorno elástico) tem sido um dos grandes problemas, no aço dual phase DP800 esta caraterística do material é ainda maior fruto das suas propriedades mecânicas, um dos fatores principais, que também aumenta o nível deste fenómeno é o raio de curvatura relativo (r/t , raio de curvatura/espessura). A tensão de cedência é outro fator associado, ou seja, que quanto maior for a tensão de cedência, maior tende a ser o springback, como se pode observa no ensaio da Figura 4.12.

O aço DP800 é forte e maleável, o que é ótimo para fazer partes de carros, mas às vezes, quando se lhe atribui outra forma e quanto mais complexa, ele oferece resistência e com isso tende a voltar à sua forma original. Isso acontece porque ele tem uma mistura de dois tipos de estrutura interna, uma mais flexível e outra mais rígida. Então, mesmo após aplicar toda a pressão para moldá-lo, ele ainda quer voltar um pouco à sua forma original, como se observa na Figura 4.10.



(a) Dobra de extremidade da chapa

(b) Retorno da extremidade da chapa

Figura 4.10: Ocorrência de springback

Na conformação de chapas metálicas, uma peça é removida da ferramenta após a etapa de conformação. Durante essa fase de descarregamento, a deformação elástica é recuperada e causa uma alteração na forma final da peça (ver Figura 4.10b). A discrepância entre a forma completamente carregada no final da etapa de conformação e à configuração descarregada é chamada de springback. O springback é o fator mais significativo, que dificulta alcançar a precisão dimensional necessária dos componentes estampados. Projetar uma matriz com compensação de retorno elástico incorreta pode levar a dificuldades

significativas em operações posteriores, como ajuste inadequado durante a soldadura e distorção de submontagens. Em alguns casos, revisões nas ferramentas podem ser necessárias, o que poderia resultar em atrasos na produção. Portanto, é muito importante que o retorno elástico seja previsto com precisão e compensado corretamente durante o primeiro projeto da matriz [36].

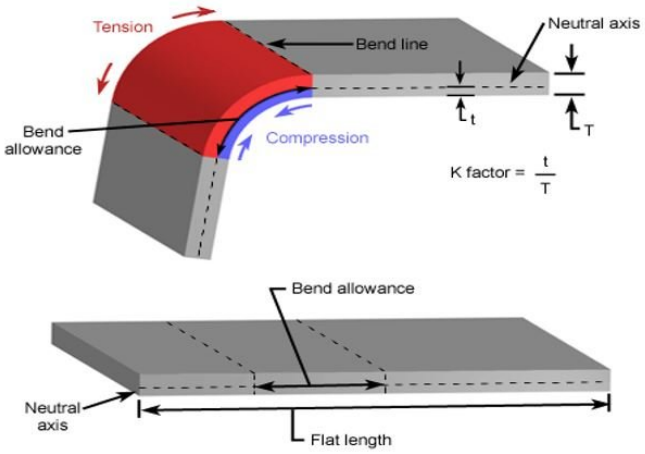


Figura 4.11: Dobra do eixo neutro [45]

Na Figura 4.11, se observa que a operação de dobragem, leva à compressão no interior da chapa metálica. Além disso, a secção externa do material sofre tensão e estende-se a um comprimento considerável.

O ato de dobrar resulta em tensão e compressão na chapa metálica, enquanto a secção interna sofre compressão e encolhe [45].

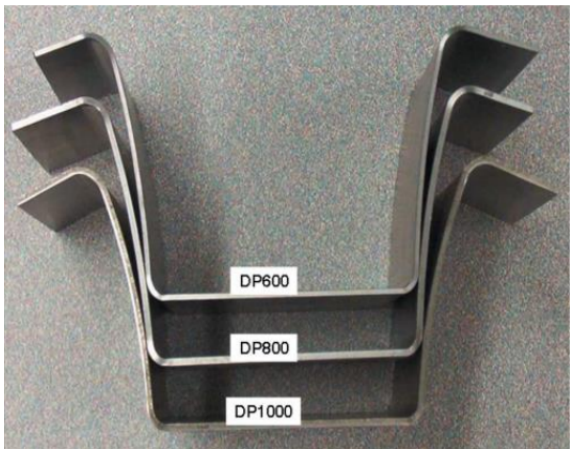


Figura 4.12: Fenómeno de retorno elástico no mesmo componente fabricado em DP600, DP800 e DP1000 [46]

Devido a este fator, um aço de alta de resistência (ver Figura 4.12), como no caso do DP800, tende de apresentar um alto índice de springback, associado a sua resistência ao ser dobrado, fatores como raio de curvatura e espessura da chapa, aumentam na

incidência de ocorrência do springback nesses metais, uma solução desenvolvida para estes casos muito frequente na indústria de conformação metálica a frio, é a compensação do retorno elástico nas ferramentas de estampagem, para minimizar o grau de retorno da chapa metálica.

4.6 Propriedades Desejáveis e Limitações para Estampagem

Os aços Dual Phase (DP) apresentam microestrutura de ferrita e martensita que proporciona excelentes propriedades mecânicas desejadas pela indústria. Os aços DP possuem alta resistência à tração devido à martensita, associada à baixa resistência inicial à tração devido à ferrita, alto endurecimento por deformação e fluxo plástico macroscopicamente homogéneo devido à ausência de efeitos de Luders. Como resultado, os aços DP são ideais para processos de conformação de chapas [64]. De facto, a combinação de início precoce de deformação plástica e o alto endurecimento por deformação é a base para as características excecionais de conformação e desempenho de peças desses aços para aplicações na indústria automóvel, onde a conformabilidade é tão crítica quanto as propriedades de serviço.

Como resultado da sua capacidade de melhorar a segurança em caso de colisão (ver Figura 4.13, parachoques desenhado para absover impacto). O uso de Aços de Alta Resistência Avançada (AHSS), especificamente os aços Dual Phase, na indústria automóvel, aumentou consideravelmente. No entanto, existem algumas dificuldades e desafios que



Figura 4.13: Parachoques estampado com um aço DP1000 numa chapa de 1,35 mm de espessura [4].

precisam ser ultrapassados. Os aços Dual Phase apresentam maior resistência e menor ductilidade quando comparados aos aços suaves tradicionalmente utilizados, tornando-os

naturalmente menos conformáveis. Sem dúvida, em comparação com os aços suaves, os aços DP sofrem mais retorno elástico, requerem mais forças de prensagem na conformação, o que leva a danos e desgaste superficiais maiores nas ferramentas de conformação devido ao aumento da pressão de contacto entre superfícies (chapa e ferramenta), durante o processo de estampagem. De facto, os danos superficiais, que podem eventualmente resultar em baixa qualidade superficial da peça, podem ser custosos devido ao aumento do tempo de produção parado e a manutenção das ferramentas. Embora condições mais desafiadoras sejam encontradas e otimizações dos processos devam ser feitas, os aços DP têm formabilidade significativa e podem ser estampados em geometrias consideravelmente complexas, como mostra a Figura 4.14 [74].



Figura 4.14: Estampagem de peças complexas com o aço DP [4].

Na secção 4.5 exibe as aplicações mais comuns dos aços Dual Phase na indústria automóvel. O grau do aço é apresentado como uma função da resistência mínima à tração, seguida da resistência mínima à tração especificada no grau do material [64]. Como exemplo, DP300/500 significa que, de acordo com essa especificação de grau de material, a sua resistência mínima à tração é de 300 MPa e a sua resistência máxima à tração é de 500 MPa.

5 Modelação Numérica

5.1 Método dos Elementos Finitos

A ideia básica por trás do método dos elementos finitos é dividir a estrutura, corpo, ou região sendo analisada em um grande número de elementos, ou simplesmente elementos. Estes elementos podem ser unidimensional, bidimensional ou tridimensional. Um popular e clássico elemento bidimensional é o triângulo mostrado na Figura 5.1. Quando uma estrutura bidimensional (dispositivo de transferência de calor, massa ou energia, etc.) divide-se em centenas ou, por vezes, milhares destes triângulos não sobrepostos, podemos ver que essencialmente todos os planos das geometrias podem ser facilmente acomodadas. Observe que este elemento em particular tem três nós (i, j, k) adequadamente colocados nos vértices do triângulo. Antes de explicar a finalidade destes nós ou pontos nodais, é essencial compreender como podemos usar este tipo de elemento para representar uma superfície de forma irregular [73].

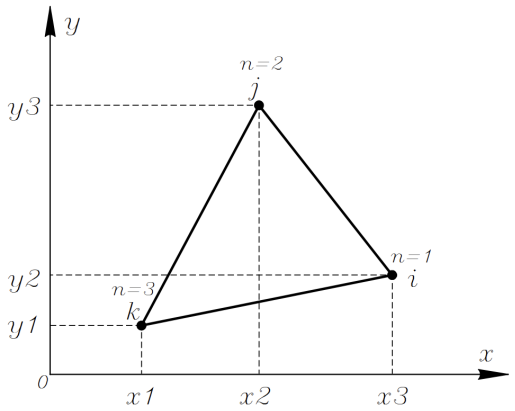


Figura 5.1: Elemento triangular de três nós.

Para realização do cálculo computacional, mediante análises de Elementos Finitos, um computador digital de alta velocidade é usado para executar o grande número de cálculos envolvidos. Um analista deve fornecer ao software as coordenadas de cada nó, definições dos elementos, material, dados de condições de contornos, etc, [73]. Geralmente a precisão melhora conforme o número dos elementos aumenta, mas o tempo computacional e, portanto, o custo, também aumentam. Lá não substitui a experiência na tentativa de

determinar o número de elementos a serem usados. O 'software' determina as variações dos parâmetros em estudo em cada nó e a diferença flui por meio de cada elemento. Os resultados são geralmente impressos ou apresentados em forma de gráficos. O analista pode então usar essas informações no processo de estudo de um determinado fenómeno.

O mesmo conceito é aplicável às áreas estruturais e de fluidos, bem como a outras. Numa aplicação de análise estrutural, as variáveis de campo podem ser deslocamentos e/ou deflexões e declives, velocidades e pressão. Portanto, num modelo estrutural de elementos finitos. Determinamos os deslocamentos nodais e/ou as deflexões e inclinações nodais. De estes, as tensões e/ou momentos de flexão dentro de um elemento são facilmente derivados.

Em resumo, as duas ideias-chave do método dos elementos finitos são:

1. A discretização da região que está a ser analisada em elementos finitos e;
2. O uso de polinómios interpolados para descrever a variação de uma variável de campo dentro de um elemento.

5.2 Fundamentos Matemáticos

5.2.1 Equações Diferencias e Parciais

As equações diferenciais aparecem com grande frequência em diversos problemas de modelação de fenómenos físicos. Exemplos são equações que descrevem escoamento de fluidos, transferência de calor e massa, química, dinâmica e vibrações em sistemas mecânicos, etc. [34].

Uma equação diferencial é definida como uma equação que envolve derivadas de funções. A ordem de uma equação diferencial é descrita em função da maior ordem ***p*** da derivada envolvida.

Dois tipos básicos podem aparecer, o primeiro envolve equações diferenciais ditas ordinárias. Neste caso existe apenas uma variável independente, $y(x)$ [34].

$$\frac{dy}{dx} = x + y \tag{5.1}$$

As equações diferenciais ordinárias contêm parâmetros físicos concentrados [34]. O segundo tipo acontece quando existe mais de uma variável independente, por exemplo, $u(x, y)$ representando o deslocamento numa placa em função de x e y:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \nabla^2 u = 0 \tag{5.2}$$

Onde ∇^2 é o Laplaciano. Esta expressão é um exemplo de equação diferencial parcial. Este tipo de equação envolve parâmetros distribuídos [34].

Quando um dado problema pode ser descrito por uma equação diferencial, a sua resolução pelo método dos elementos finitos exigirá que as derivadas da função incógnita, contidas nessa equação, sejam convenientemente representadas pelas derivadas da função aproximada. Admitindo que se utiliza para representar a aproximação a uma função incógnita, a aproximação a uma sua derivada de ordem s será obtida por [75]:

$$\frac{\partial^s \phi}{\partial x^s} = \frac{\partial^s \psi}{\partial x^s} + \sum_j a_j \frac{\partial^2 N_j}{\partial x^2} \tag{5.3}$$

A necessidade de trabalhar com expressões como esta impõe que as funções de forma N_j sejam deriváveis pelo menos até à ordem $(s-1)$. Só assim se poderá garantir que uma expressão em que intervêm derivadas de ordem (s) das funções de forma toma valor finito (embora possa não ser contínuo) em todo o seu domínio. Diz-se que uma função de forma possui continuidade C^s , quando admite derivada contínua até à ordem $(s-1)$ e derivada de ordem (s) finita. Como se depreende, num problema de elementos finitos apenas intervêm primeiras derivadas, situação, aliás, frequente, bastará utilizar funções de forma de continuidade C^0. Para casos em que aparecem segundas derivadas teremos que utilizar funções de forma de continuidade C^1 e assim sucessivamente [75].

5.2.1.1 Princípios dos Trabalhos Virtuais

O Princípio dos Trabalhos Virtuais pode ser enunciado da seguinte maneira:

Seja um corpo em equilíbrio, submetido a um sistema de forças externas. Se a este corpo é imposto um campo de deslocamentos virtuais, compatível com as condições de fronteira da estrutura, o trabalho das forças externas é igual ao trabalho das forças internas. Denotando o campo de deslocamentos virtuais por $\delta\mathbf{u}$ e as deformações virtuais por $\delta\varepsilon$, o trabalho das forças internas é igual a [69]:

$$W_{int} = \int_\Omega (\delta\varepsilon)^t \sigma d\Omega \tag{5.4}$$

onde σ são as tensões resultantes das forças externas impostas à estrutura. O trabalho destas das forças externas é dado por [69]:

$$W_{ext} = \int_\Omega b^t \sigma u d\Omega + \int_{\Gamma_q} \bar{t}^t \sigma u d\Gamma \tag{5.5}$$

Igualando as duas expressões acima, e introduzindo as relações constitutivas da eq. (3.10

de [69]) obtém-se:

$$W_{ext} = \int_{\Omega} (\delta\varepsilon)^t D(\pounds u) d\Omega = \int_{\Omega} b^t \delta u d\Omega + \int_{\Gamma_q} \bar{t}^t \sigma u d\Gamma \tag{5.6}$$

Comparando este resultado com eq. (3.10 de [69]), observa-se que as funções W desempenham o papel dos campos de deslocamentos virtuais $(\delta u = W)$, com deformações virtuais $(\delta\varepsilon = \pounds W)$.

5.2.2 Discretização do Domínio

O primeiro passo em qualquer análise de elementos finitos é a discretização [73]. Neste processo o elemento deve ser discretizado em vários elementos finitos. O elemento em análises é normalmente rodeado de um número finito de nós que permitem o estudo do comportamento deste elemento mediante análises do diferencial dos nós que o mesmo possui, e parece bastante natural considerar que um elemento em estudo seja dividido por um número finito de partes. Um elemento típico é mostrado na Figura 5.2. Note-se que o elemento tem dois nós, ***i*** e ***j***, um em cada extremidade. É nestes nós que as forças são

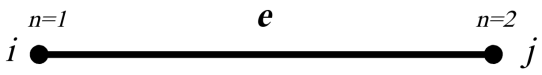


Figura 5.2: Elemento finito típico, 1 elemento e 2 nós.

transmitidas de um elemento para o outro. Estes elementos são frequentes referidos como elementos de barra, em oposição a elementos como viga e treliça. Elementos de barra só podem suportar forças axiais; os elementos de viga permitem momentos de flexão; e os elementos de treliça incluem forças axiais, momentos de flexão e torção [73].

Como mostrado na Figura 5.3, a característica saliente da solução do método dos elementos finitos é que o domínio bidimensional Ω é discretizado (subdividido) em N_e subdomínios, chamados elementos, e cada elemento consiste em nós. Então definimos uma aproximação por partes, ou seja, estipulemos a aproximação do campo para cada elemento separadamente. O campo do domínio aproximado,$\Theta^{(e)}(x, y)$, no elemento será

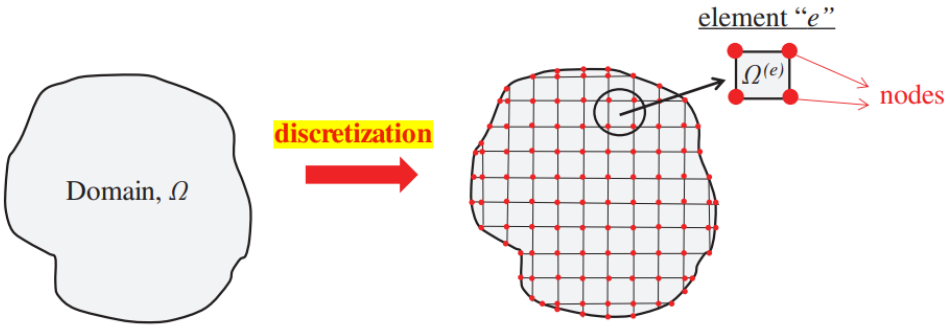


Figura 5.3: Discretiazação de um elemento bidimensional.

dado por uma expressão polinomial envolvendo funções de forma e o vetor nodal do elemento. Se o elemento tiver (n) pontos nodais, então a seguinte equação será aplicada [73]:

$$[\Theta^{(e)}(x,y)] = \left(N_1(x,y)\Theta_1^{(e)} + N_2(x,y)\Theta_2^{(e)} + ... + N_n(x,y)\Theta_n^{(e)}\right) = \sum_{i=1}^{n} N_i(x,y)\Theta_i^{(e)} \tag{5.7}$$

As funções $N_i(x,y); i = 1,2,\ldots,n$, são chamadas de funções de interpolação ou funções de forma do elemento e. Expressaremos a equação (5.7) numa forma matricial.

$$\Theta^{(e)}(x,y) = [N^{(e)}]\{\Theta_n^{(e)}\} \tag{5.8}$$

onde $[N^{(e)}]$ é a matriz de funções de forma do elemento, definida pela seguinte expressão:

$$[N^{(e)}] = \left(N_1^{(e)}(x,y) + N_2^{(e)}(x,y) + ... + N_n^{(e)}(x,y)\right) \tag{5.9}$$

e $\Theta^{(e)}$ é o vetor nodal do elemento:

$$\left\{\Theta^{(e)}\right\} = \begin{bmatrix}\Theta_1^{(e)} & \Theta_2^{(e)} & ... & \Theta_n^{(e)}\end{bmatrix}^{-1} \tag{5.10}$$

Agora que estabelecemos as expressões matemáticas que fornecem o campo de valores aproximado no elemento, podemos conduzir a diferenciação parcial da equação (5.7) com relação a x e y para estabelecer as expressões para os componentes do gradiente aproximado do que se calcula. Por exemplo, para a derivada parcial em relação a x, temos [43]:

$$\frac{\partial\Theta^{(e)}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(N_1(x,y)\Theta_1^{(e)} + N_2(x,y)\Theta_2^{(e)} + ... + N_n(x,y)\Theta_n^{(e)}\right) \tag{5.11}$$

Agora, podemos observar que, nos termos da equação (5.11), apenas as funções de forma dependem de x, enquanto os valores nodais são números constantes. Assim, temos:

$$\frac{\partial\Theta^{(e)}}{\partial x} = \frac{\partial N_1}{\partial x}\Theta_1^{(e)} + \frac{\partial N_2}{\partial x}\Theta_2^{(e)} + ... + \frac{\partial N_n}{\partial x}\Theta_n^{(e)} \tag{5.12}$$

igualmente obtêm-se a derivada em função de y

$$\frac{\partial\Theta^{(e)}}{\partial y} = \frac{\partial N_1}{\partial y}\Theta_1^{(e)} + \frac{\partial N_2}{\partial y}\Theta_2^{(e)} + ... + \frac{\partial N_n}{\partial y}\Theta_n^{(e)} \tag{5.13}$$

Os termos do lado esquerdo nas equações (5.12 e 5.13) são os componentes do gradiente do campo de aproximação. Podemos combinar as duas equações numa única ex-

pressão matricial [43]:

$$\{\nabla\Theta^{(e)}\} = \begin{bmatrix} \frac{\partial\Theta^{(e)}}{\partial x} \\ \frac{\partial\Theta^{(e)}}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \cdots & \frac{\partial N_n}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \cdots & \frac{\partial N_n}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Theta_1^{(e)} \\ \Theta_2^{(e)} \\ \cdots \\ \Theta_n^{(e)} \end{bmatrix}^T = [B^{(e)}]\{\Theta^{(e)}\} \tag{5.14}$$

Onde $B^{(e)}$ é a matriz do elemento que pré-multiplica os valores nodais para fornecer o gradiente do campo aproximado [43]:

$$[B^{(e)}] = \begin{bmatrix} \partial N_1/\partial x & \partial N_2/\partial x & ... & \partial N_n/\partial x \\ \partial N_1/\partial y & \partial N_2/\partial y & ... & \partial N_n/\partial y \end{bmatrix} \tag{5.15}$$

Uma parte essencial de cada análise de elementos finitos e softwares, são os dados que definem as coordenadas de cada nó presente nos elementos. Os dados dos elementos são

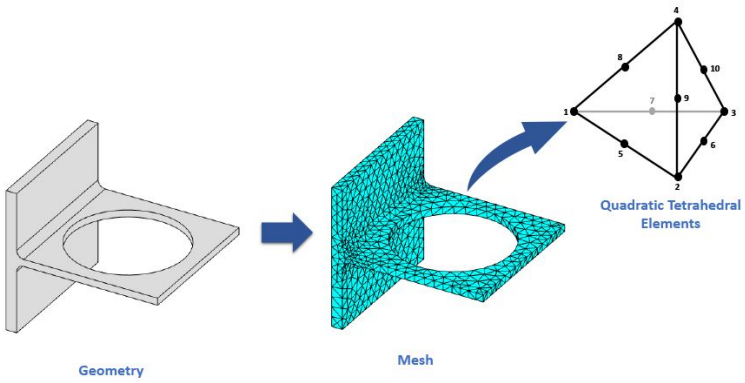


Figura 5.4: Discretiazação de um elemento tridimensional.

normalmente compostos por informações de coordenadas, material de conectividade nodal e condições de fronteiras. Dados nodais e informações dos elementos são geralmente gerados dentro de um software, como mostra a Figura 5.4, mas o utilizador ainda deve fornecer alguma quantidade mínima de dados para descrever o problema específico em questão. Isso é chamado de geração de malha [73].

5.2.3 Formulação do Problema

As formas isoparamétricas dos elementos 3D são mostradas na Figura 5.5. Observa-se que tanto a Figura regular como os elementos distorcidos são mostrados. Como no caso do elemento retangular (bidimensional), o número de nós em cada perna do triângulo determina a ordem do elemento (dois, três e quatro nós numa perna para as formas linear, quadrático e ordem cúbica, respetivamente). Observe como uma curva de ordem quadrática pode ser desenhada através três pontos (ou seja, os nós) e uma curva de ordem cúbica mediante quatro pontos [73].

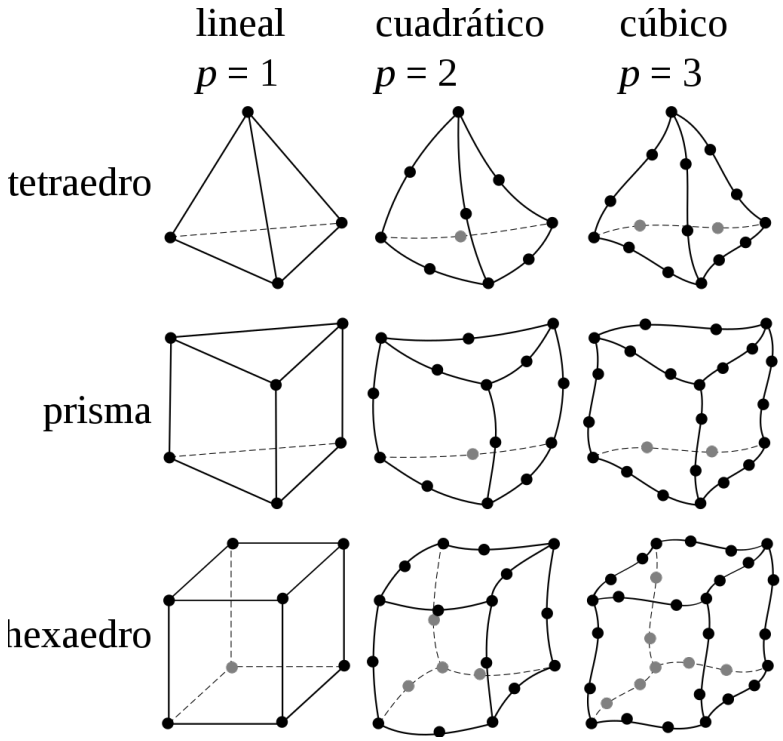


Figura 5.5: Principais tipos de elementos isoparamétricos utilizados en 3D [81].

A formulação dos elementos triangulares é muito semelhante aos elementos quadrilátero, exceto que as coordenadas locais normalizadas são áreas de coordenadas, e não são todos coordenadas independentes. Recorde-se que os três domínios as coordenadas não são todas independentes porque devem somar à unidade [73]. Isto pode ser tido em conta tomando L_1 e L_2 como coordenadas independentes. O facto de L_3 ser dependente (de L_1 e L_2) é explicitamente tomado em consideração posterior. Portanto, podemos escrever:

$$\begin{aligned} L_1 &= L_1(x, y) \\ L_2 &= L_2(x, y) \end{aligned} \tag{5.16}$$

tendo em conta que, L_i é a longitude de cada lado do triângulo, e

$$N_i = N_i(L_1, L_2) \tag{5.17}$$

que resulta em:

$$\frac{\partial N_i}{\partial L_1} = \frac{\partial N_i}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial L_1} + \frac{\partial N_i}{\partial y}\frac{\partial y}{\partial L_1} \tag{5.18}$$

e

$$\frac{\partial N_i}{\partial L_2} = \frac{\partial N_i}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial L_2} + \frac{\partial N_i}{\partial y}\frac{\partial y}{\partial L_2} \tag{5.19}$$

Na forma matricial, se obtém:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial L_1} \\ \frac{\partial N_i}{\partial L_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial L_1} & \frac{\partial y}{\partial L_1} \\ \frac{\partial x}{\partial L_2} & \frac{\partial y}{\partial L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{bmatrix} \tag{5.20}$$

Desta forma, se obtém a matriz jacobiana ***J*** por:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial L_1} & \frac{\partial y}{\partial L_1} \\ \frac{\partial x}{\partial L_2} & \frac{\partial y}{\partial L_2} \end{bmatrix} \tag{5.21}$$

resultando em:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial L_1} & \frac{\partial y}{\partial L_1} \\ \frac{\partial x}{\partial L_2} & \frac{\partial y}{\partial L_2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial L_1} \\ \frac{\partial N_i}{\partial L_2} \end{bmatrix} \tag{5.22}$$

Observe que as derivadas parciais das funções de forma N_i, são necessárias no vetor coluna no lado direito da (equação 5.22). Lembre-se que assumimos N_i; ser uma função apenas de L_1 e L_2, uma vez que L_3 é então dependente de L_1 e L_3 por eq. ($L_i + L_j + L_k = 1$). Isto implica que, nos cálculos de $\frac{\partial N_i}{\partial L_1}$ e $\frac{\partial N_i}{\partial L_2}$, devemos obter membros suplentes:

$$L_3 = 1 - L_1 - L_2 \tag{5.23}$$

nas funções de forma N_i; antes de calcular estas derivadas parciais. Para elementos de ordem superior, esta abordagem é muito tediosa; mas, há uma maneira mais simples. Denotemos a derivada parcial de N_i; no que diz respeito à L_1 como:

$$\left(\frac{\partial N_i}{\partial L_1}\right)_{L_1, L_2} \tag{5.24}$$

onde a função de forma N_i; é agora uma função L_1, L_2, L_3 , (mas L_2, L_3) são mantidos como constantes na realização da diferenciação e se obtém:

$$\frac{\partial N_i}{\partial L_1} \tag{5.25}$$

implica N_i; é uma função de L_1 e L_2 , e L_2 é mantido constante (o L_2 não está escrito na eq. (5.22)). Daqui resulta que:

$$\frac{\partial L_i}{\partial L_1} = \frac{\partial L_1}{\partial L_1}\left(\frac{\partial N_i}{\partial L_1}\right)_{L_2, L_3} + \frac{\partial L_2}{\partial L_1}\left(\frac{\partial N_i}{\partial L_2}\right)_{L_1, L_3} + \frac{\partial L_3}{\partial L_1}\left(\frac{\partial N_i}{\partial L_3}\right)_{L_1, L_2} \tag{5.26}$$

e desde

$$\frac{\partial L_1}{\partial L_1} = 1, \qquad \frac{\partial L_2}{\partial L_1} = 0, \qquad \frac{\partial L_3}{\partial L_1} = -1 \tag{5.27}$$

temos:

$$\frac{\partial N_i}{\partial L_1} = \left(\frac{\partial N_i}{\partial L_1}\right)_{L_2, L_3} - \left(\frac{\partial N_i}{\partial L_3}\right)_{L_1, L_2} \tag{5.28}$$

De forma completamente análoga, conclui-se que:

$$\frac{\partial N_i}{\partial L_2} = \left(\frac{\partial N_i}{\partial L_2}\right)_{L_1, L_3} - \left(\frac{\partial N_i}{\partial L_3}\right)_{L_1, L_2} \tag{5.29}$$

As equações (5.28) e (5.29) tornam desnecessário obter N_i; em função apenas de L_1, e L_2 antes de calcular as derivadas parciais no lado direito de (equação 5.22). A matriz jacobiana pode ser lançada numa forma mais utilizável pela escrita:

$$J = \begin{bmatrix} \sum \frac{\partial N_j}{\partial L_1} x_j & \sum \frac{\partial N_j}{\partial L_1} y_j \\ \sum \frac{\partial N_j}{\partial L_2} x_j & \sum \frac{\partial N_j}{\partial L_2} y_j \end{bmatrix} \tag{5.30}$$

onde as derivadas parciais podem ser calculadas com a ajuda de eqs. (5.28) e (5.29). Observe que para os elementos triangulares lineares, quadráticos e de ordem cúbica, as somas são feitas em três, seis e dez termos, respetivamente. Por tanto, conclui-se que [73]:

$$dxdy = |\det(J)| dL_1 dL_2 \tag{5.31}$$

Segue-se também, que as matrizes de rigidez dos elementos típicos e vetores de forças nodais podem ser lançado na forma:

$$K^e = \int_0^1 \int_0^{1-L_2} H(L_1, L_2, L_3) dL_1 dL_2 \tag{5.32}$$

e

$$f^e = \int_0^1 \int_0^{1-L_2} g(L_1, L_2, L_3) dL_1 dL_2 \tag{5.33}$$

Onde:

K^e - Representa o vetor de rigidez

f^e - Representa o vetor de forças nodais

g - Aceleração de gravidade

H - Altura do triângulo

L_i - A longitude de cada elemento ou barra do triângulo

5.2.4 Sistemas de Equações Envolvidas

Na Figura 5.6 está representada um elemento unidimensional de comprimento $L = 2$, com dois nós. Vejamos à análise que devemos seguir tendo conta os deslocamentos nodais do elemento.

Consideremos que o único eixo onde ocorre o movimento é o x, desta forma o deslocamento ocorre paralelamente ao eixo x. A função $u(x)$ então corresponde ao único campo de deslocamento nodal do elemento como se estabelece na seguinte equação:

$$\begin{cases} u(+1) = a_1 \\ u(-1) = a_2 \end{cases} \tag{5.34}$$

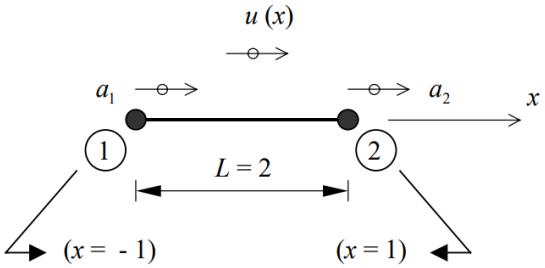


Figura 5.6: Elemento finito unidimensional de dois nós.

tendo em conta que a_1 e a_2 são deslocamentos nodais do elemento.

Analisemos agora em forma de aproximação a variação que o deslocamento nodal irá proporcionar aos nós 1 e 2 é linear. Note-se que neste caso a função $u(x)$ que representa o campo de deslocamentos, porque é linear em x e obedece à equação 5.34.

$$u(x) = \frac{a_1 + a_2}{2} + \frac{a_2 - a_1}{2}x \tag{5.35}$$

Os valores numéricos dos componentes a_1 e a_2 então são conhecidos ao analisar a estrutura.

Colocando a_1 e a_2 em evidência na equação 5.35, obtêm-se a seguinte expressão:

$$u(x) = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2}x\right) a_1 + \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}x\right) a_2 \tag{5.36}$$

Na equação 5.36 se obtém o produto de soma entre a função linear de x e os deslocamentos nodais a_1 e a_2 respetivamente.

Então na forma matricial da equação 5.36 temos:

$$u(x) = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2}x\right) & \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}x\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \tag{5.37}$$

ou

$$u(x) = \begin{bmatrix} N_1(x) & N_2(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \tag{5.38}$$

Desta forma se obtém o seguinte sistema de equações linear:

$$\begin{cases} N_1(x) = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2}x\right) \\ N_2(x) = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}x\right) \end{cases} \tag{5.39}$$

5.2.5 Solução dos Sistemas de Equações

Ao solucionar um problema pelo método dos elementos finitos, seja manual ou computacionalmente, é comum surgirem sistemas de equações desintegradas de matrizes ou vice-versa, para resolução do sistema envolvido no problema analisado na secção anterior consideraremos uma resolução analítica.

Desta forma definimos o campo de deformação linear pela seguinte equação diferencial:

$$\varepsilon = \frac{du}{dx} \tag{5.40}$$

Partindo da equação 5.38 e substituindo na 5.40 obtêm-se a seguinte expressão:

$$\varepsilon = \frac{d}{dx}\left(N_1(x)a_1 + N_2(x)a_1\right) \tag{5.41}$$

Uma vez que os deslocamentos nodais são independente da coordenada x derivando obtêm-se a seguinte expressão:

$$\varepsilon = \frac{dN_1}{dx}a_1 + \frac{dN_2}{dx}a_2 \tag{5.42}$$

Que denotamos na forma matricial da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \frac{dN_1}{dx} & \frac{dN_2}{dx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \tag{5.43}$$

Então definimos a matriz B como:

$$B = \begin{bmatrix} \frac{dN_1}{dx} & \frac{dN_2}{dx} \end{bmatrix} \tag{5.44}$$

Assim da equação 5.41 obtêm-se a expressão seguinte:

$$\varepsilon = Ba \tag{5.45}$$

Derivando os componentes do vetor B contidas na equação 5.39, obtêm-se:

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dx} = -\frac{1}{2} \\ \frac{dN_2}{dx} = \frac{1}{2} \end{cases} \tag{5.46}$$

O novo vetor B podemos descrever então da seguinte maneira:

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{5.47}$$

Tendo em conta que os nós a_1 e a_2 representam as extremidades do elemento, então da

equação 5.45 obtêm-se:

$$\varepsilon = Ba = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \frac{a_2 - a_1}{2} = \frac{\Delta L}{2} \tag{5.48}$$

Deste exemplo simples, a expressão do campo de deformações corresponde ao que se considera habitualmente para uma barra sujeita a um esforço axial. Uma vez que ε não depende da coordenada x, este elemento finito apresenta deformação constante.

5.3 Análise dos Métodos dos Elementos Finitos

Quando surge a necessidade de resolver um problema de análise de uma estrutura, a primeira questão que se coloca é a sua classificação quanto à geometria, modelo do material constituinte e ações aplicadas. O modo como o MEF é formulado e aplicado dependente, em parte, das simplificações inerentes a cada tipo de problema. Referem-se em seguida alguns aspetos que é necessário ter em consideração na fase que antecede a análise de uma estrutura.

5.3.1 Análise Dinâmica ou Estática

As ações sobre as estruturas são em geral dinâmicas, devendo ser consideradas as forças de inércia associadas às acelerações a que cada um dos seus componentes fica sujeito. Por este motivo, seria de esperar que a análise de uma estrutura teria obrigatoriamente de ter em consideração os efeitos dinâmicos. Contudo, em muitas situações é razoável considerar que as ações são aplicadas de um modo suficientemente lento, tornando desprezáveis as forças de inércia. Nestes casos a análise designa-se estática. Nestes estudos apenas são considerados problemas em que se supõem válidas as simplificações inerentes a uma análise estática.

5.3.2 Análise da não Linearidade

Na análise de uma estrutura sólida, é habitual dizer-se que os pequenos deslocamentos impostos pelas ações exteriores são muito pequenos em comparação com as dimensões dos elementos da estrutura. Nestas circunstâncias, pode assumir-se que a alteração da geometria da estrutura não afeta em nada a distribuição de esforços e tensões, todo o estudo é feito sob a hipótese da geometria inicial inalterado. Se esta hipótese não for aplicada para o formato geométrico da estrutura, a análise é denominada não-linear geométrica.

Até recentemente, a maioria das utilizações do método de elementos finitos em engenharia estava restrito a análises lineares. Como a análise linear em muitos casos responde

bem as condições reais das peças em análise, não existem grandes dificuldades, entretanto em certos problemas é necessário que ocorra uma aproximação não linear, visando com isto, descrever a situação em análise [16].

Historicamente, engenheiros são relutantes a usar análise não linear, devido à complexidade de formulação do problema e também a longos tempos de solução. Com as mudanças mais recentes nas interfaces de programas de elementos finitos se tornou muito mais fácil à utilização deste tipo de análise. Além disto, a solução dos algoritmos é possível de ser realizada na maioria dos casos em computadores pessoais comuns [18].

Quando se fala em análise não linear o principal termo que se deve levar em conta é a rigidez, que define a diferença fundamental entre a análise linear e não linear. A rigidez é uma propriedade da peça em análise que caracteriza a resposta da mesma a uma carga aplicada [16].

Existem basicamente três fatores que alteram a rigidez que são:

- A geometria da peça;
- O material;
- Condições de fronteiras.

5.3.2.1 Não Linearidade Geométrica

Como vimos na secção anterior, à análise não linear se torna necessária quando há uma variação da rigidez da peça sobre as condições de operação. Se estas mudanças se originam das mudanças na geometria, o comportamento não linear está definido como não linearidade geométrica [18].

Estas mudanças na geometria, que levam a mudança na rigidez, podem acontecer quando uma peça possui deslocamentos elevados podendo os mesmos ser claramente visíveis, como no caso de se aplicar uma carga elevada a uma das extremidades de uma viga fina de um material frágil e na extremidade oposta houver um engaste segurando a mesma [18].

Quando o deslocamento sofrido por uma estrutura é relativamente pequeno, alguns termos de maior ordem nas equações estáticas não são considerados, sendo somente requeridos os termos lineares para calcular a solução do problema. Entretanto, quando o deslocamento se torna maior, os termos não lineares começam a se tornarem significativos, sendo os mesmos considerados na resolução do problema [16].

5.3.2.2 Não Linearidade do Material

Se as mudanças na rigidez, ocorrerem somente devido a mudanças nas propriedades do material em condições de operação, o problema é de não linearidade do material. Na

Figura 5.7 é mostrado o gráfico de tensão-deformação específica para um material quando submetido a um ensaio de tração.

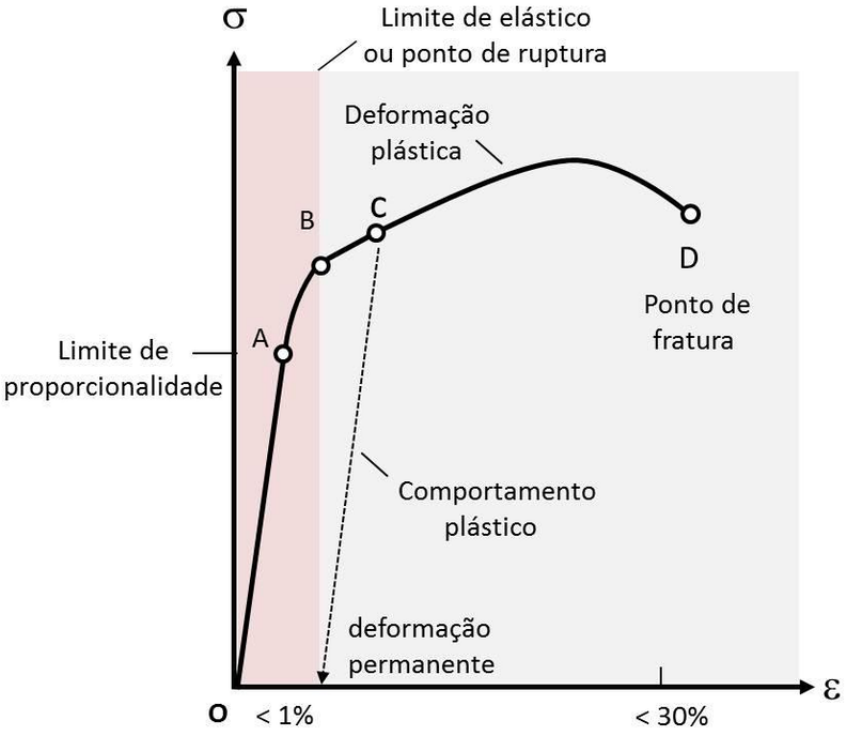


Figura 5.7: Gráfico tensão-deformação específica para um material submetido a um ensaio de tração [10].

Desde início do gráfico até o ponto **A** o material passa pelo processo de deformação linear elástica, ou seja, possui linearidade entre a tensão aplicada ao material e a deformação sofrida pelo mesmo. O material nesta condição consegue retornar as suas características iniciais quando a carga é retirada do mesmo [16].

Do ponto **A**, até o ponto **B**, ainda ocorre um processo de deformação elástica, entretanto não existe mais linearidade entre a tensão suportada pelo material e a deformação sofrida, porém quando a carga é retirada o material volta a sua condição inicial, mesmo que demore um tempo maior para que isto ocorra [16].

A partir do ponto **B**, o material passa a apresentar um comportamento plástico, ou seja, a partir deste valor o material quando submetido a uma carga, não irá mais retornar a condição inicial, pois apresentará uma deformação permanente que é irreversível, além de não haver também linearidade entre a tensão suportada pelo material e a deformação sofrida. Este ponto corresponde à tensão de escoamento do material, que é o valor de tensão que caracteriza o início do regime de deformação plástica [16].

Os próximos pontos no gráfico, são o da máxima tensão que o material pode suportar que é o ponto **C** e no fim do gráfico o ponto **D** que caracteriza a tensão convencional de rutura que foi experimentada pelo material [16].

5.3.2.3 Não Linearidade Devido a Condições de Fronteiras

Se a condição de contacto, incluindo o engaste, varia durante a aplicação da carga, deve-se utilizar a análise não linear [18].

As tensões de contacto desenvolvem-se entre duas superfícies quando as mesmas se tocam, em esforço de compressão, sendo por consequência a área de contacto e a rigidez da zona de contacto desconhecidas antes da solução [18, 16].

Na Figura 5.8 é mostrado uma solução de tensões de um problema típico de contacto. Mesmo que a área das tensões de contacto seja muito pequena comparada ao tamanho total da peça, a mudança na rigidez nesta área faz com que seja requerida a análise não linear de toda a peça [18].

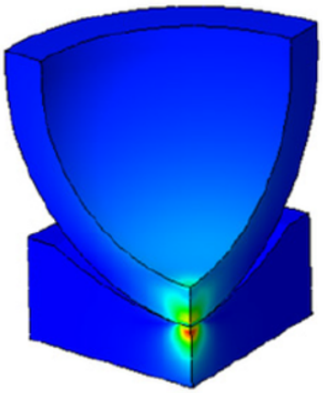


Figura 5.8: Análise não linear das tensões de contacto [18].

Na Figura 5.9 é mostrado um exemplo de uma viga engatada onde se utiliza a análise não linear. O comprimento da viga e a sua rigidez dependem de quanto à mesma se deforma. Caso seja aplicada uma carga que faça com que a viga entre em contacto com o engaste na parte inferior da mesma, é necessário utilizar-se análise não linear, devido a este contacto levar a uma variação na rigidez da mesma [18].

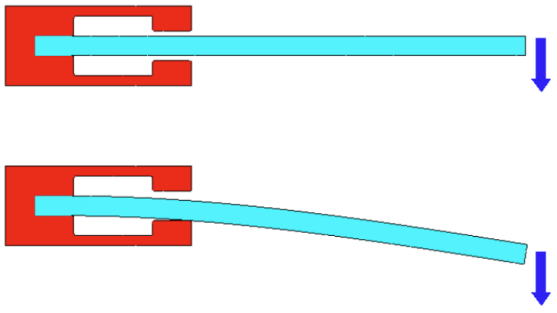


Figura 5.9: Viga em contacto com o seu engate [18].

5.3.3 Avaliação e Interpretação

Os criadores de códigos informáticos de elementos finitos estruturais, os analistas que utilizam os códigos e os decisores que dependem dos resultados da análise enfrentam uma

questão crítica: Como é que a confiança na modelação e na computação deve ser avaliada de forma crítica? A validação e a verificação dos resultados do MEF são as principais variáveis para criar e quantificar essa confiança. Essencialmente, validação e a avaliação da exatidão dos resultados estruturais e modelos computacionais por comparação dos resultados numéricos com dados experimentais. Os ensaios são geralmente efetuadas em laboratório utilizando modelos à escala de uma estrutura, e em ocasiões especiais em estruturas reais. A correta definição dos ensaios experimentais e a fiabilidade dos resultados experimentais são questões cruciais no processo de validação [65].

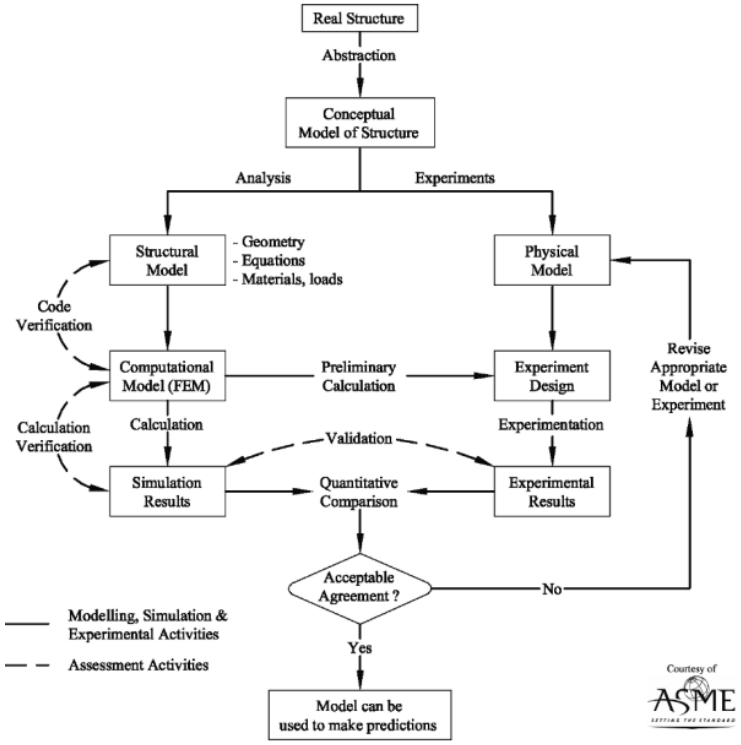


Figura 5.10: Esquema dos processos de verificação e validação no MEF. Fluxograma conceito retirado de [65].

A verificação, por outro lado, é o processo de determinar que um modelo computacional representa corretamente o modelo estrutural subjacente e a sua solução. Na verificação, portanto, a relação entre os resultados numéricos com o mundo real não é um problema. A verificação dos cálculos do MEF é feita comparando os resultados numéricos para problemas de referência simples com soluções "exatas"obtidas analiticamente, ou utilizando métodos numéricos mais exatos. A Figura 5.10 mostra um esquema das etapas de verificação e validação [65].

A etapa de validação subsequente (Figura 5.10) tem por objetivo avaliar a a capacidade de previsão do modelo. Esta avaliação é efetuada através da comparação dos resultados numéricos com ensaios de validação realizadas em modelos físicos em laboratório ou em estruturas reais. Se estas comparações forem satisfatórias, o modelo é considerado validado para a utilização a que se destina. Em resumo, o exercício de validação fornece uma visão sobre a capacidade do modelo estrutural global para reproduzir o comportamento de

uma estrutura real (ou o modelo físico escolhido) com precisão suficiente. Embora tanto a exatidão do modelo estrutural como o método computacional sejam avaliados num processo de validação, um grande erro de validação para um código já verificado significa normalmente que o modelo estrutural escolhido não é adequado e que um modelo estrutural melhor deve ser utilizado [65].

5.4 Apresentação do Software

A indústria automóvel tem na mira, hoje em dia, a digitalização da tecnologia de automatização para conseguir introduzir melhorias substâncias na produtividade e a qualidade da produção. O objetivo final é a criação de um entorno de produção autónomo, ou a chamada fábrica inteligente. Esta visão está impulsada pela promessa de muitos benefícios substâncias: linhas de produção inteligentes e autocorretivos, que realizam os ajustes necessários de processo em linha de forma automática para garantir uma produção sem falhas, uma produtividade e um tempo de atividades máximas (sem tempos de inatividade não planificadas dos equipamentos de produção), assim como custos de produção más baixos e uma flexibilidade de produção ótima [6].

Para implementar com sucesso a Indústria 4.0, é essencial adotar uma estratégia abrangente que procure integrar a digitalização em todos os estágios da cadeia de produção e envolva todas as atividades em todos os níveis [32]. Isso requer um esforço colaborativo de todo o ecossistema automóvel, incluindo não apenas as empresas do setor automóvel, mas também todas as partes envolvidas na cadeia de suprimentos, como fabricantes de hardware, desenvolvedores de software, fornecedores de peças, subconjuntos e serviços. A colaboração entre todos os atores é fundamental para garantir uma transição suave e bem-sucedida para a era da Indústria 4.0, promovendo eficiência, inovação e competitividade no setor automóvel.

5.4.1 AutoForm

O software AutoForm é o maior e mais avançado software de simulação de processos de estampagem de chapas metálicas e de montagens de componentes BIW. O seu simples layout, os baixos tempos de simulação, atualizações e constantes melhorias aliadas às diversas parcerias com grandes grupos automóveis, produtoras de aços e universidades, faziam deste, em 2010, o software mais utilizado na indústria (50 a 60%) porém, atualmente o software é utilizado por mais de 70% da mesma [56].

O AutoForm oferece soluções de software para conformação de chapas metálicas, software para as indústrias de fabricação de ferramenta, estamparias (ver Figura 5.11) e para a produção de chapas metálicas, a sua solução atende a toda a cadeia de processo de um produto estampado [32].

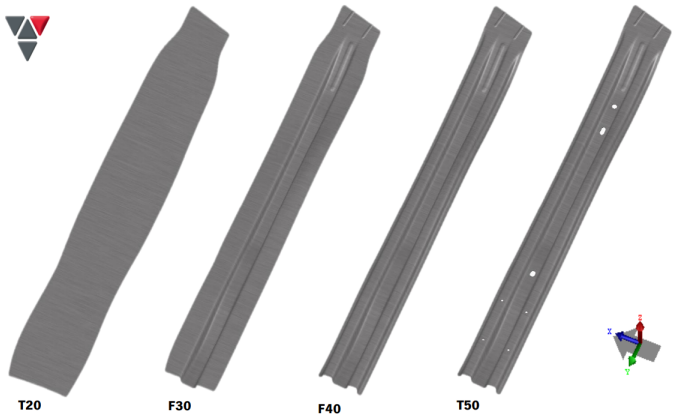


Figura 5.11: Etapas da simulação de um componente metálico [56].

O AutoForm oferece tecnologia de ponta que permite aos engenheiros de processo e de produção adquirir informações em profundidade sobre os processos de conformação e de montagem de carroçarias brutas que eles planeiam, projetam, desenvolvem e otimizam (ver Figura 5.12). O método de elementos finitos usado pela AutoForm para modelar a física dos processos de conformação e união permite a criação de transparência total do



Figura 5.12: Análises do Processo de estampagem no AutoForm [6].

processo [6]. Consequentemente, as causalidades que impactam os resultados do processo, ou seja, a peça estampada, é exibida detalhadamente conforme ocorre no processo real. Entender exatamente quais peças e características do processo têm um impacto no resultado permite aos utilizadores do AutoForm, prever o resultado do processo e desenvolver estratégias que atendam a todos os requisitos de tempo, qualidade e custo [6].

Durante a engenharia de processos, para ter uma melhor visão do processo de estampagem, os engenheiros devem realizar a simulação de embutidura e operações secundárias, tais como calibração, corte e dobramento, assim como do SpringBack [6].

O Autoform permite a simulação rápida e precisa de todas as operações do processo de estampagem, combinada com a análise de resultados, a simulação dos processos de es-

tampagem com o software da AutoForm oferece ao utilizador as informações necessárias para a criação do processo [6].

5.4.1.1 AutoForm-StampingAdviser

O AutoForm-StampingAdviser oferece uma avaliação rápida e fácil da viabilidade das peças e processos, assim como determina a forma do blank, o uso de material e os custos do blank. O software traz informações valiosas sobre os principais problemas de qualidade de estampagem, tais como riscos de rutura e afinamento excessivo, potencial de enrugamento e as formas desenvolvidas de blank com seus custos materiais associados [6].

Na sua aplicação mais simples, o AutoForm-StampingAdviser é utilizado para avaliações antecipadas de viabilidade baseadas apenas na geometria da peça, sem considerar a geometria da ferramenta. Para estas análises, o software permite que o utilizador modifique a peça (ver Figura 5.13) e, quando necessário, gere automaticamente uma superfície do cerra-chapas e uma geometria de complemento do punção. Numa aplicação mais avançada, análises de conformação e desenvolvimento de blanks são executados de acordo com a geometria 3D da ferramenta de embutidura gerada pelo AutoForm-DieDesigner. Com um desenho de matriz plausível, o AutoForm-StampingAdviser rapidamente identifica os possíveis problemas de conformação e determina a forma do blank, uso de material e custos do blank [6].

Vantagens:

- Avaliação de viabilidade da peça e processo;
- Feedback sobre problemas-chave de qualidade de estampagem;
- Previsão da melhor condição de formato e encaixe dos blanks.

Recursos principais:

- Configuração poderosa e flexível;
- Rápida modificação de geometrias da peça;
- Várias opções de blank;
- Aplicação baseada apenas na peça ou na geometria inteira da ferramenta.

O software AutoForm-StampingAdviser permite calcular e otimizar a incorporação e o encaixe. Quando estes cálculos de peças em bruto são associados ao AutoForm-CostEstimator, é possível obter um equilíbrio entre os custos de material, de ferramentas e de produção [6].

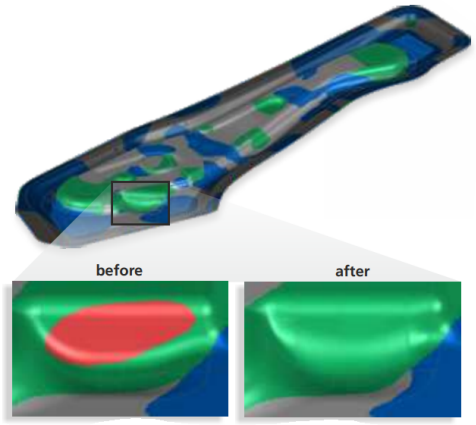


Figura 5.13: Modificação rápida da geometria [6].

Quando aplicado desde o início do ciclo de conceção da peça, o AutoForm-Stamping proporciona benefícios significativos em termos de desempenho e de uma manufacturabilidade robusta da peça. Ao utilizar o desbaste observado e a deformação plástica efetiva durante o CAE, é mais provável que os resultados produzidos reflitam o desempenho final da peça. A aplicação do AutoForm-StampingAdviser conduz a uma melhoria contínua da qualidade do projeto da peça, bem como a uma redução significativa dos custos totais e do tempo de produção da peça [6].

5.4.1.2 AutoForm e Gestamp

A tendência atual no sector de automóvel vai dirigida à redução do peso do veículo e o reforço na segurança dos componentes. Estes objetivos pretendem-se alcançar em ciclos mais curtos e com maior precisão. Isso implica a incorporação de novos materiais, aços de ultra alto limite elástico (DP, TRIP) e alumínios, e a definição de formatos de chapas mais pequenos e de espessura reduzida. Estas inovações na produção de peças de chapas metálicas devem estar vinculadas com uns processos de fabricação mais estáveis e tempo de desenvolvimento de ferramentas mais reduzidos [41].

A simulação torna-se indispensável no estudo destes processos, com a possibilidade de realizar-se várias simulações de um mesmo processo, mas com diferentes abordagens, permite garantir os resultados tendo em conta a variação das propriedades do material, da espessura de chapas ou as condições de dobra, bem como a embutidura durante o processo de estampagem do componente metálico.

Em 2005 aparece AutoForm-Sigma, módulo único no mercado especializado em analisar e melhorar a robustez de peças de chapas metálicas e os seus processos. Com o AutoForm-Sigma o processo de fabricação é mais eficiente e estável, alcançando-se os objetivos de qualidades desejados.

No princípio do ano de 2012 Gestamp Global Tooling e AutoForm realizaram um projeto colaborativo com o fim de implementar a solução do AutoForm-Sigma no trabalho

diário dos processos de corte e conformação do grupo. Desta forma Gestamp Global Tooling aposta na inovação para conseguir maior competitividade e aumentar a eficiência dos seus processos, no intuito de reduzir paragens não programadas de máquinas e ajustes de ferramentas, além de minimizar os ciclos de compensação dos processos para alcançar a qualidade final de peças desejadas [41].

O projeto começa com uma breve formação em AutoForm-Sigma para os especialistas em simulação e processos da Gestamp Global Tooling. Após a formação, os utilizadores do AutoForm desta divisão da Gestamp puderam verificar as vantagens da utilização do AutoForm-Sigma em algumas das peças que estavam em produção, especialmente em componentes de alumínio, um material que está tornando-se cada vez mais comum na produção de peças metálicas.

O AutoForm-Sigma não só oferece a possibilidade de aumentar a robustez do processo, como também apoia a tomada de decisões. A tendência para utilizar tamanhos mais pequenos para reduzir custos de material pode provocar, em alguns casos, levar a defeitos nas peças e à instabilidade da produção. Em última análise, isto leva a um aumento dos custos de produção de moldes. Este exemplo é um problema típico com que a Gestamp Global Tooling se depara diariamente. Graças à sua longa experiência no fabrico de ferramentas, os especialistas da Gestamp conhecem os problemas causados por esta redução do tamanho da chapa, mas por vezes precisam não só de uma opinião mas também de um resultado quantitativo para poderem tomar uma decisão. Através dos resultados CP e CPK fornecidos pelo AutoForm-Sigma, este possível defeito da peça é facilmente tangível e o utilizador desta solução AutoForm tem mais argumentos para refutar uma decisão junto do cliente final [41].

Após um ano de cooperação entre as duas empresas, em que a AutoForm apoiou e deu suporte à implementação deste produto, a Gestamp Global Tooling adquiriu a solução AutoForm-Sigma e continua a trabalhar para melhorar e aumentar a robustez dos seus processos.

5.4.2 Solução Implícita

A abordagem de integração usada pelo programa é como se ele resolvesse o problema de forma estática, como se estivesse equilibrando cuidadosamente todas as forças envolvidas, sem levar em conta a dinâmica. Em outras palavras, ele trata os problemas analisados como se estivessem se movendo lentamente. Para encontrar os deslocamentos dos pontos nodais, o programa resolve a seguinte equação de equilíbrio para cada intervalo de tempo $(\Delta t + t)$ durante cada iteração [15]:

$$^{(t+\Delta t)}R - ^{(t+\Delta t)}P = 0 \tag{5.49}$$

No momento ($\Delta t + t$), onde as forças internas e externas são representadas por R e P, respetivamente, é necessário alcançar o equilíbrio. Enquanto isso, no tempo (Δt), presume-se que já estamos num estado de equilíbrio. Como os métodos implícitos não lidam diretamente com o tempo na sua formulação, os passos de tempo são basicamente incrementos de deslocamento. Para resolver essa equação de equilíbrio, usamos uma abordagem baseada em séries de Taylor.

$$k(\hat{u})\Delta\hat{u} - P(\hat{u}) = 0 \tag{5.50}$$

Considerando k como a matriz de rigidez, $\hat{u}$ como o vetor de deslocamentos nodais e $\Delta\hat{u}$ como o incremento de deslocamento desconhecido.

Na integração implícita, em cada passo de integração se deve resolver um sistema acoplado das equações que contém os valores atuais e futuros das variáveis. É trabalhoso de programar e custoso de resolver; ao tratar-se de muitas equações acopladas, geralmente há que usar matrizes ou iterar para convergir a solução. A câmbio, esta integração temporal pode ser incondicionalmente estável, o que permite avançar em (Δt) muito maiores [55].

A principal vantagem dessa formulação em relação ao outro método mais amplamente utilizado, o método explícito dinâmico, é que ela é estável independentemente das condições. Isso significa que os intervalos de tempo definidos podem ser significativamente maiores sem causar instabilidades. O tamanho do intervalo de tempo é determinado apenas pela taxa de convergência e pela precisão desejada da solução. Por outro lado, como o método explícito é condicionalmente estável, a precisão da solução não pode ser garantida para intervalos de tempo maiores do que o crítico, requerendo intervalos de tempo muito curtos para garantir estabilidade, como afirma [15].

Além disso, não há restrições na discretização espacial. Elementos grandes podem ser combinados na malha com elementos muito pequenos, especialmente ao usar o refinamento adaptativo, sem que o tempo de cálculo seja afetado pelo tamanho do menor elemento.

No entanto, a melhoria da estabilidade do método implícito tem uma desvantagem. Um procedimento iterativo é necessário para linearizar e resolver um conjunto de equações algébricas não lineares em cada incremento, o que aumenta a carga de trabalho do processador e os requisitos de memória. Mudanças abruptas nas restrições de contacto, por exemplo, são outro fator que pode contribuir para problemas de convergência com incrementos extremamente grandes. No entanto, essa abordagem não impõe nenhuma restrição na discretização espacial, o que é fundamental em muitas aplicações para as quais é escolhida. Para aprimorar a eficácia da solução implícita, funcionalidades especiais estão sendo continuamente implementadas no AutoForm. Por exemplo, a formulação eficiente de elementos de casca elástico-plásticos e de casca espessa, com um solucionador direto rápido, garante que o tempo de cálculo e os requisitos de memória aumentem

apenas moderadamente em relação ao reforço da membrana de flexão (fator 3-5). Além disso, um controle automático eficiente do passo de tempo assegura que as restrições de contacto sejam apenas levemente modificadas de um incremento para o próximo. Um passo de tempo o mais amplo possível é selecionado para que os efeitos na precisão do cálculo sejam insignificantes e geralmente não resultem em problemas de convergência [15].

5.4.2.1 AutoForm Model Spring Back

Para melhorar a previsão do spring back, uma abordagem inovadora para modelar o efeito Bauschinger foi desenvolvida e implementada no código comercial AutoForm [48]. A ideia principal do modelo é utilizar a mesma equação de evolução para todo o caminho de descarga e recarga inversa, incluindo a área, que é tratada como elástica nos modelos convencionais. O princípio do modelo será apresentado aqui para o caso de tensão-compressão uniaxial usando valores fictícios da tensão de retorno σ_r e da deformação de retorno ε_r com o centro de coordenadas no ponto de retorno de carga [8].

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r}{E_l(p)} + K\left(\frac{\sigma_r}{2\sigma_h(p)}\right)^2 tan^{-1}(h^2) \tag{5.51}$$

Com $\sigma_h(p)$ como a tensão de encruamento usado para descrever a curva de tensão (ver fig. 5.14) e E_l como o módulo de Young inicial no momento de retorno de carga. Analogamente ao modelo de Yoshida-Uemori descrita em [8], E_l é uma função da deformação plástica acumulada p,

$$E_l = E(1-\gamma)(1-e^{-\chi p}) \tag{5.52}$$

em que γ e χ são dois parâmetros do material e E é o módulo de elasticidade. Pode-se então escrever a definição para as partes de tensão e compressão da curva:

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_h(p), & \text{para} \quad \text{tensão} \\ \sigma_h(p) - \sigma_r, & \text{para} \quad \text{compressão.} \end{cases} \tag{5.53}$$

Ao contrário dos modelos anteriores, aqui as equações de evolução para a tensão de encruamento e para a tensão de retorno são muito mais desconectadas. A definição do encruamento durante o carregamento proporcional é independente da definição da tensão de retorno e a curva de encruamento pode ser definida até mesmo em forma tabular. Assim como no modelo de Yoshida-Uemori, o encruamento cinemático puro é assumido aqui. No entanto, o modelo no AutoForm usa a resposta não linear tensão-deformação dentro da superfície de escoamento e pode descrever muito precisamente a replastificação precoce. Para modelar a estagnação do encruamento, a deformação plástica equivalente acumulada p é substituída por um novo parâmetro de encruamento p_d, que se comporta da

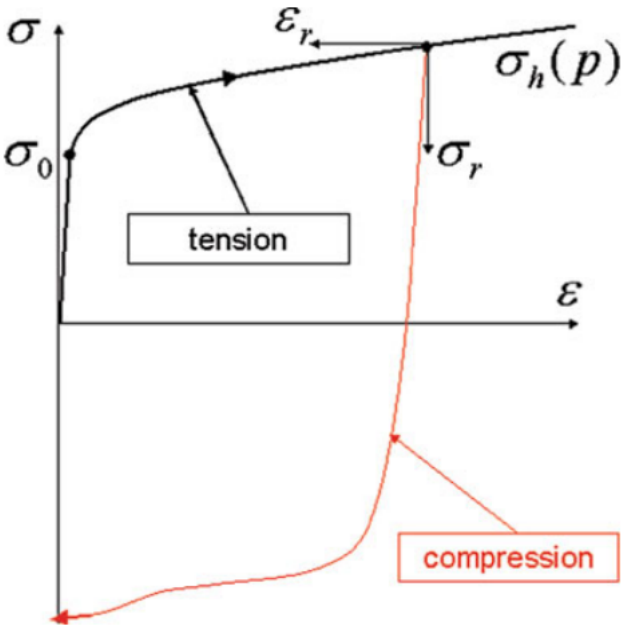


Figura 5.14: Esquema da curva tensão-compressão com inversão de tensão e deformação.

seguinte forma: p_d é idêntico a p durante a deformação proporcional e se desenvolve mais lentamente do que p durante a deformação inversa ou não proporcional. Para determinar se uma deformação é inversa ou não proporcional, uma superfície de armazenamento g é introduzida (Figura 5.15). Durante o carregamento proporcional inicial (tempo t), a progressão da deformação plástica estende a superfície de armazenamento e a variável semelhante à deformação **q** está na superfície g. Durante o carregamento inverso ou não proporcional adicional (tempo $t + \Delta t$), o tensor **q** atravessa a superfície de armazenamento; durante o tempo em que está dentro, a variável p_d se desenvolve mais lentamente do que p. Esse comportamento é controlado por um parâmetro do material $\xi(0 \leq \xi \leq 1)$, que caracteriza a fração da deformação para a frente que pode ser revertida com o atraso do encruamento do trabalho [8].

O conjunto de equações é:

$$\dot{P}_d = f\dot{q} \tag{5.54}$$

$$f = sing(\tilde{f})\tilde{f}^2 \tag{5.55}$$

$$\tilde{f} = 1 - \frac{3}{4}\frac{r}{g} \tag{5.56}$$

No início é $g = 0$ e cresce proporcionalmente a $\dot{P}_d$:

$$\dot{g} = \xi\dot{P}_d \tag{5.57}$$

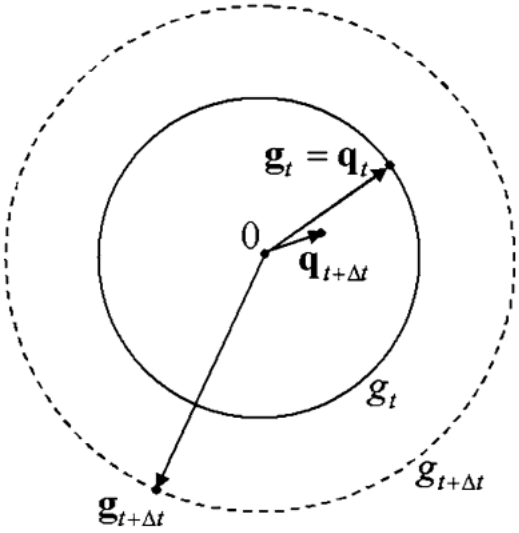


Figura 5.15: Esquema de ilustração do armazenamento superfície g [8].

r na eq. (5.56) é um valor escalar

$$r = \phi(\mathbf{g} - \mathbf{q}) \tag{5.58}$$

em que $\mathbf{q}$ é um tensor que representa a posição no interior da superfície g.

$$\dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{g}} + \dot{p}\left[\frac{\partial r}{\partial \mathbf{g}}\right]^{-1} \tag{5.59}$$

e

$$\dot{\mathbf{g}} = \frac{\dot{g}}{\varphi(\sigma)}\sigma \tag{5.60}$$

Considerando as eqs. (5.58) e (5.59) e uma vez que $\mathbf{q}$ não pode exceder a superfície g, obtém-se a taxa de r como:

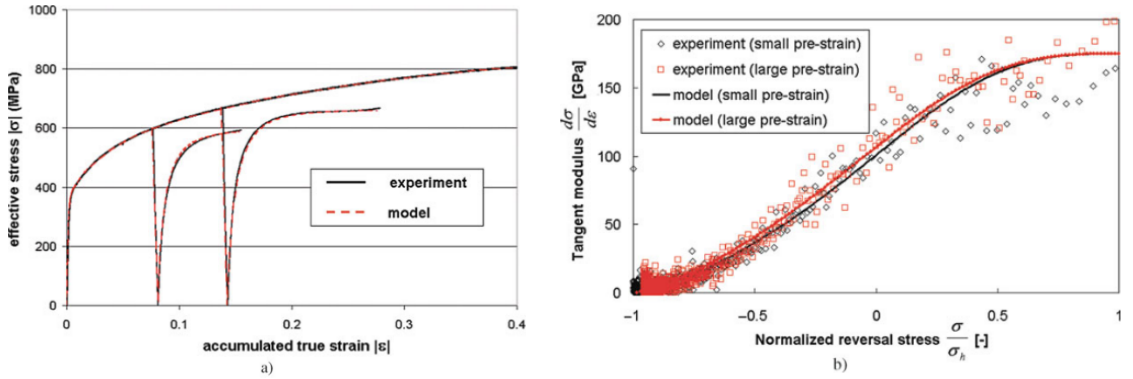
$$\begin{aligned} \dot{r} &= -\dot{p}, \quad \text{quando} \quad r > 0 \\ \dot{r} &= 0, \quad \text{quando} \quad r = 0 \end{aligned} \tag{5.61}$$

Finalmente, assumindo todos os fenómenos acima referidos, o modelo é capaz de descrever com exatidão as curvas experimentais de tensão-compressão. A Figura 5.16a mostra os dados de tensão uniaxial e tensão-compressão para o aço de alta resistência DP600 para dois ensaios com pré-esforços diferentes de 8 e 14%. A segunda imagem (ver

Tabela 5.1: Parâmetros de encruamento cinemático para aço DP600 [8].

K	$\xi(-)$	$\gamma(-)$	χ	$E_l(GPa)$
0.011	1	0.13	30	200

Figura 5.16b) apresenta a evolução do módulo da tangente a partir do ponto de inversão, o que permite ver o carácter não linear da resposta tensão-deformação diretamente após



(a) Curvas de tração uniaxial e tração-compressão

(b) Evolução do módulo de elasticidade tangencial tangencial

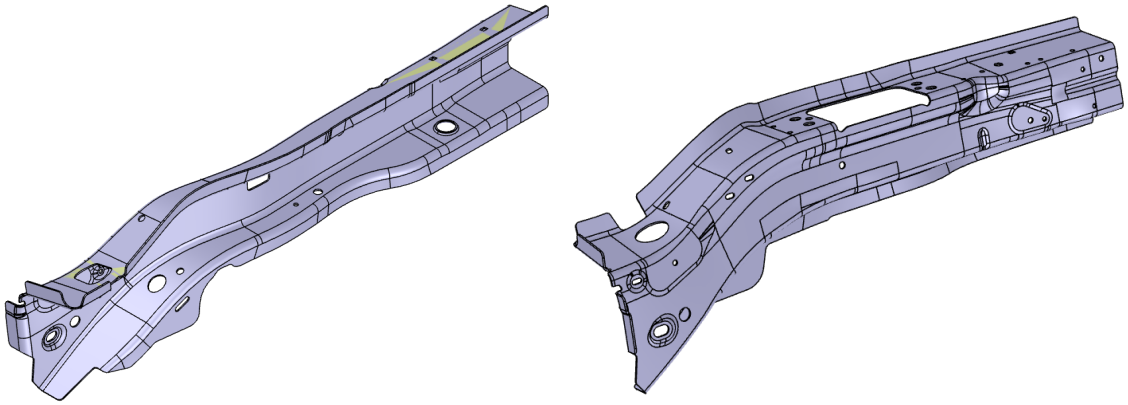
Figura 5.16: Resultados durante a compressão para o aço DP600 calculadas com o modelo AutoForm juntamente com resultados experimentais [8].

a inversão da carga. A tabela 5.1 apresenta os parâmetros do modelo para o aço DP600. Para a descrição da curva de encruamento por tração foram utilizados dados tabelados do ensaio de tração [8].

6 Desenvolvimento do Processo de Produção do Componente

6.1 Descrição do Componente

Nesta dissertação, efetuou-se o seguimento do processo de industrialização de duas longarinas para uma viatura ligeira, os dois componentes localizados paralelamente na parte dianteira da viatura, as mesmas possuem geometria ligeiramente diferente como mostram as Figuras 6.1a e 6.1b e o material de fabrico é um aço de alta resistência (AHSS), DP 800 (CR440Y780T-DP-GI) de 2 mm de espessura. Elas são dos principais componentes que constituem o chassis de um veículo. Em [80] afirma que as longarinas não são mais do que vigas de secção variável montadas longitudinalmente que proporcionam rigidez estrutural ao chassis.



(a) Longarina direita (b) Longarina esquerda

Figura 6.1: Geometria dos componentes.

Como observa-se na Figura 6.2, a longarina esquerda é responsável pelo suporte do apoio do motor e caixa de velocidade respetivamente, ao passo que a longarina direita, serve simplesmente como suporte do apoio do motor, importa realçar que a estrutura da longarina dispõe de um furo guia como indicado na Figura, que serve como referência da localização de outros componentes do automóvel, representando um alto grau de precisão neste componente.

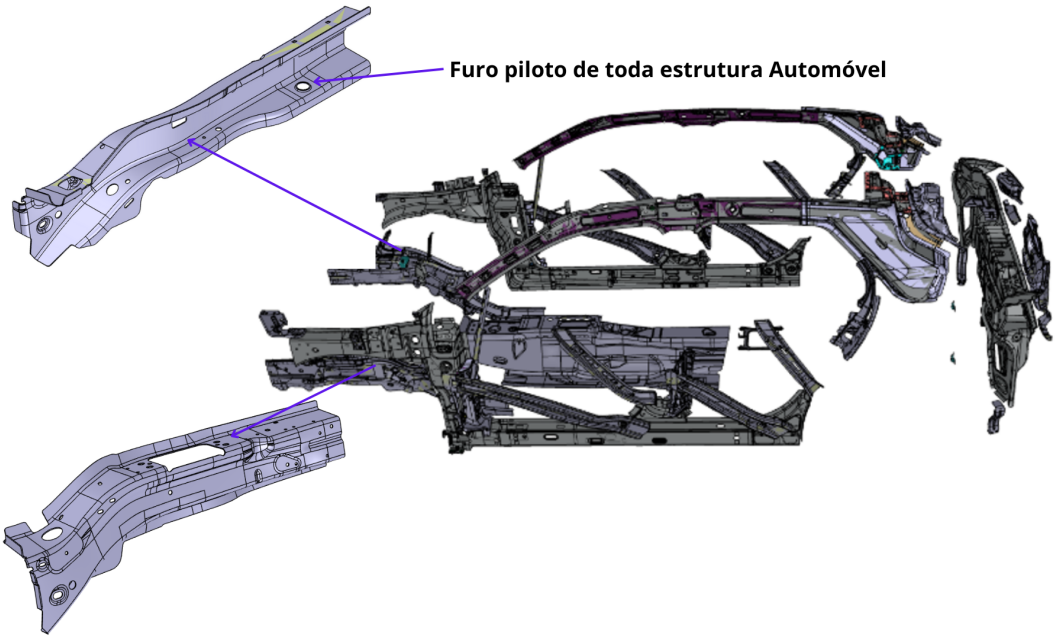
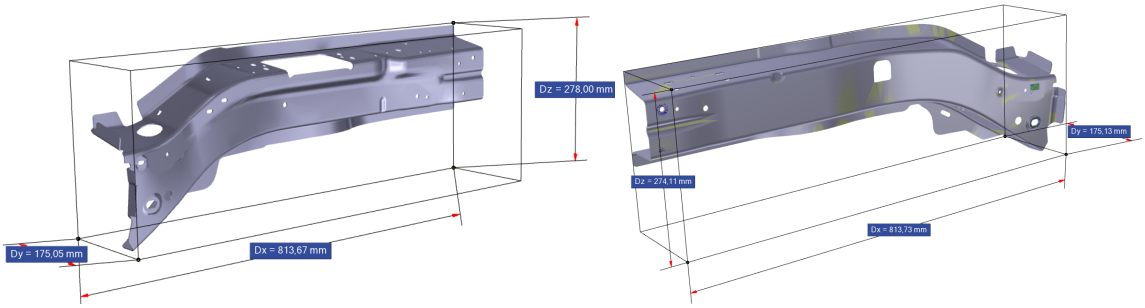


Figura 6.2: Localização das longarinas no chassis do automóvel.

A maioria dos veículos tem duas longarinas: esquerda e direita. Cada uma delas pode ser dividida em dianteira, média e traseira. A maioria dos componentes é feita em chapa de aço [5].

As longarinas estão divididas, em termos de construção, em dois tipos: sólidas e compostas. As primeiras são peças sólidas, enquanto que as segundas consistem em alguns elementos. A vantagem das longarinas compostas reside no facto de, em caso de defeito, poder ser possível substituir apenas o elemento afetado. Por seu lado, as longarinas sólidas (caso em estudo) são incapazes de suportar cargas muito elevadas [5].



(a) Longarina Esquerda

(b) Longarina Direita

Figura 6.3: Dimensões das Longarinas.

Uma vez que as longarinas são peças principais em termos de suporte de cargas na construção do carro, deve-se ponderar cuidadosamente a escolha do material para estes componentes. A elevada resistência ao desgaste são características principais das longarinas, como afirma [5].

Durante a escolha da geometria ideal para o componente, deve deixar guiar-se pela localização da montagem no chassi: a parte dianteira ou traseira, a esquerda ou a direita.

Mas, os componentes variam em termos de formato e dimensão, segundo o modelo do carro para o qual foram criadas [5].

Os componentes são estampados com uma liga de aço de alta resistência (DP 800) de (2 mm) de espessura, na Figura 6.3, observa-se que ambas possuem uma longitude de aproximadamente (800 mm), que representa mais de 50% da longitude da parte dianteira da viatura, pelo material, e o seu desenho as longarinas também desempenham um papel vital na absorção da energia elástica, ocasionados por colisões ou impacto frontal em superfícies rígidas, permitindo que a energia seja dissipada pela elasticidade do material, mantendo a integridade dos passageiros.

6.2 Simulação do Processo de Estampagem

A simulação foi efetuada no software AutoForm versão R11, o software proporciona dados valiosos aos engenheiros de projetos, os dados podem ser melhorados segundo os resultados obtidos, (ou seja, a abordagem da simulação pode ser alterada em função dos resultados obtidos), por outras palavras a simulação é uma etapa de análise da viabilidade do processo de produção, visto que os resultados podem levar à alteração da geometria, ou elaboração de um plano de produção alternativo que possa atender aos requisitos da geometria, o que pode levar o aumento do custo de produção. Desta forma a simulação representa uma fase de elevada importância na análise de projeto para produção dos componentes, principalmente em peças com geometrias complexas, como o caso das duas longarinas.

Os dados CAD 3D e a especificação do tipo de material constituem os dados mínimos necessários para o estudo inicial. O modelo do material requer uma curva de encruamento e um modelo de curva delimite de conformação. Os dados CAD devem ser os dados mais recentes do projeto , totalmente confrontados e completos. Outros dados opcionais, mas de valor acrescentado, podem incluir a orientação de fabrico desejada, as condições de fronteira (restrição da folha e fricção) e adenda (geometria da disposição das ferramentas) [8].

6.2.1 Modelo do Material

Atualmente, os tipos de aço de ultra-alta resistência (UHSS) e ligas de alumínio de elevada resistência são utilizadas para fabricar peças BIW. A conformação (dobra ou embutidura) destes materiais à temperatura ambiente é uma tarefa desafiadora. Para obter resultados exatos da análise FEM, é essencial um modelo de material adequado. Esta secção aborda as propriedades dos materiais e os modelos de materiais para uma simulação de conformação de chapa metálica no AutoForm, neste caso em específico abordaremos o modelo para o Aço DP 800 (ver Figura 6.4), utilizada para a produção das longarinas.

Os critérios mais importantes para uma modelação adequada do material são coeficiente de encruamento, limite de elasticidade e rotura do material [42].

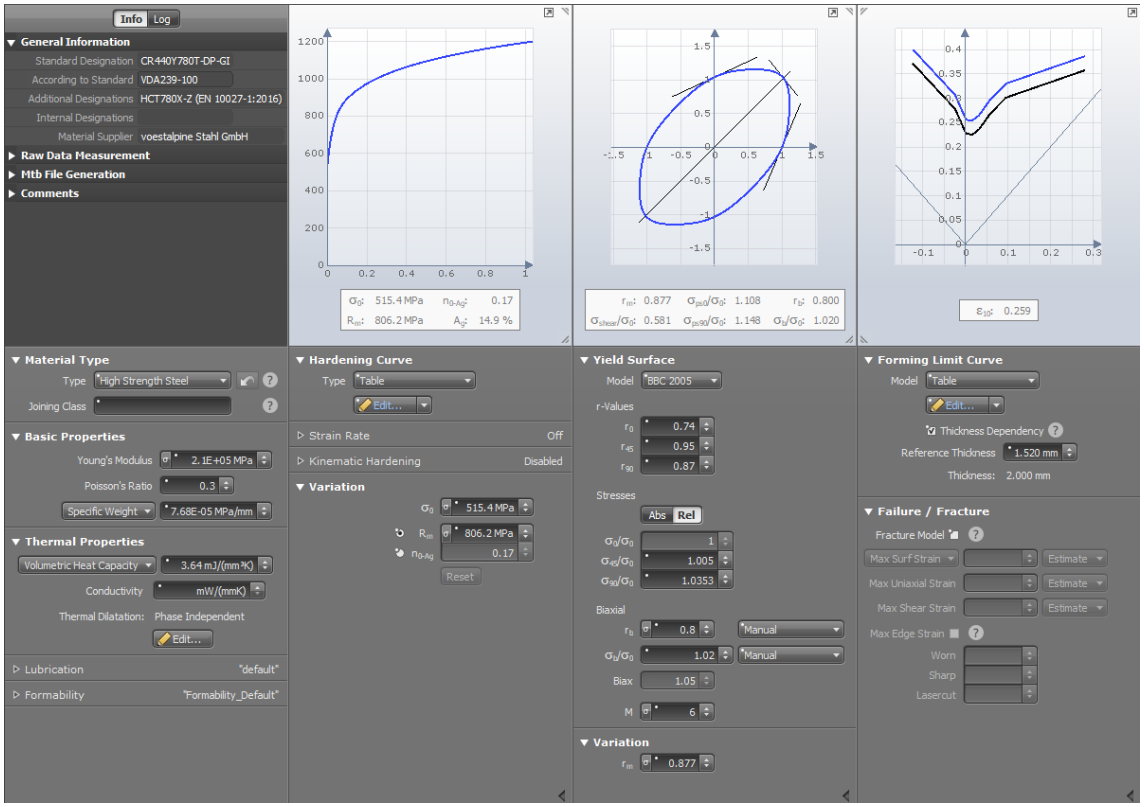


Figura 6.4: Modelo do material DP800 utilizado na simulação.

Na simulação de chapas metálicas, interessam dois aspetos da modelação. O primeiro caracteriza o comportamento do fluxo da chapa e o segundo prevê o limite de conformação em condições definidas [13]. O limite de elasticidade é utilizado para descrever o comportamento plástico das chapas metálicas com uma anisotropia plástica normal. Em [49] explica as influências da forma da superfície de cedência e do parâmetro de anisotropia plástica na força do punção, a distribuição da deformação e a localização do estiramento por punção. O segundo modelo define o limite superior da conformação (estrangulamento local ou fissuração) na chapa deformada. A Curva de Limite de Embutidura (FLC) é uma curva que representa o limite superior da zona de segurança, que é obtida através da deformação de chapas até ao estrangulamento local em diferentes condições de deformação, como compressão uniaxial, cisalhamento puro, tensão uniaxial, deformação plana e tensão equi-biaxial.

6.2.1.1 Superfície de Cedência

A superfície de cedência é descrita de uma forma geral utilizando o critério de cedência BBC 2005 [8]. O critério de cedência BBC 2005 pode ser reduzido as formulações mais simples (Hill 1948, Barlat 1989, etc.) através da imposição de igualdades entre alguns

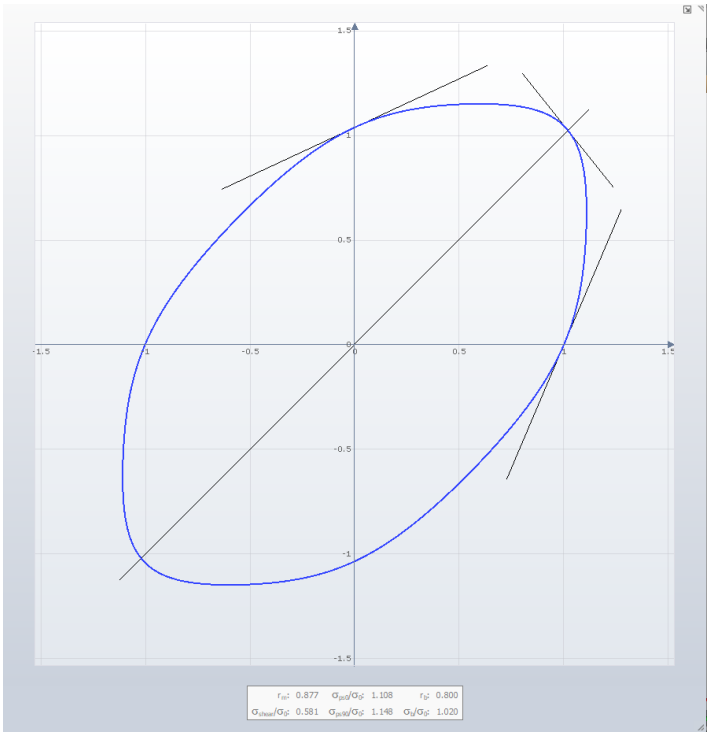


Figura 6.5: Superfície de Cedência.

dos seus coeficientes. Deste modo, o critério geral de cedência pode também ser utilizado nas situações em que apenas estão disponíveis 2, 4, 5, 6 ou 7 constantes mecânicas. Os desempenhos do critério de cedência da BBC 2005 para diferentes estratégias de identificação foram avaliados e apresentados em [79, 1]. A Figura 6.4 mostra a interface gráfica do utilizador deste módulo. Aqui é o local onde o utilizador pode escolher a estratégia de identificação, especificando o número de parâmetros mecânicos disponíveis para entrada. As caixas de entrada podem ser preenchidas a partir do teclado, mas o programa também oferece a possibilidade de importar dados de um ficheiro ASCII. O módulo efetua a identificação, apresenta os valores dos coeficientes e armazena-os num ficheiro ASCII de saída ASCII. Opcionalmente, os valores dos coeficientes podem ser passados para o módulo de cálculo FLC.

6.2.1.2 Curva de Ensaio Tração-Deformação

A tensão de fluxo inicial e o encruamento por deformação são críticos para o comportamento da ductilidade e da resistência. O expoente de encruamento por deformação n na lei de Ludwik descreve a capacidade de envolver o material circundante no processo de deformação e de evitar a deformação local. Um valor n mais elevado induz uma ductilidade melhorada e uma melhor capacidade de estiramento de uma chapa metálica. Os materiais macios apresentam normalmente um valor n elevado, enquanto os materiais de elevada resistência têm um valor baixo. Para a abordagem FEM, Brushi [13] divide o encruamento por deformação em (a) encruamento isotrópico, (b) encruamento cinemático,

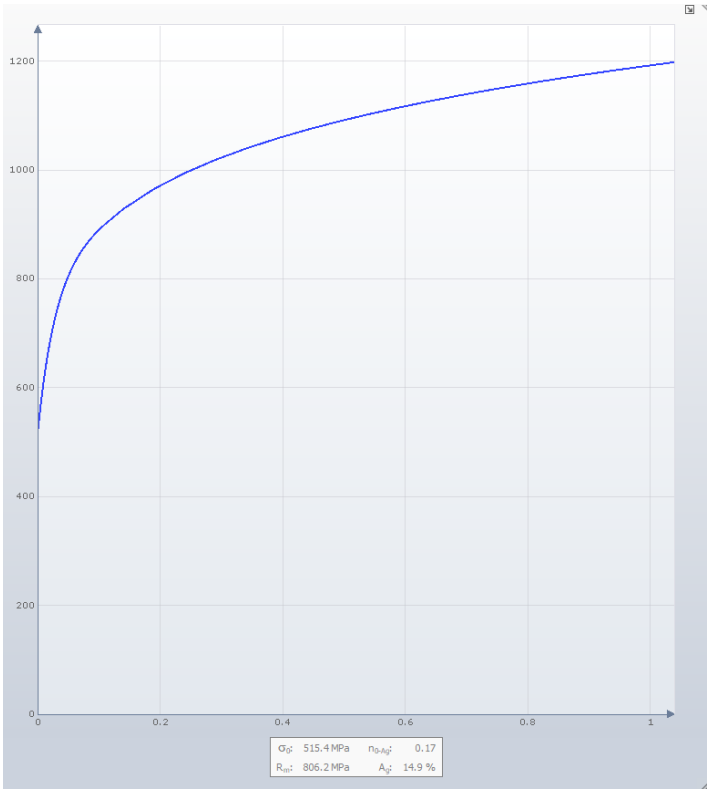


Figura 6.6: Curva de encruamento.

(c) encruamento rotacional e (d) encruamento distorcional.

6.2.1.3 Curva Limite de Embutidura

A curva de limite de embutidura (FLC), (ver Figura 6.7) é amplamente utilizado em aplicações de chapas metálicas para a previsão de falhas. A curva representa os valores máximos das deformações principais ε_1 e ε_2 determinados pela medição das deformações na rotura do material. Os diferentes métodos para determinar a curva de limite de deformação foram propostos pelo ensaio de Nakajima, ensaio de expansão biaxial, teste de Marciniak, entre outros [38]. No LUT, um sistema Zwick BUP 200 é utilizado para medir FLCs em combinação com um dispositivo ótico, um sistema GOM Aramis, para medir o campo de deformação na amostra de teste e para determinar as deformações no início do estrangulamento [42].

Na Figura 6.4, além da opção selecionada (table) tem ainda disponível quatro opções diferentes para gerar o FLC no AutoForm. O modelo Keeler é utilizado para aços de baixo carbono. O modelo FLC Arcelor V9 é utilizado para aços com uma resistência à tração que varia entre 260 e 1500MPa e espessuras de chapa variando de 0,5 a 3,5 mm. Para o modelo modelo Keeler, a entrada tem de ser definida a partir dos dados de tração na direção 90°. O modelo Arcelor V9 Alu utilizado para o alumínio com uma espessura de chapa que varia entre 0,5 a 3,5 mm. O modelo FLC da Tata Steel é aplicável a aços com resistência à tração entre 260 e 1500MPa e espessuras de chapa entre 0,2 e 3,0 mm [42],

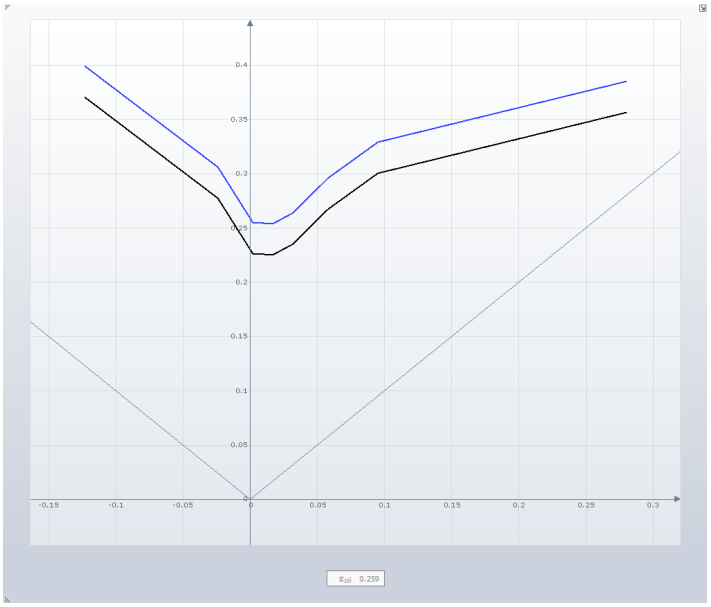


Figura 6.7: Curva Limite de Embutidura.

Tabela 6.1: Variáveis de entrada necessárias para definir os modelos de critérios de cedência [15].

Test	Uniaxial Tensile Test												Biaxial		Shear			Plane Strain				
Value	σ_0	σ_{45}	σ_{90}	r_0	r_{45}	r_{90}	$A_{g,0}$	$A_{g,45}$	$A_{g,90}$	$R_{m,0}$	$R_{m,45}$	$R_{m,90}$	σ_b	r_b	τ_0	τ_{45}	τ_{90}	$\sigma_{ps,0}$	$\sigma_{ps,45}$	$\sigma_{ps,90}$	Biax	M
Vegter 2017				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓										
Vegter Standard	✓	✓	✓	✓	✓	✓							✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
BBC 2005 (8)	✓	✓	✓	✓	✓	✓							✓	✓								✓
BBC 2005 (7)	✓	✓	✓	✓	✓	✓							✓	+								✓
BBC 2005 (6)	✓	✓	✓	✓	✓	✓							+	+								✓
Barlat 1989	✓			✓	✓	✓																✓
Hill 1990	✓			✓	✓	✓															✓	
Hill 1948	✓			✓	✓	✓															= 1	

e a tabela 6.1 ilustra outros modelos para geração do FLC. Se utilizou a opção (table), porque os dados experimentais de FLC, para o material DP 800 (CR440Y780T-DP-GI) foram importados de um ficheiro com duas colunas que representam a deformação menor e a deformação maior, na biblioteca de materiais do AutoForm.

6.2.1.4 Anisotropia

Quando se fala sobre a anisotropia de uma chapa metálica, se aborda essencialmente como as suas propriedades podem variar em diferentes direções. A anisotropia (valor r ou valor Lankford) é uma propriedade importante para a estampagem de chapas e desempenha um papel fundamental na formabilidade das chapas. A anisotropia é a variação das propriedades do material em relação à direção devido à variação da microestrutura. No processo de laminagem, os grãos são alongados na direção da laminagem, pelo que ocorre uma variação microestrutural [8]. Os valores de r são calculados a partir do ensaio

de tração uniaxial medindo a deformação no comprimento e na direção transversal, como mostra Figura 6.8.

$$r = \frac{\ln w_f / \ln w_i}{\ln t_f / \ln t_i} \tag{6.1}$$

r - Anisotropia Normal

w - Largura da Chapa

t - Espessura da chapa

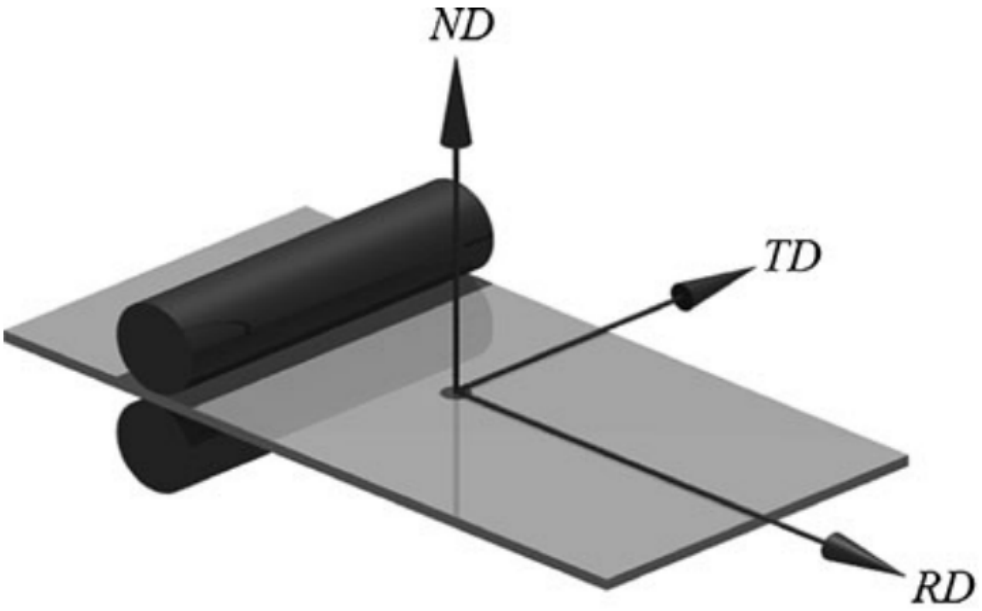


Figura 6.8: Eixos de ortotropia das chapas laminadas: ND-Direção Normal; TD-Direção Transversal; LD-Direção Longitudinal [8].

Se, *r = 1*, significa que ambas as deformações são iguais, o que se designa por encruamento isotrópico. Geralmente, para as ligas de alumínio, os valores de r são inferiores à unidade, enquanto os valores de r para as chapas de aço superiores a 2 não são invulgares. Hipoteticamente, quando $r \longrightarrow \infty$, então, a deformação de espessura é zero, o que significa que não haverá afinamento durante a deformação por tração, é por isso que altos valores de r são preferidos em chapas de metal [8].

Em operações de conformação biaxial, como a estampagem profunda (embutidura) numa cavidade circular, uma anisotropia não uniforme pode resultar no fenómeno de "earing". O bordo superior é refletido de forma ondulada. A anisotropia também pode influenciar fortemente o limite de conformação. As tensões residuais após a conformação e o retorno elástico dependem intensamente da anisotropia do material, por exemplo a deformação plástica é distribuída microscopicamente nos grãos vizinhos de uma forma não uniforme [22].

6.2.2 Modelo Constitutivo do Material Discretizado

O modelo de discretização de um componente em FEM, descreve dois aspetos fundamentais, a medida que dicretização torna os elementos mais pequenos, ou seja, uma malha mais refinada os resultados tendem a ser mais precisos, no obstante a este fator o poder computacional para o processamento destes dados tende a ser maior, por tanto é importante que modelo de discretização atenda alguns requisitos que tornam resultados mais precisos e custo computacional mais reduzidos, o AutoForm apresenta uma alternativa para esta relação que possibilita obter resultados precisos com um poder computacional relativamente moderado.

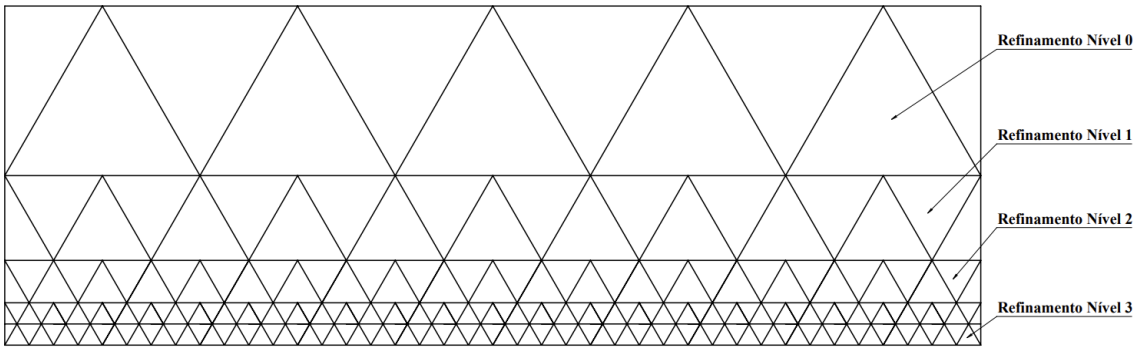


Figura 6.9: Níveis de refinamento de malha no AutoForm.

A Figura 6.9 apresenta o modelo de discretização usado na simulação das longarinas, como mostra a Figura 6.11, este é um modelo que ajusta os elementos de forma triangular, a medida que a zona da peça é mais critica a malha tende a ser mais refinada (ajuste

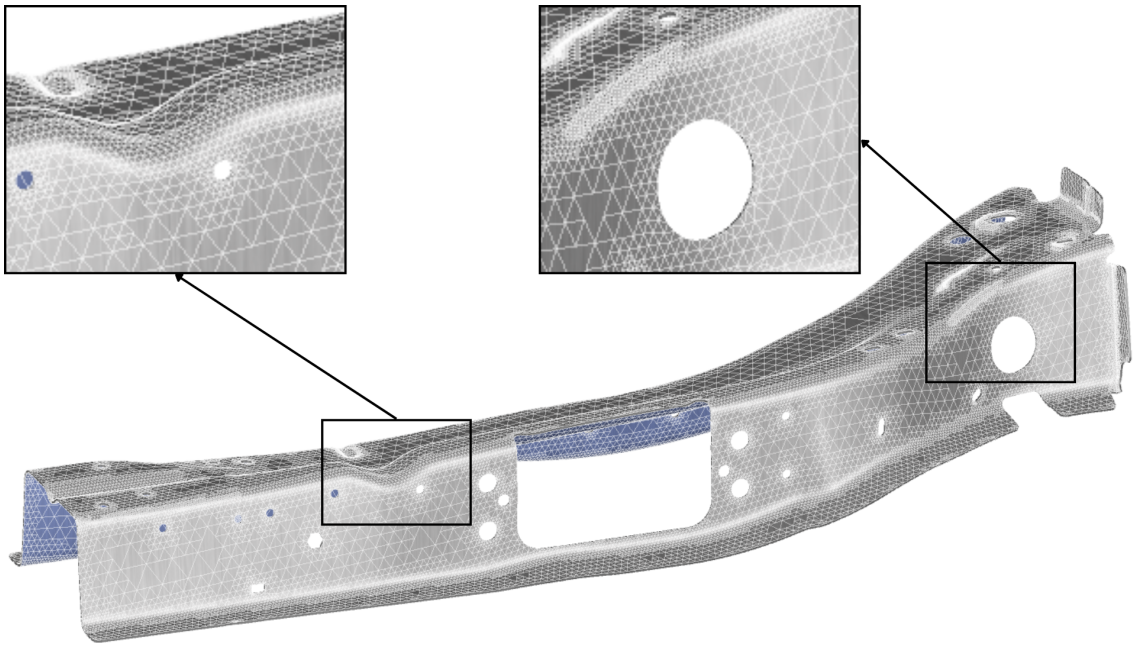


Figura 6.10: Discretização da Longarina esquerda.

adaptativo) para proporcionar valores mais precisos, em zonas critica ou zonas onde as

deformações tendem a ser maior, com isso em zonas que a chapa não sofre deformações consideráveis, regiões que visivelmente pode-se perceber que não terão impactos significativos nos resultados, o nível de malha tende ser menor (nível 0) ou elementos maiores para reduzir o custo computacional.

Utilizando este método, é possível obter uma descrição suficientemente precisa mesmo dos problemas de grandes dimensões a um nível aceitável de custo computacional e com uma quantidade aceitável de espaço de armazenamento [47].

As grandes deformações são um aspeto integrante dos processos de estampagem. Este facto provoca uma contínua das necessidades da malha de cálculo ao longo da simulação (ver Figura 6.11), à medida que as zonas que requerem elementos mais finos são deslocadas. Este problema pode ser resolvido através da criação consistente de elementos suficientemente finos em toda a chapa. No entanto, as geometrias complexas exigiriam milhões de elementos, o que quebraria os critérios fundamentais procurados num software de simulação de estampagem: simplicidade, precisão e eficiência computacional. A alternativa é modificação adaptativa da malha durante o cálculo [47, 15].

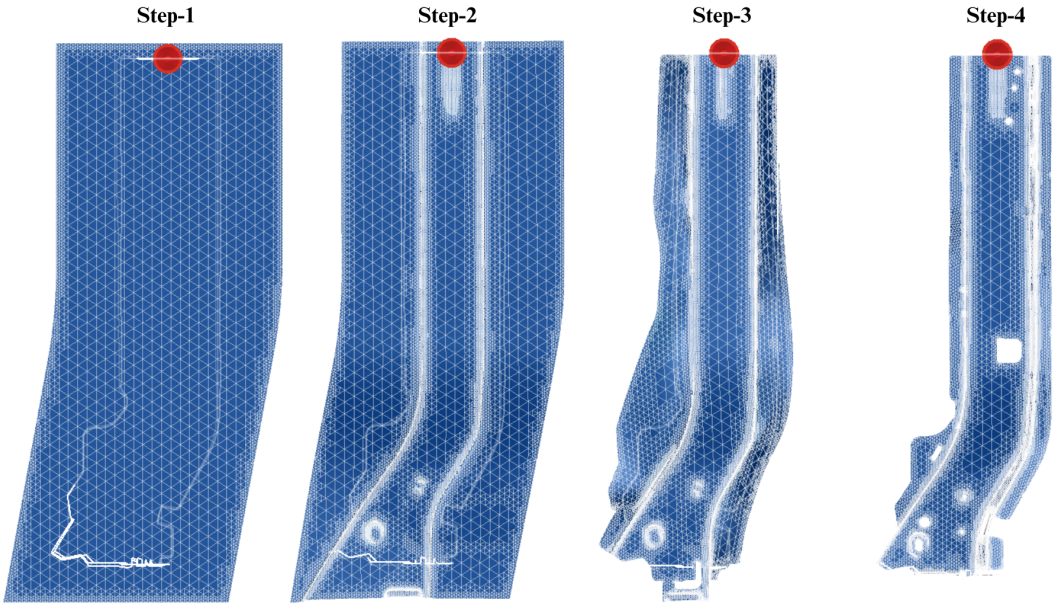


Figura 6.11: Ajuste de malha ao longo da simulação.

Durante o cálculo, estes elementos fundamentais são subdivididos recursivamente com base em critérios específicos. Assim, é perfeitamente possível construir vários milhares de elementos a partir de um único elemento. Se os elementos menores já não forem necessários numa determinada área, são automaticamente fundidos em elementos maiores. Ao contrário do que acontece com os problemas lineares, os critérios de refinamento não consistem nos chamados estimadores de erro. Num problema de conformação geometricamente muito não linear, é é crucial que as formas complicadas das ferramentas possam ser representadas com precisão. O AutoForm usa os seguintes critérios por este motivo [15]:

- Curvatura; em locais fortemente curvos, elementos mais finos são essenciais para representar a geometria corretamente.

- Contacto; se pequenas secções das ferramentas penetram em elementos grandes, então estes são refinados para que a secção na chapa seja corretamente representada.

- Gradientes de deformação; isto corresponde ao estimador de erro do problema linear. Para gradientes maiores, são necessários elementos mais finos para manter o erro discreto do método dos elementos finitos.

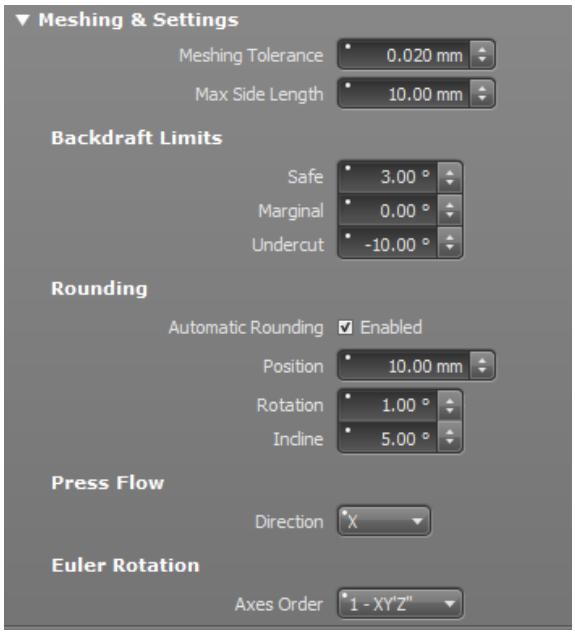


Figura 6.12: Configurações de malha padrão do AutoForm.

6.2.3 Time Step

Diferentemente do conceito utilizado no software de elementos finitos explícito dinâmico [82], o time step no código de elementos finitos implícito estático, AutoForm, denota o intervalo de tempo para atualizar a informação de deformação e tensão dos elementos, ou os deslocamentos da ferramenta. O time step pode influenciar a descrição do historial de deformações e tensões (por exemplo, historial de dobragem/dobragem inversa) e o tratamento do atrito, etc. Não há dúvida de que um time step mais pequeno permite obter resultados de simulação mais exatos, mas o consumo de tempo também aumentará. A Figura 6.13 mostra como variam os resultados da simulação utilizando vários time step. O time step mais pequeno resultará num retorno elástico mais estável. Quando o time step é inferior a 2,5 s (com base numa velocidade da ferramenta de 1 mm/s) ou um máximo de 2,5 mm por incremento, a magnitude do retorno elástico simulado começa a concentrar-se numa banda estreita e não são introduzidas mais melhorias [8]. Para seguir o historial da flexão/inversão e o tratamento do atrito, sugere-se um time step compreendido entre os valores de (0,5 a 2,5 s ou 0,1 a 2,5 mm) por incremento.

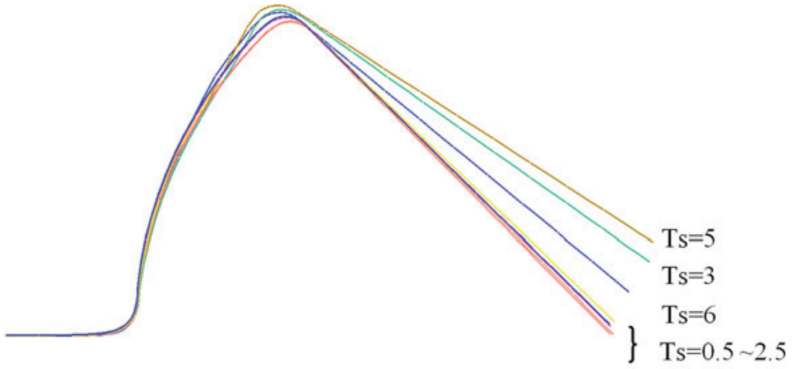


Figura 6.13: O springback calculado, varia com o time step [8].

6.2.4 Plano de Produção AutoForm

A simulação do processo produtivo representa uma grande importância na tomada de decisões, visto que desta se obtém dados que auxiliam os engenheiros de projetos em desenhar o melhor processo possível para fabricação do componente em termos de custos e tempo de produção.

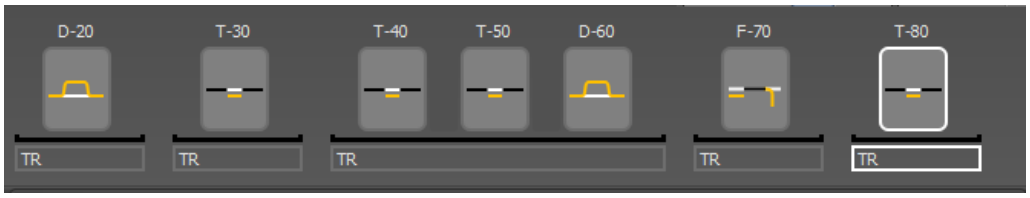


Figura 6.14: Plano de produção definido no Autoform.

Na Figura 6.14, é possível observar o modelo de produção AutoForm definido para a longarina esquerda. Este processo é definido pelo utilizador Autoform, segundo as operações requeridas no componente, para este componente podemos resumir em três operações principais, como a conformação que se realizou na operação D-20, corte e furações, realizadas na operação T-30. O Autoform utiliza vários comandos para os processos de conformação de chapas metálica, entre elas podemos destacar os mais utilizados (os três usados na simulação):

- *Singel Action Draw:* Este comando foi aplicado nas operações D-20 e D-60, como mostra a Figura 6.14, O singel action draw ou etapa de conformação simples é um comando usado para processos em que a conformação de chapas se realiza numa única etapa, o que pode ser necessário quando apenas uma operação seja executa num determinado momento do processo produtivo, é normalmente aplicado em peças com geometria simples ou várias vezes em geometrias complexas, geralmente está entre as primeiras operações do processo produtivo, em caso de peças com geometria que requerem conformações múltiplas, este comando pode ser aplicado múltiplas vezes ou se utiliza o comando Double Action Draw, para duplas conformações numa mesma etapa.

- *Trim:* Utilizada nas operações, T-30, 40, 50 e 80 (ver Figura 6.14), este comando é o mais utilizado em simulações de processo de estampagem no AutoForm. Esta sempre presente nas operações de estampagem, normalmente é muito comum em últimas operações. Representa o corte seja de extremidade da peça ou furações em toda a estrutura da peça. A utilização do comando Trim possibilita ao utilizador do AutoForm gerar corretamente a geometria da ferramenta de corte, como também permite reduzir o desperdício do material, aumentando a eficiência do processo produtivo.

- *Form Trim:* O form Trim é a operação F-70 (ver Figura 6.14), no AutoForm este comando é utilizado em operações de corte e conformação (dobra de chapa) em etapa única, geralmente ocorre após a conformação inicial (Singel Action Draw), em geral, este comando é associado ao processo de dobra de superfície após o corte, para remover o excesso de material ao redor dos contornos da peça para garantir uma geometria final com precisão requerida. A utilização deste comando permite ao utilizador do software definir parâmetros como a geometria da ferramenta de corte, bem como a melhor trajetória para efetuar o corte de superfícies a serem removidas, isso permite identificar possíveis problemas no processo, como o caso de distorções, rugas, ou material em excesso, desta forma o design da ferramenta é otimizado de forma a garantir uma excelente qualidade da peça terminada.

6.2.5 Ferramentas de Estampagem AutoForm

O AutoForm é um software com um algoritmo avançado que permite criar ferramentas de estampagem baseado na geometria que se deseja estampar, ao importar um ficheiro CAD 3D, é possível obter a sua matriz e punção como mostra a Figura 6.15, bem como o contorno de corte da peça, furações e cortes de superfícies (ver Figura 6.18), estas operações são possíveis através do módulo *"DieDesigner* ou *Face Die*".

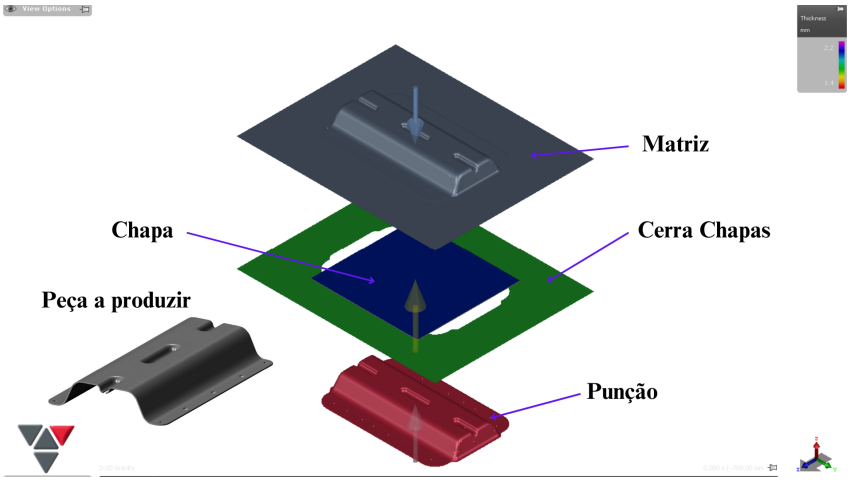


Figura 6.15: Ferramentas de estampagem gerada no AutoForm.

O AutoForm-DieDesigner possui uma estrutura clara e lógica que permite aos utilizadores trabalharem passo a passo, desde a importação da geometria da peça em CAD até o desenho completo da matriz. Este software nos proporciona uma visão global, permitindo a validação do cenário de processo e também do comportamento da chapa pelas várias operações [6].

O AutoForm-DieDesigner é baseado num modelo totalmente associado com o desenho da matriz, que nos permite modificar facilmente a geometria da peça e as operações intermediárias. Uma vez determinado o desenho ideal da matriz, as superfícies podem ser exportadas e processadas posteriormente em qualquer sistema CAD [6].

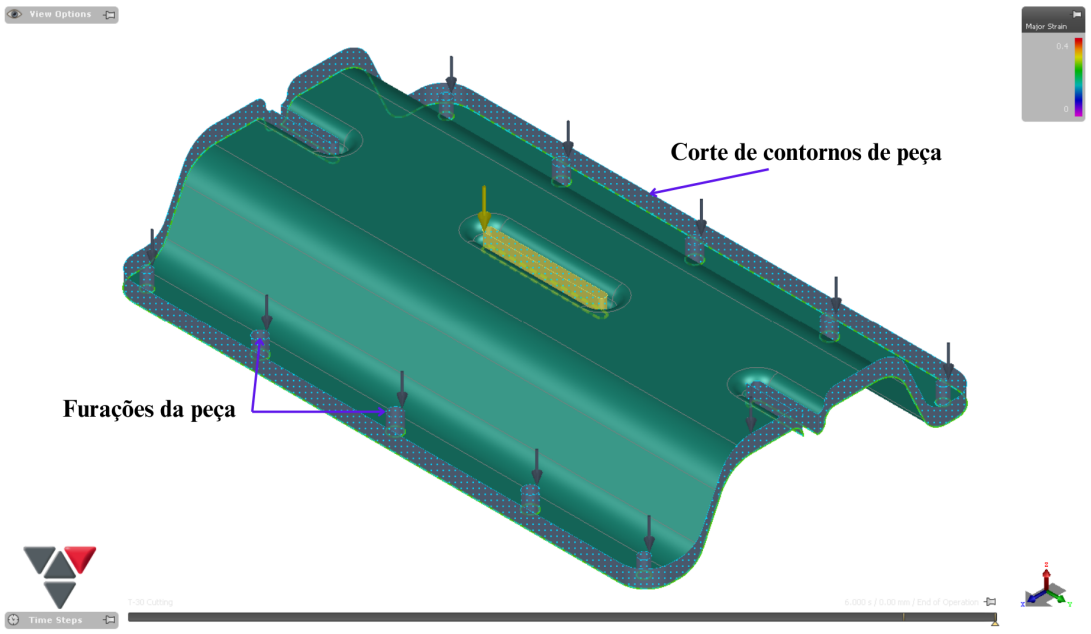


Figura 6.16: Ferramenta de corte gerado no AutoForm.

Importa destacar que a geometria da ferramenta pode ser criada de forma automática pelo software, com parâmetros de extensão da ferramenta que o utilizador pode ajustar segundo as necessidades do processo produtivo.

Além da criação da ferramenta internamente pela interface gráfica do software, o AutoForm tem ainda a possibilidade de importar a geometria das ferramentas em ficheiros CAD-3D de outros softwares, bem como exportar para outros softwares, no caso das ferramentas das longarinas que face a sua geometria complexa como dobras complexas e superfícies muito irregulares, se gerou a geometria da ferramenta no AutoForm, posteriormente exportada em outros softwares CAD como o caso do (SolidWorks, CATIA, entre outros), posteriormente retificadas e efetua-se o input para o AutoForm, deste modo a geometria das ferramentas são importadas novamente com geometria da peça no AutoForm e a simulação é efetuada, de forma a se obterem os resultados mais precisos possíveis.

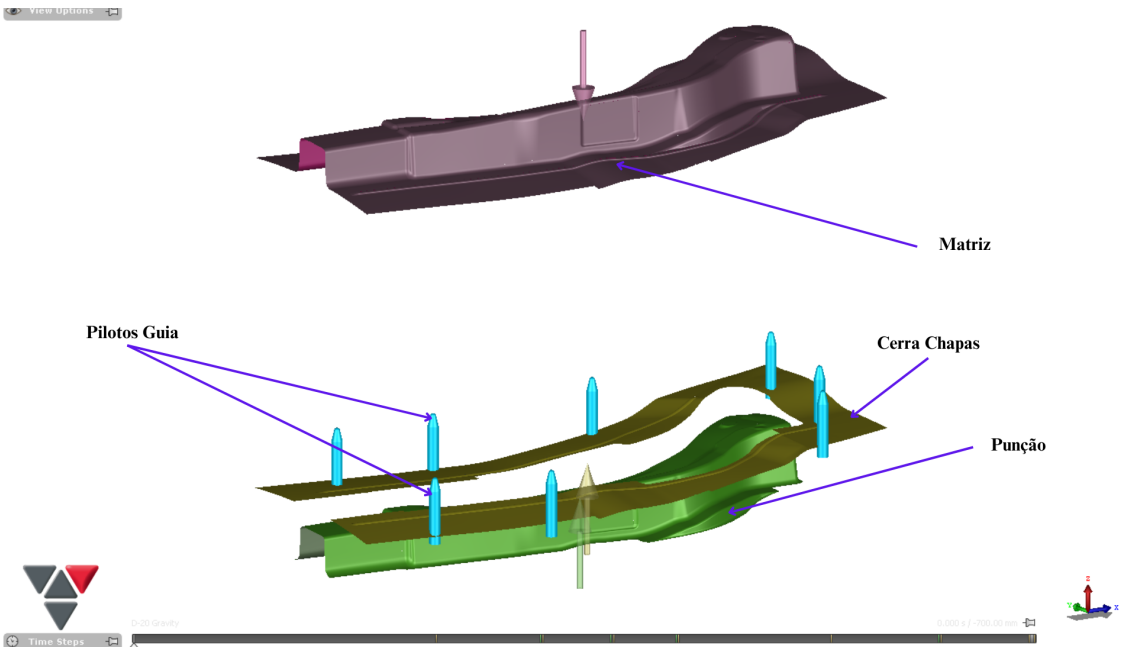


Figura 6.17: Ferramenta para Longarina esquerda.

6.2.6 AutoForm Resultados

A obtenção dos resultados e a sua posterior análise no AutoForm, é uma fase crucial para a validação do projeto, nesta fase é importante fazer uma análise cuidadosa, para que o projeto possa avançar sem contratempos.

O desafio não consiste apenas em identificar a existência de problemas de conformação, mas, o mais importante ainda, em identificar as restrições que constituem a condição de estampagem provável. A condição na ferramenta de produção real será provavelmente algo entre as restrições "livres" e "bloqueadas". Os fabricantes de ferramentas e matrizes ajustam a matriz para garantir que a peça seja esticada o suficiente para evitar rugas, mas não tanto que a peça rasgue. Um sistema pode ser concebido para permitir que o engenheiro identifique um limiar mínimo de estiramento entre livre e bloqueado que deve ser atingido. Se surgirem problemas de fissuras, compressão e aumento de espessura, poder-se-á concluir que as ferramentas que serão posteriormente construídas para fabricar a peça induzirão provavelmente esse potencial de falha. A questão da viabilidade da conformação nunca é uma simples proposição de sim ou não, em vez disso deve ser proposta com muitas condições. O resultado deve ser apresentado no contexto dos pressupostos que conduziram ao resultado, ou seja, a peça é viável a um de alongamento de X% de desbaste na maioria da superfície da peça, a peça não é viável com o limiar mínimo de estiramento, a peça é viável se for produzida a partir de uma única operação de conformação, etc [8].

6.2.6.1 Variação de Espessura na chapa

Os resultados obtidos demonstraram que a longarina esquerda, fruto da complexidade geométrica e elevado numero de operações, sofrerá maiores variações na espessura da chapa, em comparação com longarina direita.

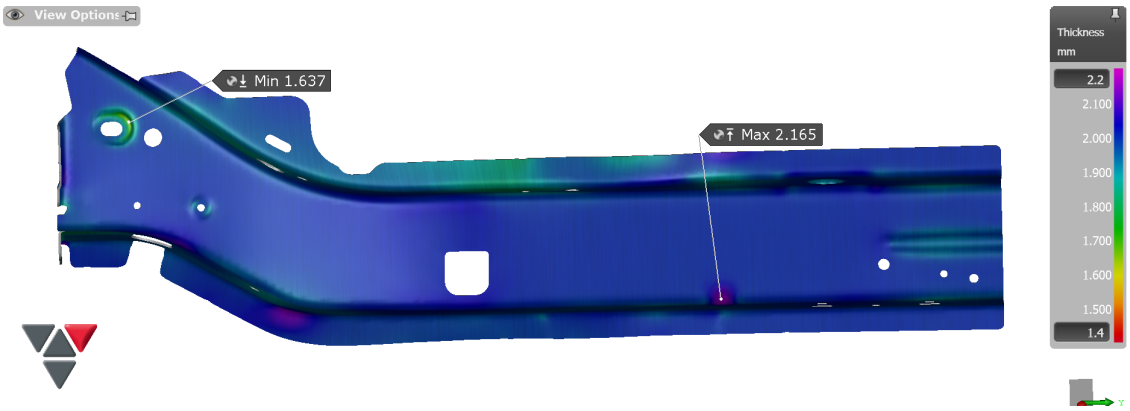


Figura 6.18: Variação da espessura na longarina direita.

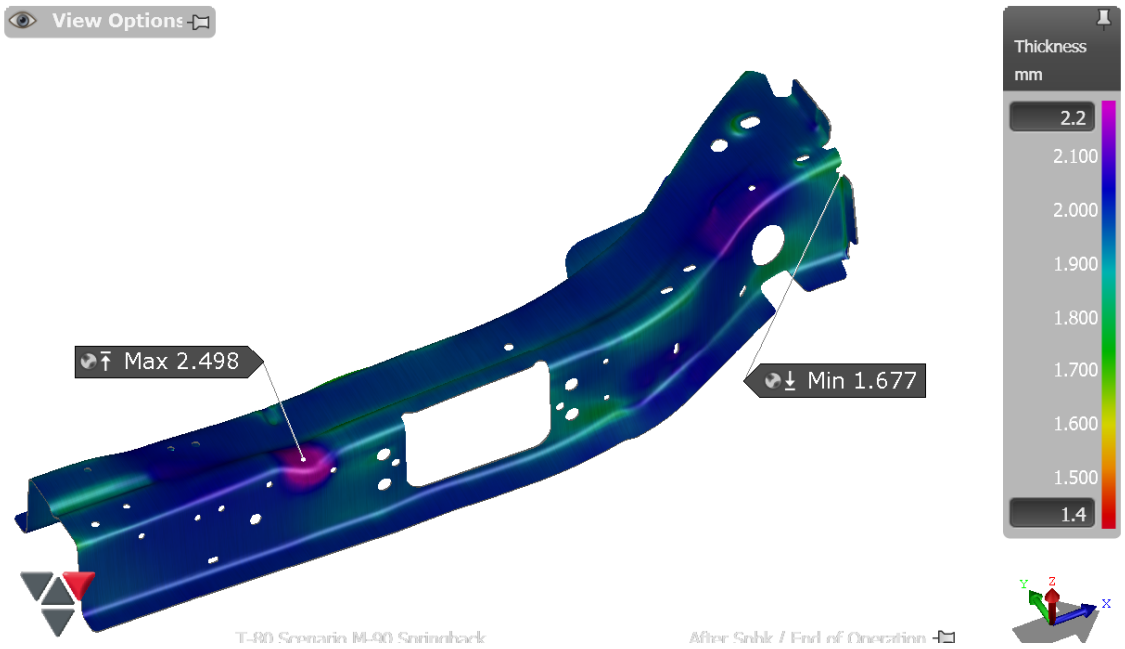


Figura 6.19: Variação da espessura na longarina esquerda.

Na Figura 6.18, observa-se a variação da espessura ao longo da Longarina direita, ao longo do processo. Esta variação é muito comum em processos de estampagem, normalmente em peças metálicas a variação da espessura é inevitável, pela natureza elástica do material. As variações podem incluir o aumento ou diminuição da espessura em determinadas zonas da peça. Figura 6.19 , observa-se as zonas da Longarina esquerda onde ocorreu um aumento da espessura (inicial do material 2 mm) e uma diminuição da mesma, verificando-se um aumento de espessura de até 2+0,49 mm, que representa uma variação na ordem dos 25% de incremento do material, ao passo que a variação mínima alcançou valores de até 2-0,33 mm, uma diminuição considerável do nível de espessura, mas que

não representa níveis de alarme, visto que níveis preocupantes ocorrem quando o aumento ou diminuição na espessura é superior a 30%.

6.2.6.2 Tensões

As tensões máximas obtidas (Major Stress no AutoForm), indicam o valor máximo de tensão que a chapa atinge durante o processo de conformação. Esses dados são essenciais

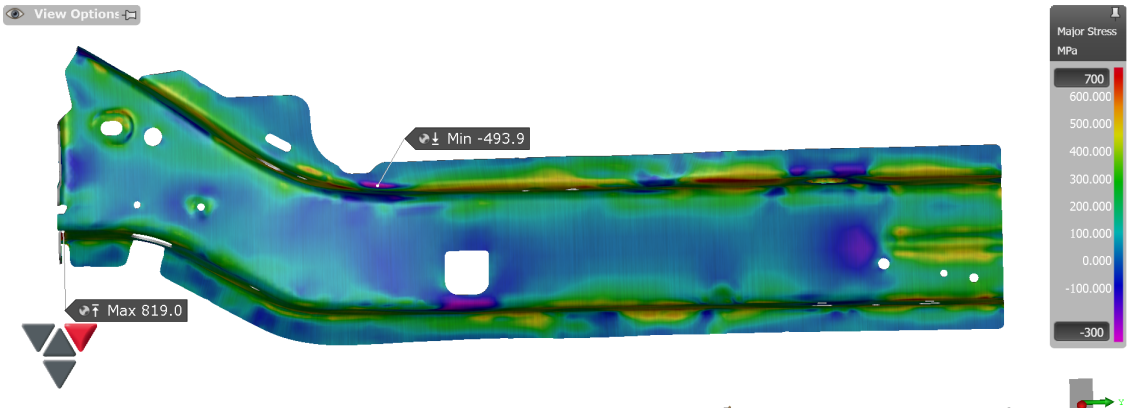


Figura 6.20: Variação das tensões na Longarina direita.

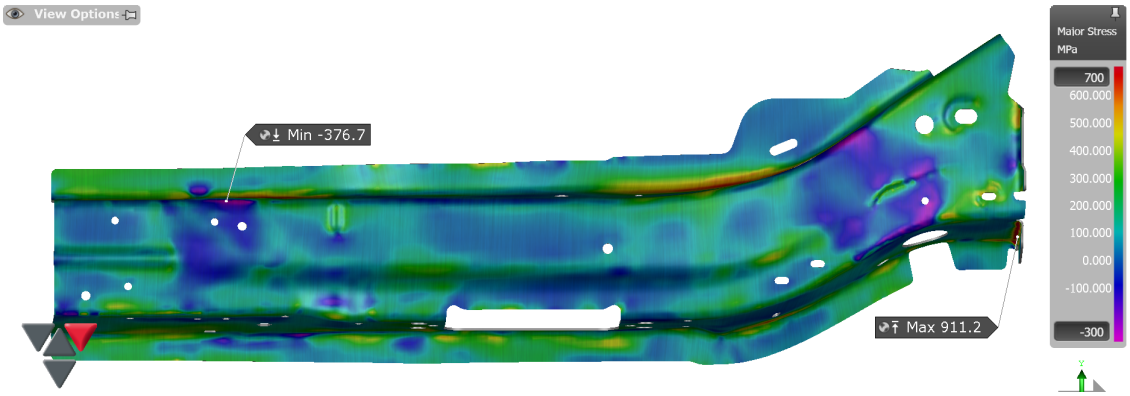


Figura 6.21: Variação das tensões na Longarina esquerda.

para determinar a segurança das peças metálicas e prever possíveis erros durante a produção. Em geral, essas tensões devem ser menores que a tensão de rutura do material, para evitar fissuras durante o processo de produção dos componentes.

6.2.6.3 Deformações

No AutoForm, os resultados de *Major Strain* , obtidos pela simulação das duas longarinas (ver as Figuras 6.22 e 6.23) representa a deformação máxima principal da chapa durante a simulação de conformação. Esta medida é essencial para avaliar a formabilidade do material e para identificar áreas que podem fraturar durante o processo de prensagem.

As Figuras 6.25a e 6.25b, mostram as curvas do diagrama de limite de conformação das longarinas, nas mesmas é possível observar, que estas têm grande parte da secção

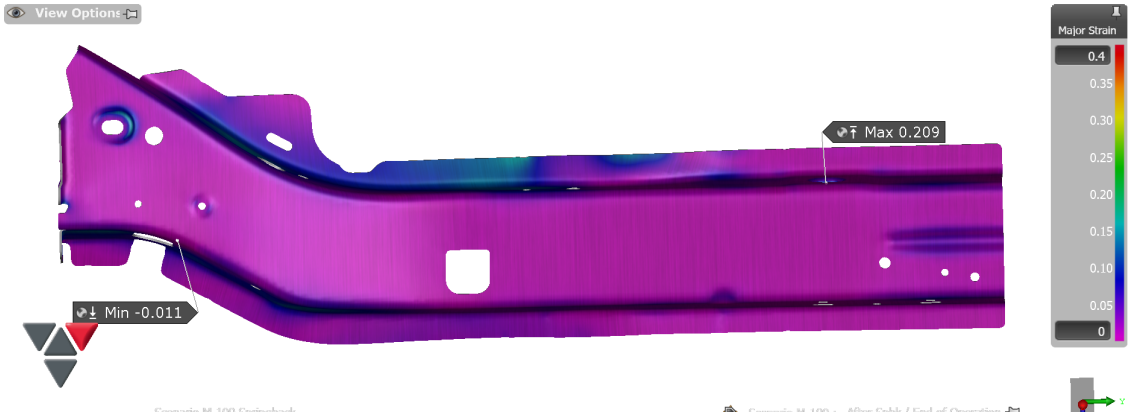


Figura 6.22: Deformações na Longarina direita.

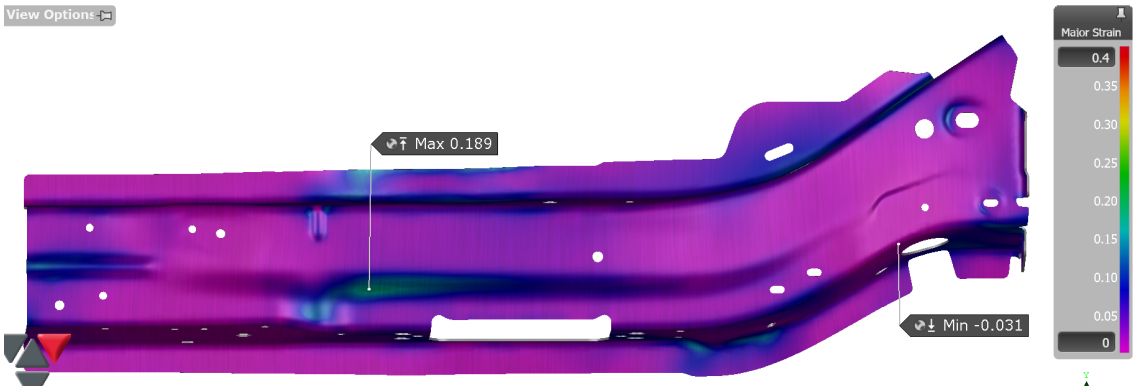


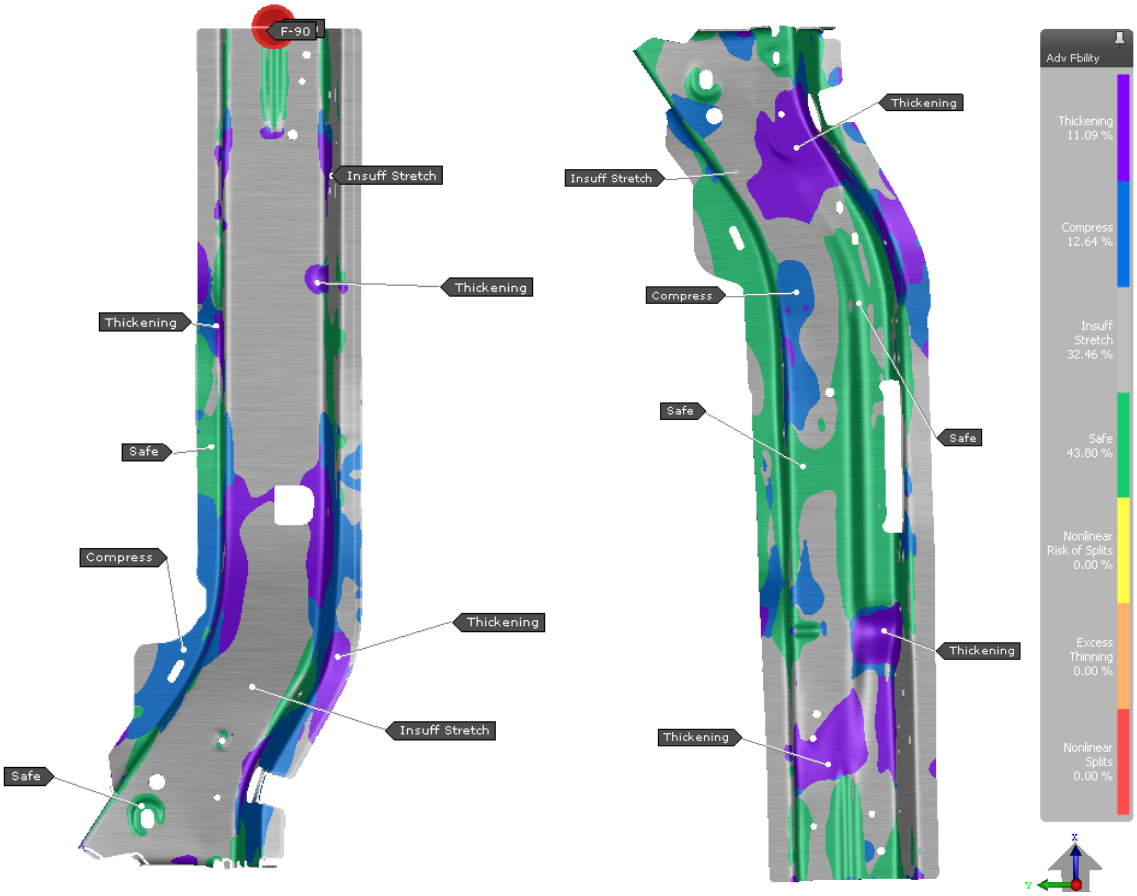
Figura 6.23: Deformações na Longarina esquerda.

em zona segura como mostra o gráfico (área verde abaixo da curva), este diagrama é de extrema importância em análises de falhas, no processo de conformação de chapas metálicas. Testes mecânicos são necessários para determinar se uma área específica está com defeito. O AutoForm proporciona estes dados mediante análises de dados de ensaio de materiais contido num ficheiro da biblioteca de materiais do software.

A área azul abaixo da curva do diagrama (FLC) representa o estado de tração onde a deformação principal muda de tração para compressão, e defeitos superficiais ou rugas podem ocorrer nesta região.

A zona representada, a cor de laranja, indica a diminuição de espessura de mais de 30%, não foi o caso das longarinas, pois não houve aumento de espessura superior os 25% e diminuição acima de 18%, nos resultados obtidos, o que indica que a chapa não exercerá elevadas pressões na superfície da ferramenta, este efeito normalmente pode causar enrugamento da superfície e estiramento por retenção da chapa na ferramenta.

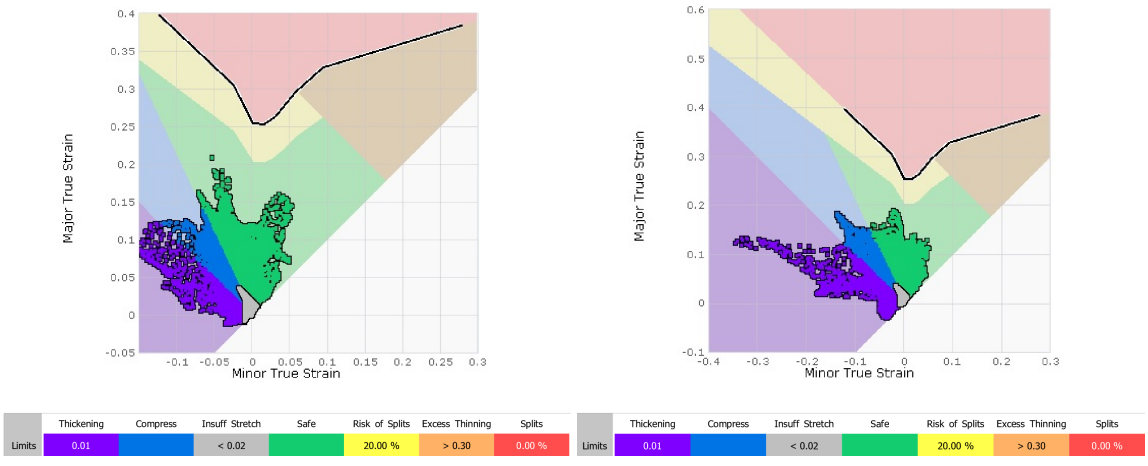
O estiramento é o outro fator apresentado no diagrama FLC. O aparecimento de rugas pode ocorrer por diferentes razões, incluindo a falta de estiramento da chapa metálica e forças de compressão muito elevadas sem aumentar a espessura da chapa, resultando em ondulações (rugas) na chapa. No diagrama FLC a área de estiramento está representado em violeta, bem como pode-se verificar estas zonas nas peças, na ilustração das Figuras



(a) Longarina Direita (b) Longarina Esquerda

Figura 6.24: Conformabilidade Avançada.

6.24a e 6.24b.



(a) Longarina Direita (b) Longarina Esquerda

Figura 6.25: Curva de limite de conformação das duas longarinas, obtidas no AutoForm.

6.2.6.4 SpringBack

O springback é um dos fatores não desejados em processo de conformação de chapas. Nas Figuras 6.26 e 6.27, observam-se estes defeitos nas duas longarinas, este problema é muito comum em processos de estampagem de componentes com elevada complexidade geométrica, e materiais de elevada resistência.

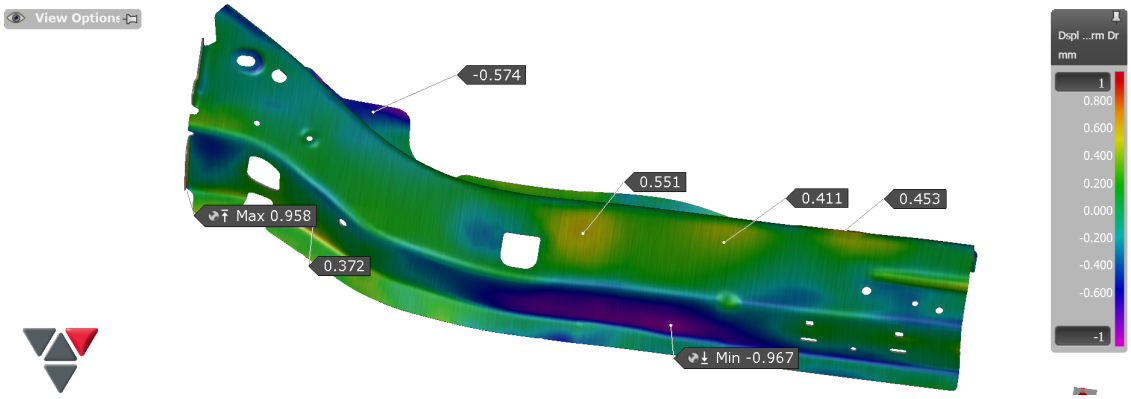


Figura 6.26: SpringBack na Longarina direita.

Os resultados obtidos demonstraram que a Longarina esquerda, é a que mais apresenta incidência de ocorrência de springback, este fator observa-se na prática quando a peça é removida da ferramenta este tende a deformar-se ligeiramente, perdendo a sua forma original, este efeito se verifica com maiores incidências em zonas, vermelha (sentido para fora) e violeta (sentido para dentro) das Figuras 6.27 e 6.26.

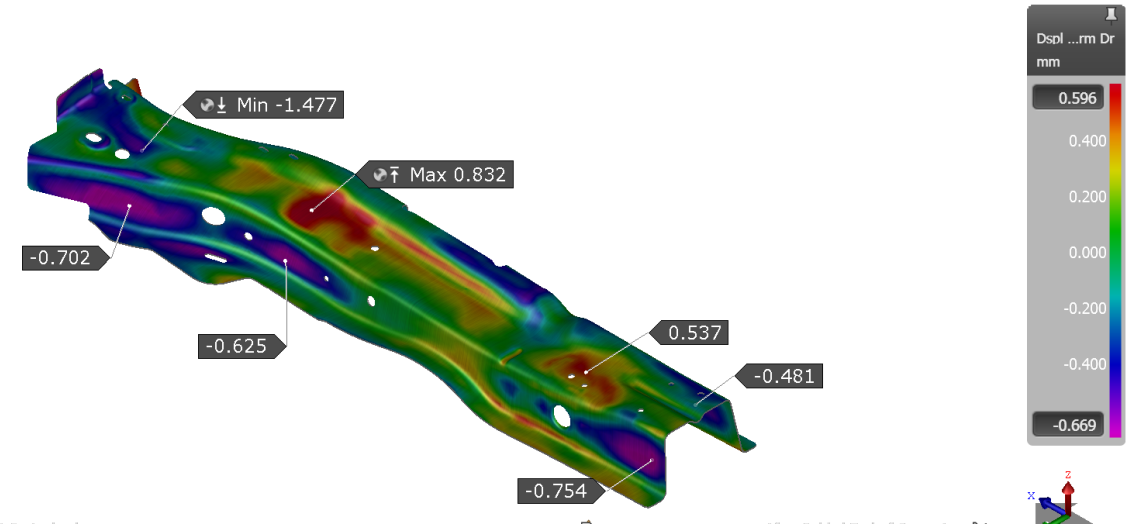


Figura 6.27: Springback na Longarina esquerda.

Estes resultados demonstram que a peça sofrerá deformações que levarão a perder as tolerâncias que se requerem, por isso medidas são tomadas para contrariar este efeito, uma destas mediadas é a alteração da forma que as ferramentas podem ser construidas, normalmente o efeito do springback é compensado pela geometria da ferramenta tomando

dimensões opostas das deformações que a peça terá. Isso quer dizer na prática que se entre duas superfícies da geometria inicial da peça tiver um ângulo de $105°$ e springback gerar uma variação deste ângulo de $105°$ para $110°$, então a geometria da ferramenta deve ser projetada para um ângulo compreendido entre $98°$ a $102°$ em função do material da peça a estampar, ou seja, mais fechada para compensar o efeito do retorno.

6.2.6.5 Compensação do SpringBack

O AutoForm dispõem de um módulo de compensação do retorno elástico, denominado *"Compensator"*, este módulo representa um avanço na compreensão, do retorno que a superfície da peça obterá quando ser extraída da ferramenta. O módulo de compensação ou correção geométrica é uma abordagem utilizada no AutoForm para compensar o springback na estampagem de componentes metálicos. Este módulo consiste em ajustar geometricamente a ferramenta considerando as alterações elásticas que ocorrem durante a operação. Esses ajustes podem incluir a alteração do tamanho da cavidade da matriz, superfície do punção, a alteração dos ângulos de saída e outras alterações específicas necessárias, para garantir a qualidade do produto final, reduzindo alterações dimensionais devido à recuperação elástica.

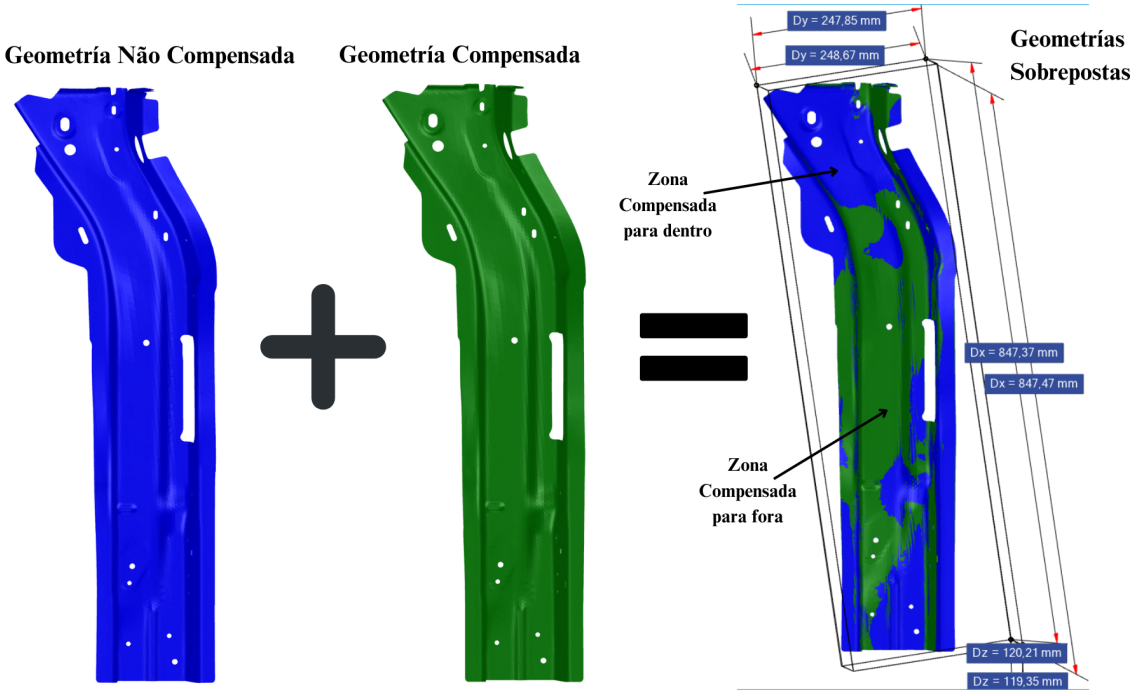


Figura 6.28: Diferença entre geometria padrão e a geometria gerada em ferramenta compensada.

Na Figura 6.28, observam-se duas geometrias extraída do AutoForm para dois casos, com compensação e sem compensação, nelas observa-se que a geometria original está em cor azul e a geometria gerada com ferramentas compensadas em cor verde, quando se sobrepõem as duas geometrias é possível observar as zonas de influência da compensação, ao observar o exterior se percebe que zonas onde a geometria original sobre sai, implica

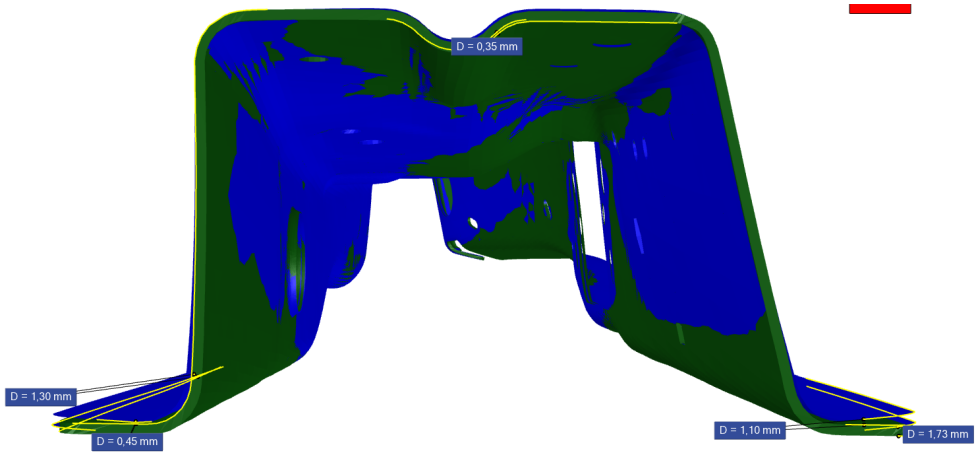


Figura 6.29: Secção dianteira da longarina esquerda com compensação geométrica.

dizer que esta zona foi compensada para interior, ou seja, esta zona quando a peça é retida da ferramenta tende a sobre sair, para contra restar este efeito a geometria compensada nesta zona (azul de geometria sobreposta) é mais para dentro, e na outra zona (verde da geometria sobreposta) ocorre o mesmo fenómeno, mas de forma inversa.

6.2.6.6 Força Exercida Pela Ferramenta

Os valores da força exercida pela ferramenta em cada estágio da operação são importantes para garantir que o processo seja fiável e eficiente.

Tabela 6.2: Força por cada operação necessária para produzir a longarina direita.

Tool Forces Overview								
Tool Name		**Max Force**	**Tool Name**		**Max Force**	**Tool Name**		**Max Force**
T-10			pun 2		677.4 kN	Repassar		351.6 kN
Cutting Tool		3768.0 kN	alm		550.5 kN	Weight		33.20 N
Counter Cutting Tool		3768.0 kN	pun		705.2 kN	**Scenario M-100**		
Weight		50.30 N	cal		578.2 kN	Weight		33.20 N
C-20			Weight		35.50 N			
pun		1977.1 kN	**T-70**					
mat		1977.1 kN	Cal		448.1 kN			
Weight		50.30 N	Mat		448.1 kN			
T-30			Repassar		126.9 kN			
Cutting Tool		3386.9 kN	Counter Cutting Tool 2		126.9 kN			
Counter Cutting Tool		3386.9 kN	Weight		34.40 N			
Cutting Group		232.6 kN	**F-80**					
Counter Cutting Group		232.6 kN	mat		195.8 kN			
Weight		35.40 N	alm		159.9 kN			
I-40			pun		35.9 kN			
Weight		35.40 N	Weight		34.40 N			
D-50			**F-90**					
cal		591.2 kN	cal		265.7 kN			
pun		1410.3 kN	mat		258.8 kN			
mat		1998.7 kN	Extrudido		31.4 kN			
Weight		35.50 N	pun		15.5 kN			
D-60			Counter Cutting Tool		351.6 kN			

Ao conhecer estes valores pode-se evitar problemas como rasgos, rugas e deformações excessivas nos componentes metálicos. Com a utilização destes valores corretamente se

garante a qualidade do produto final, e se reduz a possibilidade que operações adicionais sejam implementadas no processo de produção. Além disso, os resultados da força por cada operação também são necessários para otimizar a eficiência do processo e garantir a precisão e economia de produção.

Tabela 6.3: Força por cada operação necessária para produzir a Longarina esquerda.

Tool Forces Overview								
Tool Name		**Max Force**	**Tool Name**		**Max Force**	**Tool Name**		**Max Force**
D-20			trim		232.1 kN	pun		40.1 kN
mat		7108.0 kN	piercing		109.8 kN	Counter Cutting Group		640.6 kN
pun		4713.6 kN	Counter Cutting Tool		121.3 kN	piercing		640.6 kN
alm		2394.5 kN	trim 2		121.3 kN	Counter Cutting Tool		44.6 kN
Weight		49.90 N	trim 3		132.2 kN	piercing 2		44.6 kN
T-30			Counter Cutting Tool 2		132.2 kN	Cutting Group		331.0 kN
Pad		3011.6 kN	Cutting Tool 3		205.9 kN	Counter Cutting Group 2		331.0 kN
Post		3011.6 kN	Counter Cutting Tool 3		205.9 kN	Cutting Group 2		84.4 kN
trim		2756.2 kN	trim 4		192.8 kN	Counter Cutting Group 2 2		84.4 kN
Counter Cutting Group		2756.2 kN	Counter Cutting Tool 4		192.8 kN	Cutting Group 3		153.2 kN
piercing		1191.6 kN	Counter Cutting Tool 5		232.1 kN	Counter Cutting Group 3		153.2 kN
Counter Cutting Tool		1191.6 kN	corte_extrudido_lat		421.5 kN	Weight		34.60 N
Weight		44.00 N	corte_extrudido_lat 2		421.5 kN	**T-80**		
T-40			Counter Cutting Tool 7		109.8 kN	Pad		608.9 kN
Pad		1785.0 kN	Weight		35.00 N	Post		609.7 kN
Post		1785.1 kN	**D-60**			extrudido		30.1 kN
trim		186.8 kN	calc		713.5 kN	Counter Cutting Group		275.8 kN
Counter Cutting Group		1710.3 kN	pun		860.2 kN	piercing		234.9 kN
Counter Cutting Tool		186.8 kN	mat		821.0 kN	Cutting Group		275.8 kN
trim_		1710.3 kN	alm		752.7 kN	Counter Cutting Group 2		234.9 kN
Weight		39.00 N	Weight		35.00 N	Weight		34.30 N
T-50			**F-70**			**T-80 Scenario M-90**		
Pad		869.2 kN	calc		641.3 kN	Weight		34.30 N
Post		869.3 kN	mat		641.8 kN			

Uma vez que se conhece estes valores, pode-se ter uma visão mais detalhada das características da prensa ideal para o projeto de produção dos componentes, o AutoForm proporciona estes dados de forma eficaz, fornecendo a força necessária para cada operação realizada ao longo do processo de produção dos componentes. A tabela 6.2, apresenta os valores da força exercia pela ferramenta em cada operação realizado ao longo do processo produtivo da longarina direita, na primeira coluna, terceira fila, observa-se a primeira operação realizada e a força requerida, vejamos, se trata da operação T-10, ou operação de corte da chapa, são necessários cerca 3768 kN de força (aproximadamente 380 toneladas) para cortar a lamina de aço de 2 mm de espessura. Este cálculo é feito pelo AutoForm com base na área de secção transversal da chapa e a tensão de cisalhadura do material.

A tabela 6.3, apresenta os valores da força necessária para produzir a longarina esquerda, diferente do componente anterior aqui se verifica que operação de maior aplicação de força é a D-20 ou operação de conformação inicial da peça, para tal são necessários 7108 kN (720 toneladas) de pressão, este valor demonstra a resistência que o material oferece ao ser conformado. Outros fatores que influencia na alta tonelagem para a conformação inicial, é o volume, área de conformação da peça, a espessura do material e o raio de dobra da peça (Longarina esquerda). A Figura 6.30 apresenta o gráfico da força

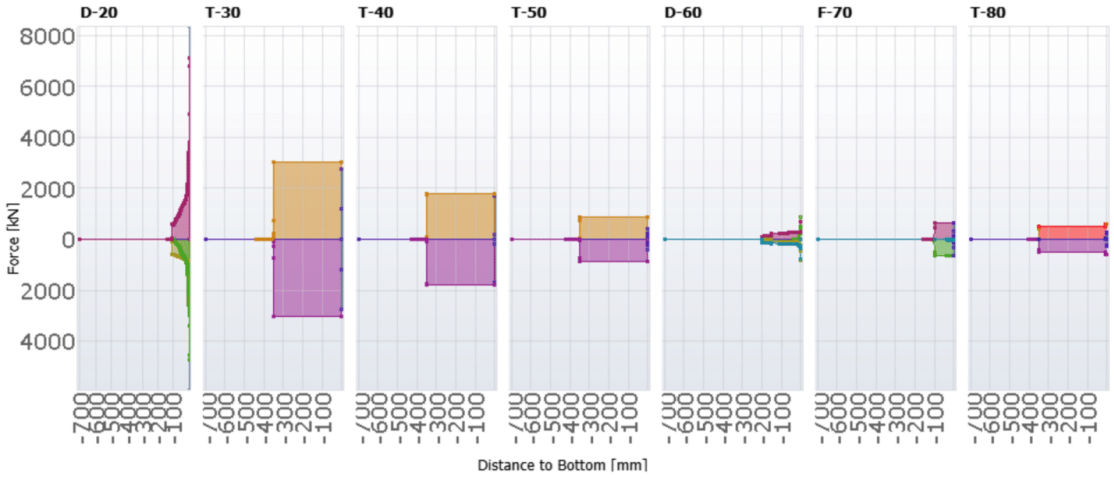


Figura 6.30: Força em cada etapa quando do módulo superior da ferramenta está em descenso.

em função da longitude que o módulo superior percorre desde a posição superior até a inferior, a força máxima é aplicada no ponto inferior onde a ferramenta exerce a máxima pressão sobre a chapa.

6.3 Layout do Processo de Estampagem

A sequência do processo de estampagem representa a segunda etapa de análise de projeto, na Gestamp Cerveira esta etapa é sempre tido em conta como uma das mais critica do processo, para as longarinas esta análise teve em conta alguns aspetos como; é o caso das dimensões dos componentes; quantidade de operações que requerem (furações, dobras e cortes); a resistência e a espessura do material. Estes dados são analisados em paralelo com os resultados obtidos na simulação.

A longarina esquerda pela complexidade geométrica torna-se a primeira vista, o que requer maior numero de operações, mas nem sempre esta análise é factível, porque os resultados obtidos durante a simulação, auxiliam no processo e podem tornar a sequência mais curta, mas este processo pode ser muito tedioso e levar alguns problemas na peça terminada, visto que o springback é um problema inevitável no processo de dobra de chapas metálicas de materiais com elevada resistência mecânica e espessura.

6.3.1 Longarina Esquerda

A Figura 6.31 mostra a sequência definida para o processo de estampagem da longarina esquerda, esta análise como mencionado anteriormente tem em conta alguns fatores, bem como a seleção da ferramenta definida como transfer tendo em conta as dimensões do componente.

A ferramenta transfer funciona normalmente com uma sequência separada de operações desta forma o módulo pode ser único ou divididos em blocos (transfer tandem), no caso da longarina direita o modulo é único, e tem como grande vantagem a instalação em espaços mais reduzidos comparativamente a módulos separados, que requerem mais espaço de instalação e braços robóticos para auxiliar nas operações, tornando o processo mais custoso e complexo de ser instalado.

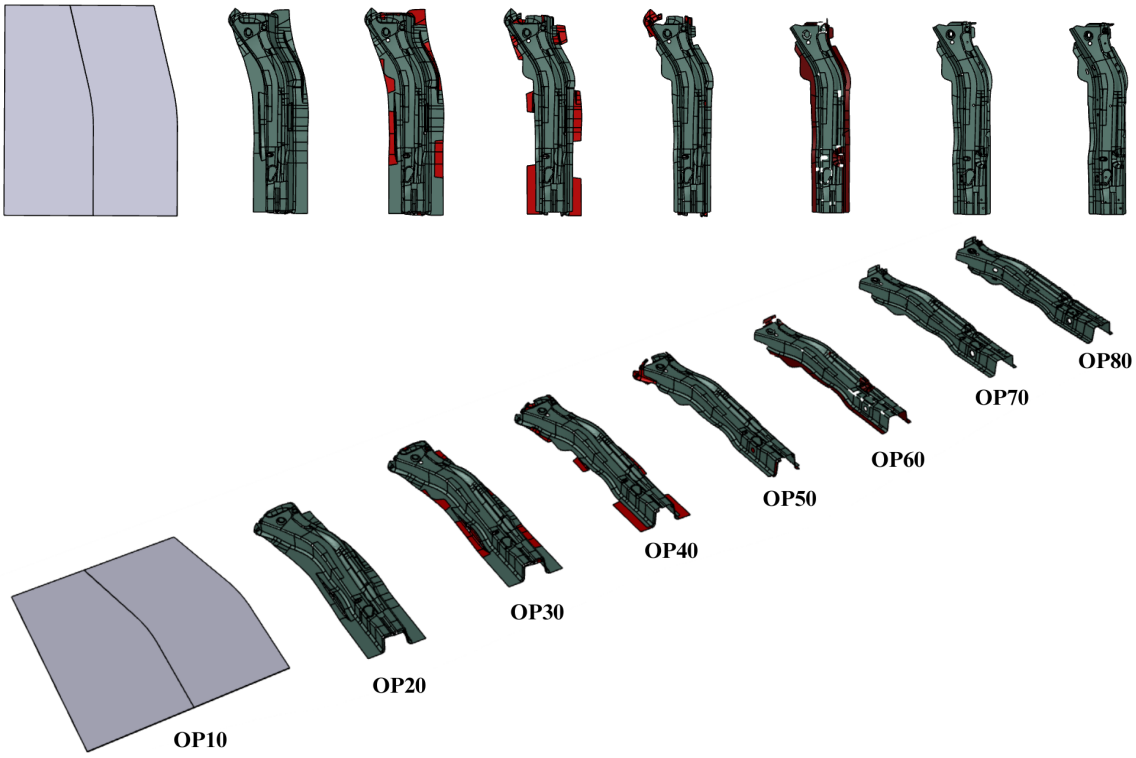


Figura 6.31: Sequência de operações definidas para Longarina esquerda.

Em cada etapa da Figura 6.31 observam-se secções da geometria a cor vermelho, estas marcam as operações efetuadas em cada passo da ferramenta, divididas principalmente em operações como, conformado geral, corte de superfícies e arredor da chapa, furações na parte superior e lateral da peça e dobra de abas.

Desta forma podemos descrever detalhadamente nas imagens ampliadas divididas em dois passos por cada Figura, seguindo a ordem de operações de esquerda para direita:

Passo 1 e 2 (OP10 e OP20): No passo 1 como mostra a Figura 6.32, à esquerda, a chapa é cortada numa secção que assume a pré-forma da geometria da peça que se deseja obter, aqui começa a principal diferença entre uma operação transfer da progressiva, porque com este corte a pré-forma obtida se separa da bobina situação que em ferramentas progressivas só ocorre na última operação. No passo seguinte (2) representada no lado direito, a chapa que anteriormente foi cortada, é conformada numa operação na qual a matriz em forma de cavidade exerce a pressão sobre a chapa apoiada na superfície do punção que tem a forma oposta da matriz para desta forma se obter a forma tridimensional com uma cavidade gerada pela conformação.

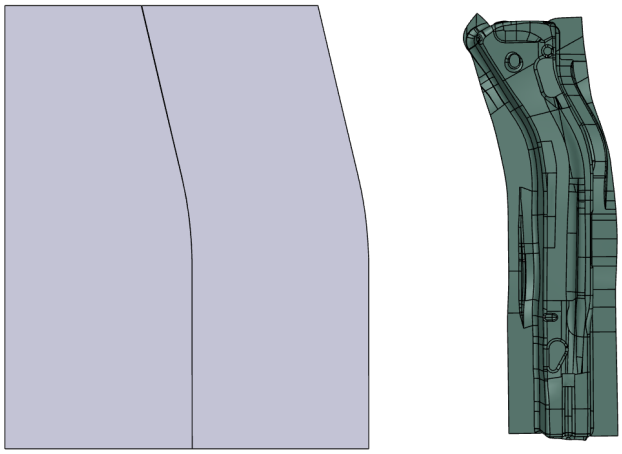


Figura 6.32: Operações realizadas no passo 1 e 2 (Longarina esquerda).

Passo 3 e 4 (OP30 e OP40): Nos passos 3 e 4 como mostra a Figura 6.33, ocorrem em ambos passos operações muito parecidas, todas elas de corte nas bordas da forma tridimensional obtida no passo anterior,observa-se que os cortes são realizados, com uma ligeira separação, estas separações ou espaços entre partes que se vai cortar, é fundamental

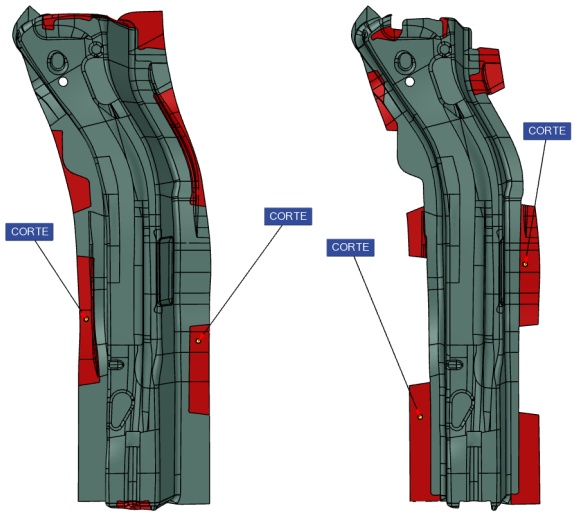


Figura 6.33: Operações realizadas no passo 3 e 4 (Longarina esquerda).

para construção das ferramentas, que requer este espaço para que as operações de corte sejam realizadas sem interferência de componentes arredor dos punções.

Passo 5 e 6 (OP50 e OP60): No passo 5 como mostra a Figura 6.34, observam-se duas operações de corte realizadas no extremo superior e inferior como o apresentado na Figura, no centro da peça é realizado um corte ainda no passo 5, mas na posição horizontal, como indicado na Figura, ou seja, o punção de corte e movido horizontalmente mediante uma superfície inclinada na extremidade que sob ação de uma força perpendicular a superfície inclinada é movido horizontalmente, este tipo de componente se denomina carro que na abordagem da ferramenta é mais detalhada.

No passo 6 entram novas operações como a dobra realizada na parte superior da ilus-

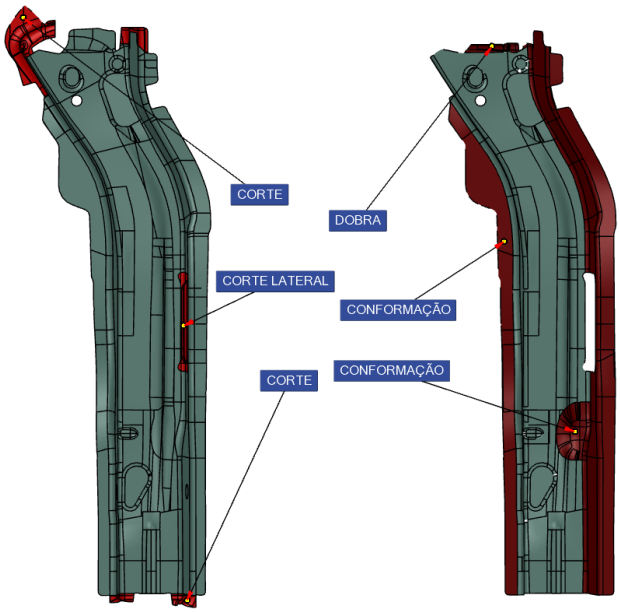


Figura 6.34: Operações realizadas no passo 5 e 6 (Longarina esquerda).

tração da Figura, nela a superfície que no passo anterior se encontrava na posição horizontal foi dobrada para cima, como observa-se a diferença notável entre os passos 5 e 6. Ainda foram realizadas duas operações de conformação, nos extremos da peça para obter as abas inclinadas, visto que esta até então se encontrava na posição horizontal, bem como no passo 6 ocorre também uma operação de conformação para criar uma cavidade na parte superior do componente, como mostra a Figura.

Passo 7 e 8 (OP70 e OP80): Nos passos 7 e 8 (ver Figura 6.35) respetivamente, é

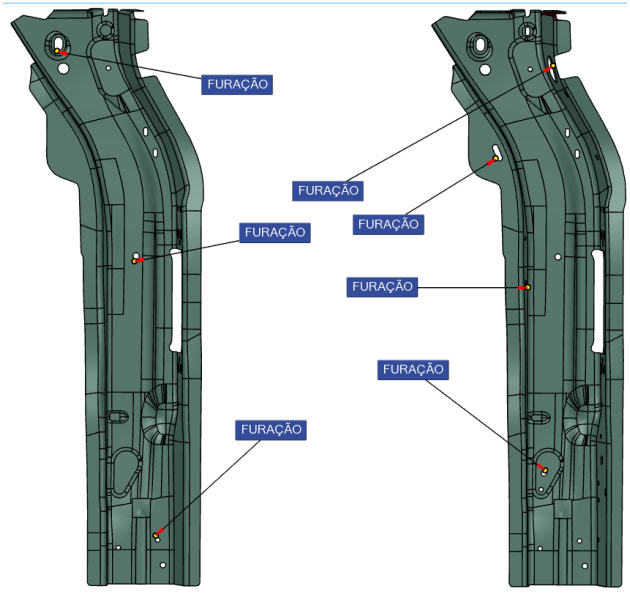


Figura 6.35: Operações realizadas no passo 7 e 8 (Longarina esquerda).

realizado várias operações de furações da superfície da chapa, observa-se que em ambos passos existem algumas furações que constam apenas no último passo, ou seja a medida

que a sequência avança do passo 7 para 8 se efetuam várias operações para obter os furos de forma sequenciada, seja elas realizadas na posição horizontal ou vertical da superfície da peça.

6.3.2 Longarina Direita

Na Figura 6.36 podemos observar a sequência de operações definidas para obtenção da longarina direita, como observa-se da primeira operação à última, foi definida ligeiramente diferente em comparação a longarina esquerda, com um passo de diferença entre ambas. A geometria da longarina direita mesmo sendo menos complexa em relação à esquerda ainda assim requer de mais passos de operações, este facto se deve primeiramente a uma análises cuidadosas que os profissionais realizaram, e para se chegar a tal conclusão, como referido anteriormente uma das principais causas pode estar diretamente relacionados ao springback do material, este é um fator que não está relacionado com a geometria, se não com a área da superfície e o raio de dobra da chapa.

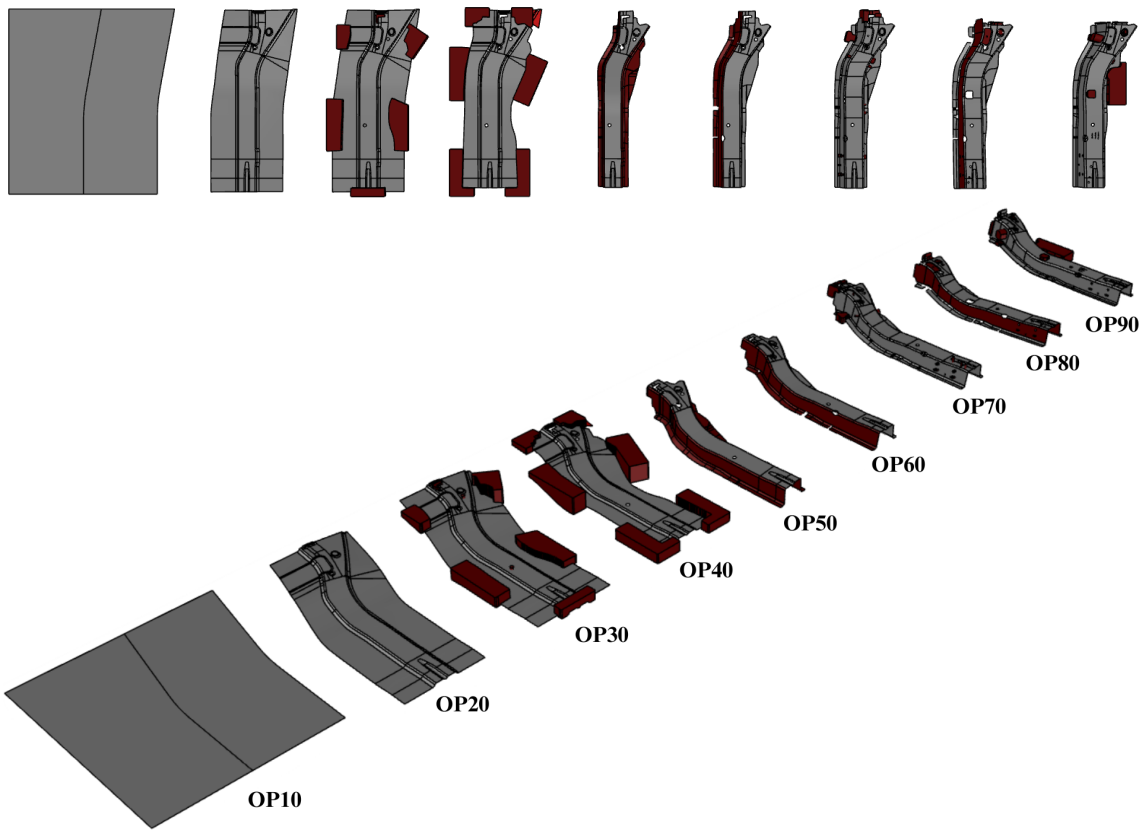


Figura 6.36: Sequência de operações definidas para Longarina direita.

Passo 1 e 2 (OP10 e OP20): A Figura 6.37, mostra a sequência dos passos 1 e 2 da longarina direita, como se observa o passo 1 ou do corte de chapa é uma operação parecida ao da longarina anterior, mas o passo 2 por sua vez se verifica uma ligeira diferença, nesta operação se efetua uma conformação da chapa a um profundidade muito reduzida cerca

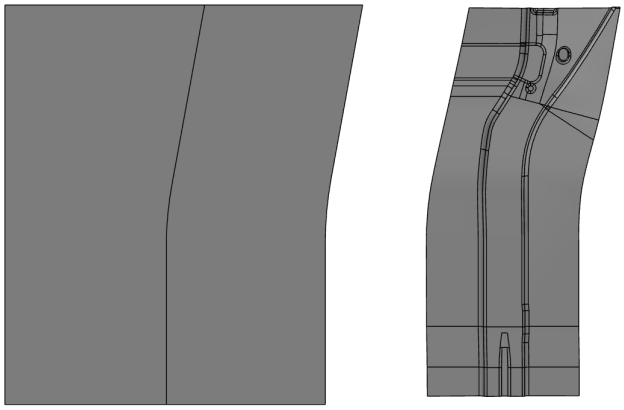


Figura 6.37: Operações realizadas no passo 1 e 2 (Longarina direita).

de 25% da profundidade da peça que se deseja obter, ou seja, é um processo de pré-conformação da estrutura tridimensional do componente.

Passo 3 e 4 (OP30 e OP40): Nas operações 3 e 4 se realiza uma série de cortes e furações, como pode-se o observa na Figura 6.38, os primeiros cortes representam cortes procurados, eles são realizados antes da conformação final da peça, bem como se realizou também algumas furações na superfície superior do componente, ainda no passo 3, que representa uma secção que até a última operação já não sofrerá conformação, visto que em superfícies não uniforme geralmente primeiro se realiza a conformação e posteriormente as furações, para garantir a precisão dimensional dos furos.

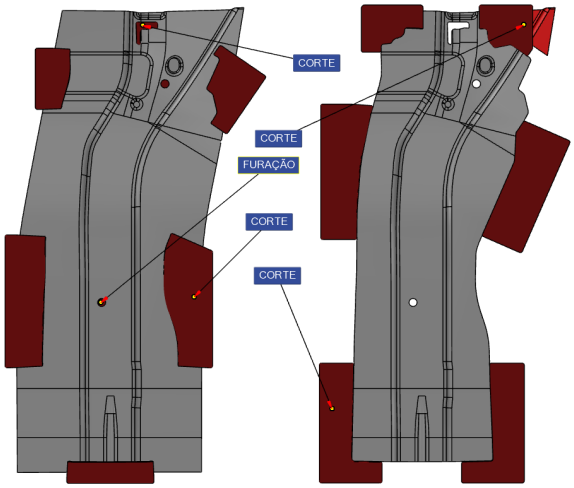


Figura 6.38: Operações realizadas no passo 3 e 4 (Longarina direita).

Passo 5 e 6 (OP50 e OP60): Nos passos 5 e 6 como mostra Figura 6.39 a peça passa da forma rasa para forma mais profunda, esta operação é dada, como a que dá as características mais próximas da peça final, nela as abas que anteriormente estavam na posição horizontal são dobradas para baixo dando mais volume a peça, consequentemente o raio de dobra que anteriormente se situava mais acima agora passa estar mais para baixo gerando um novo springback, para contra-restar este retorno, no passo 6 é efetuado uma calibração para manter as superfícies laterais da peça na posição desejada. Ainda no

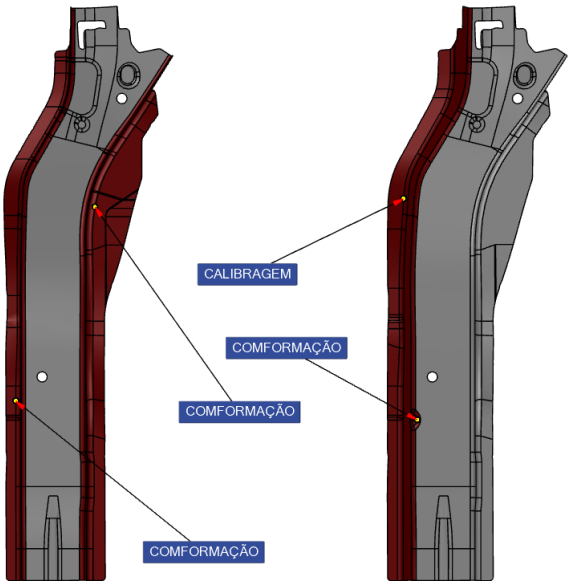


Figura 6.39: Operações realizadas no passo 5 e 6 (Longarina direita).

passo 6 é realizada a conformação de uma pequena superfície situada na borda superior da superfície, ou seja, esta conformação é gerada sobre o raio de curvatura, este tipo de operação normalmente requer um esforço elevado para gerar a deformação, por ser uma zona de raio de curvatura normalmente o material encontra-se sob tensão em ambos lados da superfície, gerando um aumento de dureza superficial na chapa.

Passo 7; 8 e 9 (OP70; OP80 e OP90): Nos passos 7, 8 e 9 (ver Figura 6.40), é reali-

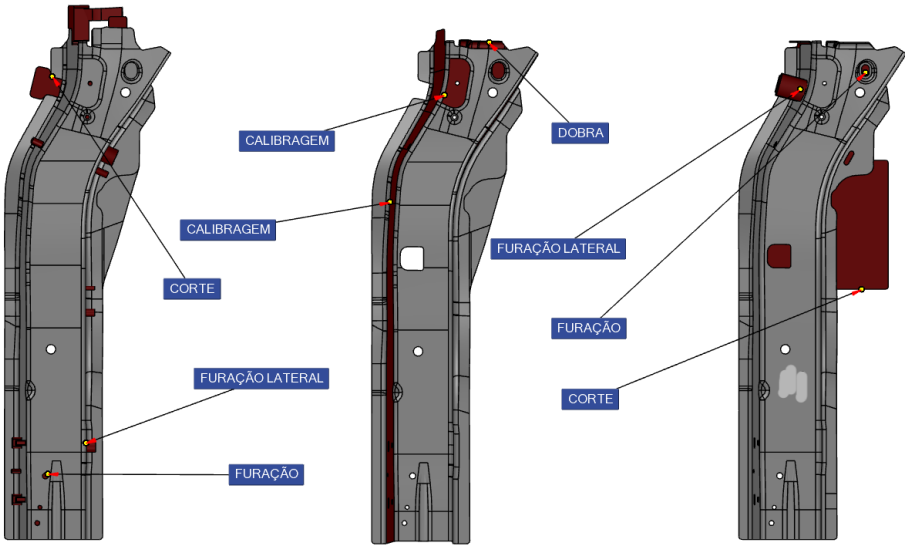


Figura 6.40: Operações realizadas no passo 7; 8 e 9 (Longarina direita).

zado uma séria de operações visando a obter geometria final da peça, o passo 7 que está composto maioritariamente por furações efetuadas em dois eixos (x, z) respetivamente. No passo 8 ocorrem três calibragens de superfícies e uma operação de dobra. Importa destacar que a dobra realizada no passo 8 ela é efetuada de baixo para cima desta forma a peça desce com matriz superior e o punção fixo na ferramenta inferior entra em contacto

com a aba da peça gerando a dobra por ser uma superfície de área muito pequena geralmente a ocorrência de springback é muito reduzida evitando assim que no passo seguinte seja realizado uma calibração, e desta forma termina a sequência de operações no passo 9, com corte em aba da peça e furações, dando à peça a sua forma final.

6.4 Molde de Estampagem do Componente

Os moldes para o processo de conformação de chapas é uma ferramenta imprescindível, visto que cumpre uma grande importância no processo de estampagem de metais e não só. Geralmente os moldes são colocados, entre a chapa de metal, esta exerce uma força uniforme direcionada a superfície da chapa gerando uma pressão, esta por sua vez a deformação da chapa metálica, desta forma se gera uma nova geometria segundo o modelo do componente que se deseja obter.

Na Gestamp Cerveira o molde é projetado por uma equipa de especialistas do departamento de projetos, segundo os requisitos e especificações da peça que se deseja produzir, no caso do projeto das longarinas a ferramenta foi produzido por uma empresa externa, o projeto é adjudicado a uma empresa especializada na produção de moldes, posterior a sua produção o departamento de ferramentaria se encarrega com a manutenção do equipamento.

O portal [25], afirma que por atuar na confeção de peças, o molde para estampagem de metais é feito sob medida, seguindo projetos realizados para oferecer o máximo de fidelidade e precisão com o formato da estrutura, já que ela oferece a forma para a estampagem. Assim, é essencial que o molde para estampagem de metais seja feito com o auxílio de uma mão de obra profissional, garantindo maior precisão na fabricação da estrutura, bem como processos qualificados de produção, evitando, erros, problemas e demais prejuízos.

6.4.1 Ferramenta para Produção do Componente

A produção das ferramentas necessárias para produção das duas longarinas, foi encarregada a uma empresa externa, todos processos de análises, desenho do seu projeto foram desenvolvidos pelos profissionais da Gestamp Cerveira. Em alguns casos, eventualmente a ferramenta pode ser produzida pela divisão de ferramentas (Gestamp Global Tooling), mas este não foi o caso das ferramentas para produção das duas longarinas, esta tarefa foi encarregada a uma empresa externa, que se encarregou pela produção dos mesmos sob verificação dos profissionais da Gestamp Cerveira.

O projeto de conceção das ferramentas, é parte integrante no processo de estampagem de chapas metálicas, a matriz é responsável por dar a forma padrão ou a estrutura desejada

a folha de chapa, pela sua geometria geralmente irregular, as matrizes permitem criar relevos que melhoram a estética e funcionalidade do produto terminado.

A matriz é um componente geralmente endurecida que exerce uma pressão sobre a chapa, para criar forma tridimensional em relevo, a sua funcionalidade se caracteriza fundamentalmente, em dois componentes, a matriz macho (ou punção) que possui o padrão tridimensional desejado e a matriz fêmea que possui a forma tridimensional em forma de cavidade, então quando uma pressão é aplicada em um dos componentes separadas entre si por uma distância predefinida de acordo a profundidade da peça, uma chapa é colocada entre as duas matrizes opostas que ao entrarem em contacto a chapa assume a forma geométrica das duas superfícies em contacto.

6.4.1.1 Projeto de Ferramenta Transfer

Inicialmente é gerado vários ficheiros 3D, como mostram as Figuras 6.41 e 6.42 que podem variar de acordo a um padrão geométrico simples ou complexo, dependendo da peça que se planeia produzir, posteriormente todos os componentes são montados para formar o modulo de ferramentas.

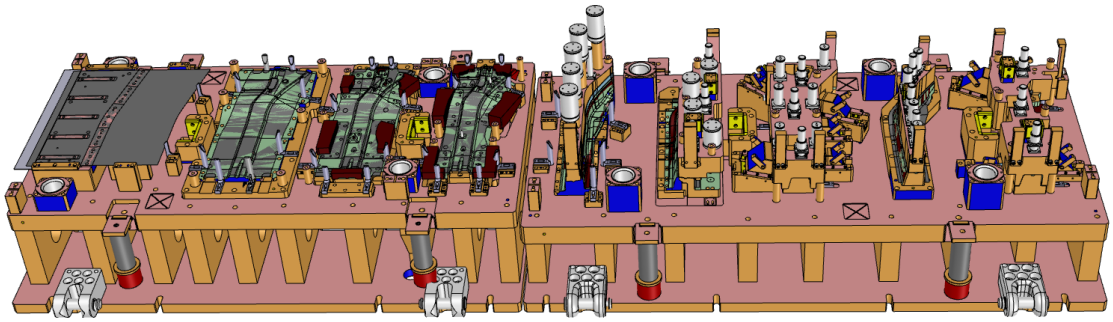


Figura 6.41: Módulo de ferramentas, para estampagem da longarina direita.

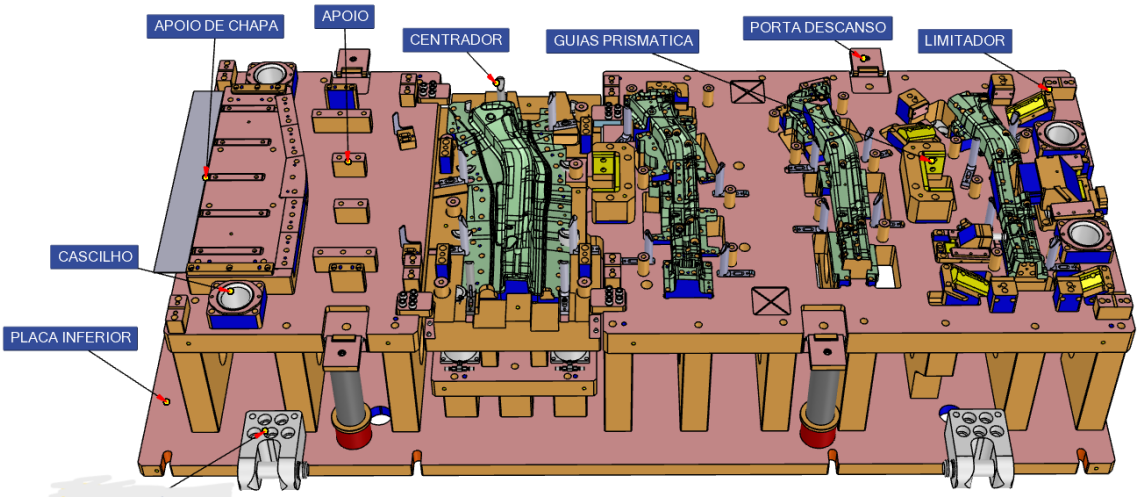


Figura 6.42: Módulo 1 de ferramentas, para estampagem da longarina esquerda.

A grandiosidade e complexidade do projeto, tem grande impacto na forma como a matriz é projetada, uma geometria com muitos detalhes e complexa, exige uma matriz

mais sofisticada em comparação com uma geometria mais simples direta. Nesta etapa os engenheiros e profissionais de projetos, têm em consideração as especificações, da peça final a ser estampada. Por outro lado, é importante ter em consideração, o tipo de material do componente que se vai estampar, visto que diferentes materiais podem influenciar no projeto final de acordo a maleabilidade e dureza destes materiais.

O software de desenho utilizado para o projeto de design da ferramenta foi o solidworks, neste software o design das matrizes são esboçados desde planos 2D da peça, até que os padrões ideais sejam alcançados, logo após que este processo seja terminado, passa-se então ao momento de levar o projeto a uma terceira dimensão.

O processo que leva os modelos 2D aos modelos tridimensionais, correspondem a uma etapa crítica no processo de conceção da matriz, com auxílio dos softwares CAD, a tarefa dos engenheiros de projetos passa ser, o desenvolvimento de modelos exaustivo que incluem formas tamanho e padrões desejáveis pelo projeto.

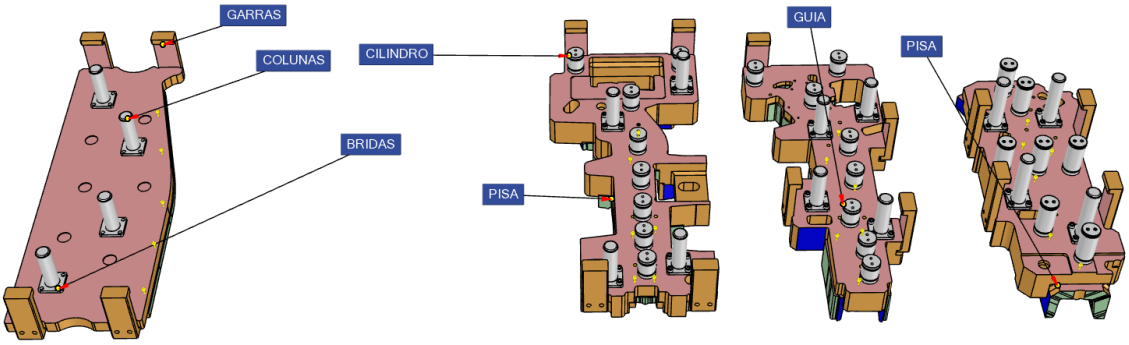


Figura 6.43: Elementos de guia de um módulo de ferramentas.

Com os modelos 3D criados, os engenheiros de projetos, podem interagir com a interface gráfica do software (CAD e CAE) e perceber como a superfície da matriz irá interagir com a superfície da chapa, desta forma pode-se prever possíveis problemas, e evitar que os mesmos passem ao modelo real, com isso efetuam-se ajustes, principalmente nos elementos de guia como mostra a Figura 6.43, antes que a sua produção a escala real seja posta em marcha.

Uma vez que todo processo de análises é terminado e o design aprovado, leva-se o modelo computacional a uma escala real, nesta fase o projeto começa a surtir os primeiros resultados palpáveis.

O processo de fabricação das ferramentas e matrizes envolve diversas técnicas como, maquinação, fresagem, corte por eletroerosão por fio ou tecnologia EDM (Eletrical Discharge Machining), processos que podem variar dependendo da complexidade do projeto e tipos de materiais, para o caso do projeto das duas longarinas todas as operações citadas foram necessárias.

Nesta fase importante do projeto a precisão é crucial, visto que pequenos desvios podem afetar a qualidade das peças terminadas, para evitar estes tipos de problemas,

geralmente nesta etapa a utilização de máquinas sofisticadas, operadores e técnicos qualificados para garantir o mais alto grau de qualidade nas peças que se deseja produzir.

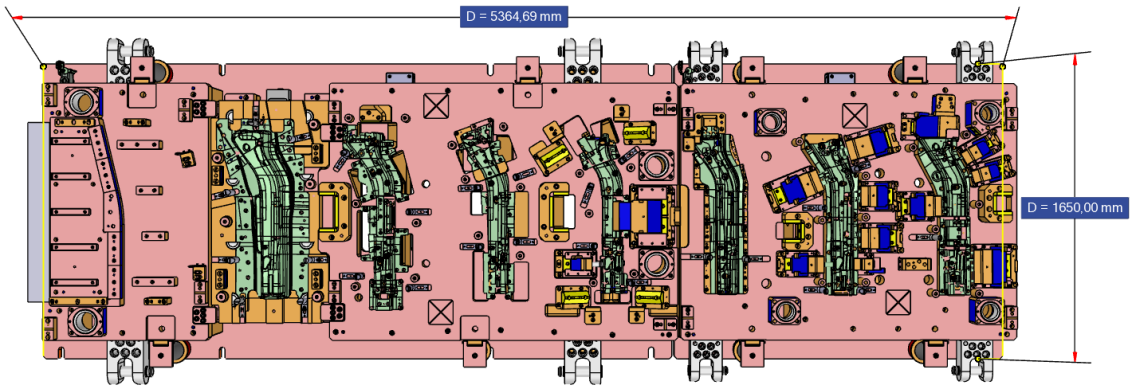


Figura 6.44: Dimensões do módulo da ferramenta da longarina esquerda.

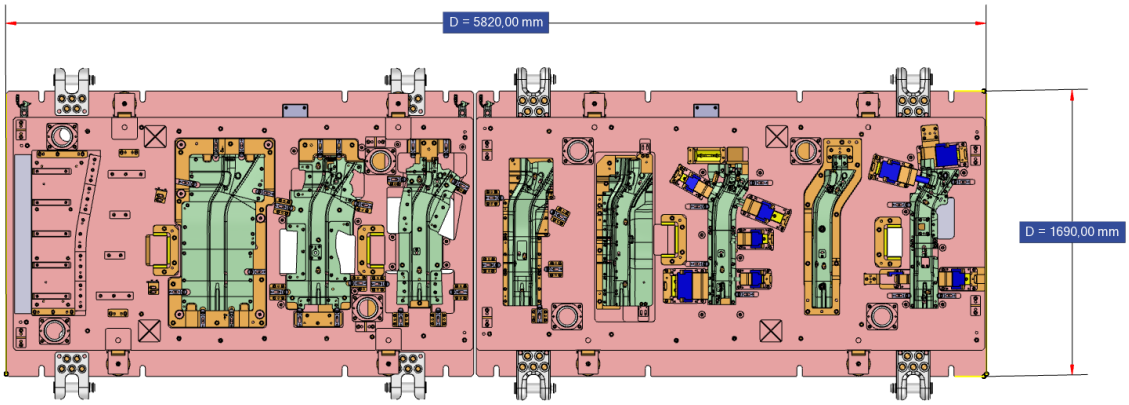


Figura 6.45: Dimensões do módulo da ferramenta da longarina direita.

Nas Figuras 6.44 e 6.45, observam-se as dimensões dos módulos de ferramentas para as duas longarinas, nota-se que o módulo de longarina direita possui uma longitude relativamente maior, com aproximadamente 450 mm, mais longa em comparação ao outro módulo, esta diferença surge pelos números de passos necessários para obter a peça, implica isso dizer que quanto maior o número de passos, em peças com dimensões muito próximas, maior tende a ser a longitude do módulo. A longarina direita exige maior numero de passos para a sua produção, fruto da sua geometria que por possuir raios de dobras maiores, tende a impactar significativamente no springback, e com auxílio dos resultados da simulação, permite escolher um caminho mais viável para sua produção.

6.4.2 Testes e Ajustes das Ferramentas

Como afirma [67], o controlo de qualidade é fundamental na fabricação de moldes. Após a produção, a matriz passa por uma inspeção minuciosa para garantir que esteja perfeitamente alinhada com as especificações do projeto. Isso envolve verificar as dimensões da matriz, a nitidez das bordas e a precisão do desenho em relevo.

A matriz pode então passar por uma série de testes, que podem incluir execuções de peças de teste em amostras de chapas metálicas cortada a laser no formato da peça. Isso oferece a oportunidade de ver a matriz em ação e verificar a qualidade do componente em 3D e a sua superfície. Se surgir algum problema durante este estágio, a matriz pode precisar ser ajustada ou mesmo reestruturada para garantir que atenda aos padrões exigidos [67].

Após passar pela inspeção e teste, a matriz está pronta para embarcar na sua jornada, prensando inúmeras folhas de metal e dando vida ao conceito de design inicial [67].

6.4.3 Maquete

A maquete é um componente de controlo de peças estampadas, representa uma cavidade, geralmente muito similar a cavidade da matriz, uma das principais ferramentas de controlo geométrico das primeiras peças estampadas e o controlo dimensional do ciclo produtivo, ela representa também o mecanismo de controlo dimensional, baseando-se na localização de pontos de controlo presente no plano 2D da peça fornecida pelos clientes da Gestamp. O controlo dimensional é efetuado mediante uma máquina de medição por coordenadas (MMC) presente no laboratório de qualidade, assim as coordenadas na nova peça devem cumprir com tolerâncias muito precisas para que as peças sejam validadas.

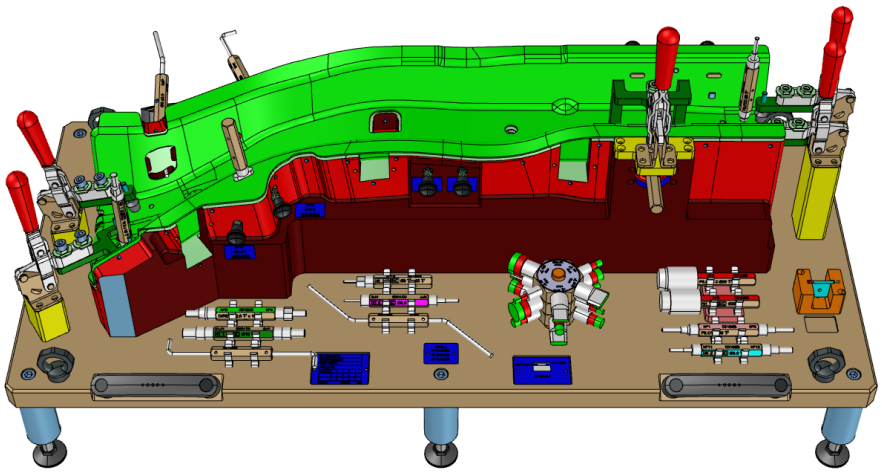


Figura 6.46: Maquete Longarina direita.

Para construir uma maquete é necessário ter em conta a posição de duas face da peça, geralmente se considera a face da peça que fica voltada para baixo e que fica voltada para cima, como mostra o plano da peça (Figura 6.47).

Para se chegar a esta conclusão, basta ter em conta a direção pela qual a espessura da peça pode ser incrementada ou reduzida, visto que a face oposta, mesmo que a espessura da peça sofre alterações, esta não se alterará, evitando que uma nova maquete seja construída em caso de alterações da espessura do material. Uma das vantagens desta técnica é que não é apenas as maquetes que se mantém inalterável, mas os calibres não precisam

ser modificados uma vez que a face de referência, se mantêm na mesma posição antes ou depois de qualquer alteração.

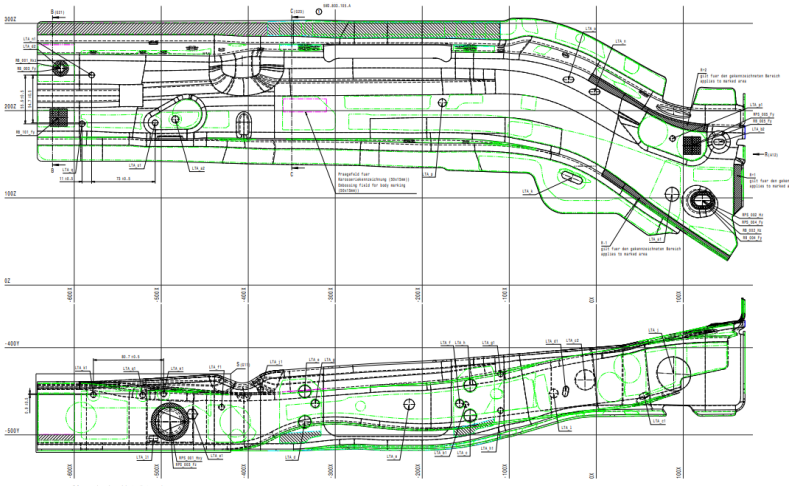


Figura 6.47: Plano 2D da longarina esquerda.

Na Figura 6.48, observa-se os furos de verificação do calibre do componente metálico sobre a maquete, a técnica baseia-se em inserir os calibre ajustado a medida das tolerâncias recomendadas pelos projetistas do componente a ser fabricado.

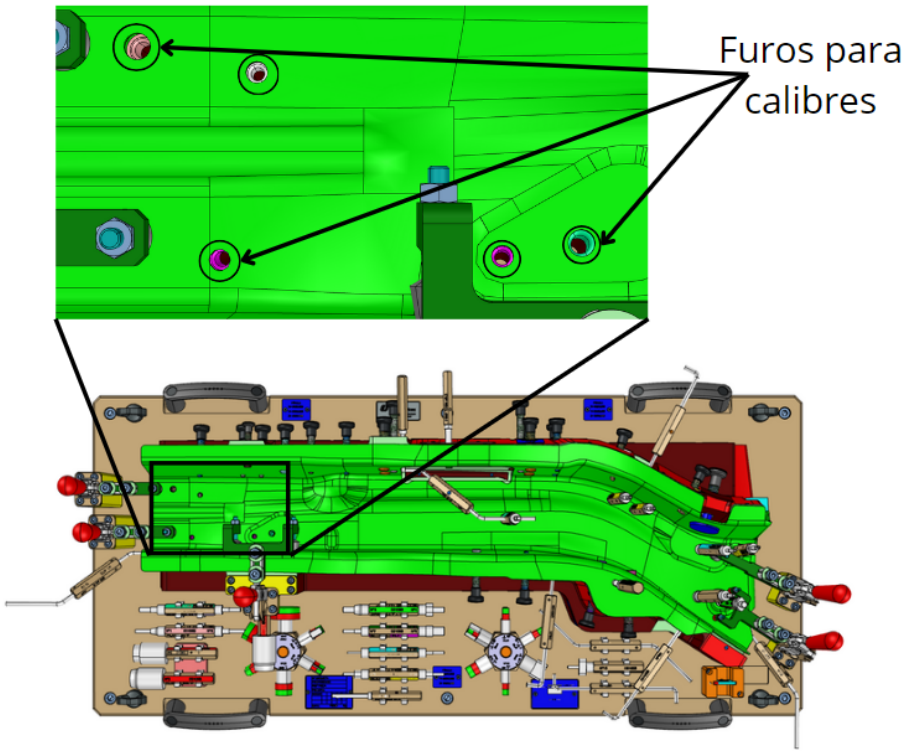
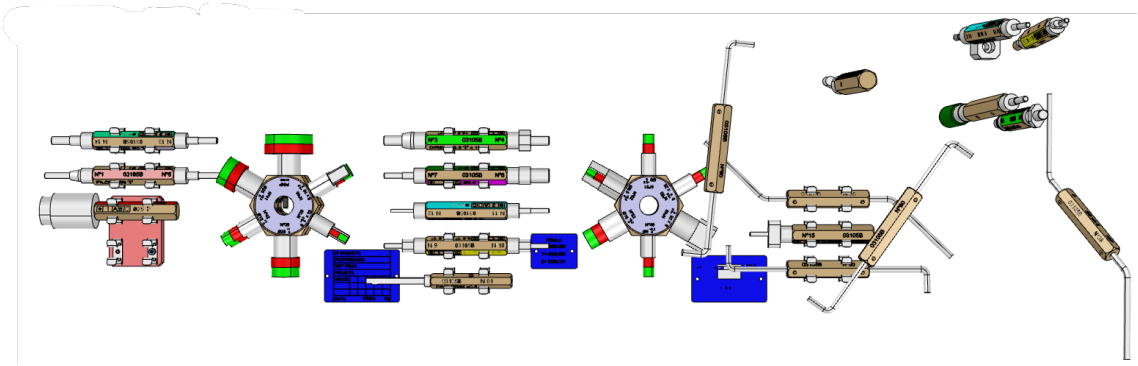


Figura 6.48: Maquete Longarina esquerda.

Ao inserir os calibres nos furos assinalados na Figura e outros que se encontram arredor da maquete, se verifica mediante ajuste ou folga dos calibres nos furos, se elas passam ou não passam, geralmente estes devem passar com uma ligeira facilidade, não

sendo necessário à aplicação de excessiva força ou oscilações para entrarem, em casos que os calibres não entrem com facilidade, indica algum desvio no componente, e então uma retificação na ferramenta será necessária.

Os calibres são normalmente fabricados de aços maquinadas a frio, e com tolerâncias muito precisas. Nota-se, na Figura 6.49a, que os calibres são colocados na estrutura base da maquete, segundo a localização dos furos, desta forma torna-se muito mais ágil localizar os furos correspondentes a cada calibre, segundo a localização mais próxima na



(a) Localização dos calibres na estrutura base da maquete



(b) Especificações dos calibres pilotos

Figura 6.49: Calibres de controlo dimensional.

estrutura base da maquete, por outro lado, entre a superfície da maquete e a superfície das bordas do componente existe uma folga e um calibre (de extremidades com dobras e em forma da letra *(Z)* da Figura 6.49a), deve passa por esta secção sem interferências ou travamento, para garantir a uniformidade entre as superfícies das bordas do componente e da maquete.

6.4.4 Custos Associados com a Ferramenta

As matrizes, ferramentas essenciais na estampagem de metais, impactam significativamente os custos do projeto. Peças simples com poucas dobras geralmente exigem uma matriz de estação única, uma ferramenta de uma etapa que é econômica para projetar e construir [67].

Em contraste, peças complexas com estampagens profundas ou tolerâncias restritas exigem matrizes progressivas. Essas ferramentas de vários estágios moldam a peça gradualmente, aumentando a complexidade e o custo [67].

Além disso, a escolha do material da matriz é crucial; embora o aço rápido forneça durabilidade para produção de alto volume, ele é mais caro em comparação ao aço para ferramentas, que é mais adequado para produção de baixo volume [67].

7 Industrialização de um Componente Automóvel

7.1 Preparação para Produção

A industrialização de um componente automóvel, envolve várias etapas. A preparação para produção do componente é uma etapa crucial para o projeto, nesta etapa são definidas prioridades, e questões que podem ser revista a posterior, aqui é importante olhar para as prioridades que podem definir o processo de produção dos componentes sem sobre saltos, uma das questões que se tem em primeiro plano é o capital humano, normalmente um novo projeto sempre acarreta consigo novos desafios, é importante que o capital humano que a empresa dispõe atenda as necessidades do novo projeto, em casos que o capital humano não atenda os requisitos do novo projeto, geralmente se olha para o mercado externo ou a formação interna de equipas que possam assumir as responsabilidades do novo projeto.

7.1.1 Configuração da Prensa de Estampagem

A maioria da produção em série de partes moldadas a partir de chapas finas é realizada em prensas mecânicas ou hidráulicas. As prensas mecânicas a energia são máquinas de ação rápida e aplicam golpes de curta duração, enquanto as prensas hidráulicas são de ação mais lenta, mas podem aplicar golpes mais longos [28].

A Gestamp Cerveira, tem nas suas unidades 4 prensas transfer (ver Tabela 1.3) mecânica de duplo efeito que superam as 600 toneladas de força. Estas prensas mecânicas permitem a estampagem de chapas com volume igual ou superior a 800x1000x2 mm^3 (x, y, z), como bacias ou assoalho do porta malas do automóvel, painéis para portas, entre outros produtos.

Para o projeto de produção das Longarinas, tendo em conta a sua dimensão, requerem de prensas de alta tonelagem, para tal a Gestamp Cerveira dispõem nas suas instalações, duas prensas transfer com capacidade requerida para o projeto, as duas têm mesma força

de prensagem (15000 kN), mas com caraterísticas de entrada do material ligeiramente diferente entre ambas.



(a) Prensa Servo de 15000 kN (b) Prensa Servo-mecânica (PT002) 15000 kN

Figura 7.1: Prensas presente nas instalações da Gestamp Cerveira, com capacidade de prensado para produzir as longarinas [35].

A prensa servo (ver Figura 7.1a) por ser a mais moderna, e ser mais ideal para aços de 3ª geração Ultra High Streght Steel (3G UHSS), é inicialmente a melhor opção para produção das Longarinas. Em relação a PT002 (ver Figura 7.1b) mesmo que dispõem de uma capacidade de prensado ideal, tem a limitação de possuir um alimentador que não permite a entrada de chapas com pré-forma determinada. Segundo [35], os aços de 3ª geração são muito recentes e ainda pouco adotados internacionalmente, dada a dificuldade em moldar componentes com estes materiais, devido ao seu efeito «spring back». A Gestamp Cerveira é pioneira ao nível nacional a produzir componentes com recurso a estes aços inovadores e de elevada performance, considerados o material do futuro da indústria automóvel.

7.1.2 Alinhamento e Fixação dos Moldes

O alinhamento e fixação de moldes é um processo que requer muita precisão, a experiência é um fator crucial nestes tipos de operações. Na Gestamp Cerveira esta operação é feita por profissionais com muitos anos de experiência, que torna este processo mais célere e preciso, importa considerar que este processo por ser muito preciso podem surgir sempre contratempos, por este motivo se trabalha a margem de tempo de forma que se possam superar os eventuais contratempos que surjam no decorrer do processo.

A instalação de uma nova ferramenta requer uma planificação das instalações, tendo em conta aspetos como dimensões, força de prensado que se requer, e outros fatores que podem afetar negativamente o meio fabril, problemas que podem surgir com o novo ciclo produtivo, para isso é importante uma planificação adequada para evitar problemas posteriores. Na Figura 7.2 se observa as dimensões da ferramenta a ser instalada. Normalmente estes são instaladas em prensas já existentes nas instalações da Gestamp Cerveira, sendo

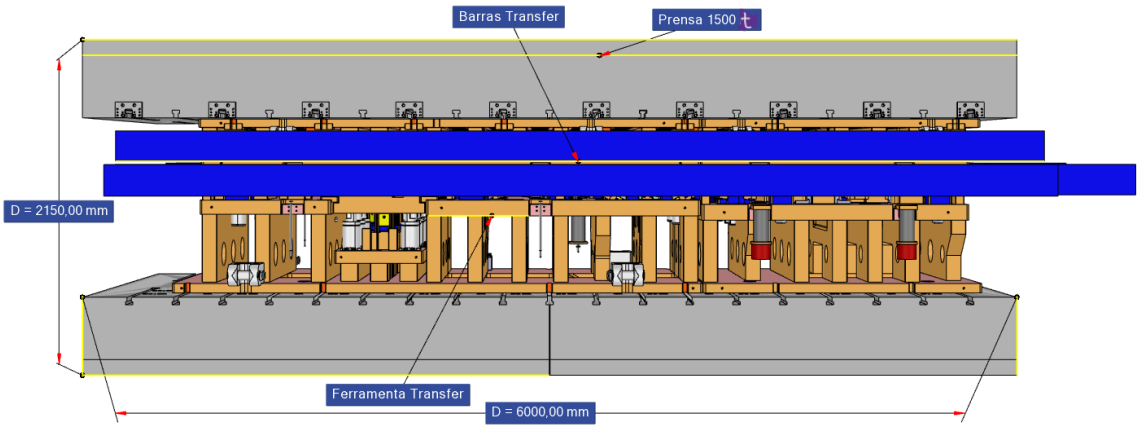


Figura 7.2: Módulo completo da ferramenta a ser instalado.

alteradas segundo as necessidades de produção, com outras que requerem a mesma força de prensado, só em casos de não houver uma prensa que atende as necessidades do novo projeto, é que se instala novas prensas para atender os requisitos do novo projeto, mas para este projeto as instalações já dispõe de prensas requeridas, com a força de prensagem de até 1500 toneladas (ver Figura 7.1).

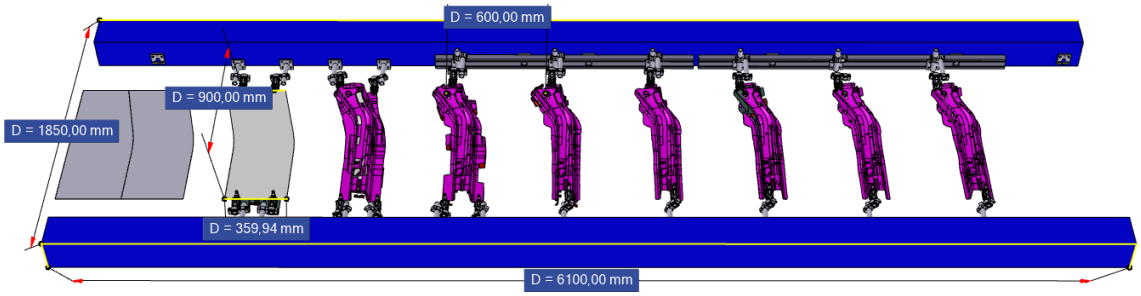


Figura 7.3: Barras transfer.

Na Figura 7.3, se observa o mecanismo de transferência de peças ou barras transfer, em processos de produção de componentes metálicos com ferramentas transfer estes mecanismos desempenham um papel fundamental no avanço das peças desde a primeira etapa até a última, possui entre as duas barras paralelas braços que contém pinças encarregadas em agarrar as peças (ver Figura 7.4), em superfície determinada pelos engenheiros de projetos, estas zonas de sujeição do componente geralmente não sofrem operações constantes para evitar interferência, assim as duas barras efetuam movimentos ascendentes e descendentes, movendo-se de um lado para outro, enquanto os braços movem-se em forma de manivelas avançando as peças de um passo para outro sucessivamente.

7.1.3 Calibração do Equipamento

Como em todo e qualquer processo produtivos, antes da instalação das ferramentas, se requerem uma série de testes visando a garantir a operacionalidade das ferramentas a

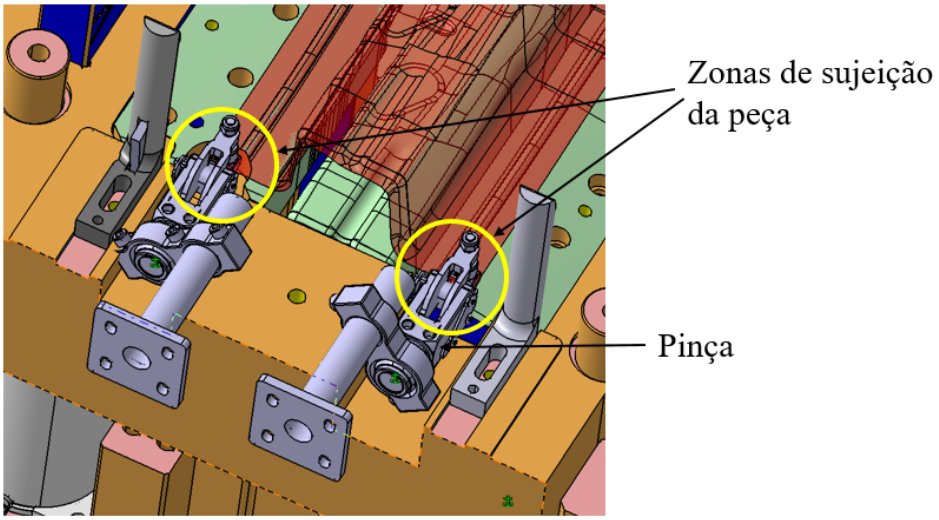


Figura 7.4: Pinça de sujeição da peça na ferramenta.

100%, para tal se efetua uma produção inicial de peças de testes, verificam-se as possíveis irregularidades das ferramentas que posteriormente são transferidas nas primeiras peças.



Figura 7.5: Ferramenta de estampagem para produção das longarinas

Na Figura 7.5, se pode observar a ferramenta de estampagem de uma das Longarinas, ainda nas instalações na empresa encarregada pela sua produção, nessa fase se efetuam os últimos ajustes para proporcionar a qualidade requerida nos componentes, logo após a sua produção, as primeiras peças são enviadas para um controlo minucioso por parte dos profissionais da Gestamp Cerveira. São verificadas as irregularidades e posteriormente se elabora um plano de correções a serem efetuadas, é um processo muito crítico na fase de projeto, porque são verificados todos os detalhes mínimos que possam interferir na

qualidade das peças.

7.2 Execução da Estampagem

A estampagem metálica é um processo de fabricação que envolve a deformação de chapas metálicas para criar peças de diversas formas e tamanhos. Para garantir a qualidade e precisão das peças estampadas, é essencial seguir alguns princípios básicos, como a escolha adequada dos materiais e a definição correta dos parâmetros de processo, como velocidade e pressão de estampagem.

A principal ferramenta de industrialização num processo de estampagem são as prensas (ver Figura 7.1). A prensa é o elemento responsável por fornecer a uma ferramenta a energia necessárias para à conformação plástica de um elemento de chapa plana para obter uma peça com uma determinada forma [21], designada por embutido. Este tipo de máquina ferramenta é caracterizada pela sua força nominal, sendo esta fundamental para o cálculo da rigidez, ou seja, a força máxima que uma dada prensa consegue realizar sem que haja o risco de esta se danificar ou deformar a sua estrutura. Este é um dos fatores que determina qual o tipo de peças, que serão executadas em determinada prensa [56].

Na execução da estampagem metálica, são utilizados materiais metálicos que possuem características específicas, como a ductilidade e resistência, para permitir a deformação sem fratura. Os materiais mais comuns incluem aço carbono, aço inoxidável e alumínio, cada um adequado para diferentes aplicações e exigências de resistência mecânica e corrosão.

Os equipamentos necessários para a estampagem metálica incluem prensas mecânicas ou hidráulicas, ferramentas de estampagem, como matrizes e punções, dispositivos de alimentação de material e sistemas de controlo de processo. A escolha correta e manutenção adequada desses equipamentos são fundamentais para garantir a eficiência e precisão do processo de estampagem.

7.2.1 Ciclo de Estampagem

Os processos de estampagem dos componentes automóveis consistem em várias etapas, começando desde a preparação da matéria-prima, até a produção em séries dos primeiros componentes. Para que a produção se efetua sem contratempo, se requer uma preparação cuidadosa de todos os fatores envolvidos diretamente no setor de produção (capital humano e condições técnicas).

A preparação dos componentes metálicos é a primeira etapa do processo de estampagem de peças automóveis, no caso das longarinas, um bobina de aço cortada para dimensão dos componentes (largura da chapa para produção das longarinas 900 mm),

é fundamental, para produção das primeiras peças ou peças de testes das ferramentas. Nesta etapa, os metais são selecionados e preparados para a estampagem. Isso envolve a limpeza e o tratamento das chapas metálicas para remover qualquer impureza e melhorar a aderência dos revestimentos aplicados posteriormente. Além disso, o dobramento e o corte dos metais são realizados para obter as dimensões corretas das peças, garantindo a precisão e a qualidade do produto final.

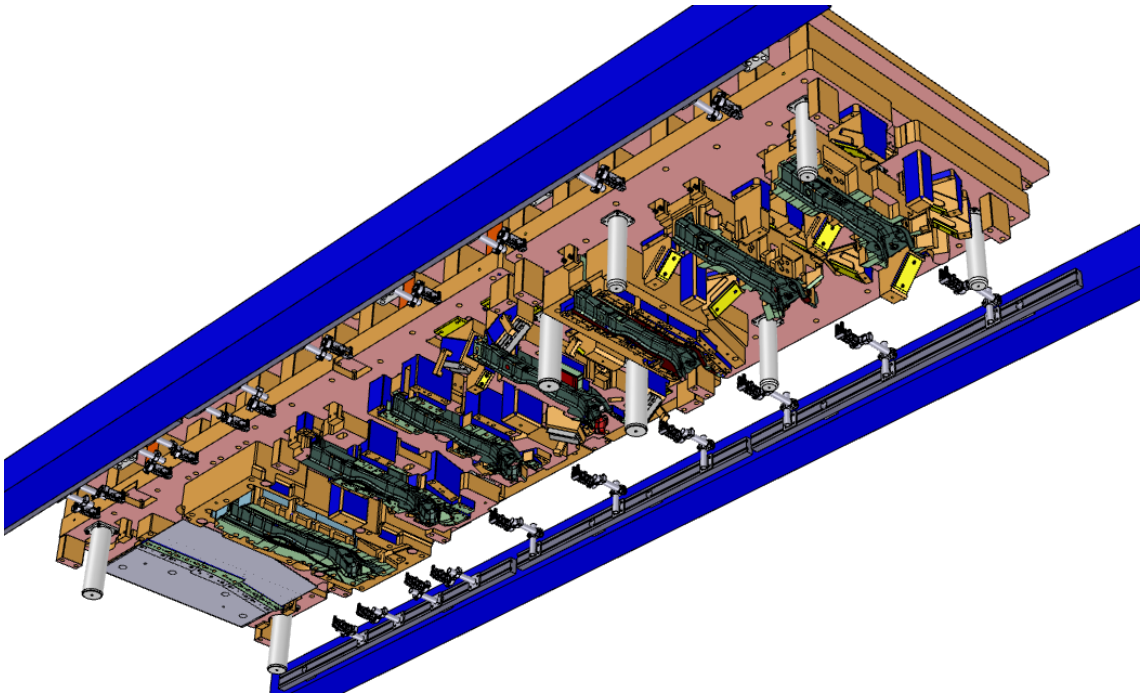


Figura 7.6: Módulo superior da ferramenta de estampagem da Longarina esquerda.

A estampagem de componentes metálicos para automóveis com os padrões de qualidade requerido, é o principal objetivo do processo. Nessa fase, as chapas metálicas

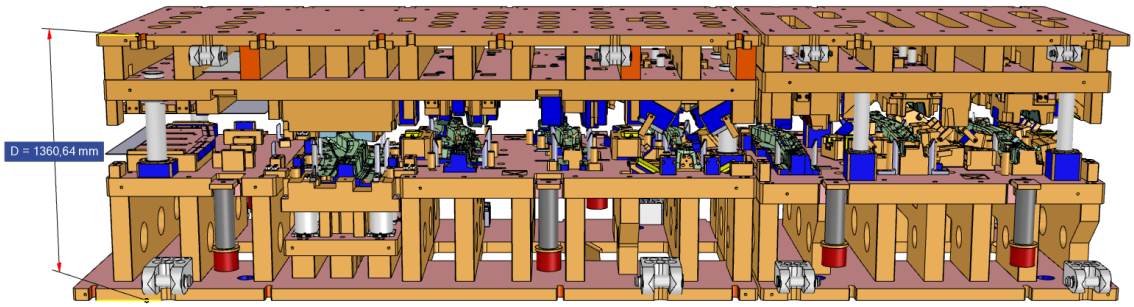


Figura 7.7: Módulo superior da ferramenta no ponto médio (Ferramenta aberta).

preparadas são submetidas a altas pressões por meio de ferramentas de estampagem de alta produção. A pressão transferida desde as prensas para as ferramentas molda o metal conforme as especificações do projeto, criando as formas e contornos desejados das peças automóveis. Durante a estampagem, a chapa metálica pode ser dobrada, esticada, perfurada e curvada, para obter o resultado desejado. Essa etapa exige precisão e experiência

para garantir a correta formação das peças e evitar defeitos ou falhas.

Na Figura 7.6, se observa o módulo superior da ferramenta de estampagem, como se pode observar este componente é maioritariamente formado por cavidades (matrizes) bem como alguns punções cujas cavidades opostas estão no módulo inferior da ferramenta. Este ciclo de produção foi definido segundo a simulação efetuada, cuja abordagem mais detalhada foi descrita no capítulo anterior.

O ciclo de estampagem dos componentes começa de forma mais precisa, com a ferramenta aberta, dessa forma a chapa entra e sofre a primeira operação, no primeiro golpe que ferramenta realiza ao descender. Esta operação corta a pré-forma da chapa como mostra o primeiro passo da operação na Figura 7.10 (ilustração a esquerda), este ciclo

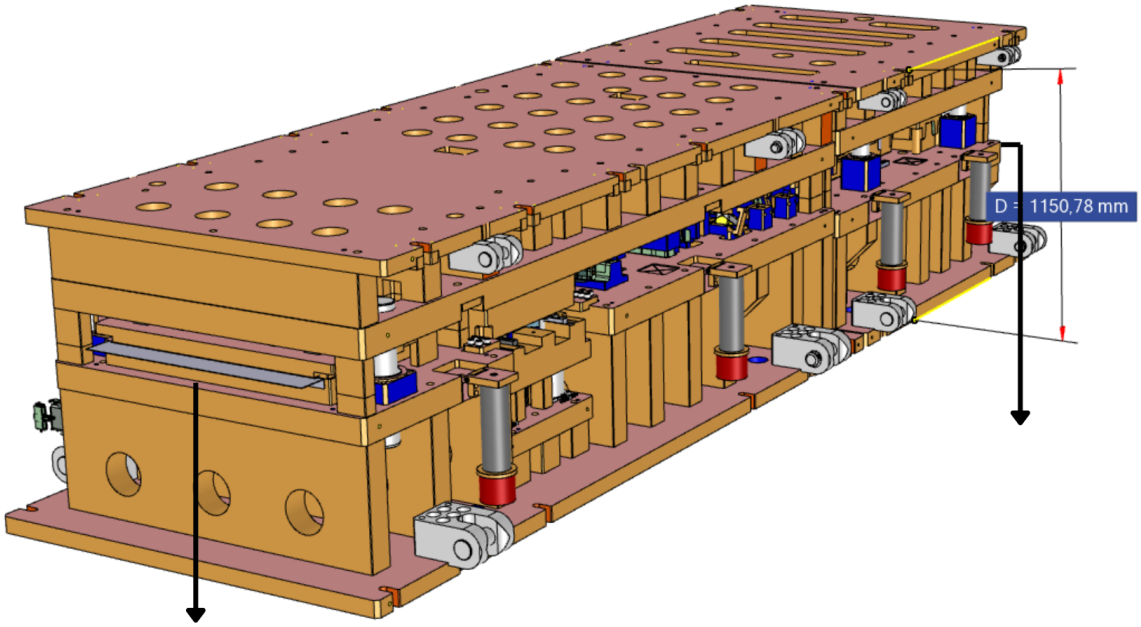
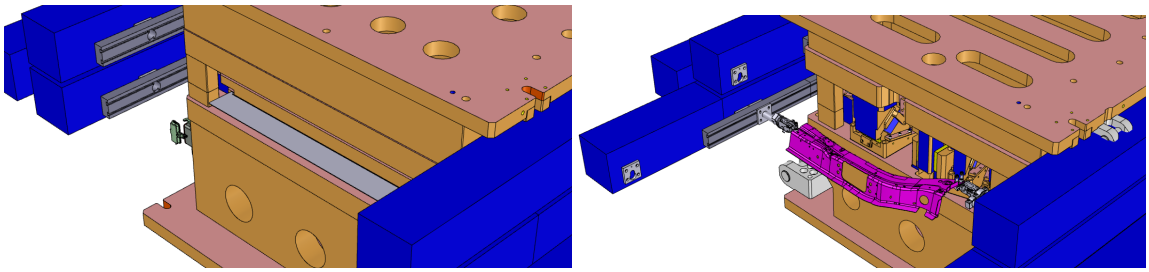


Figura 7.8: Módulo superior da ferramenta no ponto inferior (Ferramenta Fechada).



(a) Entrada da matéria-prima (Chapa).

(b) Saida do componente (final do ciclo produtivo).

Figura 7.9: Início e o final do processo de produção da peça.

de ascendência e decadência (Figura 7.7 ascendência do módulo superior e Figura 7.8 descendo o módulo superior) da ferramenta se repete até a última etapa de produção obtendo se a peça final (ver Figura 7.11 e 7.12), enquanto o módulo inferior da ferramenta mantêm-se fixo aos apoios de uma superfície rígida, de modo absorver as elevadas pressões exercida pela prensa.

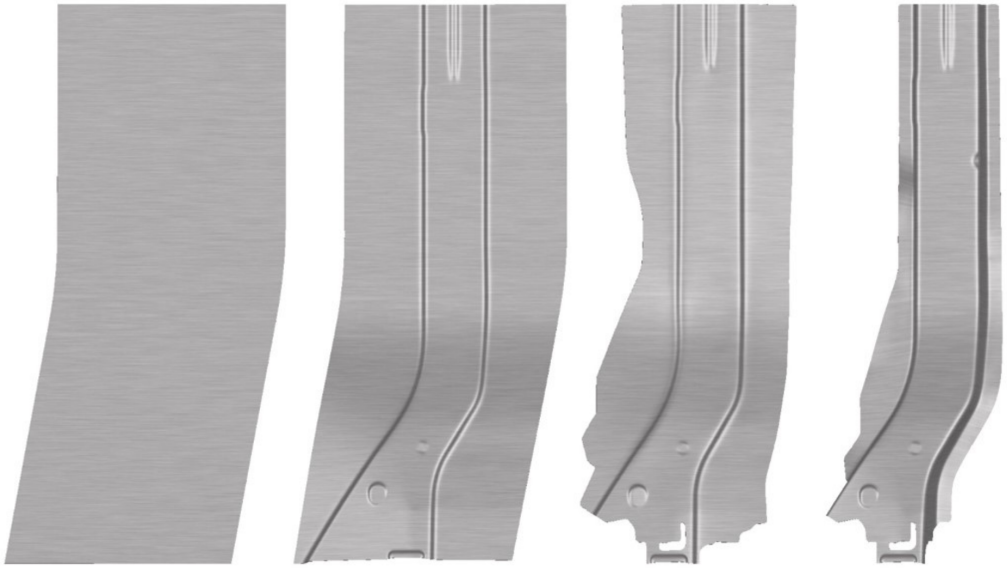


Figura 7.10: Passos de produção da longarina direita resumida em 4 etapas.

O movimento da ferramenta é sincronizado com o avanço da chapa, e o valor deste avanço se observa na Figura 7.3 a dimensão do passo da ferramenta (600 mm) que representa a separação entre uma operação e outra, já na Figura 7.10, podemos observar que a primeira operação de corte de chapa com as seguintes dimensões, 900 mm de comprimento e 359,94 mm de largura (ver as dimensões na Figura 7.3), este último valor representa a longitude de avanço da chapa no alimentador da ferramenta por cada golpe dado e o 900 mm representa a largura da bobina de chapa que entra na ferramenta.

7.2.1.1 Primeiras Peças Produzidas

As primeiras peças produzidas, representam o índice de eficiência que projeto da construção da ferramenta alcançou, uma primeira peça com pequenos desvios, sem fissuras e com superfície uniforme representa um grande passo, para o êxito do projeto, no obstante a isso, há sempre desafios para superar, porque imperfeições na primeira tentativa do processo de produção de componentes metálicos são sempre esperados.

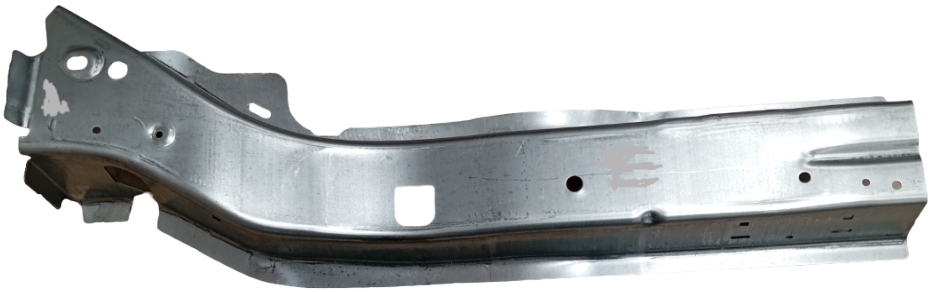


Figura 7.11: Longarina direita

Uma vez que as peças passam pelo controlo de qualidade, se verifica todas as irre-

gularidades. No caso da longarina direita (Figura 7.11), as primeiras peças apresentaram melhor performance, fruto da sua geometria menos complexa em relação a outra, como se observa, a superfície está uniforme, mas com alguns aspetos a melhorar. Como era de se esperar, o springback foi um dos grandes problemas que as duas peças apresentaram.



Figura 7.12: Longarina Esquerda

Como previam os resultados obtidos na simulação do processo produtivo, a longarina esquerda (Figura 7.12), foi a que mais irregularidades apresentou nas primeiras peças, neste componente verificaram-se algumas anomalias como, desvio de superfície originada pelo springback, algumas partes do componente, como a superfície de abas da peça, com zonas que demonstram que a chapa não teve um escoamento adequado originado inúmeros riscos na superfície da aba do componente. Estes aspetos verificados, são fundamentais para uma proposta de melhoria substancial, que podem proporcionar uma nova abordagem da ferramenta, ajustando detalhes mínimos que podem propiciar a obtenção de uma peça com tolerâncias requeridas.

7.2.2 Análise de Eficiência do Processo

A análise de eficiência do processo produtivo, corresponde a uma etapa do processo onde os resultados obtidos são comparados com os valores previsto durante o processo de simulação, nesta fase é prevista a discrepância entre o modelo computacional e o modelo real da peça produzida. Sendo os resultados da medição do componente real serem obtidos por uma Máquina de Medição por Coordenadas (MMC). Como em todos os processos de medição, existem sempre tolerâncias associadas ao processo de medição, é importante considerar a tolerância que uma MMC introduz no processo de medição do componente.

Uma máquina de medição por coordenadas (MMC) é um equipamento utilizado para medir a geometria de peças de forma precisa e repetitiva. Usando um sistema de coordenadas tridimensional, a MMC pode calcular as dimensões e a posição de pontos específicos numa peça. Geralmente equipada com um braço de medição e uma sonda, a MMC é essencial para garantir a qualidade e a precisão das peças fabricadas, sendo amplamente utilizada na indústria automóvel, aeroespacial, eletroeletrónica, entre outras.

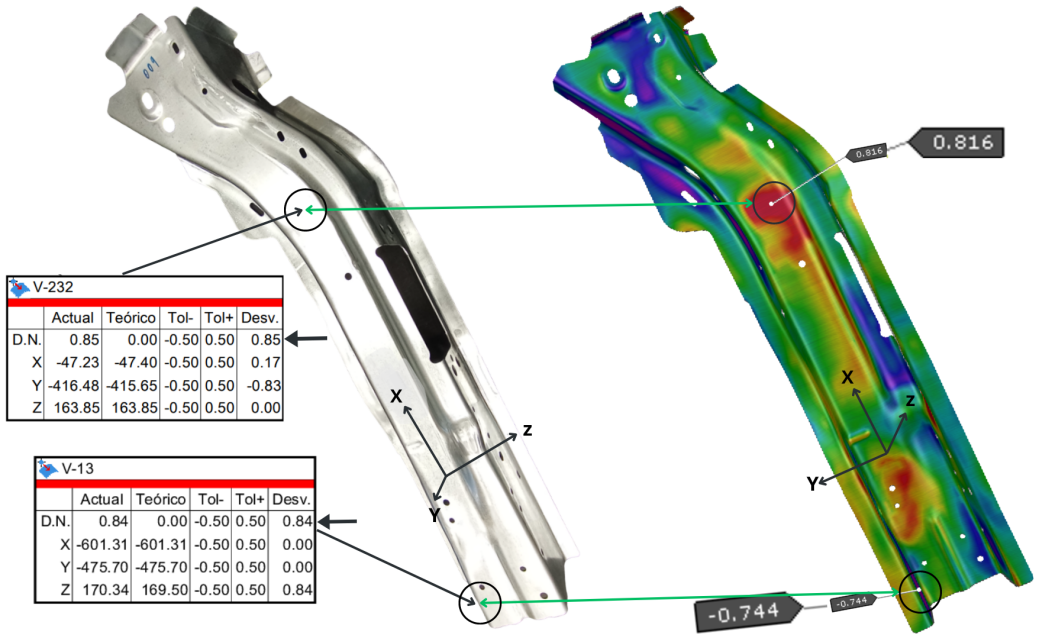


Figura 7.13: Comparação dos resultados obtidos na MMC e os resultados da simulação para o springback na Longarina Esquerda

A Gestamp Cerveira dispõem de uma MMC moderna, com alta precisão que proporciona uma tolerância e nível micrómetro, desta forma podemos considerar que os erros associados ao processo de medição do componente tendo em conta o fator humano e a tolerância da MMC, sejam menores que 10 μm.

Tabela 7.1: Equivalência dos sistemas de coordenadas da MMC e AutoForm

L. Esquerda		L. Direita	
C. MMC	C. Autoform	C. MMC	C. Autoform
X	X	X	-Y
Y	Z	Y	-Z
Z	-Y	Z	X

Na Figura 7.14, a direita podemos observar os resultados dos desvios da posição de referência da geometria do componente ou springback obtidos no AutoForm, e a esquerda temos os resultados da medição obtidos numa máquina de medição por coordenadas (MMC). Uma etapa que corresponde ao controlo de qualidade. Tendo em conta que se efetuaram as medições em inúmeros pontos, tomei apenas 2 pontos onde os resultados do AutoForm previam maiores desvios seja para dentro e fora da peça, ou seja, os valores extremos previstos pelos resultados do AutoForm, assim o ponto da parte superior da Figura como o valor de 0.816 mm, representa o maior valor obtido para o desvio da peça para fora, e -0.744 mm, maior valor do desvio da superfície da peça para dentro. Tendo em consideração os sistemas de coordenadas utilizadas para as medições na MMC e o sistema de coordenadas do Autoform, estavam em posições diferentes (ver as equivalências na Tabela 7.1), considerei a comparação de valores absolutos, porque os sinais apenas

representam o sentido pelo qual os desvios estão direcionados num eixo de coordenada, e o desvio nominal corresponde ao vetor que une 2 pontos desviados de eixos diferentes, no sistema de coordenada.

Figura 7.14, se observa os resultados obtidos para os dois modelos, em análise da longarina direita, estes resultados demonstram o quanto o modelo computacional se aproxima do modelo real, existe uma discrepância inferior a 14%, entre os dois modelos.

Entender o efeito do "springback"é crucial para garantir que as peças conformadas mantenham a precisão dimensional desejada. Ao combinar simulações computacionais com medições experimentais, podemos avaliar de forma confiável as previsões de "springback". Isso permite fazer ajustes no processo de conformação para reduzir o retorno elástico, garantindo que as peças finais atendam às especificações necessárias.

Dos resultados obtidos podemos prever a discrepância média entre os dois modelos mediante a equação 7.1.

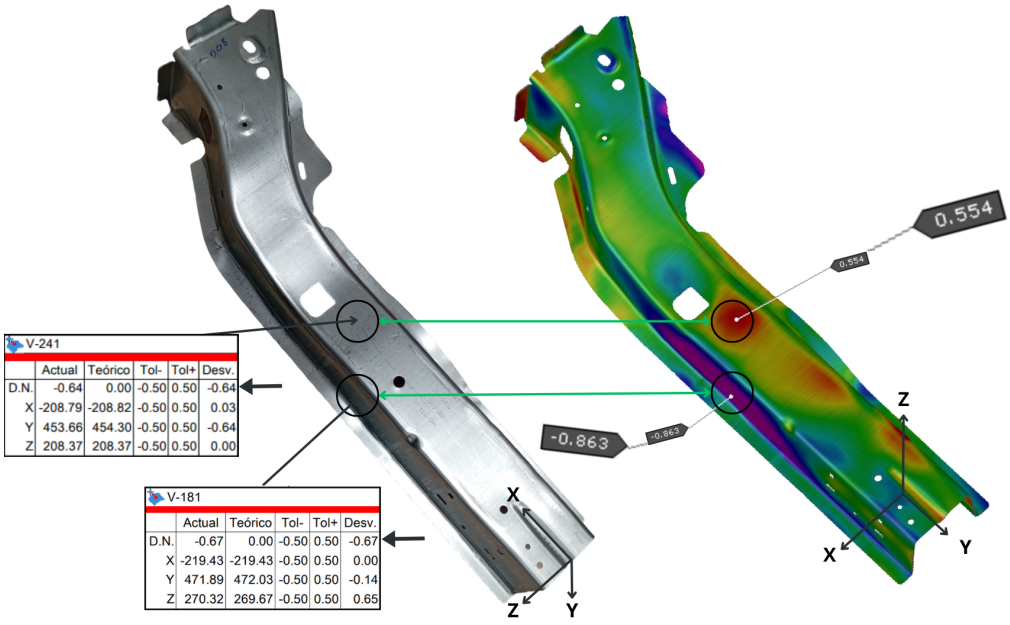


Figura 7.14: Comparação dos resultados obtidos na MMC e os resultados da simulação para o springback na Longarina Direita

$$\bar{d} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(|DN_{real} - DN_{siml}|) \tag{7.1}$$

Onde:

$\bar{d}$- discrepância média;

n - numero de pontos;

DN_{real} - desvio nominal no componente real;

DN_{siml} - desvio nominal no componente simulado.

Tabela 7.2: Comparação dos desvios obtidos no AutoForm e os da MMC.

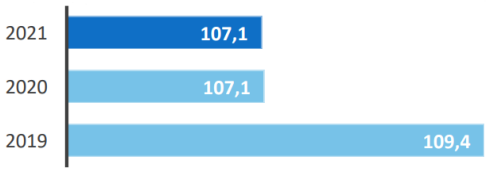
Pontos	**MMC** (DN_{real})	**AutoForm** (DN_{siml})	$\bar{d}$(mm)
n_1 - L. Esquerda	0,85	0,816	0,065
n_2 - L. Esquerda	0,84	0,744	
n_1 - L. Direita	0,64	0,554	0,14
n_2 - L. Direita	0,67	0,863	

7.2.3 Gestão de Resíduos e Rebarbas

A Gestão de Resíduos Industriais é de extrema importância para garantir a sustentabilidade ambiental fruto das operações realizadas nas indústrias, por representar um aspeto crucial para a preservação do meio ambiente e para o cumprimento de normas regulatórias. Por meio de práticas eficientes de gestão ambiental, é possível reduzir impactos negativos, melhorar a imagem da empresa perante a sociedade e otimizar recursos, contribuindo para um desenvolvimento mais sustentável e responsável.

A Gestão de Resíduos na Indústria vai além do cumprimento de obrigações legais, relacionando também aspetos económicos e sociais. A gestão eficiente dos resíduos pode gerar economia de recursos, redução de desperdícios e o aumento da eficiência produtiva. Além disso, a preocupação com o destino adequado dos resíduos demonstra o compromisso da empresa com a responsabilidade ambiental, o que pode representar um diferencial competitivo no mercado atual, cada vez mais exigente e consciente com aspetos ambientais.

A Gestamp Cerveira tem na sua agenda o compromisso com o meio ambiente, para isso os resíduos gerado pelos processos de produção, na sua maioria são reciclados, sendo maioritariamente sucatas (restos de metais descartados no processo produtivo), estas são reaproveitados por outras empresas e posteriormente enviados para siderúrgicas, tendo como seu fim útil, em sectores como construção civil e outros.

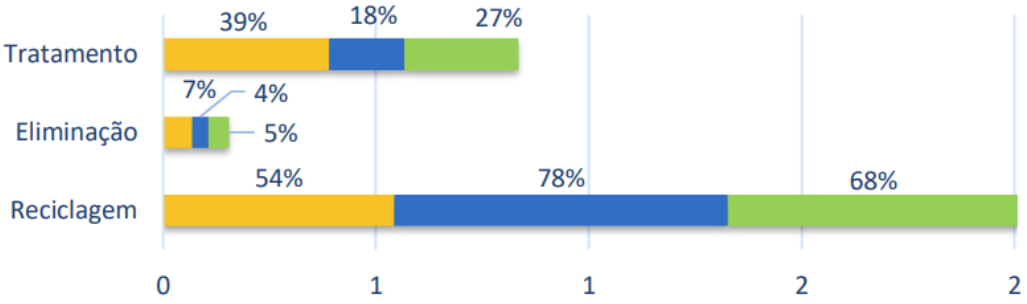


	2019	2020	2021
Sucata de aço (Processo) (t)	25742,0	24013,7	24329,2
Sucata de aço (Processo) (t)/VAB (%)	109,4	107,1	107,1

Figura 7.15: Sucata de Aço (Processo) (t)/VAB (%) [35].

A sucata de aço resulta das aparas do processo de estampagem, peças defeituosas (mal estampadas ou mal soldadas) e componentes metálicos que entram no processo produtivo. Este tipo de sucata, aumenta proporcionalmente com o incremento de produção. Tendo em conta o VAB, em 2021 o rácio da sucata de aço manteve-se face a 2020. Em valores absolutos produziu-se mais 1% de resíduos de sucata de aço do que em 2020 e menos 5% do que em 2019 [35].

A decisão do destino a conferir aos resíduos é da responsabilidade da Gestamp Cerveira, podendo os resíduos não perigosos ser eliminados ou valorizados. A seguir, apresenta-se a distribuição percentual (sem sucata do processo), consoante o destino que foi dado aos resíduos no triénio 2020-2022 [35].



	Reciclagem	Eliminação	Tratamento
2020	54%	7%	39%
2021	78%	4%	18%
2022	68%	5%	27%

Figura 7.16: Destino dos resíduos em (%) [35].

Na Figura 7.16, apresenta os principais destinos dos resíduos produzidos na Gestamp Cerveira, entre elas podemos destacar os principais produtos que vão para reciclagem (sucata ferrosa, a sucata de alumínio), tratamento (óleo usado, lamas de maquinagem), eliminação (colas/vedantes contendo solventes orgânicos).

A Gestamp Cerveira tem implementado um Sistema de Gestão Ambiental de acordo com a NP ISO 14001 e Regulamento (EU) 2018/2026 de 19 de dezembro [35].

O âmbito do registo atual da Gestamp Cerveira no EMAS é a produção de peças por estampagem metálica, montagem e soldadura de conjuntos metálicos, para veículos de passageiros, veículos comerciais ligeiros e veículos industriais [35].

O Sistema de Gestão Ambiental encontra-se implementado e certificado nas instalações da Gestamp Cerveira desde 2004, permitindo desenvolver e implementar a política ambiental e objetivos, tendo em consideração os aspetos ambientais significativos, diretos e indiretos, bem como as obrigações de conformidade legal [35].

O Sistema de Gestão Ambiental é revisto anualmente, verificando se o mesmo se adequa às condições fabris atuais, potenciando sempre a melhoria contínua e as melhores práticas de gestão ambiental (MPGA) [35].

7.3 Controlos de Qualidade

Entende-se por controlos de qualidade, todos os controlos realizados desde o início à preparação da produção, até ao fim da mesma, de maneira a garantir a estabilidade do processo, assim como a qualidade do produto produzido [35].

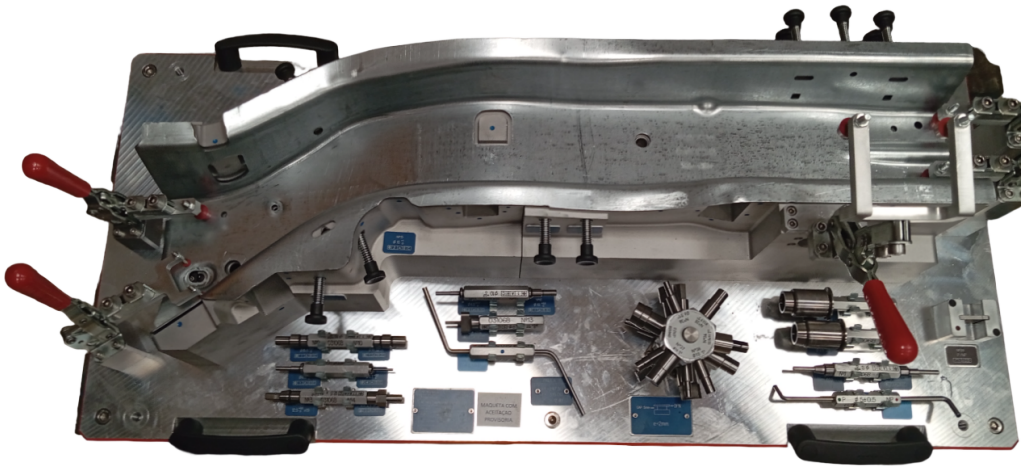


Figura 7.17: Maquete de controlo de qualidade para Longarina direita.

O controlo de qualidade é fundamental para as empresas atinjam os padrões mais elevados a nível de eficiência produtiva.

No processo de estampagem de componentes metálicos, o controlo é efetuado mediante maquetes de controlo de qualidade, é apenas uma de muitas técnica para controlo dimensional de peças produzidas, normalmente segundo o tipo de peça produzida, se define um ciclo produtivo, para as peças passarem por inspeção, esta inspeção passa por submeter a peça numa maquete (ver Figura 7.17), onde no componente é verificado as tolerâncias dimensionais, mediantes pontos de controlos, desta forma se controla a qualidade das peças produzidas. O controlo permite seguir a ordem de produção para encontrar de onde surgiu os problemas na peça, caso estes surgem dentro do ciclo produtivo. Por



Figura 7.18: Controle de qualidade de componentes em produção.

exemplo, se uma peça estiver com desvios nas tolerâncias dimensionais, no controlo de qualidade numa maquete, se revê o lote de peças desta série de produção para encontrar de onde começou o defeito, desta forma todas as peças produzidas devem passar por ajustes, caso os desvios sejam mínimos, e em casos mais severos as peças são descartadas em

forma de sucata para reciclagem.

Na Figura 7.18, observa-se o controlo de qualidade de um componente em produção. O controlo é baseado num processo digital na qual, um software armazena um ficheiro 3D para comparação com a peça produzida. Quando a peça chega ao final do ciclo produtivo, um braço robótico submete a peça num scanner, para comparar as dimensões da peça e verificar a posição dos casquilhos soldados no componente. Se os casquilhos estão na posição correta, com as dimensões contida no ficheiro 3D baseado nas tolerâncias requeridas, e se todos os pontos medidos estiverem dentro da tolerância pretendida, a peça avança para outros processos posteriores (logística), mas se a peça estiver com apenas um ponto fora da tolerância, então ela não passa para fase posterior, logo é descartado e vai para zona de peças com defeitos para análises e tratamentos posteriores (retificação ou sucata).

7.3.1 Manutenção Preventiva das Máquinas

A manutenção preventiva na indústria é considerada uma atividade de extrema importância, não só para garantir o normal funcionamento das máquinas, mas também para prolongar o ciclo de funcionamento das mesmas, na Gestamp Cerveira as ferramentas de estampagem, prensas e outros equipamentos industriais são tidos como os de maior atividade, por isso, na agenda da manutenção são tidos como os itens que mais requerem intervenções de forma periódica, para tal são elaborados planos de manutenção destas máquinas, pois ajuda a evitar falhas inesperadas e interrupções na produção. Ao realizar inspeções regulares e substituição de peças desgastadas, é possível garantir a operação contínua e eficiente das máquinas, contribuindo para a redução de custos com reparos de emergências e o incremento do período útil dos equipamentos.

Os benefícios da manutenção preventiva das máquinas de estampagem são inúmeros, incluindo a redução do tempo de inatividade, a melhoria da qualidade dos produtos, a segurança dos operadores e a otimização do desempenho operacional. Além disso, a manutenção preventiva ajuda a manter a conformidade com as normas de segurança e a minimizar os riscos de acidentes de trabalho.

A falta de manutenção preventiva nas máquinas de estampagem em geral pode acarretar consequências graves, como paradas não programadas, redução da produção, danos aos equipamentos, e em situações extremas, acidentes pessoais. Além disso, a falta de manutenção adequada pode resultar também em custos significativos não planificados.

7.4 Pós-Processamento em processos de produção de componentes metálicos

Nos processos de produção de componentes metálicos na indústria automóvel, o pós-processamento corresponde as etapas posteriores ao processo de produção do componente, uma vez que as peças são aprovadas pelo controlo de qualidade na Gestamp Cerveira e certificada pelo cliente da Gestamp (destinatário final dos componentes). Começa uma fase de processos relacionados com a logística e transportes dos componentes, até as instalações do cliente da Gestamp Cerveira, nesta fase é importante considerar o volume de peças a serem enviadas e como são armazenadas, destacar que para diferentes geometrias de peças, como estes devem ir organizados varia segundo alguns critérios, para tal a equipa técnica de produção deve passar as devidas orientações aos operários de campo, porque a questão não é só o volume que as peças ocupam quando forem mal organizadas, mas também, uma má organização dos componentes pode eventualmente ocasionar colisão entre os componentes no momento de carga ou descarga, originado defeito nos componentes.

7.4.1 Logística e Transporte

A logística pode ser definida como o processo de planeamento, implementação e controle do fluxo eficiente e económico de matérias-primas, inventário em processo, produtos acabados e informações relacionadas, desde o ponto de origem até o ponto de consumo, com o objetivo de atender aos requisitos dos clientes [7].

A logística de produção refere-se ao conjunto de atividades necessárias para garantir que os materiais sejam fornecidos na quantidade certa, no momento certo, no local certo e com a qualidade requerida para o processo de produção. Já a logística de distribuição lida com o movimento de produtos acabados do ponto de produção até os consumidores finais [11].

A Gestamp Cerveira, dispõem de dois centros logísticos, como mostra a Figura 1.8, um para peças pré-terminadas e outra para peças terminadas e prontas para o envio, no centro logístico das peças pré-terminadas são armazenadas as peças que vão passar por operações posteriores, visto que alguns componentes vêm de outras fábricas, e são ensamblados com outros componentes produzidos na Gestamp Cerveira e logo se produz o conjunto final, os componentes passam por outros processos que lhes conferem a forma final, posteriormente passam pelo controlo de qualidade e logo vão para o centro logístico de peças validadas e prontas para o envio.

As peças validadas são armazenadas (ver Figura 7.19), por um período determinado até que estas são enviadas para os respetivos clientes, realçar que a produção de peças



Figura 7.19: Armazenamento de peças validadas no centro logístico.

é feita sob medida da procura dos clientes, implica isso dizer que o volume de peças produzidas varia segundo as necessidades dos clientes, isso não só evita que as peças ficam retidas no centro logístico, mas também facilita o processo de carga aos camiões visto que se evita o aglomerado de peças que possa inviabilizar o processo de carga.

O transporte é um dos componentes mais críticos da logística, representando uma significativa parte dos custos logísticos totais. A sua importância se deve à necessidade de movimentar bens de um ponto a outro, de maneira segura e eficiente, impactando diretamente a competitividade e a satisfação do cliente [54].

O transporte das peças desde o centro logístico da Gestamp Cerveira até as instalações do cliente, é uma responsabilidade dos clientes da Gestamp Cerveira, para tal o cliente da Gestamp dispõe de meios próprios para transportar as peças, bem como também existe empresas especializadas em transportes de componentes metálicos que se encarregam de transportar os componentes até ao destinatário final. Realçar que os principais clientes da Gestamp Cerveira localizam-se num raio de aproximadamente 1000 km em relação à fábrica, pelo que a via mais utilizadas é a terrestre, e a preocupação com as emissões de CO_2 é cada vez mais questionada, para mitigar estes efeitos, é frequente a utilização de camiões movidos a gás natural licuado (GNL), estes podem cobrir uma distância de até 900 km por dia e oferecem uma redução anual de até 57 toneladas por ano de emissões de CO_2 em comparação aos transportes comum movidos a diesel.

7.5 Implementação de Melhorias Tecnológicas

Em todos processo tecnológicos, a eficiência e inovação, são sempre procurados, tendo em conta desenvolvimento de novos materiais, a corrida pela busca de novas formas de produção é frenética, para tal a implementação de melhorias, é sempre uma forma de se manter na competitividade do mercado global de uma indústria que se atualiza constantemente dia após dia.

A implementação de softwares de simulação representa um grande passo nos processo de produção de componentes metálicos, no obstante a isso é necessário que a implementação destes softwares sejam feitas gradualmente, porque apesar de serem muito importante em termos de análises dos processos produtivos, ainda representam um custo relativamente alto para as empresas.

O uso de inspeções automatizadas na indústria, vem se tornando cada vez mais uma solução interessante para a análise de conformidade de peças. Em processos de manufatura, devem ser avaliadas: tolerâncias dimensionais, tolerâncias geométricas, ajustes, incertezas e defeitos de fabricação. Com a evolução e redução dos preços, os sistemas digitais associados a inteligência artificial, torna-se atrativo investir em sistemas de Visão Computacional, para a realização de medições e inspeções. Sistemas desse tipo podem oferecer exatidão e repetibilidade em medições sem contacto, especialmente por eliminarem aspetos como subjetividade, fadiga, lentidão e custo associados à inspeção humana. Em sistemas de medição por imagem automatizados, o principal desafio consiste em saber combinar a tecnologia com uma aplicação específica de maneira económica e com a qualidade requerida.

A implementação de melhorias tecnológicas nos processos de conformação metálica na indústria é essencial para manter a competitividade e a qualidade da produção. Investir em Visão Computacional, automação e simulação computacional oferece benefícios significativos, como aumento da eficiência, melhoria da qualidade e redução de custos. Com um planeamento adequado, treinamento e integração eficazes, a empresa pode aproveitar ao máximo essas tecnologias emergentes.

Para implementar essas tecnologias, é essencial um planeamento detalhado. Isso inclui a análise das necessidades específicas das empresas, a definição de objetivos claros e a alocação de recursos adequados.

7.6 Valorização Económica

Para execução do projeto de produção das longarinas é importante considerar fatores que influencia diretamente nos custos de produção, um fator preponderante a considerar são os custos da matéria-prima (Aço).

No momento da redação deste relatório o preço ronda em torno de 1100 €/Tn, a influência do preço da matéria-prima vai além dos componentes produzidos, o custo das ferramentas também sofrem devido à flutuação no preço da matéria-prima, a ferramenta é constituída por mais de 95% de aço na sua estrutura. O principal fornecedor da matéria-prima é o mercado asiático (China), bem como existem outros mercados a nível da Europa, pelo que, os custos com transporte da matéria-prima é outro fator a considerar.

Vejamos o caso dos 2 componentes, cada componente, pesa arredor de 3,5 kg, tendo em conta o preço da matéria-prima por toneladas podemos determinar que só em custo por

matéria-prima, para cada componente produzido rondam a volta dos 3,85 €, associado ao fator material podemos adicionar ouras variáveis como a mão de obra, custo com a simulação (Licença do Software e outros custos associados), energia necessária para cada golpe, uma vez que para produzir os componentes são necessários 8 e 9 golpes respetivamente. Tendo em conta a todos estes fatores envolvidos no processo de produção podemos estimar um preço de aproximadamente 7 €, por cada componente.

Por se tratar de um cálculo aproximado, o valor do componente, é importante destacar que o volume de peças que se planeia produzir tem um impacto significativo no preço do componente. Para casos que o volume de produção é menor (por ex: menos 10 mil peças), isso implica um impacto significativo no custo da ferramenta visto que, por ser menor o volume de produção, é essencial que o preço do componente seja mais elevado para compensar os custos associados a construção da ferramenta.

Em casos de altos volumes de produção (ex: volumes superiores a 10 mil peças), o custo da ferramenta tende a ser compensado por se tratar de uma produção a larga escala, nestes casos o preço do componente tende a ser inferior, visto que o volume de produção proporciona uma tendência positiva da recuperação do capital investido.

Tabela 7.3: Fatores aproximados que podem influenciar o custo da peça.

Matéria Prima	Ferramenta	Mão de obra	Simulação	Energia	Outros Custos
50-60%	15-20%	10-15%	5-10%	5-10%	2-5%

Na Tabela 7.3, apresenta a distribuição aproximada dos custos que influenciam diretamente o preço de um componente metálico estampado a frio. A matéria-prima representa grande parte dos custos de produção como já mencionado anteriormente. Os custos da ferramenta incluem a sua produção, manutenção e substituição, custos estes que podem ser muito significativo em caso de produção a grande escala e alta precisão. A mão de obra inclui salários, de toda a equipa envolvida, tendo em conta que a experiência dos membros da equipa pode influenciar de certa maneira esses custos. Custos que envolvem a simulação estão diretamente ligados a utilização do software (licença), desenho e testes necessários para o desenvolvimento e otimização do processo de produção. A energia é outro fator a considerar visto que se trata de uma produção numa prensa mecânica de alta tonelagem (1500 Tn), que requer uma quantidade significativa de energia para uma operação de alta performance. Outros custos podem incluir transporte e logística, administração e outros custos indiretos envolvidos no processo.

Tendo em conta o preço da matéria-prima no mercado internacional, e fatores envolvidos na produção da ferramenta, se pode estimar um preço de 400 mil € para cada ferramenta produzida, com as dimensões das ferramentas das longarinas. Sabendo que os projetos são adjudicados para uma produção contínua ao longo de 10 anos. Isso implica que o capital investido deve ser recuperado dentro desse período. A maior volume/ano, de produção, menor será o período de recuperação do capital investido.

8 Conclusões

Através do presente estudo foi possível compreender, de forma prática e detalhada, o processo de industrialização de duas Longarinas estampadas numa chapa aço de alta resistência (DP800) com 2 mm de espessura, pelo processo de conformação metálica em estampagem a frio. A integração de teorias avançadas de engenharia permitiu identificar os desafios envolvidos no processo de industrialização, bem como estratégias para superação dos mesmos.

A abordagem do método dos elementos finitos, através do software AutoForm, permitiu explorar os benefícios da sua utilização para eficiência dos processos produtivos, bem como os desafios associados a sua implementação no setor da conformação metálica. O uso do Autoform, não só permite redução de forma considerável o período de execução do projeto, através da análise detalhada dos processos de produção, por intermédio da sua interface gráfica é possível prever problemas e estratégias para superação, tendo a possibilidade de se fazer várias abordagens do processo de produção de forma otimizada, para uma posterior tomada de decisão, do processo que pode apresentar melhores resultados.

A integração da indústria 4.0 na conformação metálica, por meio de simulações computacionais, proporcionou a este estudo uma visão da maximização dos processos produtivos, bem como os avanços do sector, hão permitidos que a produção de componentes metálicos com geometrias complexas e materiais cada vez mais resistentes, sejam problemas que gradualmente vão ficando para o passado. Através simulação computacional se pode prever com precisão o comportamento da chapa durante a conformação. Os resultados obtidos da simulação foram fundamentais para otimizar o processo de produção, prever deformações, tensões, variação de espessura da chapa e o springback, minimizar custos através da redução de testes e ajustes de ferramentas.

Durante todo o processo de industrialização se identificou os principais problemas inerentes ao processo. Alguns problemas do processo de produção das Longarinas, residiram nas constantes variações no preço da meteria prima, bem como desafios técnicos e operacionais ocasionadas pelos desvios nas primeiras peças produzidas devido à alta resistência do material de fabrico, que conduziram a um processo de análise cuidadoso para proporcionar tolerâncias requeridas. A implementação da compensação geométrica para o ajuste de ferramentas, permitiu obter uma visão mais clara, para superação dos

problemas ocasionados pelos desvios encontrados nas primeiras peças.

Se avaliou como os processos de conformação metálica por estampagem a frio afetam positivamente na produção de componentes metálicos e no meio ambiente, através da alta produção, custos reduzidos por peça, baixo consumo energético em comparação com outros métodos de produção, acabamento superficial uniforme, não necessitando de pós-processamento, boa resistência dos componentes devido à conformação que causa o encurtamento do material, uniformidade das peças, evitando-se o controlo de qualidade constantemente. Mas também foram identificados os desafios e limitações da indústria, como a falta de investimentos em equipamentos de alta tecnologia, bem como as principais mudanças na procura do mercado e nos requisitos de segurança, exigem adaptação da indústria e na forma como os processos são realizados.

A pesquisa enfatizou a importância da qualidade na produção de componentes metálicos e como a conformação metálica, combinada com a simulação computacional, pode proporcionar produtos finais que atendam os requisitos rigorosos da indústria. A introdução do conceito de fábrica inteligente e automação de processos, foi explorada como uma das via para aumentar a eficiência e competitividade no sector automóvel.

Os resultados obtidos na simulação e a sua posterior comparação com o modelo real produzido, apresentou uma discrepância inferior a 0,14 mm para longarina esquerda e 0,065 mm para longarina direita, representando um nível de aproximação considerável entre os dois modelos. Estes resultados não só demonstram a eficiência do software Autoform, como também contribui com os avanços, na compreensão da aplicabilidade da simulação computacional em processos de conformação metálica em futuros estudos e desenvolvimento de novos produtos.

8.1 Trabalhos Futuros

Tendo em conta magnitude do tema, é importante destacar que algumas áreas específicas que ainda não foram completamente exploradas ou que apresentam potencial significativo para melhorias e inovações de futuros trabalhos como:

- Investigar formas de melhorar a precisão da simulação computacional no processo de conformação metálica.
- Explorar a implementação de conceitos de fábrica inteligente e automação de processos para aumentar a eficiência e a competitividade no setor automóvel.
- Estudar o uso de novos materiais de alta resistência e as suas implicações nos processos de conformação e estampagem.
- Analisar o impacto ambiental dos processos de produção, buscando métodos para reduzir o consumo de energia e minimizar os resíduos gerados.

Referências Bibliográficas

[1] H. Alharthi, S. Hazra, A. Alghamdi, D. Banabic, and R. Dashwood. Determination of the yield loci of four sheet materials (aa6111-t4, ac600, dx54d+z, and h220bd+z) by using uniaxial tensile and hydraulic bulge tests. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98:1307–1319, 2018.

[2] A. Almeida. Industrialização de ferramentas progressivas, e como o cae pode acelerar a fase de pré-produção: casos de estudo. Master's thesis, U. Minho, 2022.

[3] ArcelorMittal. Dual phase steels data sheet. Technical report, North American Automotive, 2016.

[4] ArcerolMittal. Dual phase steel. `https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/first_gen_AHSS/DP/`, 2018. [Online; acedido 4 de Março de 2024].

[5] Auto-Peças. Longarina para automóvel. `https://www.autopecas-online.pt/longarina`, 2020. [Online; acedido 18 de Março de 2024].

[6] AutoForm. Archives autoform. `https://www.autoform.com/en/`, 2024. [Online; acedido 07 de Março de 2024].

[7] R. H. Ballou. *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Logística Empresarial*. Bookman, 2006.

[8] D. Banabic. *Sheet Metal Forming Processes Constitutive Modelling and Numerical Simulation*. Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2010.

[9] J. Banks. *Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications and practice*. Atlanta: John Wiley Sons, Inc., 1998.

[10] I. D. Barcelos. *Estudo de propriedades estruturais e óticasde heteroestruturas formadas pormateriais bidimensionais*. PhD thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

[11] D. J. Bowersox, D. J. Closs, and M. B. Cooper. *Supply Chain Logistics Management*. McGraw-Hill, New York, 2020.

[12] D. Brown, M. Flickenschild, C. Mazzi, A. Gasparotti, Z. Panagiotidou, J. Dingemanese, and S. Bratzel. O futuro do setor automóvel da ue. 2021.

[13] S. Bruschi, T. Altan, D. Banabic, P. Bariani, A. Brosius, J. Cao, A. Ghiotti, and A. T. M. Khraisheh and, M. Merklein and. Testing and modelling of material behaviour and formability in sheet metal forming. *CIRP Annals – Manufacturing Technology, 63*, 2014.

[14] Car body repair, manual de formação, 2019.

[15] M. Carvalho. Industrialization of a dual-phase steel stamped component process optimization using autoform software. Master's thesis, U. Porto, 2023.

[16] M. P. Carvalho. Análises de tensões e deformações em estruturas termo plásticas usando o método de elementos finitos. Master's thesis, Pontífica Universidade Católica do Rio Grande Do Sul, 2007.

[17] P. Chen, H. Ghassemi-Armaki, S. Kumar, A. F. Bower, S. P. Bhat, and S. Sadagopan. Microscale-calibrated modeling of the deformation response of dual-phase steels. *Acta Materialia*, 65:133–149, 2014.

[18] COSMOSWORKS. Understanding nonlinear analysis. *SolidWorks Corporation*, 2005.

[19] I. da Silva. Tipos de estampagem. Master's thesis, Faculdade Anhanguera, 2019.

[20] R. H. da Silva Pires. Industrialização de uma peça automóvel. Master's thesis, U. Porto, 2010.

[21] J. R. Davis, S. L. Semiatin, and A. S. for Metals. *ASM Metals Handbook*, volume 14. EUA, 9 edition, 1989.

[22] Dawson, MacEwen, and Wu. Advances in sheet metal forming analyses: dealing with mechanical anisotropy from crystallographic texture. *Int. Materials Reviews*, 48:86–121, 2023.

[23] A. F. de Pinho, F. Leal, J. A. B. Montevechi, F. A. da Silva Marins, S. M. S. Mapa, and M. J. C. Ribeiro. Aumento de produtividade em uma linha de montagem de chassis automotivos através da simulação computacional. *XXVI ENEGEP - Fortaleza, CE, Brasil*, 2006.

[24] B. Dengiz, Y. T. İç, and O. Belgin. A meta-model based simulation optimization using hybrid simulation-analytical modeling to increase the productivity in automotive industry. *Mathematics and Computers in Simulation*, 120:120–128, 2016.

[25] Diafler. Molde para estamparia de metais. `https://www.diafler.com.br/molde-estamparia-metais`, 2020. [Online; acedido 18 de Março de 2024].

[26] Dieter and George. *Metalurgia mecânica*. Rio de Janeiro, 2 edition, 1981.

[27] L. S. dos Santos. Modelagem e simulação do sistema de inspeção de torques de uma montadora de veículos. *Brasília: UNB*, 2013.

[28] Eiblda. Estampagem. `https://www.eiblda.pt/eib/servicos/estampagem/`, 2019. [Online; acedido 25 de Março de 2024].

[29] M. Emoto. Entenda a relação entre indústria 4.0 e o setor automotivo. https://www.infor.com/pt-br/blog/industry-4-0-and-the-automotive-sector, 2021. [Online; acedido 27 de Março de 2024].

[30] F. B. Ettore, C. Carvalho, S. Tonini, and F. da Costa. *Conformação Plástica dos Metais*. Campinas, SP, 5 edition, 1997.

[31] T. Feitos. Conformação plástica dos materiais - corte e estampagem. https://www.trabalhosfeitos.com/ensaios/ConformaÃğÃčo-PlÃąstica-Dos-Materiais-Corte/220880.html, 2021. [Online; acedido 30 de Abril de 2024].

[32] Ferramental. Guia de indústrias. https://www.revistaferramental.com.br/empresa/autoform-do-brasil, 2020. [Online; acedido 13 de Março de 2024].

[33] E. Filho, S. Button, G. Batalha, and I. da Silva. *Conformação Plástica dos Metais*. Campinas, SP, 6 edition, 2011.

[34] P. V. Gamboa. Introdução ao método dos elementos finitos. *Univesidade da Beira Interior*, 2022.

[35] Gestamp. Arquivos Gestamp. V.N. Cerveira. 2023.

[36] A. Ghaei. Modeling springback in stamped automotive structures. Master's thesis, University of Windsor, 2010.

[37] A. Gonçalves, M. Cortimiglia, and R. Paes. Projeto de simulação computacional de abastecimento just-in-time de uma linha de produção do setor automotivo. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO... Fortaleza: ENEGEP*, pages 1–9, 2006.

[38] M. Gorji, B. Berisha, P. Hora, and F. Barlat. Modeling of localization and fracture phenomena in strain and stress space for sheet metal forming. *Int. Journal of Material Forming*, 9:573–584, 2016.

[39] Hexagon. Hxgn multiphysics simulation and analysis software. https://hexagon.com/products/product-groups/computer-aided-engineering-software/hxgn-multiphysics?tabId=tab-EBD7FC4B39B34BF39A33D89D05999AD8-2-1, 2024. [Online; acedido 31 de Maio de 2024].

[40] W. F. Hosford and R. M. Cadell. *Metal Forming Mechanics and Metallurgy*. University of Michigan, Ann Arbor, 4 edition, 2011.

[41] Interempresas. Gestamp y autoform, juntos hacia una producción robusta. https://www.interempresas.net/Ciberseguridad/Articulos/118154-Gestamp-y-AutoForm-juntos-hacia-una-produccion-robusta.html, 2014. [Online; acedido 12 de Março de 2024].

[42] S. Jadhav, M. Schoiswohl, and B. Buchmayr. Applications of finite element simulation in the development of advanced sheet metal forming processes. *Loeben, Austria*, 2018.

[43] C. R. James McClure. Fundamentals of finite element analysis. *WILEY*, 2018.

[44] R. S. Jamwal. Microstructural origins of variability in the tensile ductility of dual phase steels. Master's thesis, Georgia Institute of Technology, 2011.

[45] Kdmsteel. Sheet metal enclosure fabrication process: The complete guide. `https://www.kdmsteel.com/sheet-metal-enclosure-fabrication-process/`, 2021. [Online; acedido 17 de abril de 2024].

[46] P. C. M. Koç and M. L. Wenner. Experimental investigation of springback variation in forming of high strength steels. *Journal of Manufacturing Science and Engineering Industrialization of a dual-phase steel stamped component 134*, 2008.

[47] Kubli and J. Reissner. Optimization of sheet-metal forming processes using the special-purpose program autoform. *Journal of Materials Processing Technology*, 50:292–305, 1995.

[48] W. Kubli, A. Krasovskyy, and M. Sester. Advanced modeling of reverse loading effects-for sheet metal forming processes. in: Proceedings of the 7th international conference and workshop on numerical simulation of 3d sheet metal forming processes. 1:145–148, 2008.

[49] K.-C. Liao, J. Pan, and S.-C. Tang. Effects of yield surface shape on sheet metal forming simulations, int. journal for numerical methods in engineering. *Journal for Numerical Methods in Engineering*, 41:559–585, 1998.

[50] L. L. Lim, G. Alpan, and B. Penz. Reconciling sales and operations management with distant suppliers in the automotive industry: a simulation approach. *International Journal of Production Economics*, 151:20–36, 2014.

[51] J. Machálek. *Projects of Progressive Production Technologies of Parts from Sheet-metal with the Use of Finite Elements Method*. PhD thesis, VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2014.

[52] M. S. Magalhães. Utilização de ferramentas cae no projeto do fabrico de um estampado profundo metálico: estudo de caso. Master's thesis, U. Minho, 2022.

[53] Mahadevan and Zhao. Advanced computer simulation of polycrystalline microstructure. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 191(34):3651–6*, 2002.

[54] C. Martin. *Logistics & Supply Chain Management*. Always learning. Pearson Education, 5 edition, 2016.

[55] J. Martí. Análisis de elementos finitos: esquemas implícitos y explicíto. `https://principia.es/analisis-de-elementos-finitos-esquemas-implicito-y-explicito/`, 2021. [Online; acedido 12 de Março de 2024].

[56] P. R. Mina. Estudo de um componente estrutural do biw automóvel: nexos entre o material base e o processo de industrialização. Master's thesis, U. Minho, 2023.

[57] J. A. B. Montevechi, A. F. de Pinho, F. Leal, and F. A. S. Marins. Application of design of experiments on the simulation of a process in automotive industry. *Winter Simulation Conference*, pages 1601–1609, 2007.

[58] S. I. Monye, A. S. Afolalu, L. S. Lawal, T. Gisanrin, O. A. Oluwatoyin, and A. G. Adeyemi. Now and future challenges of the automobilie industry in the developing world. 2023.

[59] D. Morgado. Otimização de processos de projeto de uma ferramenta progressiva para a estampagem de componentes metálicos. Master's thesis, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2011.

[60] NationalMaterial-(NMC). Dual-phase steels: An introduction. https://www.nationalmaterial.com/introduction-dual-phase-steels/, 2018. [Online; acedido 29 de fevereiro de 2024].

[61] NewMechanics. Estampagem: Impacto na fabricação de automóveis. "https://portuguese.mechanicsnews.com/estampagem-o-que-e-e-como-afecta-o-fabrico-de-automoveis/", 2023. [Online; acedido 4 de Abril de 2024].

[62] Newstamp. Componentes metálico. https://newstamp.pt/0/pt/technologies/21, 2023. [Online; acedido 1 de Abril de 2024].

[63] A. C. Nobre and S. J. Bachega. Simulação computacional do sistema de emissão de ordenstwo-boundary control aplicada a uma empresa automobilística. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Fortaleza.*, pages 1–13, 2015.

[64] J. Oliveira. Numerical and experimental analysis of dual phase steels in automotive applications. Master's thesis, U. Porto, 2023.

[65] E. Oñate. *Structural Analysis withthe Finite Element Method*. School of Civil Engineering Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 2009.

[66] P.-C. para Ferramentaria. Punções para estampos: o que são e para que servem? "https://www.pbgcomponentes.com.br/blog/2023/05/26/puncoes-para-estampos-o-que-sao-e-para-que-servem/", 2023. [Online; acedido 28 de Março de 2024].

[67] Proleantech. Inspeção e teste da matriz. https://proleantech.com/pt/sheet-metal-embossing-die-guide/, 2023. [Online; acedido 19 de Março de 2024].

[68] M. P. Raquel Martins, Ana Outerelo. Manual do Acolhimento do Colaborador, Gestamp Cerveira. 2023.

[69] F. Ribeiro. Introdução ao método dos elementos finitos. *COPPE / UFRJ*, 2013.

[70] Rodrigues. *Tecnologia da Deformação Plástica, 2ª Edição, Vol. 1 e 2*. Escolar Editora, 2010.

[71] SienceDirect. Analysis of stamping performances of dual phase steels: A multi-objective approach to reduce springback and thinning failure. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306909001502, 2009. [Online; acedido 28 de fevereiro de 2024].

[72] SoLuckySteel. ¿qué es el acero dp800? https://soluckysteel.com/es/what-is-dp800-steel/, 2023. [Online; acedido 1 de Abril de 2024].

[73] F. L. STASA. *Applied Finite Element Analysis for Engineers*. Florida Institute of Technology, 1985.

[74] C. Tasan, M. Diehl, D. Yan, M. Bechtold, F. Roters, L. Schemmann, C. Zheng, N. Peranio, N. Peranio, D. Ponge, M. Koyama, K. Tsuzaki, and D. Raabe. An overview of dual-phase steels: advances in microstructure oriented processing and micromechanically guided design. *Annual Review of Materials Research,45: p. 391-431*, 2015.

[75] J. Tavares. Introdução ao método dos elementos finitos. Master's thesis, U. Porto, 1998.

[76] TheFabricator. 6 q and a about compact in-die transfer tooling. "https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/bending/6-q-a-about-compact-in-die-transfer-tooling", 2016. [Online; acedido 8 de Abril de 2024].

[77] D. D. Tjahjanto, S. Turteltaub, A. S. J. Suiker, and S. van der Zwaag. Modelling of the effects of grain orientation on transformation-induced plasticity in multiphase carbon steels. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 14(4):617, apr 2006.

[78] Vertown. Conheça as principais iso's da indústria automobilística. https://www.vertown.com/blog/isos-da-industria-automobilistica/#quais-s%C3%A3o-as-certifica%C3%A7%C3%B5es-ISO-da-ind%C3%BAstria-automobil%C3%ADstica, 2022. [Online; acedido 24 de fevereiro de 2024].

[79] M. Vrh, M. Halilovič, B. Starman, B. Štok, D.-S. Comsa, and D. Banabic. Capability of the bbc2008 yield criterion in predicting the earing profile in cup deep drawing simulations. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 45:59–74, 2014.

[80] Wikipedia. Longarinas. https://pt.wikipedia.org/wiki/Longarina, 2015. [Online; acedido 12 de Maio de 2024].

[81] Wikipedia. Principales tipos de elementos utilizados en 3d. "https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_los_elementos_finitos#/media/Archivo:Tipos_de_elementos_volumetricos.svg", 2015. [Online; acedido 28 de Março de 2024].

[82] W. Xu, C. Ma, C. Li, and W. Feng. Sensitive factors in springback simulation for sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 151:217–222, 2004.

[83] Y. Yin, K. E. Stecke, and D. Li. The evolution of production systems em industry 2.0 through industry 4.0. international journal of production research, 56. *International Journal of Production Research, 848–861, https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1403664.*, 2018.

[84] Élia Lopes Figueiredo. A gestão lean na indústria automóvel. Master's thesis, U. Coimbra, 2021.

A Anexos

A.1 Layout Gestamp Cerveira

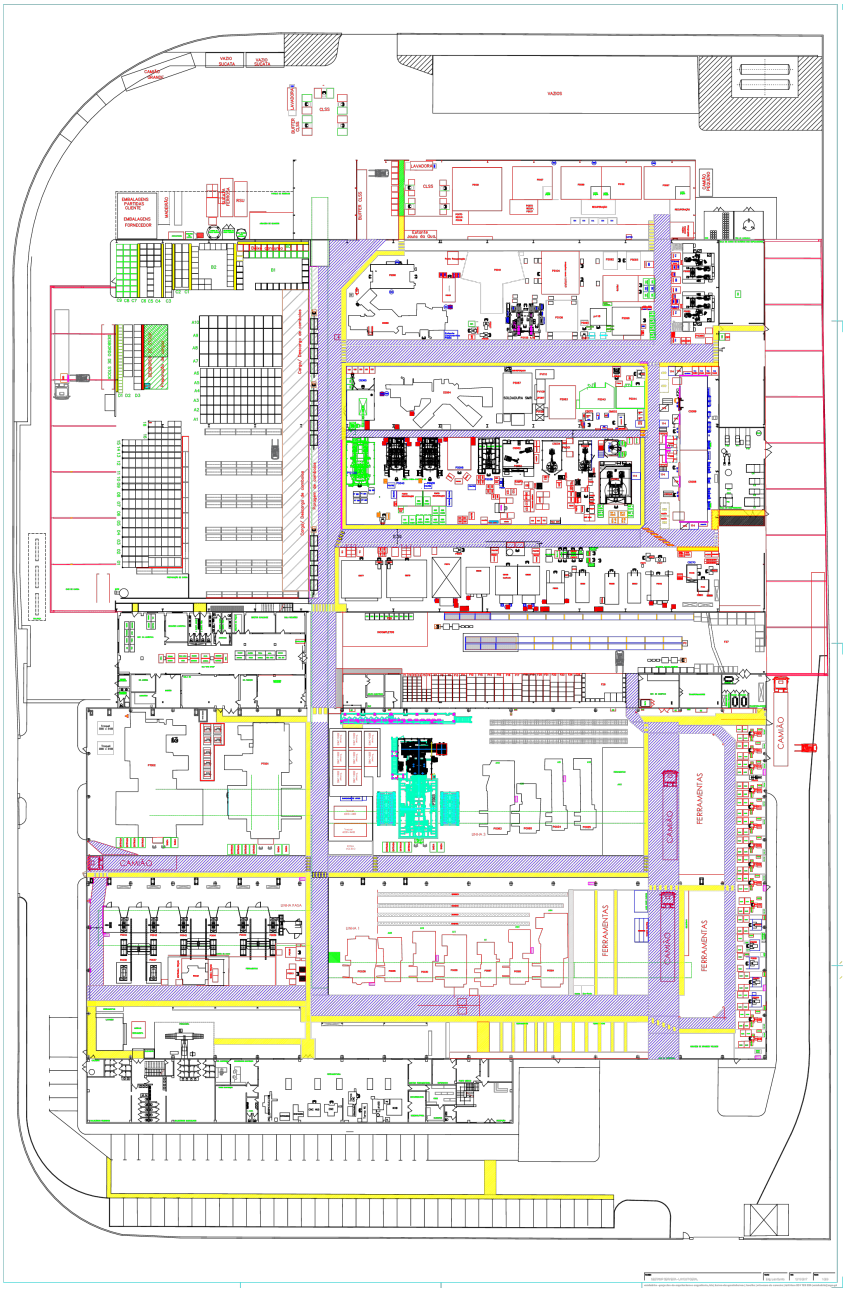


Figura A.1: Layout Gestamp Cerveira [35].

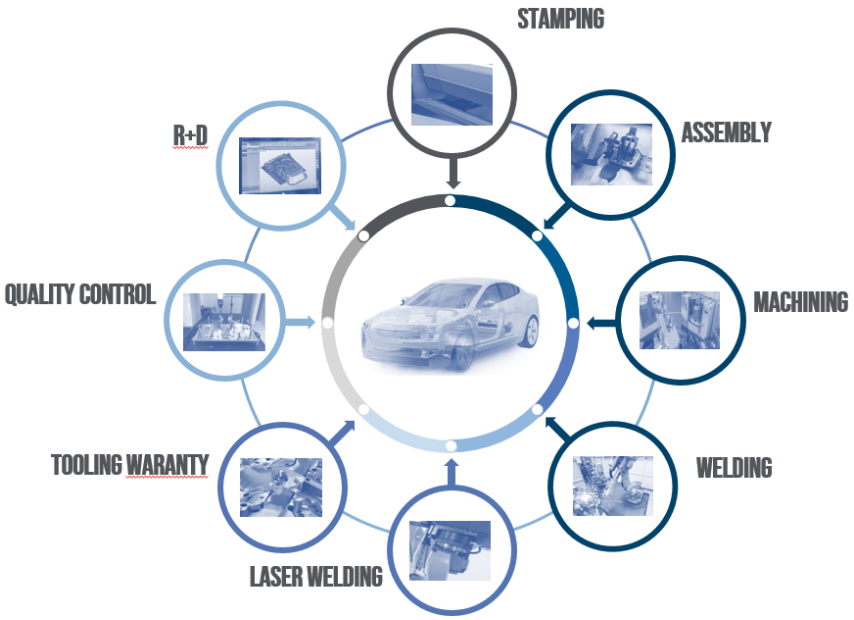


Figura A.2: Processos na Gestamp Cerveira [35].

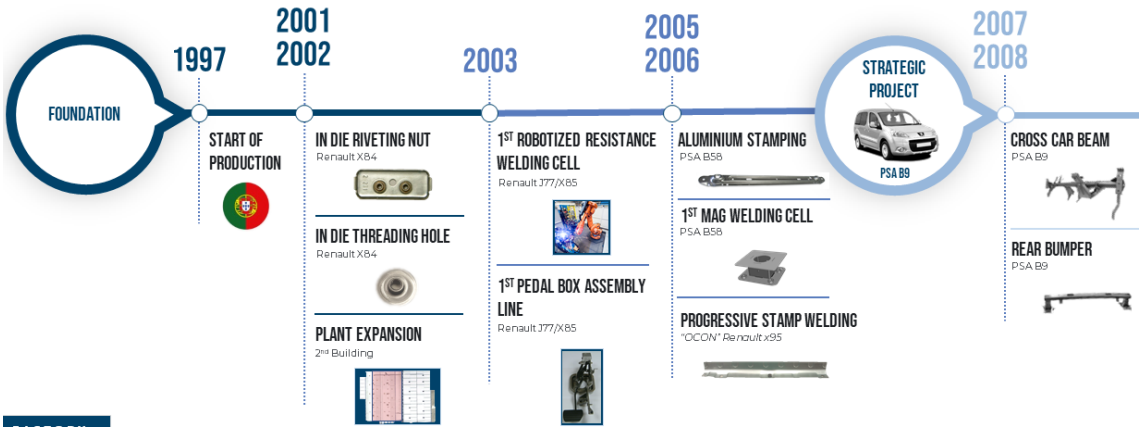


Figura A.3: Marcos importantes desde a fundação da Gestamp Cerveira até o ano 2008 [35].

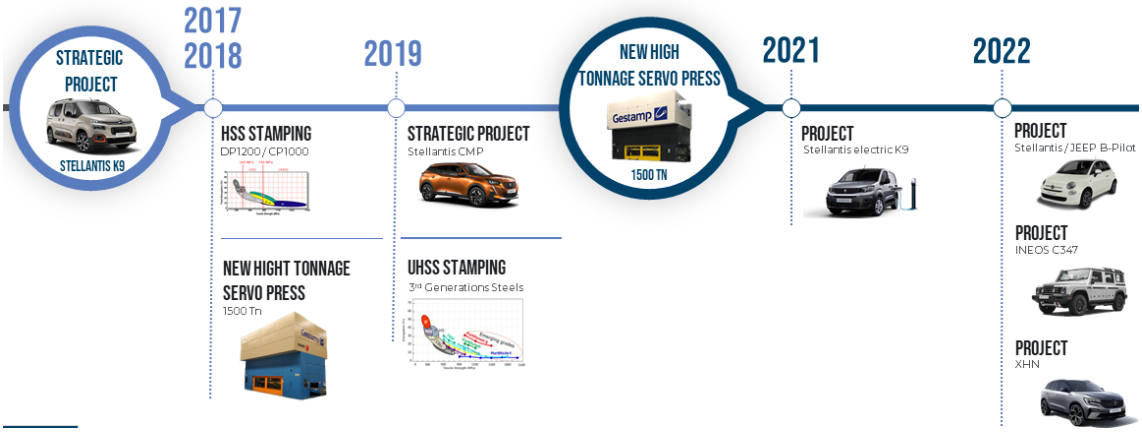


Figura A.4: Marcos importantes Gestamp Cerveira, período 2017-2023 [35].

A.2 Longarina Esquerda

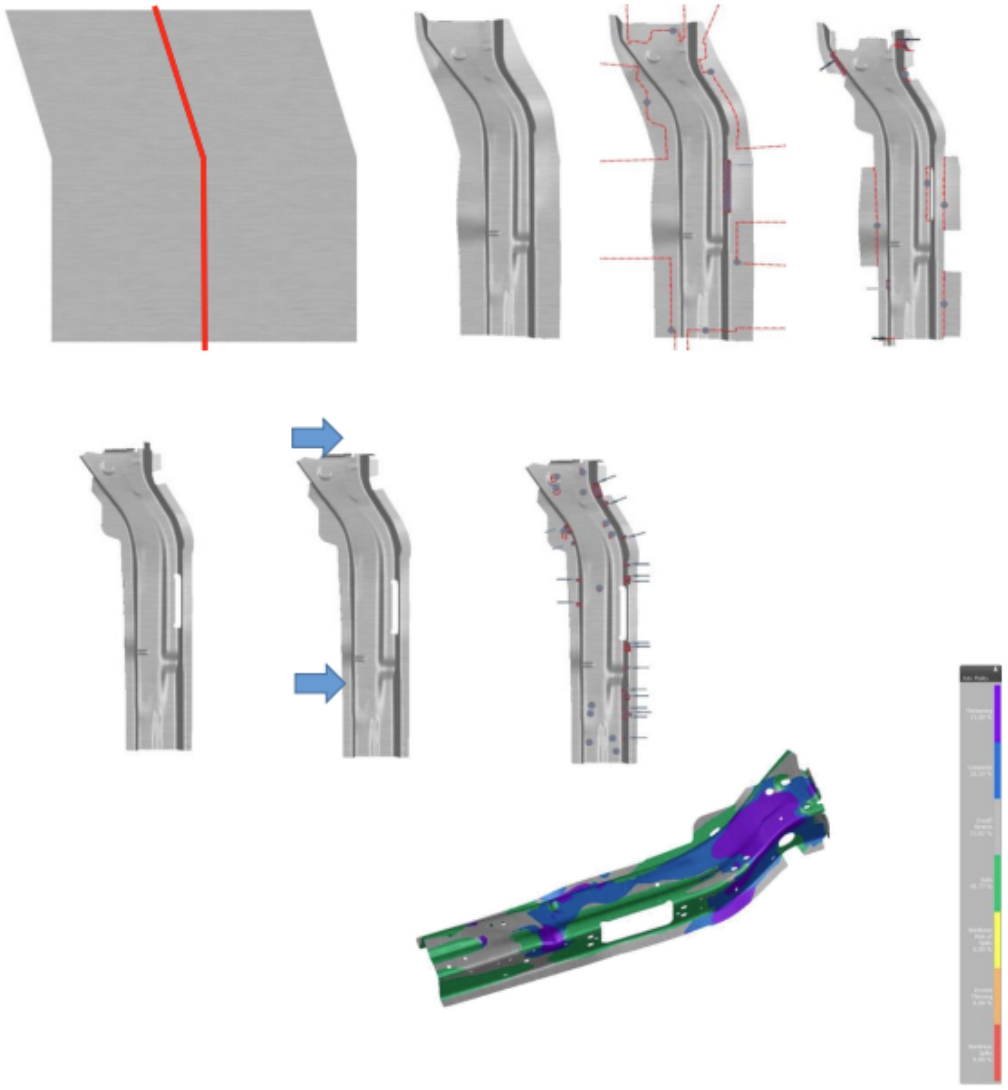


Figura A.5: Planning Longarina Esquerda.

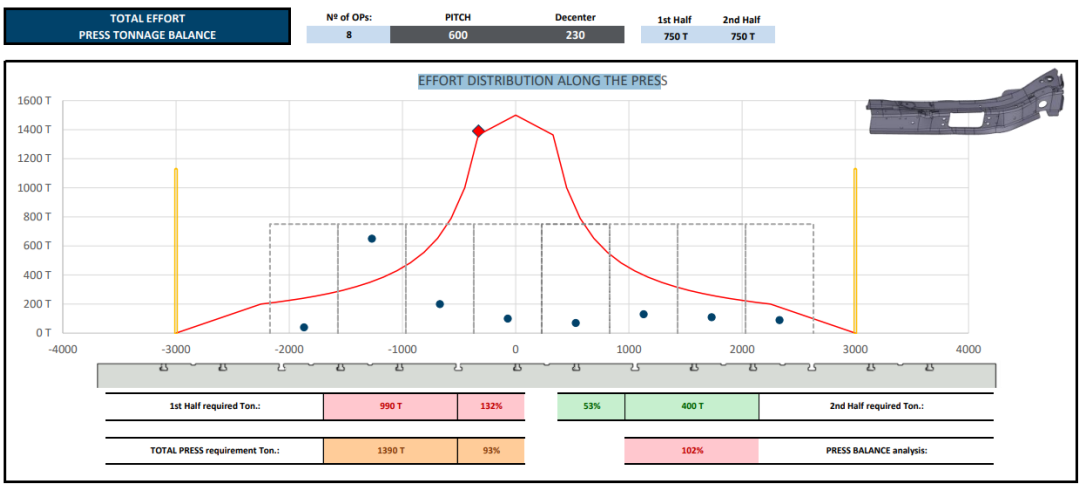


Figura A.6: Distribuição da pressão na ferramenta de produção da longarina esquerda.

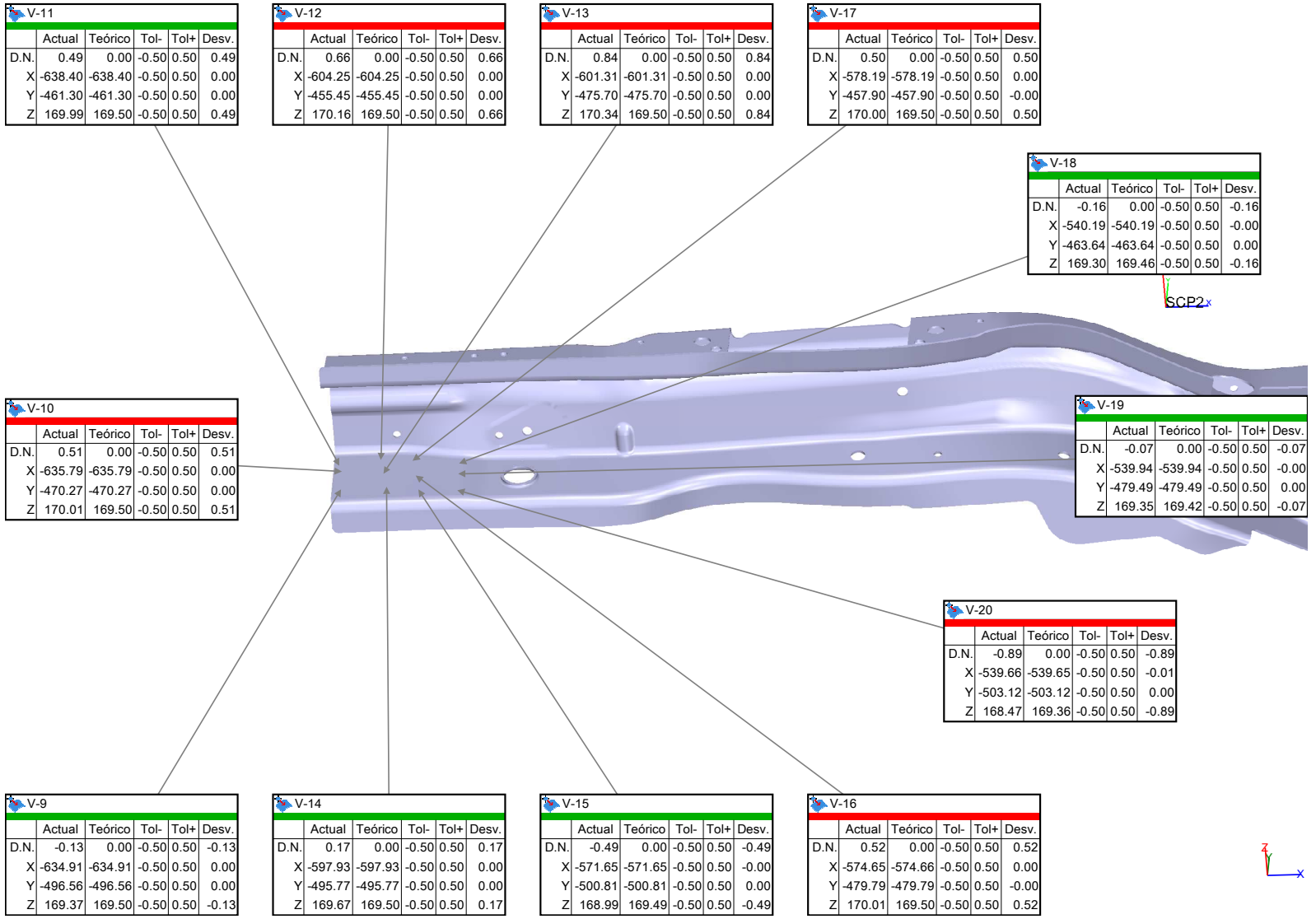


Figura A.7: Relatório de medição 9/42 da longarina esquerda.

Gestamp

Relatório de medição

Measurement report

Gestamp Cerveira

Medição: 009
Measurement

Referência
Reference

Página
Page

29 / 42

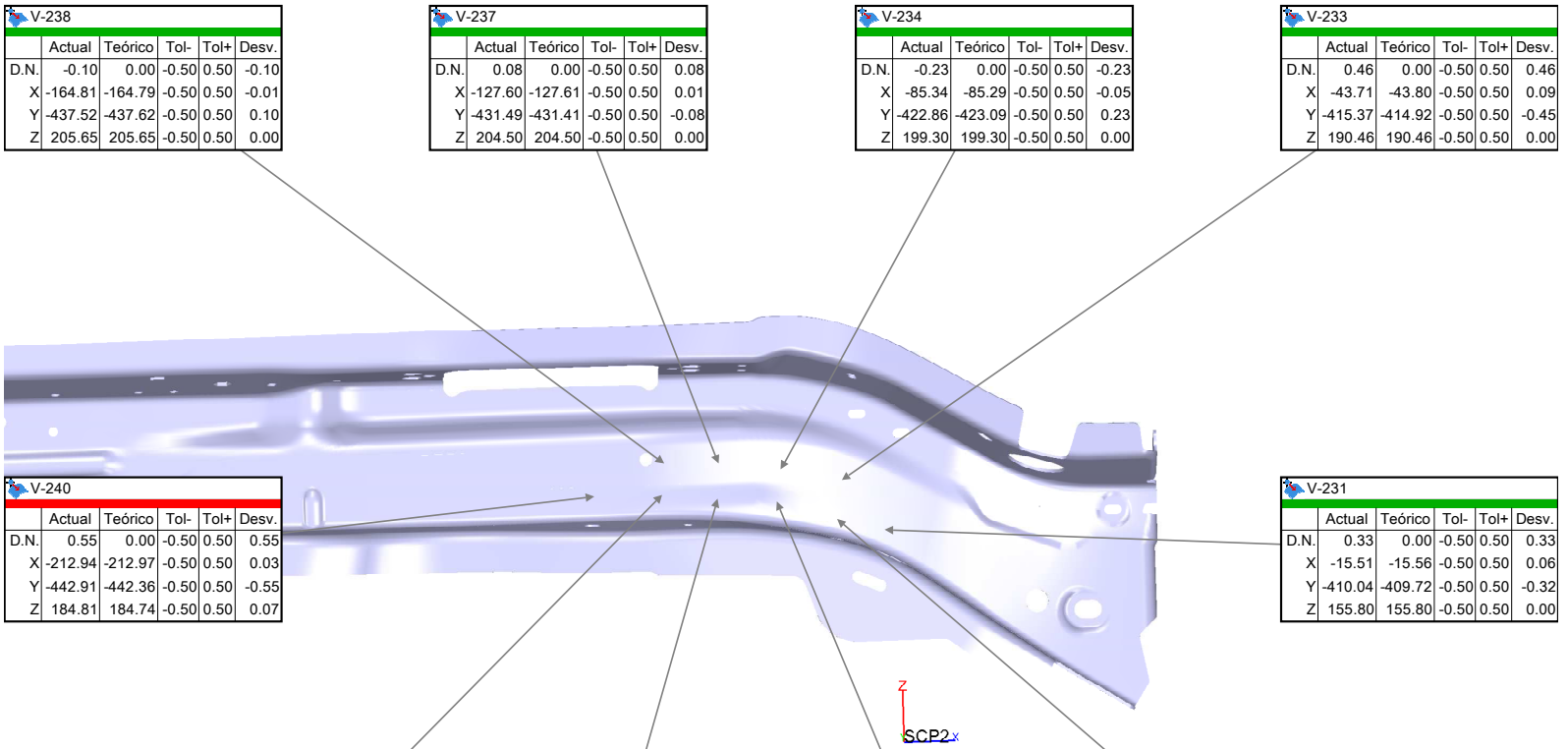


Figura A.8: Relatório de medição 29/42 da longarina esquerda.

A.3 Longarina Direita

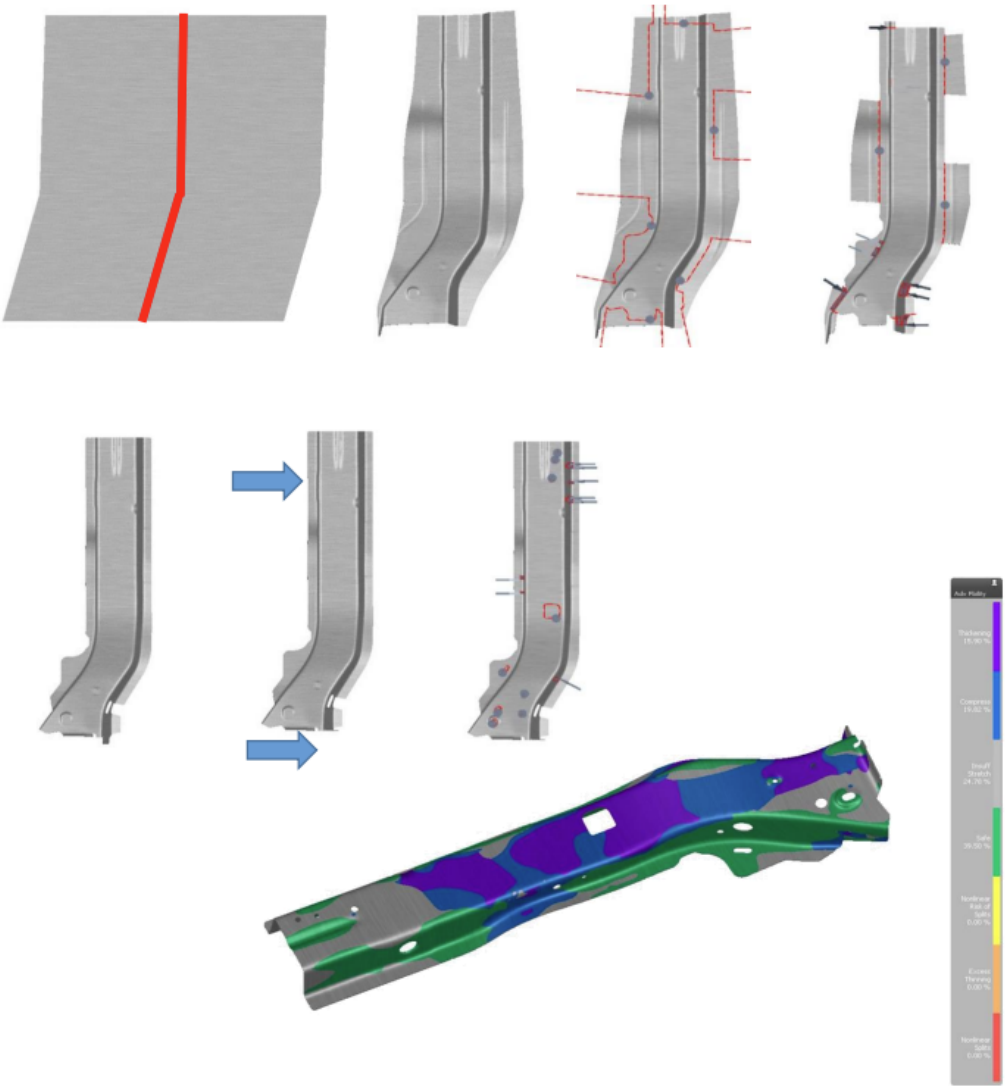


Figura A.9: Planning Longarina Direita.

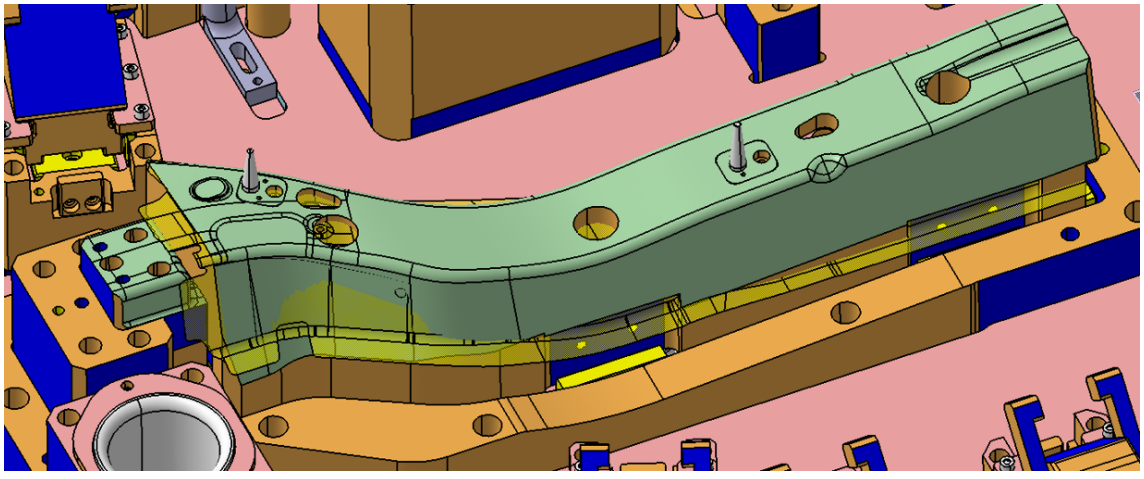


Figura A.10: Punção para Longarina Direita.

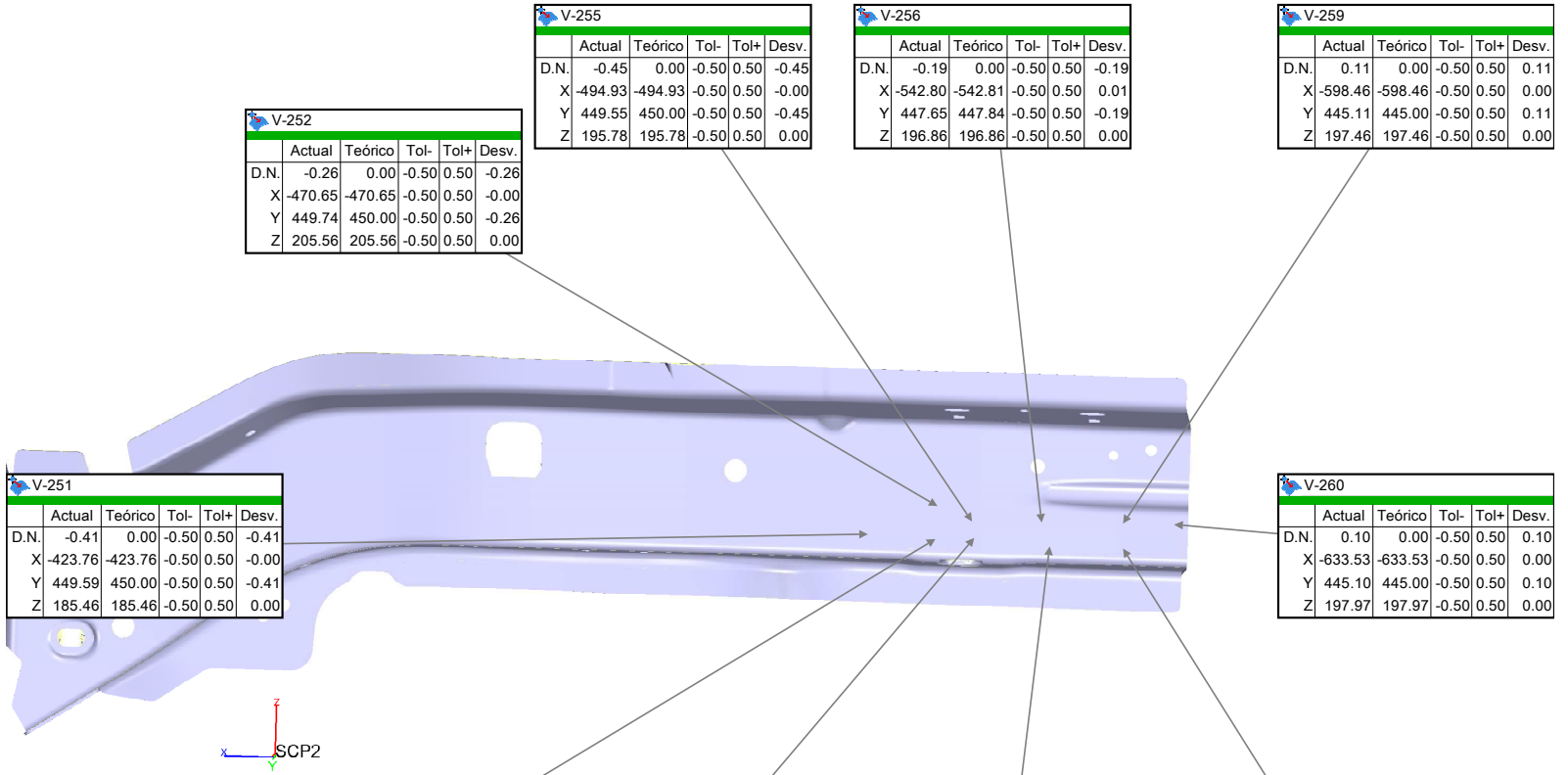
Gestamp

Relatório de medição

Measurement report

Gestamp Cerveira

Medição: 009 Measurement	Referência: Reference
Página Page	30 / 41



V-252

	Actual	Teórico	Tol-	Tol+	Desv.
D.N.	-0.26	0.00	-0.50	0.50	-0.26
X	-470.65	-470.65	-0.50	0.50	-0.00
Y	449.74	450.00	-0.50	0.50	-0.26
Z	205.56	205.56	-0.50	0.50	0.00

V-255

	Actual	Teórico	Tol-	Tol+	Desv.
D.N.	-0.45	0.00	-0.50	0.50	-0.45
X	-494.93	-494.93	-0.50	0.50	-0.00
Y	449.55	450.00	-0.50	0.50	-0.45
Z	195.78	195.78	-0.50	0.50	0.00

V-256

	Actual	Teórico	Tol-	Tol+	Desv.
D.N.	-0.19	0.00	-0.50	0.50	-0.19
X	-542.80	-542.81	-0.50	0.50	0.01
Y	447.65	447.84	-0.50	0.50	-0.19
Z	196.86	196.86	-0.50	0.50	0.00

V-259

	Actual	Teórico	Tol-	Tol+	Desv.
D.N.	0.11	0.00	-0.50	0.50	0.11
X	-598.46	-598.46	-0.50	0.50	0.00
Y	445.11	445.00	-0.50	0.50	0.11
Z	197.46	197.46	-0.50	0.50	0.00

V-251

	Actual	Teórico	Tol-	Tol+	Desv.
D.N.	-0.41	0.00	-0.50	0.50	-0.41
X	-423.76	-423.76	-0.50	0.50	-0.00
Y	449.59	450.00	-0.50	0.50	-0.41
Z	185.46	185.46	-0.50	0.50	0.00

V-260

	Actual	Teórico	Tol-	Tol+	Desv.
D.N.	0.10	0.00	-0.50	0.50	0.10
X	-633.53	-633.53	-0.50	0.50	0.00
Y	445.10	445.00	-0.50	0.50	0.10
Z	197.97	197.97	-0.50	0.50	0.00

V-253

	Actual	Teórico	Tol-	Tol+	Desv.
D.N.	-0.53	0.00	-0.50	0.50	-0.53
X	-470.41	-470.41	-0.50	0.50	-0.00
Y	449.47	450.00	-0.50	0.50	-0.53
Z	183.06	183.06	-0.50	0.50	0.00

V-254

	Actual	Teórico	Tol-	Tol+	Desv.
D.N.	-0.67	0.00	-0.50	0.50	-0.67
X	-496.56	-496.56	-0.50	0.50	-0.00
Y	449.33	450.00	-0.50	0.50	-0.67
Z	184.52	184.52	-0.50	0.50	0.00

V-257

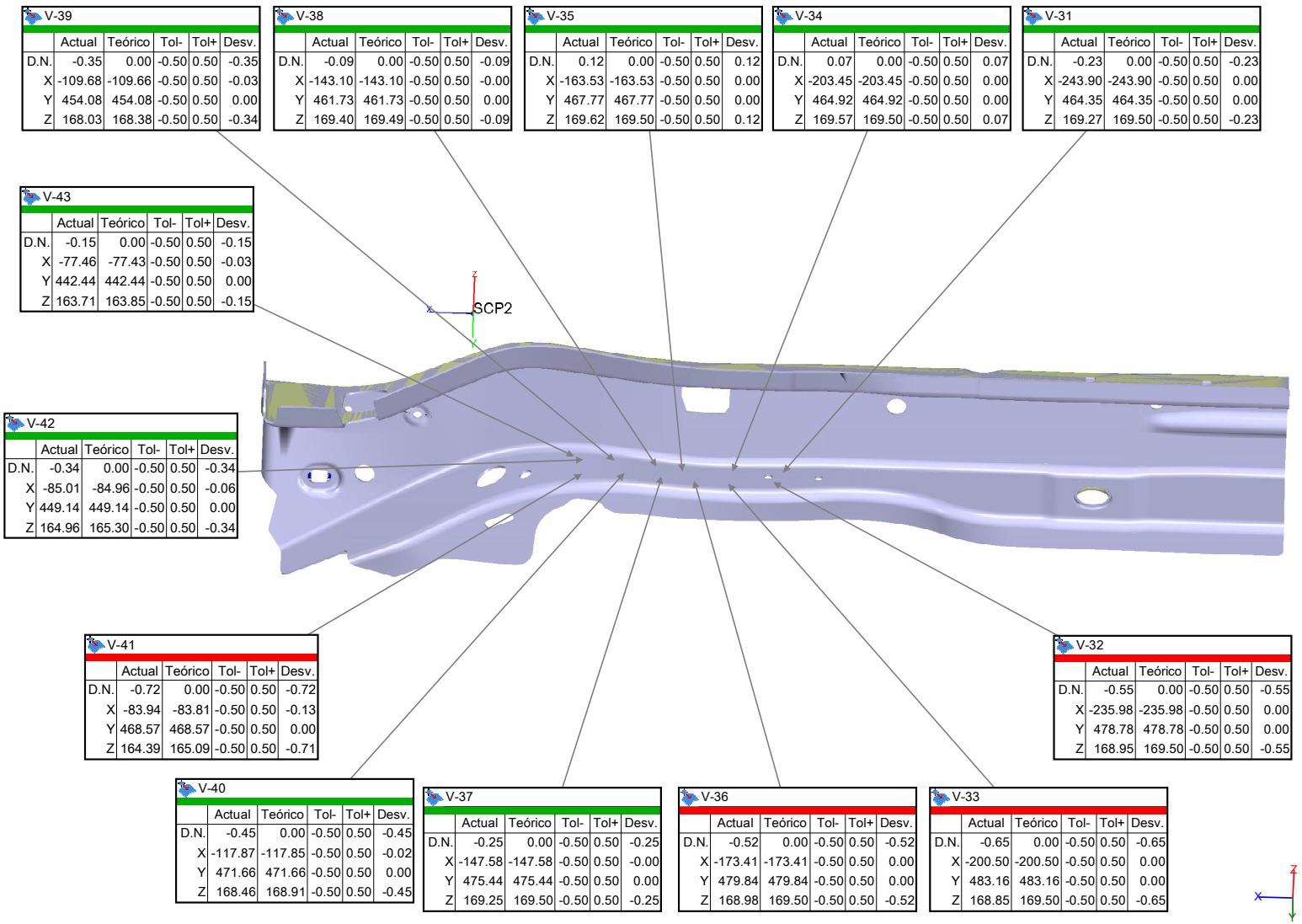
	Actual	Teórico	Tol-	Tol+	Desv.
D.N.	-0.38	0.00	-0.50	0.50	-0.38
X	-548.47	-548.50	-0.50	0.50	0.03
Y	447.01	447.39	-0.50	0.50	-0.38
Z	180.53	180.53	-0.50	0.50	-0.00

V-258

	Actual	Teórico	Tol-	Tol+	Desv.
D.N.	-0.13	0.00	-0.50	0.50	-0.13
X	-598.44	-598.44	-0.50	0.50	0.00
Y	444.87	445.00	-0.50	0.50	-0.13
Z	180.73	180.73	-0.50	0.50	0.00

Metrologic Group - Metrolog X4 V20 GA HF3

Figura A.11: Relatório de medição 30/41 da longarina direita.



V-39

	Actual	Teórico	Tol-	Tol+	Desv.
D.N.	-0.35	0.00	-0.50	0.50	-0.35
X	-109.68	-109.66	-0.50	0.50	-0.03
Y	454.08	454.08	-0.50	0.50	0.00
Z	168.03	168.38	-0.50	0.50	-0.34

V-38

	Actual	Teórico	Tol-	Tol+	Desv.
D.N.	-0.09	0.00	-0.50	0.50	-0.09
X	-143.10	-143.10	-0.50	0.50	-0.00
Y	461.73	461.73	-0.50	0.50	0.00
Z	169.40	169.49	-0.50	0.50	-0.09

V-35

	Actual	Teórico	Tol-	Tol+	Desv.
D.N.	0.12	0.00	-0.50	0.50	0.12
X	-163.53	-163.53	-0.50	0.50	0.00
Y	467.77	467.77	-0.50	0.50	0.00
Z	169.62	169.50	-0.50	0.50	0.12

V-34

	Actual	Teórico	Tol-	Tol+	Desv.
D.N.	0.07	0.00	-0.50	0.50	0.07
X	-203.45	-203.45	-0.50	0.50	0.00
Y	464.92	464.92	-0.50	0.50	0.00
Z	169.57	169.50	-0.50	0.50	0.07

V-31

	Actual	Teórico	Tol-	Tol+	Desv.
D.N.	-0.23	0.00	-0.50	0.50	-0.23
X	-243.90	-243.90	-0.50	0.50	0.00
Y	464.35	464.35	-0.50	0.50	0.00
Z	169.27	169.50	-0.50	0.50	-0.23

V-43

	Actual	Teórico	Tol-	Tol+	Desv.
D.N.	-0.15	0.00	-0.50	0.50	-0.15
X	-77.46	-77.43	-0.50	0.50	-0.03
Y	442.44	442.44	-0.50	0.50	0.00
Z	163.71	163.85	-0.50	0.50	-0.15

V-42

	Actual	Teórico	Tol-	Tol+	Desv.
D.N.	-0.34	0.00	-0.50	0.50	-0.34
X	-85.01	-84.96	-0.50	0.50	-0.06
Y	449.14	449.14	-0.50	0.50	0.00
Z	164.96	165.30	-0.50	0.50	-0.34

V-41

	Actual	Teórico	Tol-	Tol+	Desv.
D.N.	-0.72	0.00	-0.50	0.50	-0.72
X	-83.94	-83.81	-0.50	0.50	-0.13
Y	468.57	468.57	-0.50	0.50	0.00
Z	164.39	165.09	-0.50	0.50	-0.71

V-40

	Actual	Teórico	Tol-	Tol+	Desv.
D.N.	-0.45	0.00	-0.50	0.50	-0.45
X	-117.87	-117.85	-0.50	0.50	-0.02
Y	471.66	471.66	-0.50	0.50	0.00
Z	168.46	168.91	-0.50	0.50	-0.45

V-37

	Actual	Teórico	Tol-	Tol+	Desv.
D.N.	-0.25	0.00	-0.50	0.50	-0.25
X	-147.58	-147.58	-0.50	0.50	-0.00
Y	475.44	475.44	-0.50	0.50	0.00
Z	169.25	169.50	-0.50	0.50	-0.25

V-36

	Actual	Teórico	Tol-	Tol+	Desv.
D.N.	-0.52	0.00	-0.50	0.50	-0.52
X	-173.41	-173.41	-0.50	0.50	0.00
Y	479.84	479.84	-0.50	0.50	0.00
Z	168.98	169.50	-0.50	0.50	-0.52

V-33

	Actual	Teórico	Tol-	Tol+	Desv.
D.N.	-0.65	0.00	-0.50	0.50	-0.65
X	-200.50	-200.50	-0.50	0.50	0.00
Y	483.16	483.16	-0.50	0.50	0.00
Z	168.85	169.50	-0.50	0.50	-0.65

V-32

	Actual	Teórico	Tol-	Tol+	Desv.
D.N.	-0.55	0.00	-0.50	0.50	-0.55
X	-235.98	-235.98	-0.50	0.50	0.00
Y	478.78	478.78	-0.50	0.50	0.00
Z	168.95	169.50	-0.50	0.50	-0.55

Figura A.12: Relatório de medição 10/41 da longarina direita.