

João Carlos Felício Gomes da Silva

Otimização do processo de fabrico de uma peça metálica por estampagem com recurso à simulação numérica.

Tese de Mestrado

Mestrado em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Professor Doutor Paulo Joaquim Antunes Vaz

Professor Doutor Diogo Mariano Simões Neto



Fevereiro de 2021

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Paulo Joaquim Antunes Vaz, pela orientação, disponibilidade, incentivo e motivação demonstrados ao longo deste trabalho.

Ao Professor Doutor Diogo Mariano Simões Neto, por toda a ajuda, disponibilidade e auxílio prestado.

A todos os professores e docentes do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, pelos ensinamentos.

À Epalfer - Serralharia de Moldes, Cunhos e Cortantes, Lda, por permitir o desenvolvimento deste trabalho e disponibilizar todos os meios técnicos necessários.

A todos os colegas da empresa, em especial ao Engenheiro Bruno Filipe, pelos conhecimentos transmitidos e pelo apoio crítico num ambiente empresarial.

A todos os meus amigos, pelas experiências compartilhadas durante o período de formação académica.

À Márcia Neves, pela amizade, companhia, paciência, conselhos e sugestões durante as fases mais críticas da execução deste trabalho.

À minha família, em especial aos meus pais e irmã, pela compreensão, apoio e confiança.

RESUMO

Os processos de conformação plástica permitem uma elevada cadência produtiva na obtenção de peças complexas, sem necessidade de posteriores operações de finalização de peça. A capacidade de dar forma a uma chapa metálica plana requer uma tecnologia própria baseada no conceito de plasticidade, onde se destaca a estampagem. De um modo geral, no processo de estampagem, a chapa é progressivamente sujeita a várias operações de conformação plástica por ação de uma força externa, a fim de se obter a forma final desejada.

Em virtude da grande competitividade no setor automóvel, a tendência atual nos processos de conformação plástica cursa na introdução de produtos com geometrias complexas e utilização de materiais cada vez mais leves e resistentes. Como tal, o intuito será reduzir o ciclo de desenvolvimento das ferramentas de estampagem, sem recorrer a dispendiosos ciclos de tentativa/ erro. Desta forma, a previsão do processo, com o auxílio da simulação numérica baseada no método dos elementos finitos, é parte integrante e imprescindível no dimensionamento das ferramentas de estampagem.

As principais dificuldades na produção de peças estampadas relacionam-se com a previsão do comportamento da chapa ao longo do processo. Os defeitos na forma, na superfície ou nas propriedades mecânicas da peça, exigem uma fase de projeto rigorosa. Este trabalho teve como objetivo a validação do processo de estampagem de um componente de chapa metálica automóvel, através da simulação numérica baseada no cálculo do método dos elementos finitos. Para tal, foi estudado o comportamento da chapa, definido o ciclo de estampagem, compensada a recuperação elástica, otimizado o processo, analisada a capacidade do processo e comparados os resultados numéricos com os experimentais.

Palavras-chave: Conformação de chapa metálica, Simulação numérica, Formabilidade da chapa, Recuperação elástica, *AutoForm*, *CATIA*.

ABSTRACT

Sheet metal forming processes allow a high production rate, obtaining complex parts without the need of subsequent finishing operations. The ability to give shape to a flat metal sheet is based on the concept of plasticity. In general, the sheet is progressively subjected to various forming operations in order to obtain the desired final shape, using external forces through the forming tools.

Due to the high competitiveness in the automotive sector, the current trend in sheet metal forming processes is towards the introduction of complex geometry products, reduction of development cycle and the use of increasingly stronger and lighter materials. Hence, the actual objective is to reduce the development cycle of the stamping tools, without resorting to expensive trial and error analysis. Therefore, the numerical simulation of the forming process based on the finite element method is an integral and indispensable part in the design of the stamping tools.

The main difficulties in the production of stamped parts are related to the prediction of the sheet metal behaviour throughout the process. Shape defects, surface defects and the mechanical performance of the final components require a rigorous design stage. This study aims to validate the stamping process of a metallic automotive component through numerical simulation. The sheet metal forming process was studied by numerical simulation, defining all forming/trimming stages, as well as the compensation of the springback. Therefore, the process was optimised, comparing numerical and experimental results.

Keywords: Sheet metal forming, Numerical simulation, Sheet formability, Springback, *AutoForm*, *CATIA*.

ÍNDICE

Resumo	iii
Abstract.....	v
Índice	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xix
Abreviaturas e Simbologia	xxi
1. Introdução.....	1
1.1 Empresa	2
1.1.1 Processo	3
1.1.2 Objetivos.....	4
1.2 Estruturação do Documento	5
2. Estado de Arte	7
2.1 Processo de Estampagem.....	7
2.1.1 Operações	8
2.1.1.1 Corte	8
2.1.1.2 Dobragem	9
2.1.1.3 Embutidura	10
2.1.2 Ciclo de Estampagem	12

2.1.3 Defeitos.....	13
2.1.3.1 Recuperação Elástica ou <i>Springback</i>	14
2.1.3.2 Enrugamento ou <i>Wrinkling</i>	15
2.1.4 Sistema de Alimentação	16
2.1.5 Ferramentas de Estampagem.....	17
2.1.5.1 Ferramentas Manuais.....	17
2.1.5.2 Ferramentas Progressivas	17
2.1.5.3 Ferramentas <i>Transfer</i>	17
2.1.5.4 Ferramentas Híbridas.....	18
2.1.6 Prensas	18
2.1.6.1 Prensa Mecânica	19
2.1.6.2 Prensa Hidráulica.....	19
2.1.6.3 Prensa Servomecânica	19
2.2 Aços na Indústria Automóvel	20
2.2.1 Anisotropia	23
2.2.2 Comportamento Elástico e Plástico do Material	26
2.2.3 Formabilidade do Material	28
2.3 Simulação Numérica.....	30
3. Caso de Estudo	35
3.1 Peça.....	35
3.2 Requisitos do Processo	39
3.3 Modelo Numérico.....	39
3.3.1 Modelo Constitutivo da Chapa.....	40
3.3.2 Ciclo de Estampagem	41
3.3.3 OP10 – Corte	42
3.3.4 OP20 – Embutidura	45
3.3.5 OP30 – Embutidura	47

3.3.6 OP40 e OP50 – Corte	49
3.3.7 OP60 e OP70 – Corte	52
3.3.8 OP80 – Dobragem	54
3.3.9 OP90 – Corte	56
3.4 Parâmetros de Simulação.....	56
4. Resultados Numéricos	59
4.1 Validação do Ciclo de Estampagem.....	59
4.1.1 Formabilidade da Peça.....	60
4.1.1.1 OP20 – Embutidura	60
4.1.1.2 OP30 – Embutidura	63
4.1.1.3 OP40 – Corte	66
4.1.1.4 OP80 – Dobragem	67
4.1.2 Otimização do Consumo de Chapa	69
4.1.3 Springback	71
4.1.4 Otimização de Forças	80
4.1.5 Capacidade do Processo	86
4.2 Dimensionamento, Produção, Montagem e Ensaio.....	92
4.3 Validação dos Resultados Numéricos	103
4.3.1 Formabilidade da Peça.....	103
4.3.2 Controlo Dimensional	104
5. Conclusões.....	109
6. Referências Bibliográficas.....	111
7. Anexos	119
ANEXO I – Desenho 2D das peças	120
ANEXO II – Ficha técnica dos cilindros utilizados	126
ANEXO III – Relatório dimensional.....	129
ANEXO III.1 – Relatório dimensional peça esquerda	130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Logótipo e instalações da Epalfer.....	3
Figura 1.2 - Fluxograma do processo produtivo na Epalfer.....	4
Figura 2.1 - Etapas do processo de corte: a) deformação plástica; b) corte; c) rotura. Adaptado de Brites et al. (2013).....	9
Figura 2.2 - Princípio de corte.....	9
Figura 2.3 - Tensões aplicadas na chapa durante a operação de dobragem (Filho et al., 2011).....	9
Figura 2.4 - Dobragem – elementos da operação: a) cerra-chapas; b) matriz; c) punção; Fd (força de dobragem). Adaptado de Rodrigues et al. (2010).....	10
Figura 2.5 - Fases e elementos da operação de embutidura.....	11
Figura 2.6 - Modos de deformação da chapa: a) por extensão; b) por expansão (Santos et al., 2005).....	12
Figura 2.7 - Classificação das alterações por springback: a) alteração de ângulo; b) empenamento da parede; c) torção; d) curvatura. Adaptado de Yoshida et al. (2013). .	14
Figura 2.8 - Utilização de freios de retenção (Santos et al., 2005).....	16
Figura 2.9 - Sistemas <i>transfer</i> automático.....	18
Figura 2.10 - Gama de aços utilizados na indústria automóvel. Adaptado de Keeler & Kimchi (2017) e Tisza (2013).	20
Figura 2.11 - Gama de aços e ligas de alumínio utilizados na indústria automóvel (Djukanovic, 2017).....	21
Figura 2.12 - Evolução dos materiais utilizados na conceção da carroçaria do carro: a) 1999; b) 2013 (Tisza, 2013).	22

Figura 2.13 - Evolução dos materiais utilizados na concepção do carro: a) 2017; b) 2025 (Djukanovic, 2017).	23
Figura 2.14 - Tendência de redução de peso de um carro (Kazan, 2019).	23
Figura 2.15 - Alongamento dos grãos na direção de laminagem (Vrh et al., 2014).	24
Figura 2.16 - Microestrutura no plano: (a) normal à direção de laminagem; (b) longitudinal à direção de laminagem (Hu & Wang, 2016). RD: direção longitudinal à laminagem; LT: direção maior normal à laminagem (largura); ST: direção menor normal à laminação (espessura).	24
Figura 2.17 - Provetes da chapa laminada utilizados no ensaio de tração uniaxial, para cálculo da anisotropia (Kitamura & Terano, 2014).	25
Figura 2.18 - Influência da anisotropia planar na formação de orelhas no embutimento de copos (Ferrarini, 2004).	26
Figura 2.19 - Estados de deformação, representados no gráfico FLD (<i>AutoForm Plus R7</i>).	30
Figura 2.20 - Processo de desenvolvimento de uma ferramenta de estampagem sem suporte numa simulação numérica. Adaptado de Tisza & Lukács (2008).	31
Figura 2.21 - Processo de desenvolvimento de uma ferramenta de estampagem com suporte numa simulação numérica. Adaptado de Tisza & Lukács (2008).	31
Figura 2.22 - Otimização do tempo de desenvolvimento de uma ferramenta de estampagem, por auxílio de simulação numérica. Adaptado de AutoForm Forming Reality (2020a).	32
Figura 2.23 - Simulação e otimização do processo de estampagem no <i>AutoForm Plus R7</i> (Wang et al., 2007).	33
Figura 3.1 - Peças em estudo (<i>CATIA V5 6R2019</i>).	35
Figura 3.2 - Aplicação das peças em estudo (<i>CATIA V5 6R2019</i>).	36
Figura 3.3 - Características do material.	37
Figura 3.4 - Zona assimétrica entre peça esquerda e direita.	37
Figura 3.5 - Tolerâncias gerais e específicas.	37
Figura 3.6 - RPS da peça.	38
Figura 3.7 - Propriedades mecânicas da chapa (<i>AutoForm Plus R7</i>).	40
Figura 3.8 - Resultados experimentais de construção do gráfico FLD (<i>AutoForm Plus R7</i>).	41
Figura 3.9 - Ciclo de estampagem numérico (<i>AutoForm Plus R7</i>).	42

Figura 3.10 - Conjunto de referência para a planificação (<i>CATIA V5 6R2019</i>).....	43
Figura 3.11 - Planificação do conjunto – linha vermelha [mm] (<i>CATIA V5 6R2019</i>)...	43
Figura 3.12 - Níveis de previsão da planificação pelo <i>Formcheck</i> (<i>AutoForm Plus R7</i>).	44
Figura 3.13 - Formato inicial – linha azul [mm] (<i>CATIA V5 6R2019</i>).....	44
Figura 3.14 - Ferramentas de corte do <i>AutoForm Plus R7</i>	45
Figura 3.15 - Geometria e direção do corte da OP10 (<i>AutoForm Plus R7</i>).	45
Figura 3.16 - Superfície suporte da OP20 (<i>CATIA V5 6R2019</i>).....	46
Figura 3.17 - Avanço mínimo da almofada, face ao punção (<i>AutoForm Plus R7</i>).	46
Figura 3.18 - Elementos e estágios de movimento da OP20: a) elementos abertos; b) fixação da chapa por ação do conjunto matriz/ almofada; c) elementos fechados (<i>AutoForm Plus R7</i>).	47
Figura 3.19 - Superfície suporte da OP30 (<i>CATIA V5 6R2019</i>).....	48
Figura 3.20 - Avanço mínimo do cerra-chapas, face à matriz (<i>AutoForm Plus R7</i>).	48
Figura 3.21 - Elementos e estágios de movimento da OP30: a) elementos abertos; b) fixação da chapa por ação do conjunto cerra-chapas/ matriz; c) elementos fechados (<i>AutoForm Plus R7</i>).	48
Figura 3.22 - Influência da direção de corte: a) corte não perpendicular/ “em faca”; b) corte perpendicular.	49
Figura 3.23 - Auxílio de carro numa operação de corte.	50
Figura 3.24 - Geometria e direção dos cortes da OP40 (<i>AutoForm Plus R7</i>).	51
Figura 3.25 - Geometria e direção dos cortes da OP50 (<i>AutoForm Plus R7</i>).	51
Figura 3.26 - Dimensões da sucata na OP40 [mm] (<i>AutoForm Plus R7</i>).	51
Figura 3.27 - Dimensões da sucata na OP50 [mm] (<i>AutoForm Plus R7</i>).	52
Figura 3.28 - Direção perpendicular dos furos: antes de rodar (azul escuro); depois de rodar (azul claro). (<i>CATIA V5 6R2019</i>).....	52
Figura 3.29 - Furos realizados verticalmente após rotação (<i>CATIA V5 6R2019</i>).....	52
Figura 3.30 - Geometria e direção dos cortes da OP60 (<i>AutoForm Plus R7</i>).	53
Figura 3.31 - Geometria e direção dos cortes da OP70 (<i>AutoForm Plus R7</i>).	53
Figura 3.32 - Dimensões da sucata na OP60 [mm] (<i>AutoForm Plus R7</i>).	54
Figura 3.33 - Dimensões da sucata na OP70 [mm] (<i>AutoForm Plus R7</i>).	54
Figura 3.34 - Superfície suporte da OP80 (<i>CATIA V5 6R2019</i>).....	55
Figura 3.35 - Avanço mínimo do cerra-chapas, face ao punção (<i>AutoForm Plus R7</i>)...	55

Figura 3.36 - Elementos e estágios de movimento da OP80: a) elementos abertos; b) fixação da chapa por ação do conjunto cerra-chapas/ matriz; c) elementos fechados (<i>AutoForm Plus R7</i>).	55
Figura 3.37 - Geometria e direção dos cortes da OP90 (<i>AutoForm Plus R7</i>).	56
Figura 3.38 - Dimensões da sucata na OP90 [mm] (<i>AutoForm Plus R7</i>).	56
Figura 3.39 - Parâmetros de processo (<i>AutoForm Plus R7</i>).	57
Figura 3.40 - Parâmetros de simulação (<i>AutoForm Plus R7</i>).	57
Figura 4.1 - Estados de deformação e respetivo gráfico FLD no embutimento por uma vez (<i>AutoForm Plus R7</i>).	60
Figura 4.2 - <i>Max Failure</i> no embutimento por uma vez (<i>AutoForm Plus R7</i>).	61
Figura 4.3 - Redução de espessura no embutimento por uma vez (<i>AutoForm Plus R7</i>).	61
Figura 4.4 - Estados de deformação e respetivo gráfico FLD da OP20 (<i>AutoForm Plus R7</i>).	62
Figura 4.5 - <i>Max Failure</i> na OP20 (<i>AutoForm Plus R7</i>).	62
Figura 4.6 - Redução de espessura na OP20 (<i>AutoForm Plus R7</i>).	63
Figura 4.7 - Estados de deformação e respetivo gráfico FLD da OP30, antes da modificação (<i>AutoForm Plus R7</i>).	63
Figura 4.8 - Modificação da superfície da OP30: verde claro – superfície antes da modificação; verde escuro – superfície depois da modificação; azul – contorno da peça [mm] (<i>CATIA V5 6R2019</i>).	64
Figura 4.9 - Estados de deformação e respetivo gráfico FLD da OP30, depois da modificação (<i>AutoForm Plus R7</i>).	65
Figura 4.10 - <i>Max Failure</i> na OP30 (<i>AutoForm Plus R7</i>).	65
Figura 4.11 - Redução de espessura na OP30 (<i>AutoForm Plus R7</i>).	66
Figura 4.12 - Comparação do gráfico FLD numa operação de corte: a) antes da OP40; b) depois da OP40 (<i>AutoForm Plus R7</i>).	66
Figura 4.13 - Estados de deformação e respetivo gráfico FLD da OP80 (<i>AutoForm Plus R7</i>).	67
Figura 4.14 - <i>Max Failure</i> na OP80: a) antes da dobragem; b) depois da dobragem (<i>AutoForm Plus R7</i>).	68
Figura 4.15 - Redução de espessura na OP80 (<i>AutoForm Plus R7</i>).	69
Figura 4.16 - Formato final [mm] (<i>CATIA V5 6R2019</i>).	69
Figura 4.17 - Geometria e direção do corte da OP10 (<i>AutoForm Plus R7</i>).	70

Figura 4.18 - Primeiro formato da bobine (<i>AutoForm Plus R7</i>).	71
Figura 4.19 - Sequência operatória numérica (<i>AutoForm Plus R7</i>).	71
Figura 4.20 - Configuração de análise do <i>springback</i> : a) tipo de <i>springback</i> ; b) lado da geometria de referência; c) geometria de referência (<i>AutoForm Plus R7</i>).	72
Figura 4.21 - <i>Springback</i> inicial da peça final: resultado da OP90 [mm] (<i>AutoForm Plus R7</i>).	73
Figura 4.22 - Plano de compensação (<i>AutoForm Plus R7</i>).	74
Figura 4.23 - Configuração da compensação da OP20: a) quadro de configuração; b) regiões de compensação (<i>AutoForm Plus R7</i>).	74
Figura 4.24 - Configuração da compensação da OP30: a) quadro de configuração; b) regiões de compensação (<i>AutoForm Plus R7</i>).	74
Figura 4.25 - Superfície suporte da OP20 compensada (<i>CATIA V5 6R2019</i>).	75
Figura 4.26 - Superfície suporte da OP30 compensada (<i>CATIA V5 6R2019</i>).	75
Figura 4.27 - Análise de tangências na superfície suporte da OP20 compensada (<i>CATIA V5 6R2019</i>).	76
Figura 4.28 - Análise de tangências na superfície suporte da OP30 compensada (<i>CATIA V5 6R2019</i>).	76
Figura 4.29 - Superfície suporte da OP20 compensada e retrabalhada (<i>CATIA V5 6R2019</i>).	76
Figura 4.30 - Superfície suporte da OP30 compensada e retrabalhada (<i>CATIA V5 6R2019</i>).	77
Figura 4.31 - Compensação do <i>springback</i> na OP20: linha azul – contorno de peça; superfície vermelha – superfície de suporte nominal; superfície verde – superfície de suporte compensada [mm] (<i>CATIA V5 6R2019</i>).	77
Figura 4.32 - Compensação do <i>springback</i> na OP30: linha azul – contorno de peça; superfície vermelha – superfície de suporte nominal; superfície verde – superfície de suporte compensada [mm] (<i>CATIA V5 6R2019</i>).	78
Figura 4.33 - <i>Springback</i> da peça final com compensação, iteração 1 tolerâncias específicas [mm] (<i>AutoForm Plus R7</i>).	78
Figura 4.34 - <i>Springback</i> da peça final com compensação, iteração 1 tolerâncias gerais: a) vista de topo; b) vista auxiliar [mm] (<i>AutoForm Plus R7</i>).	79
Figura 4.35 - Configuração inicial dos elementos móveis: a) OP20; b) OP30; c) OP80 (<i>AutoForm Plus R7</i>).	81

Figura 4.36 - Forças aplicadas necessárias com a configuração <i>Force Controlled</i> , por operação e elemento [kN] (<i>AutoForm Plus R7</i>).	82
Figura 4.37 - Cedência dos elementos móveis na configuração inicial de <i>Force Controlled</i> , em função do curso: a) OP20; b) OP30; c) OP80 (<i>AutoForm Plus R7</i>).	83
Figura 4.38 - Configuração otimizada dos elementos móveis: a) OP20; b) OP30; c) OP80 (<i>AutoForm Plus R7</i>).	84
Figura 4.39 - Forças aplicadas necessárias com a configuração <i>Spring Controlled</i> , por operação e elemento [kN] (<i>AutoForm Plus R7</i>).	84
Figura 4.40 - Cedência dos elementos móveis na configuração <i>Spring Controlled</i> , em função do curso: a) OP20; b) OP30; c) OP80 (<i>AutoForm Plus R7</i>).	85
Figura 4.41 - Capacidade do processo (Correia et al., 2004).	86
Figura 4.42 - Tolerância e dispersão do processo (Correia et al., 2004).	87
Figura 4.43 - Configuração das variáveis no RSPI (<i>AutoForm Plus R7</i>).	88
Figura 4.44 - Limites de especificação: a) <i>Max Failure</i> ; b) <i>Thinning</i> ; c) <i>Springback</i> (<i>AutoForm Plus R7</i>).	89
Figura 4.45 - Índice de capacidade de processo C_p : <i>springback</i> (<i>AutoForm Plus R7</i>)... ..	89
Figura 4.46 - Índice de capacidade de processo C_{pk} : <i>Max Failure</i> (<i>AutoForm Plus R7</i>).	90
Figura 4.47 - Índice de capacidade de processo C_{pk} : <i>Thinning</i> (<i>AutoForm Plus R7</i>)....	90
Figura 4.48 - Índice de capacidade de processo C_{pk} : <i>springback</i> (<i>AutoForm Plus R7</i>). ..	91
Figura 4.49 - Modificação sugerida para colmatar o problema na capacidade do processo: a) peça original; b) modificação de peça (CATIA V5 6R2019).	91
Figura 4.50 - Projeto 3D da ferramenta de estampagem (CATIA V5 6R2019).	92
Figura 4.51 - Projeto 3D da ferramenta de estampagem, detalhado por operação: a) OP10; b) OP20; c) OP30; d) OP40; e) OP50; f) OP60; g) OP70; h) OP80; i) OP90 (CATIA V5 6R2019).	93
Figura 4.52 - Aplicação de cilindros na ferramenta: a) OP20; b) OP30; c) OP80 (CATIA V5 6R2019).	94
Figura 4.53 - Configuração dos elementos móveis com a aplicação dos cilindros dimensionados: a) OP20; b) OP30; c) OP80 (<i>AutoForm Plus R7</i>).	95
Figura 4.54 - Alívio de raios na superfície de construção da matriz da operação OP80: linha azul – contorno de peça; superfície vermelha – superfície sem raios aliviados; superfície verde – superfície com raios aliviados [mm] (CATIA V5 6R2019).	96

Figura 4.55 - Alívio de raios na superfície de construção do cerra-chapas da operação OP80: linha azul – contorno de peça; superfície vermelha – superfície sem raios aliviados; superfície verde – superfície com raios aliviados [mm] (<i>CATIA V5 6R2019</i>).	96
Figura 4.56 - Ângulo de corte. Adaptado de Saanouni et al. (2010).	97
Figura 4.57 - Ângulo de corte aplicado aos punções de corte: OP10 (<i>CATIA V5 6R2019</i>).	97
Figura 4.58 - Cedência dos elementos móveis com a aplicação dos cilindros dimensionados, em função do curso: a) OP20; b) OP30; c) OP80 (<i>AutoForm Plus R7</i>).	98
Figura 4.59 - Forças aplicadas necessárias com os cilindros dimensionados e alívio de raios na OP80, por operação e elemento [kN] (<i>AutoForm Plus R7</i>).	99
Figura 4.60 - Ferramenta de estampagem por operações e com o respetivo resultado (parte inferior): a) OP10; b) OP20; c) OP30; d) OP40; e) OP50; f) OP60; g) OP70; h) OP80; i) OP90.	100
Figura 4.61 - Ferramenta de estampagem por operações (parte superior): a) OP10; b) OP20; c) OP30; d) OP40; e) OP50; f) OP60; g) OP70; h) OP80; i) OP90.	101
Figura 4.62 - Aplicação de cilindros: a) OP20; b) OP30.	102
Figura 4.63 - Sistema de alimentação <i>ELMEA</i> : a) endireitador; b) desenrolador.	102
Figura 4.64 - Ensaio de ferramenta em prensa: a) Prensa <i>MOSSINI 1000 Ton</i> ; b) ferramenta em prensa.....	103
Figura 4.65 - Primeiras peças finais: linha vermelha – zona de visível redução de espessura.	104
Figura 4.66 - Redução de espessura.	104
Figura 4.67 - Maquete de controlo dimensional das peças: a) peça direita; b) peça esquerda.	105
Figura 4.68 - Medição em peça livre.	105
Figura 4.69 - Máquinas de medição por coordenadas da Epalfer: a) <i>CRYSTA-APEX S 9166</i> ; b) <i>Ares NT</i>	106

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1- Requisitos do cliente ao processo.....	39
Tabela 4.1 - Desvio absoluto em relação ao valor central de tolerância (tolerâncias específicas) [mm].	80
Tabela 4.2 - Escala de resultados dos índices de capacidade de processo no RSPI (<i>AutoForm Forming Reality</i> , 2017).....	87
Tabela 4.3 - Variáveis e respectivas variações em estudo.	88
Tabela 4.4 - Comparação dos resultados numéricos com os resultados experimentais [mm].	107

ABREVIATURAS E SIMBOLOGIA

Abreviaturas

AHSS	<i>Advanced High Strength Steel</i>
BH	<i>Bake Hardening</i>
CP	<i>Complex Phase</i>
CV	Conservação de Volume
DP	<i>Dual Phase</i>
FLC	Curva Limite de Estampagem
FLD	Diagrama Limite de Estampagem
FV	<i>Final Validation</i>
HSLA	<i>High Strength Low Alloy</i>
HSS	<i>High Strength Steel</i>
IF	<i>Interstitial Free</i>
LIE	Limite Inferior da Especificação
LSE	Limite Superior da Especificação
MEF	Método dos elementos Finitos
MS	<i>Martensite Steels</i>
M-TRIP	<i>Martensite TRIP</i>
RPS	<i>Reference Point System</i>
RSPI	<i>Robust Systematic Process Improvement</i>
SB-TRIP	<i>Super Bainite TRIP</i>
TRIP	<i>Transformation-Induced Plasticity</i>
TWIP	<i>Twinning-Induced Plasticity</i>
UAHSS	<i>Ultra AHSS</i>
XAHSS	<i>Extra AHSS</i>

Simbologia

C_p	Índice de capacidade de processo
C_{pk}	Índice de capacidade de processo
e_0	Espessura inicial
e_1	Espessura final
l	Comprimento final
l_0	Comprimento inicial
r	Coefficiente de anisotropia
r_0	Anisotropia na direção de laminagem
r_{45}	Anisotropia orientada a 45° da direção de laminagem
r_{90}	Anisotropia orientada a 90° da direção de laminagem
R_m	Tensão máxima
r_n	Anisotropia média normal
t	Espessura final
t_0	Espessura inicial
w	Largura final
w_0	Largura inicial
α	Ângulo de corte
Δr	Anisotropia planar
ε_t	Deformação real segundo a espessura
ε_w	Deformação real segundo a largura
σ_0	Tensão limite de elasticidade

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, é feita uma breve contextualização ao tema, onde se esclarece os objetivos, estrutura-se o documento e apresenta-se a empresa onde se desenvolveu o trabalho.

Os processos de conformação plástica são um setor de liderança mundial, uma vez que permitem a obtenção de peças complexas com aproveitamento praticamente total da matéria-prima e elevada cadência de produção, sem necessidade de posteriores operações de finalização de peça. Os processos de conformação plástica de metais podem ser divididos em dois grupos: os processos de conformação plástica em massa e os processos de conformação plástica de chapas metálicas, onde se destaca a estampagem. A capacidade de dar forma a uma chapa metálica plana requer uma tecnologia própria baseada no conceito de plasticidade – fundamento básico da mecânica dos sólidos não linear; na qual o material é forçado a deformar-se permanentemente por ação de uma força externa.

Em virtude da grande competitividade no setor automóvel, o objetivo passa por reduzir custos e aumentar a produtividade, mantendo os elevados níveis de segurança e qualidade do produto final (Wang et al., 2007). Para tal, a tendência atual dos processos de conformação plástica é aumentar a razão resistência/ peso dos componentes conformados. Isso é conseguido com o desenvolvimento ao nível dos materiais, bem como com a melhoria da previsão e precisão do processo, com o auxílio da simulação numérica baseada no método de elementos finitos (MEF).

A estampagem é um processo produtivo utilizado em larga escala na indústria automóvel, nomeadamente na produção de peças de aspeto, semi-aspeto e estruturais. De um modo geral, a chapa é progressivamente sujeita a várias operações de conformação

plástica – de corte, dobração ou embutidura; a fim de se obter a forma final desejada, num processo designado de estampagem multi-etapa.

As principais dificuldades na produção de peças estampadas relacionam-se com a previsão do comportamento da chapa ao longo do processo. Os defeitos na forma ou dimensionais, na peça ou na superfície e nas propriedades mecânicas da peça, exigem uma fase de projeto rigorosa. Tradicionalmente, o projeto de ferramentas de estampagem baseia-se na experiência e na utilização de métodos de tentativa/ erro. No entanto, a competitividade do setor, a constante evolução das novas tecnologias e o desenvolvimento do MEF, motivou o aparecimento de métodos de análise numérica de produção virtual (Ablat & Qattawi, 2017; Wang et al., 2007). Atualmente, a utilização de programas de simulação é parte integrante e imprescindível no projeto de ferramentas de estampagem, de modo a diminuir custos e aumentar a eficiência e a rapidez de todo o processo (Ablat & Qattawi, 2017), com a previsão exata dos campos de tensão e deformação induzidos na chapa, em cada etapa. Com o auxílio dos *softwares* de simulação numérica, o ciclo de desenvolvimento das ferramentas de estampagem é reduzido em cerca de 30 a 50% (AutoForm Forming Reality, 2020a; Roll, 2008), com uma tendência constante de otimização ao longo dos anos, pelos avanços tecnológicos.

1.1 Empresa

A Epalfer - Serralharia de Moldes, Cunhos e Cortantes, Lda iniciou a sua atividade em 2002, com o fabrico de cunhos e cortantes para a indústria das ferragens. Mais tarde, deixa de executar tal atividade e passa a dedicar-se ao desenvolvimento e construção de ferramentas de estampagem de componentes para a indústria automóvel, integrando-se, segundo a Classificação Portuguesa das Atividades Económicas, no ramo de atividade 257 – Fabricação de moldes metálicos. A gama de atividades da empresa varia entre a conceção de protótipos, ferramentas progressivas, ferramentas *transfer*, ferramentas híbridas e *gabarits*. Atualmente, a empresa conta com 81 colaboradores e com equipamentos disponíveis para a realização interna de toda a cadeia de valor do produto, incluindo a simulação do processo, dimensionamento, produção e montagem da ferramenta de estampagem, testes e produção de peças em prensa e controlo dimensional das peças conformadas.



Figura 1.1 - Logótipo e instalações da Epalfer.

1.1.1 Processo

O processo de produção de moldes metálicos, seguido na Epalfer e de uma forma geral e simplificada, é representado pelo fluxograma da Figura 1.2. Após negociação e adjudicação da ferramenta por parte do setor comercial, o processo inicia-se no gabinete de projetos, com a definição e simulação do processo de estampagem e dimensionamento de todos os componentes da ferramenta de estampagem; são também analisados e adaptados os requisitos do cliente à viabilidade do processo de estampagem e produtivo da empresa, cumprindo o caderno de encargos do cliente.

A sequência produtiva necessária ao setor é de enorme exigência em termos de flexibilidade, dado que, consoante a funcionalidade do componente, a programação produtiva varia. Na generalidade dos componentes de conformação ou corte de chapa, inicialmente o material chega em bruto, do *stock* ou dos respetivos fornecedores de aço, à secção de galgamento, onde é feito o desbaste por máquinas fresadoras convencionais. De seguida, o componente é maquinado uma primeira vez para aproximação à cota das modelações. Após esta operação, é aplicado um tratamento térmico de elevação de dureza do material (processos de têmpera e revenido), caso a funcionalidade do componente ou o cliente o exija. Posteriormente, na retificação obtém-se o paralelismo e a perpendicularidade entre as faces. Devido às deformações provocadas no tratamento térmico, é necessária uma segunda maquinação CNC, onde é dado o acabamento final aos componentes. Por último, são erodidos, por eletroerosão a fio, os componentes de dimensões com toleranciamento apertado, como por exemplo, os elementos de corte da ferramenta ou os furos de encavilhamento.

Após a conclusão da produção dos componentes, as ferramentas de estampagem são montadas e ensaiadas em prensa. Por último, as afinações finais realizadas são desenvolvidas no gabinete de projeto, de acordo com o relatório de controlo dimensional

das peças estampadas. O processo de afinações e ajustes da ferramenta de estampagem é um processo iterativo, em que, no seguimento das informações do gabinete de projetos, os componentes são desmontados, alterados e montados. A ferramenta de estampagem é aprovada quando as peças resultantes cumprem as exigências definidas pelo cliente.

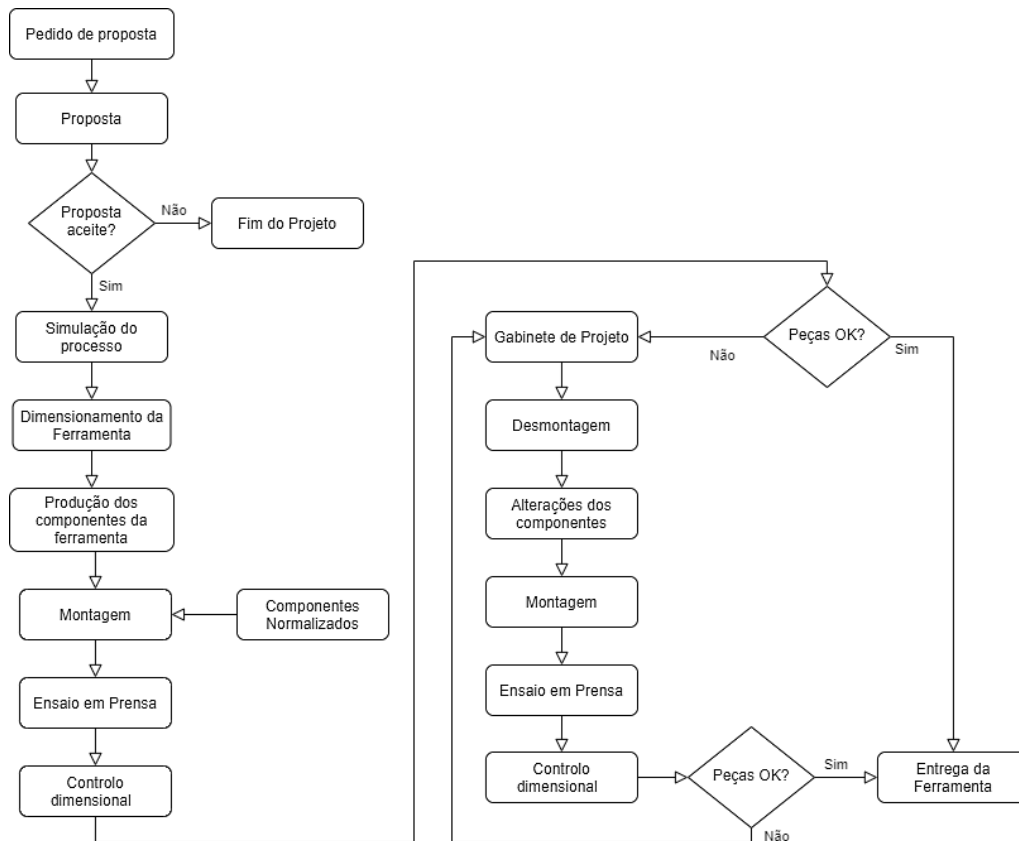


Figura 1.2 - Fluxograma do processo produtivo da Epalfer.

1.1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho consiste na validação do processo de estampagem de um componente de chapa metálica automóvel, através da simulação numérica baseada no cálculo do método dos elementos finitos. Para tal, são considerados os seguintes subobjetivos:

- Definição do ciclo de estampagem;
- Estudo da formabilidade da chapa;
- Previsão e compensação da recuperação elástica;
- Otimização do processo;
- Análise da capacidade do processo;
- Comparação dos resultados numéricos com os experimentais.

1.2 Estruturação do Documento

O presente documento encontra-se dividido em 5 capítulos, sendo este primeiro uma introdução ao trabalho, onde é feita uma breve contextualização ao tema, é apresentada a empresa na qual se desenvolveu o trabalho e são enumerados os principais objetivos a atingir.

No segundo capítulo, o tema é enquadrado de acordo com os estudos e desenvolvimentos bibliográficos, abordando o processo de estampagem e todas as variáveis que o afetam, bem como as propriedades e o comportamento dos aços utilizados na indústria automóvel e a evolução e auxílio da simulação numérica nos processos de conformação de chapa metálica.

No terceiro e quarto capítulo, é formulado, apresentado e validado o processo de estampagem. O capítulo 3 inicia-se com a análise das peças a estampar e das exigências do cliente ao processo. Posteriormente, é contruído o modelo numérico de simulação do ciclo de estampagem previamente definido. Na validação numérica do processo durante o capítulo 4, é avaliado a formabilidade da peça, o *springback*, o consumo de chapa, as forças necessárias e a capacidade do processo. Ao longo da validação, os resultados numéricos são apresentados, analisados, otimizados e comparados com os resultados experimentais.

Por último, no quinto capítulo, são apresentadas as devidas conclusões e expostas propostas de trabalhos futuros.

2. ESTADO DE ARTE

Neste capítulo, são clarificados os conceitos associados à estampagem, como as operações e os elementos de deformação, as dificuldades do processo e os equipamentos necessários. Posteriormente, é realizada uma abordagem histórica da evolução dos materiais metálicos e apresentadas as tendências evolutivas da aplicação destes na indústria automóvel. São igualmente descritas as principais características e o comportamento mecânico dos materiais metálicos, especialmente no processo de estampagem de chapa. Por último, é abordado o impacto da simulação numérica na previsão e otimização dos resultados no processo de estampagem.

2.1 Processo de Estampagem

A estampagem é um processo tecnológico de conformação plástica de metais, que consiste na produção de peças, de superfície não planificável ou não gerada, através de chapa metálica. Esta é forçada a escoar para o interior da matriz, em consequência da atuação do punção por ação de uma força externa, dando origem a uma peça com a geometria definida pelo conjunto punção/ matriz. Por outras palavras, o embutido é o resultado do conjunto de operações de deformação plástica de uma chapa plana, de modo a obter uma peça com uma geometria própria. As peças obtidas são caracterizadas pela reduzida variação de espessura, relativamente ao valor inicial.

A estampagem é um processo largamente difundido na produção em escala de componentes na indústria alimentar, aeronáutica, aeroespacial e de elementos domésticos e decorativos, com maior enfoque na indústria elétrica, eletrónica e automóvel (Choomlucksana et al., 2015). Tal deve-se à sua capacidade de cadências produtiva elevada, que pode atingir as 5000 peças/ hora (Pinheiro et al., 2013), com um aproveitamento total ou quase total da matéria-prima (Santos et al., 2005) e obtenção do

produto final, sem necessidade de operações subsequentes e com elevada repetibilidade (Bałon & Świątoniowski, 2015).

2.1.1 Operações

O processo de estampagem multi-etapa é, como o próprio nome indica, um processo sequencial de operações, a quente ou a frio, por exigência das características da peça, matéria-prima ou necessidades técnicas. Este processo subdivide-se em operações de corte, dobragem e embutidura.

2.1.1.1 Corte

O corte é uma operação mecânica realizada por consequência do movimento do punção de corte, onde, quando o punção inicia a penetração na chapa, o esforço de compressão converte-se em esforço de corte até à rotura, provocando a remoção de material. O material removido pelo punção pode ser peça final ou sucata. O punção deve apresentar uma secção análoga ao contorno da forma geométrica a ser extraída da chapa, do mesmo modo que a cavidade da matriz, contemplando a folga de corte necessária à operação.

Na primeira fase, a força do punção atua sobre a chapa, deformando-a plasticamente [Figura 2.1a)]. De seguida, ocorre a fase de penetração, onde o punção, não encontrando resistência por parte da matriz, obriga o material a escoar ao longo do plano definido pela geometria do punção e da matriz [Figura 2.1b)]. Posteriormente, o esforço de compressão supera a resistência de corte da chapa e provoca a rotura da mesma [Figura 2.1c)]. Por último, dá-se o movimento de subida do punção e é feita a extração da peça. Esta operação pode ser realizada com o auxílio (Figura 2.1), ou não (Figura 2.2), do cerra-chapas, que fixa a chapa antes da ação do punção de corte. As etapas do processo de corte estão ilustradas na Figura 2.1.

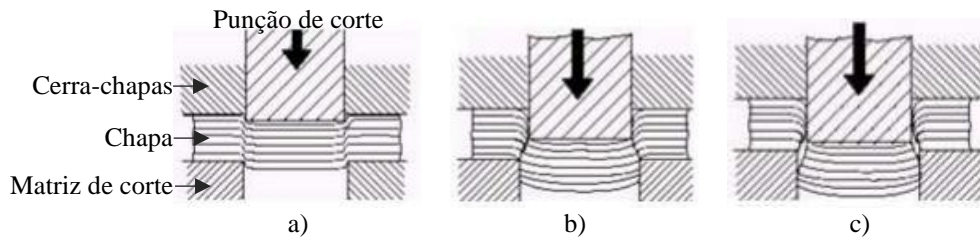


Figura 2.1 - Etapas do processo de corte: a) deformação plástica; b) corte; c) rotura. Adaptado de Brites et al. (2013).

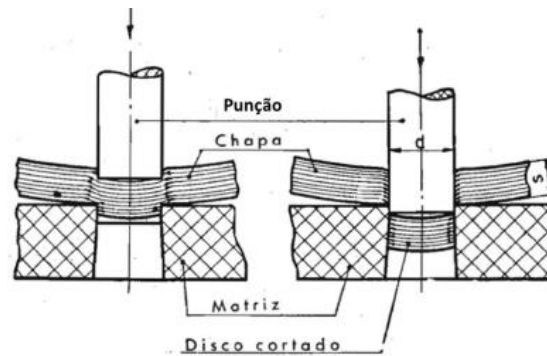


Figura 2.2 - Princípio de corte.

2.1.1.2 Dobragem

A dobragem é um processo de deformação permanente de chapa, que permite a produção de peças ou secções de superfícies planificáveis. O projeto das operações de dobragem envolve um conjunto de procedimentos, dos quais se destacam: a determinação da geometria e planificação da dobra, o dimensionamento das ferramentas de dobragem e, principalmente, a quantificação da recuperação elástica do material (Schaeffer, 2005). Na operação de dobragem, os esforços de conformação concentram-se no raio de concordância, onde o raio interno está sujeito a tensões de compressão e o raio externo a tensões de tração (Figura 2.3). Por tal, a eventual fratura da peça ocorre na parte externa e o enrugamento na parte interna.

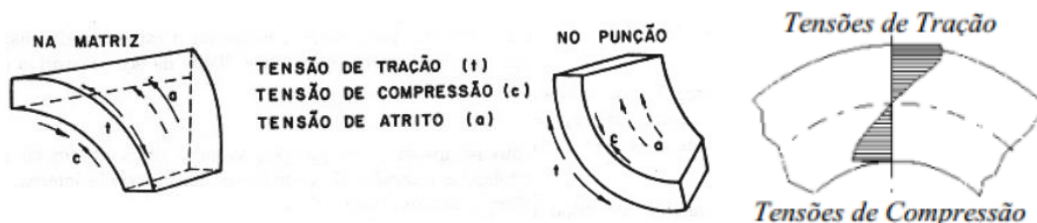


Figura 2.3 - Tensões aplicadas na chapa durante a operação de dobragem (Filho et al., 2011).

Na operação de dobragem, inicialmente a chapa é calcada pelo cerra-chapas em oposição à matriz, na zona onde não irá sofrer alterações, deixando uma parte livre para ser dobrada. Posteriormente, o punção exerce uma força de dobragem, F_d , sobre a parte livre, iniciando-se a deformação da chapa. A operação caracteriza-se pela geometria dos elementos de dobragem e pelo modo de sollicitação da chapa entre o punção e a matriz. A Figura 2.4 ilustra a operação de dobragem.

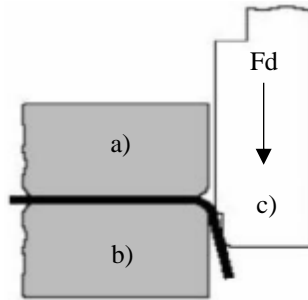


Figura 2.4 - Dobragem – elementos da operação: a) cerra-chapas; b) matriz; c) punção; F_d (força de dobragem). Adaptado de Rodrigues et al. (2010).

2.1.1.3 Embutidura

A operação de embutidura tem como objetivo a produção de peças de superfície não planificável por deformação plástica de chapa. Nesta operação, a chapa é obrigada a conformar-se à geometria da matriz, por meio da força exercida pelo punção. Esta operação ocorre na presença, ou não, de cerra-chapas, classificando-se assim o processo de embutidura por ferramentas de simples, duplo ou triplo efeito. Na embutidura por ferramentas de simples efeito, a chapa é forçada pelo punção a escoar contra a matriz; nas ferramentas de duplo efeito, a chapa, restringida pelo cerra-chapas, é forçada pelo punção a escoar contra a matriz; nas ferramentas de triplo efeito, a chapa, restringida pelo cerra-chapas e pela almofada, é forçada pelo punção a escoar contra a matriz (Santos et al., 2005).

A operação de embutidura é, no processo tradicional, constituída por 4 fases (Figura 2.5):

- Fase 1: alimentação do processo, com chapa metálica previamente cortada;
- Fase 2: bloqueio da chapa entre o cerra-chapa e a matriz, consequência da descida do cerra-chapa;
- Fase 3: conformação plástica da chapa, pela ação da força exercida pelo punção sobre a matriz;
- Fase 4: subida do cerra-chapas e do punção e extração da peça.

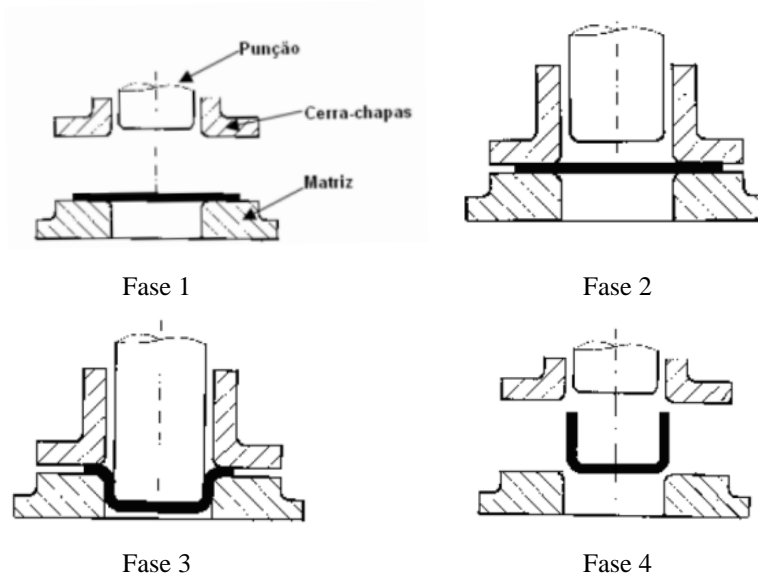


Figura 2.5 - Fases e elementos da operação de embutidura.

Para evitar o surgimento de rugas e permitir o controlo do processo de embutidura, é comum restringir ou impedir o deslizamento da chapa, através da pressão do cerra-chapas ou de saliências entre a matriz e o cerra-chapas, designados por freios (Figura 2.8). Contudo, estas soluções têm influência direta no modo de deformação da peça. Assim, se falarmos de embutidura por ferramentas de simples efeito ou se a pressão do cerra-chapas não impedir o fluxo da chapa, a deformação é, fundamentalmente, por extensão. Caso contrário, tratando-se de embutidura por ferramentas de duplo ou triplo efeito, onde a pressão do cerra-chapas impede o deslizamento da chapa entre a matriz e o cerra-chapas, o modo de deformação é, fundamentalmente, por expansão (Santos et al., 2005)

Os dois modos de deformação, descritos anteriormente, têm influência determinante na variação de espessura, entre a peça inicial (e_0 – espessura inicial) e a

final (e_1 – espessura final) (Rodrigues et al., 2010). Na deformação por extensão [Figura 2.6 a)], todas as direções da chapa estão sujeitas a esforços de tração, as paredes laterais e o fundo do embutido não sofrem variação da espessura ($e_1 = e_0$) e a espessura da parte superior da peça tem tendência a aumentar, com o aparecimento de esforços de compressão nesta zona ($e_1 > e_0$). Na deformação por expansão [Figura 2.6 b)], a espessura final da peça é inferior à espessura da chapa inicial ($e_1 < e_0$), onde existe esforços de tração, na direção do plano da chapa, e de compressão, na direção perpendicular à anterior.

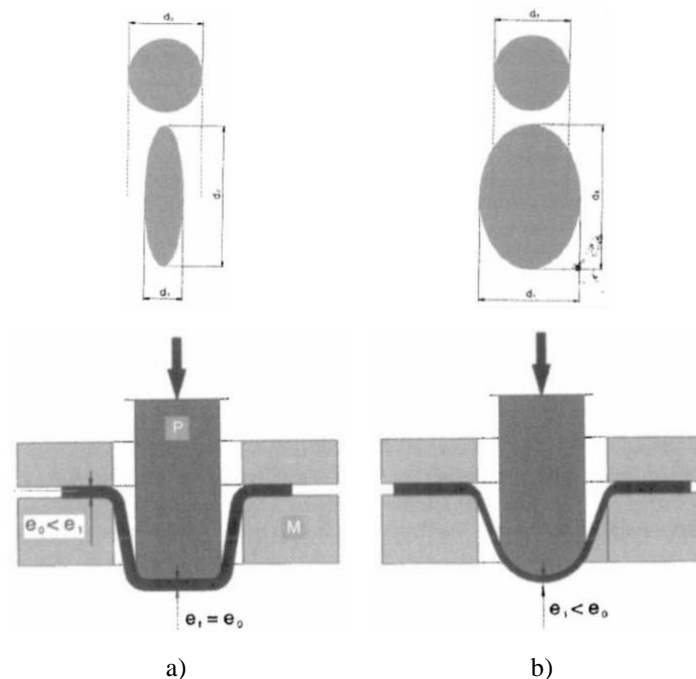


Figura 2.6 - Modos de deformação da chapa: a) por extensão; b) por expansão (Santos et al., 2005).

2.1.2 Ciclo de Estampagem

A produção de peças por estampagem metálica não tem um padrão de processo, dada a grande diversidade de variantes do processo, complexidade da peça ou limitações dos recursos de estampagem. Para se obter uma peça final, raramente basta recorrer a uma só operação de corte, dobragem ou embutidura, impondo-se a necessidade de conjugar ou subdividir as operações. Por isto, os critérios de seleção do tipo e sequência do processo a utilizar é de extrema importância. O ciclo de estampagem corresponde à sequência ordenada de operações tecnológicas de transformação de chapa metálica plana

em peças finais estampadas; e depende de numerosos parâmetros, tais como, as características da peça e da matéria-prima (Santos et al., 2005):

- Características da peça: o número de operações é diretamente influenciado pela complexidade e dimensões da peça;
- Matéria-prima: a qualidade e as dimensões da chapa influenciam o número de operações, isto é, quanto maior a capacidade plástica e menor espessura da chapa, menor será o número de operações necessárias para produzi-la.

Para além destes, o ciclo de estampagem deve ter em consideração fatores mecânicos, entre os quais, o tipo de ferramenta de estampagem, o tipo e características da forma, as dimensões dos elementos de estampagem e as condições do processo (Filho et al., 2011).

Em suma, na definição do ciclo de estampagem, todos estes fatores são oportunos e influenciam o número de operações e as condições do processo de estampagem – temperatura (a frio ou a quente), atrito (lubrificação e polimento), velocidade de estampagem, tipo e manutenção de ferramenta e de prensa.

2.1.3 Defeitos

A precisão da geometria final das peças estampadas é uma questão crítica na qualidade do produto final, no custo e no tempo de produção. Apesar dos defeitos de carácter dimensional serem os mais relevantes no controlo de qualidade da peça final, o aumento da exigência da qualidade superficial tornou os defeitos de natureza estética um fator importante no processo de estampagem.

Os defeitos em peças estampadas podem dividir-se em 3 classes: defeitos na forma ou dimensionais, defeitos na peça ou na superfície e defeitos das propriedades mecânicas da peça. Essencialmente, a origem destes defeitos está na conceção das ferramentas, comportamento mecânico do material, interação de superfícies entre a ferramenta e a peça e interação da ferramenta com a prensa. Os defeitos mais comuns no processo de estampagem são a rotura ou localização da deformação, o surgimento de rugas e a recuperação elástica (Kim et al., 2000; Santos et al., 2005).

2.1.3.1 Recuperação Elástica ou *Springback*

O principal fenômeno que contribui para os desvios dimensionais, entre a peça final e a peça nominal, é o *springback* (Yoshida et al., 2013). Esta distorção dimensional representa a recuperação elástica da chapa, devido à distribuição não-uniforme das tensões residuais ao longo da espessura da chapa, após conformação plástica. Este defeito dimensional impõe a avaliação da peça a cada etapa, antes e depois da abertura da ferramenta. Quando a ferramenta de estampagem está fechada, a peça tem a geometria nominal imposta pela matriz e punção. Porém, quando está aberta, existe um alívio das tensões residuais internas e será atingido um novo equilíbrio estático (Yoshida et al., 2013), havendo uma alteração da forma da peça de complexa previsão. O *springback* depende da conjugação das propriedades mecânicas do material, principalmente das propriedades elásticas (Jadhav et al., 2018), dos níveis e distribuição das tensões e deformações, da geometria das ferramentas e dos parâmetros do processo.

Segundo Yoshida et al. (2013), o *springback* divide-se em 4 alterações: alteração de ângulo [Figura 2.7a)], empenamento da parede [Figura 2.7b)], torção [Figura 2.7c)] e curvatura [Figura 2.7d)], sendo os dois primeiros os defeitos dimensionais mais comuns.

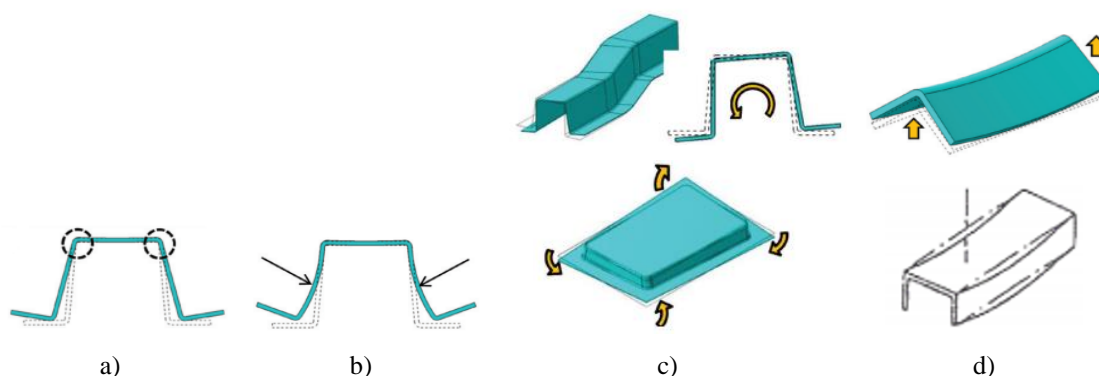


Figura 2.7 - Classificação das alterações por springback: a) alteração de ângulo; b) empenamento da parede; c) torção; d) curvatura. Adaptado de Yoshida et al. (2013).

Tradicionalmente, o *springback* é resolvido através de métodos de tentativa/ erro, onde, contrariando a tendência natural da chapa, se compensa os elementos de estampagem. Contudo, a experiência acumulada de previsão da recuperação elástica é cada vez mais dificultada pela utilização de novos materiais (Yoshida et al., 2013), que apresentam comportamentos mecânicos diferentes do convencional. Atualmente, a

previsão do *springback* é maioritariamente por simulações de elementos finitos (Tisza & Lukács, 2014).

A previsão do *springback* por simulação numérica também varia consoante certas variáveis, entre as quais (Banabic, 2010):

- Propriedades do material – módulo de elasticidade, tensão de cedência, encruamento, alongamento e anisotropia;
- Características da peça – espessura, dimensões e geometria da ferramenta;
- Condições de processo – velocidade e força de estampagem e temperatura;
- Variáveis numéricas – tipo e dimensão do elemento finito, número de pontos de integração por elemento, tamanho do incremento temporal, modelo constitutivo do material e modelo de travamentos.

As principais medidas de compensação do *springback* são (Yoshida et al., 2013, citando Hiwatashi & Yoshida, 2005):

- Redução da força de estampagem – uniformização da distribuição de tensões e redução da tensão residual;
- Aumento da rigidez – alteração da espessura da chapa ou forma da peça;
- Compensação da deformação dos elementos de embutidura – projeto das ferramentas de estampagem contrariando a recuperação elástica.

2.1.3.2 Enrugamento ou *Wrinkling*

O enrugamento em embutidura ocorre quando existem forças compressivas capazes de levar à acumulação de material numa zona. Este defeito depende do estado de tensão, das propriedades mecânicas da chapa e da geometria da peça (Kim et al., 2000) e é proporcional à força do cerra-chapas, onde uma força baixa causa enrugamento e uma força elevada minimiza ou elimina o enrugamento. No entanto, uma força elevada provoca uma diminuição de espessura na zona do raio de concordância com o punção e consequente rotura, por outras palavras, a pressão exercida pelo cerra-chapas deverá ser suficientemente baixa para permitir o movimento da chapa e suficientemente alta para evitar o enrugamento. Para além deste fator, a tendência de utilização de chapas metálicas de menor espessura com maior tensão de cedência faz com que este defeito seja observado com maior frequência no processo de conformação plástica (Kawka et al., 2001). Portanto, a solução passa por aumentar a pressão do cerra-chapas ou controlar a deformação com a utilização de freios de retenção (Figura 2.8), quando uma pressão

demasiado elevada do cerra-chapas provocar um esmagamento da chapa e conseqüente redução excessiva de espessura ou roturas.

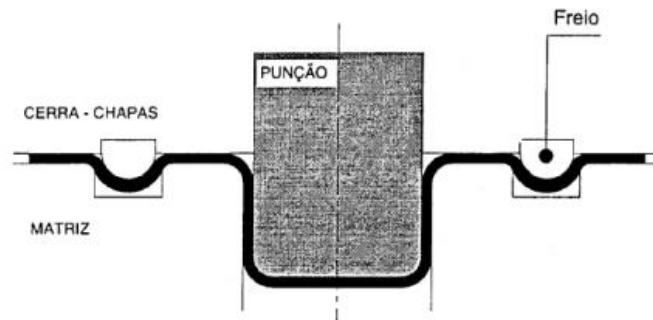


Figura 2.8 - Utilização de freios de retenção (Santos et al., 2005).

2.1.4 Sistema de Alimentação

Os principais objetivos de qualquer processo é aumentar a produtividade e a qualidade do produto final, diminuir os desperdícios, reduzir os custos de produção e superiorizar a segurança do processo para o operador. A automatização das operações é uma das soluções; como tal, o sistema de alimentação das ferramentas de estampagem é, na maioria dos casos, automatizado.

Os elementos de alimentação podem ser divididos em: equipamentos de alimentação a partir de bobines ou bandas e sistemas *transfer* automáticos ou *robot*. A alimentação pode ser a partir de formatos de chapa com dimensões normalizadas ou obtidos através do corte em guilhotina; ou bobines de largura fixa.

Quando a alimentação é realizada a partir de bobines, o sistema de alimentação é constituído por três equipamentos base:

- Desenrolador – fixação e desenrolamento da bobine;
- Endireitador – planificação da chapa, removendo tensões;
- Alimentador – introdução da chapa na prensa a cada golpe da ferramenta, num avanço igual ao passo da ferramenta.

A alimentação realiza-se unicamente durante a fase inativa da ferramenta, quando a prensa se encontra em movimento ascendente. Quando se trata de alimentação por formatos, o sistema de alimentação é a partir de sistemas *transfer* automáticos ou *robot*, que transportam as peças de operação para operação, dentro da mesma prensa, ou de prensa para prensa.

2.1.5 Ferramentas de Estampagem

O desenvolvimento e a concepção de uma ferramenta de estampagem são processos complexos e com elevados custos inerentes. Como tal, a escolha do tipo de ferramenta a desenvolver é baseada na relação custo/ benefício, resultante da análise de fatores como:

- Características e dimensões da matéria-prima;
- Qualidade, fiabilidade e tolerância dimensional da peça final;
- Características do sistema de alimentação e da prensa disponíveis.
- Cadência e dimensão da série produtiva;

As ferramentas de estampagem podem dividir-se em: ferramentas manuais, ferramentas progressivas, ferramentas *transfer* e ferramentas híbridas.

2.1.5.1 Ferramentas Manuais

Nas ferramentas manuais ou de trabalho peça a peça, por cada golpe da prensa é realizada somente uma operação e cada operação requer uma ferramenta única. Assim, caso a peça necessite de múltiplas operações, as peças terão de ser deslocadas de prensa em prensa ou será necessário trocar de ferramenta sempre que se pretenda efetuar uma operação distinta numa mesma prensa. Estas ferramentas, dada a componente manual, destinam-se a pequenas séries produtivas (Santos et al., 2005).

2.1.5.2 Ferramentas Progressivas

Nas ferramentas progressivas, as operações são sequenciais à medida que a chapa entra na prensa, com alimentação automática a partir de bobines ou manual a partir de bandas. Por cada golpe da prensa, dá-se um deslocamento da banda, que é designado por passo ou avanço da ferramenta, controlado pelo comprimento da navalha de passo ou pelo próprio alimentador e centrado por pilotos. Nesta sequência de operações, a peça produzida progressivamente mantém-se unida à banda, até à última operação de corte de separação de peça. Caso exista a possibilidade de realização progressiva da peça, as ferramentas progressivas destinam-se a médias e grandes séries produtivas, com custos de mão-de-obra baixos (Santos et al., 2005).

2.1.5.3 Ferramentas *Transfer*

As ferramentas *transfer*, como as ferramentas progressivas, têm um ciclo de estampagem sequencial. Contudo, cada operação é realizada por um conjunto de

elementos mecânicos distintos e independentes, montados em sequência numa mesma prensa. A alimentação da chapa é feita automaticamente a partir de bobines ou de formatos. A movimentação das peças de operação para operação é realizada por sistemas *transfer* automáticos (Figura 2.9) ou por *robot*, equipados com sistemas pneumáticos, magnéticos ou mecânicos. A par das ferramentas progressivas, o custo de mão-de-obra destas ferramentas é baixo, sendo utilizado para grandes séries produtivas (Santos et al., 2005). A sua flexibilidade, tratando estas ferramentas como um conjunto de ferramentas, facilita as alterações sucessivas às operações e o processo de manutenção, tornando-se assim uma grande vantagem.

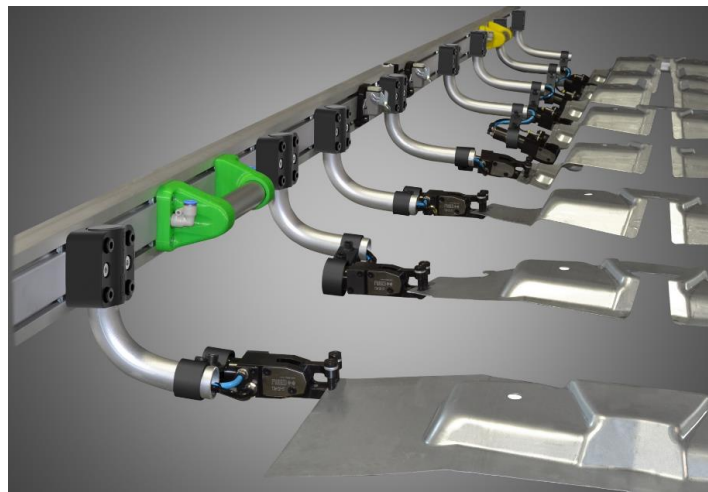


Figura 2.9 - Sistemas *transfer* automático.

2.1.5.4 Ferramentas Híbridas

As ferramentas híbridas são uma combinação de ferramentas progressivas e *transfer*, que permitem uma otimização maior no número de elementos de estampagem. A principal vantagem na utilização destas ferramentas é a minimização do consumo de matéria-prima na produção de peças de geometria complexa. Porém, apresenta um custo de dimensionamento mais elevado, em comparação com as outras ferramentas de estampagem.

2.1.6 Prensas

A prensa é definida como a máquina que fornece a força necessária aos elementos constituintes das ferramentas, ou seja, é a máquina que proporciona o movimento dos elementos das ferramentas durante o processo de conformação plástica da chapa. Na

generalidade, estas caracterizam-se por apresentar unicamente movimento vertical, onde qualquer movimento com outra direção será com recurso a elementos mecânicos específicos. A principal forma de classificação das prensas é a natureza de acionamento, onde este pode ser mecânico, hidráulico ou servomecânico. Para além desta classificação, as prensas podem ser classificadas pelo tipo de trabalho – a quente ou a frio; pela forma da estrutura ou pelo número de correções (Rodrigues et al., 2010).

2.1.6.1 Prensa Mecânica

Nas prensas mecânicas, o movimento linear vertical provém da transformação do movimento rotativo do volante de inércia, através de um sistema biela-manivela. Por outras palavras, quando é ativado o movimento da prensa, o motor elétrico transmite movimento ao volante de inércia, que, por meio de uma embraiagem, aciona o sistema biela-manivela, transformando o movimento rotativo num movimento linear.

2.1.6.2 Prensa Hidráulica

Neste tipo de prensas, a potência necessária para o movimento de subida e descida da prensa é fornecida através de cilindros hidráulicos. Estas prensas dispõem de um sistema hidráulico de controlo de velocidade e força de trabalho, através da regulação do caudal e da pressão, conseguindo-se um trabalho a baixa velocidade e elevada pressão. As prensas hidráulicas caracterizam-se por possibilitar o ajuste da pressão, do curso, da velocidade e por não necessitarem de proteção contra sobrecargas. Em comparação com as prensas mecânicas, as prensas hidráulicas são mais lentas, necessitam de motores elétricos com maior potência, não suportam o choque – especialmente em operações de corte por arrombamento; requerem maiores cuidados de manutenção e apresentam cursos maiores (Rodrigues et al., 2010).

2.1.6.3 Prensa Servomecânica

As prensas servomecânicas são acionadas através de servomotores eletromecânicos. Pelo controlo da velocidade e posição do movimento da prensa e pela aplicação da força total em qualquer posição, este tipo de acionamento confere a flexibilidade de uma prensa hidráulica aliada à velocidade, precisão e segurança de uma prensa mecânica (Osakada et al., 2011). Face a estas características, as prensas servomecânicas são frequentemente utilizadas para aumentar o limite de deformação da

chapa, melhorar a qualidade do produto final, reduzir as forças de impacto, diminuir as vibrações da chapa, diminuir o tempo de ciclo e aumentar a produtividade.

2.2 Aços na Indústria Automóvel

A indústria automóvel enfrenta atualmente uma pressão pela crescente procura por carros com menor consumo de combustível e pelas regulamentações de emissão de gases cada vez mais rígidas (Tisza, 2013), para além da necessidade de apresentação de melhorias ao nível estético, conforto e segurança. A fim de limitar o consumo de energia e a poluição do ar, o peso da carroçaria deve ser reduzido – uma redução de 10 % no peso total de um carro, resultaria em melhorias de 5,5 % na economia de combustível (Galan Lopez et al., 2012). Sem afetar os altos níveis de segurança exigidos, a escolha do material torna-se uma decisão importante no *design* do carro. Em resposta a estes requisitos, têm surgido novas classes de aço (Figura 2.10), que oferecem um excelente equilíbrio entre propriedades mecânicas, peso e custo; ou substituídas as ligas de aço por materiais de ligas mais leves, como as ligas de alumínio (Figura 2.11).

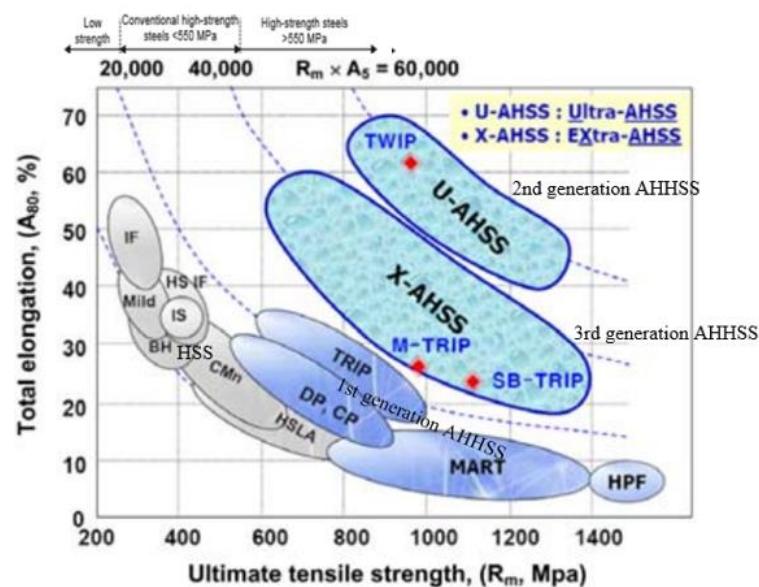


Figura 2.10 - Gama de aços utilizados na indústria automóvel. Adaptado de Keeler & Kimchi (2017) e Tisza (2013).

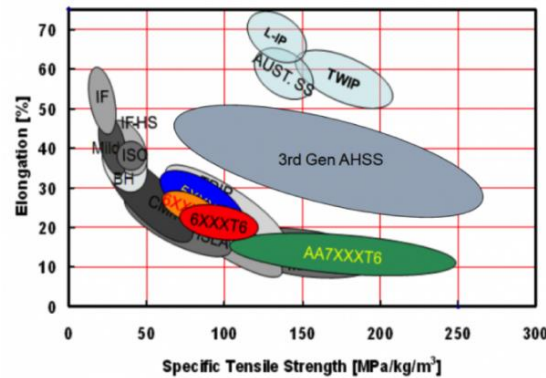


Figura 2.11 - Gama de aços e ligas de alumínio utilizados na indústria automóvel (Djukanovic, 2017).

A produção automóvel é um dos principais mercados da indústria de conformação plástica de chapa metálica. Associando isto às metas do setor – redução de peso e aumento dos requisitos de segurança; o desenvolvimento de novos materiais, através da combinação de propriedades de diferentes materiais, tem sido uma área de estudo constante. Para além das condições operatórias do processo, o sucesso das operações de conformação plástica de chapa metálica depende das características produtivas, mecânicas e reológicas da chapa, fundamentalmente.

Os aços utilizados na indústria automóvel, de acordo com a resistência limite elástica, subdividem-se em (Figura 2.10):

- Aços de baixa resistência – aços *Interstitial Free* (IF) e aços macios;
- Aços convencionais *High Strength Steel* (HSS) – aços *Bake Hardening* (BH) e aços de elevada resistência de baixo teor de liga *High Strength Low Alloy* (HSLA);
- Aços avançados de elevada resistência *Advanced High Strength Steel* (AHSS) – aços de primeira, segunda e terceira geração AHSS.

Os aços de baixa resistência, como os aços IF, apresentam uma grande capacidade de deformação – ductilidade; permitindo um bom desempenho na conformação plástica. Apesar disto, deixam a desejar na resistência mecânica, surgindo, portanto, os aços convencionais HSS, com tensões limite de elasticidade compreendida entre os 350 MPa e os 550 MPa. Quanto maior a resistência elástica, menor será a sua capacidade de deformação, segundo a Figura 2.10. Contudo, para os aços HSS, o aumento da resistência é muito mais significativo que a diminuição da ductilidade (Keeler & Kimchi, 2017). Contrariamente, os aços AHSS combinam uma elevada resistência mecânica com uma elevada ductilidade, apresentando uma relação resistência/ deformação superior à dos

aços de baixa resistência (Keeler & Kimchi, 2017), tornando-os competitivos nas operações de conformação plástica. Os aços AHSS, com uma tensão limite de elasticidade superior a 550 MPa, dividem-se em 3 gerações (Keeler & Kimchi, 2017; Tisza, 2013):

- AHSS – aços *Dual Phase* (DP), *Transformation-Induced Plasticity* (TRIP), *Complex Phase* (CP) e *Martensite Steels* (MS);
- *Ultra AHSS* (UAHSS) – aços *Twinning-Induced Plasticity* (TWIP);
- *Extra AHSS* (XAHSS) – aços *Martensite TRIP* (M-TRIP) e *Super Bainite TRIP* (SB-TRIP).

A indústria automóvel é um mercado bastante competitivo, tendo como principais objetivos o aumento de produtividade e a diminuição de custos, o que permite e impulsiona o desenvolvimento e inovação do processo. Cada vez mais, o conceito de multimaterial na produção automóvel é uma solução, optando-se por ligas mais leves, como o alumínio, e aços de elevada resistência, de forma a aumentar a rigidez e reduzir o peso do automóvel. Como se verifica na Figura 2.12 e Figura 2.13, existe uma substituição clara do aço pelo alumínio, tanto na produção total do carro como da carroçaria (Tisza, 2013); o alumínio representa a maioria percentual dos materiais utilizados na conceção atual da carroçaria [Figura 2.12b)] e previsional, para 2025, do carro [Figura 2.13b)] (Djukanovic, 2017).

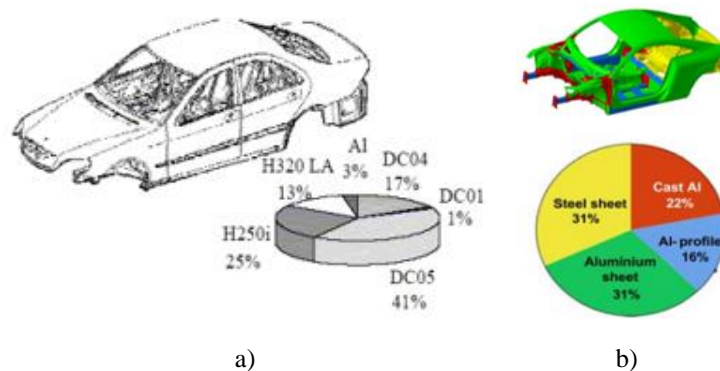


Figura 2.12 - Evolução dos materiais utilizados na conceção da carroçaria do carro: a) 1999; b) 2013 (Tisza, 2013).

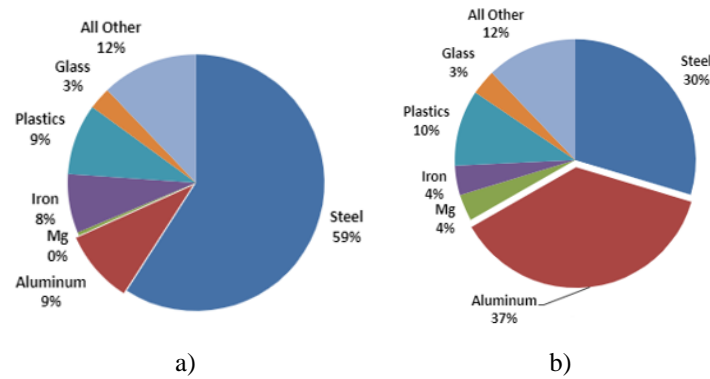


Figura 2.13 - Evolução dos materiais utilizados na concepção do carro: a) 2017; b) 2025 (Djukanovic, 2017).

O automóvel do futuro, leve, seguro, ecológico, confortável, inovador, económico e acessível (Santos et al., 2005), seguirá o conceito de utilização multimaterial, com uma visão integrada do material, conceito do produto e tecnologia de processo produtivo, procurando-se encontrar o compromisso ótimo para o volume de produção (Kazan, 2019), como representado pela Figura 2.14.



Figura 2.14 - Tendência de redução de peso de um carro (Kazan, 2019).

2.2.1 Anisotropia

Os materiais são considerados isotrópicos quando apresentam propriedades mecânicas constantes com a variação da direção de solicitação. Contudo, a grande maioria dos materiais metálicos varia o seu comportamento mecânico em função da direção de solicitação (Zaderii et al., 2005), nomeadamente a tensão limite de elasticidade e, conseqüentemente, a deformação (Rodrigues et al., 2010). Esta característica denomina-

se anisotropia e é influenciada, essencialmente, pela estrutura cristalográfica, pelo processo de produção do material e pelos tratamentos térmicos a que foi submetido.

O comportamento anisotrópico das chapas metálicas está geralmente relacionado com o processo de produção de chapa – laminagem (Zaderii et al., 2005). Durante este processo, os grãos cristalinos individuais são alongados na direção de laminagem, como mostra a Figura 2.15; nesta direção apresenta-se maior deformação de tração, em comparação com a deformação na direção normal à laminagem, ilustrado na Figura 2.16.

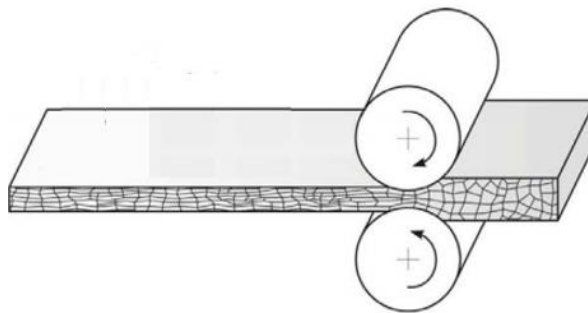


Figura 2.15 - Alongamento dos grãos na direção de laminagem (Vrh et al., 2014).

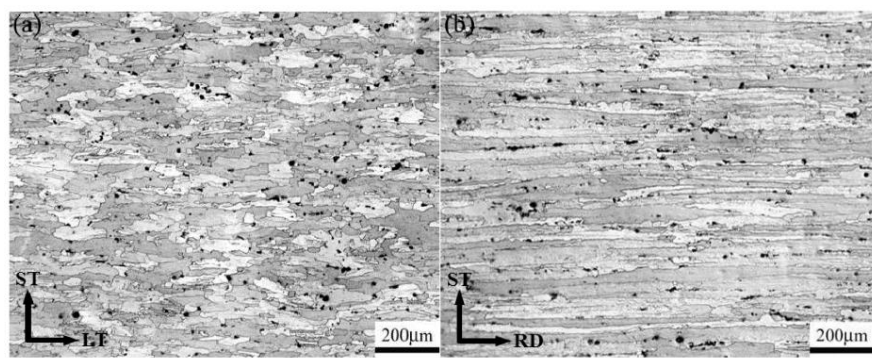


Figura 2.16 - Microestrutura no plano: (a) normal à direção de laminagem; (b) longitudinal à direção de laminagem (Hu & Wang, 2016). RD: direção longitudinal à laminagem; LF: direção maior normal à laminagem (largura); ST: direção menor normal à laminação (espessura).

O grau de anisotropia das chapas é determinado através do cálculo do coeficiente de anisotropia, r , obtido experimentalmente a partir de ensaios de tração uniaxial a provetes retirados da chapa laminada na direção de laminagem (0°), a 45° e a 90° , em relação a essa mesma direção (Zaderii et al., 2005), como apresentado na Figura 2.17.

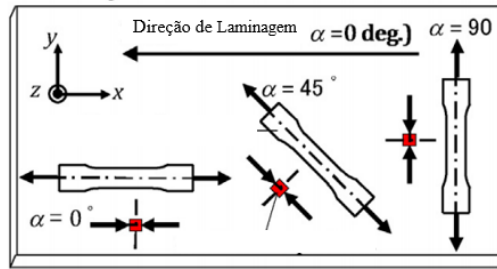


Figura 2.17 - Provetes da chapa laminada utilizados no ensaio de tração uniaxial, para cálculo da anisotropia (Kitamura & Terano, 2014).

O coeficiente de anisotropia é definido pelo quociente entre a deformação real segundo a largura, ε_w , e a deformação real segundo a espessura, ε_t , a partir da Equação 2-2. Como a espessura do provete é muito pequena em comparação à sua largura, os erros de medição de ε_t serão elevados. Por conseguinte, as relações são substituídas tendo em conta a conservação de volume (CV) (Banabic, 2010):

$$\varepsilon_l + \varepsilon_w + \varepsilon_t = 0 \quad \text{Equação 2-1}$$

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln \frac{w}{w_0}}{\ln \frac{t}{t_0}} \stackrel{CV}{\Rightarrow} r = \frac{\varepsilon_w}{-\varepsilon_l - \varepsilon_w} = \frac{\ln \frac{w}{w_0}}{\ln \frac{l_0 \cdot w_0}{l \cdot w}} \quad \text{Equação 2-2}$$

onde w_0 , l_0 e t_0 representam, respetivamente, a largura, comprimento e espessura iniciais do provete em estudo e w , l e t , representam, respetivamente, a largura, o comprimento e a espessura finais, após o ensaio de tração e antes da rotura do material. Os materiais isotrópicos apresentam anisotropia unitária.

A anisotropia varia com a direção e, como tal, é comum caracterizar-se um material pela anisotropia média normal, r_n , determinada pela Equação 2-3 (Banabic, 2010). Esta evidencia a diferença entre as propriedades segundo a espessura e segundo o plano de laminagem, mediante a anisotropia na direção de laminagem (0°), a 45° e a 90° , respetivamente, r_0 , r_{45} e r_{90} . A anisotropia média normal representa a relação entre a resistência da chapa na direção da espessura e na direção da largura (Banabic, 2010), ou seja, quando maior r_n , maior será a resistência na direção da espessura, em comparação com a resistência na direção da largura, e inversamente. No caso unitário, o material diz-se isotrópico.

$$r_n = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad \text{Equação 2-3}$$

No processo de estampagem, quanto maior a anisotropia de um material, melhor será o seu comportamento, ou seja, a deformação ocorre preferencialmente na largura e no comprimento, sendo reduzida a variação de espessura.

O comportamento do plano da chapa também varia em função da direção, observando-se, por exemplo, o aparecimento de orelhas na estampagem de copos de chapas laminadas. O tamanho das orelhas e a direção em que estas se formam estão relacionados com a anisotropia planar (Figura 2.18), Δr , calculada pela Equação 2-4 (Banabic, 2010). Quanto maior for o módulo de Δr , maior será o tamanho das orelhas. A formação de orelhas acontece a 0° e 90° , quando os valores de Δr são positivos, e a 45° , quando os valores de Δr são negativos. Para valores nulos de Δr , não existe formação de orelhas (Yoon et al., 2011).

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2} \quad \text{Equação 2-4}$$

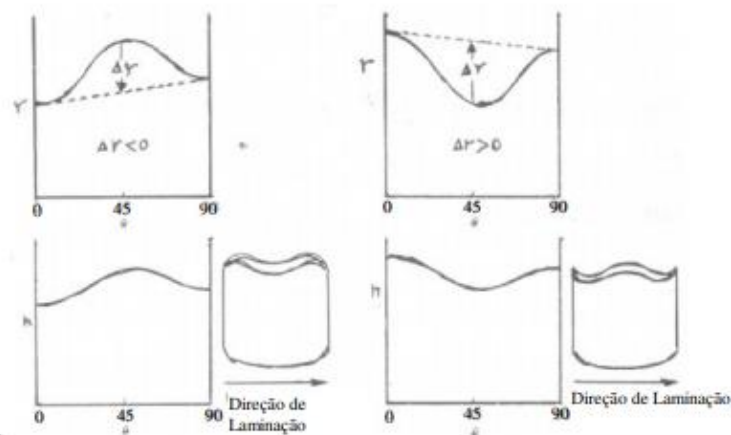


Figura 2.18 - Influência da anisotropia planar na formação de orelhas no embutimento de copos (Ferrarini, 2004).

2.2.2 Comportamento Elástico e Plástico do Material

Na compreensão e estudo de processos de conformação plástica, é fundamental conhecer os fundamentos básicos da mecânica da deformação, como a elasticidade e a plasticidade de um material. A deformação é uma grandeza mensurável pelas alterações posicionais dos pontos materiais entre o estado inicial e final.

A elasticidade é a capacidade de um material recuperar totalmente o estado inicial, após aplicação e alívio de uma força externa. Este comportamento de deformação é regido pela lei de *Hooke*, no qual a tensão e a deformação são diretamente proporcionais; e é válido até ao limite de elasticidade do material (Callister, 2008). A componente elástica de um material tem um grande impacto na previsão do comportamento do material, onde quanto maior for a tensão limite elástica e menor o módulo de *Young*, maior será a recuperação elástica.

O princípio básico dos processos de conformação plástica é a alteração de forma, como tal, a sua aplicação baseia-se no conceito de plasticidade. Dada tal relevância, o ênfase nos processos de conformação plástica será o estudo e avaliação da plasticidade do material.

Durante a deformação plástica, após o limite de elasticidade do material, o material é deformado permanentemente por ação de uma força externa, não retomando o seu estado inicial (Callister, 2008). Quando um material entra no regime plástico, sofre deformações irreversíveis com alterações nas suas propriedades, tornando-se então importante conhecer as condições a partir das quais o material entra no domínio plástico.

O comportamento plástico do material é caracterizado por 3 elementos (Banabic, 2010):

- Critério de plasticidade – indica o nível de tensão de início da deformação plástica;
- Lei de encruamento – descreve o comportamento do critério de plasticidade perante o grau de deformação plástica, após se iniciar a deformação plástica;
- Lei de plasticidade – define a relação entre a tensão e deformação pós-plastificação.

A superfície de plasticidade é um conceito importante no fenómeno da plasticidade, visto que define os níveis de tensão críticos de início de deformação plástica, ou seja, descreve matematicamente a superfície tridimensional das tensões principais (Banabic, 2010). Ao longo dos anos, têm surgido inúmeros critérios de plasticidade como propostas de definição da superfície limite de elasticidade de materiais isotrópicos e anisotrópicos. Dentro destes trabalhos, é de salientar os critérios de plasticidade isotrópicos apresentados por Tresca, Huber–Mises–Hencky, Drucker e Hershey e os critérios de plasticidade anisotrópicos desenvolvidos por Hill, Hosford, Barlat, Karafillis–Boyce, Budiansky,

Gotoh, Banabic–Balan–Comsa (BBC), Cazacu–Barlat, Vegter, Hu, Wang e Comsa (Banabic, 2010).

À medida que o material é deformado plasticamente, a superfície de plasticidade é modificada, uma vez que é comum existir um aumento da resistência durante a deformação plástica nos metais, ou seja, a tensão aumenta com o aumento da deformação plástica. Este fenómeno é designado por encruamento e a evolução da superfície de plasticidade em função da deformação plástica é definida pela lei de encruamento. As leis de encruamento baseiam-se em 3 modos (Pimentel, 2018):

- Encruamento isotrópico – expansão uniforme da superfície de plasticidade, inalterando a posição do centro da superfície de plasticidade;
- Encruamento cinemático – translação do centro da superfície de plasticidade, mantendo-se constante a sua forma e dimensão;
- Encruamento misto – combinação de encruamento isotrópico e cinemático, onde a superfície de plasticidade sofre expansão e translação em simultâneo. Este modo permite a modelação do comportamento dos materiais com maior generalidade.

As principais leis de encruamento são da autoria de Ludwick, Prager, Ramberg-Osgood, Hollomon, Swift, Voce, Gosh, Hockett-Sherby e Swift-Hockett-Sherby (Pham et al., 2018).

O critério de plasticidade e a lei de encruamento definem, na devida ordem, a superfície de plasticidade e a sua evolução ao longo da deformação plástica. Contudo, não formulam a evolução da deformação plástica. Esta informação é obtida pela lei de plasticidade, que define a velocidade e as direções da deformação plástica em função do estado de tensão e dos incrementos de tensão (Banabic, 2010).

2.2.3 Formabilidade do Material

A formabilidade do material é a capacidade de um material se deformar sem apresentar estiramento excessivo ou rotura (Vigneshwaran et al., 2020). O agrupamento da superfície de plasticidade e da lei de encruamento do material, num estudo numérico, pode ser utilizada para testar a formabilidade de um determinado material.

Face à complexidade inerente na análise do comportamento do material e no número de parâmetros variáveis em cada processo, o estudo da viabilidade das peças estampadas pode ser obtido através de métodos como a curva limite de estampagem

(FLC), representada no diagrama limite de estampagem (FLD). O FLD é um diagrama empírico, no domínio tensão/ compressão, de previsão do limite máximo plástico de uma chapa metálica (Isik et al., 2014; Vigneshwaran et al., 2020), ou seja, é um diagrama de análise de rotura. A aplicação deste método é a forma mais eficiente e realista de determinação das zonas críticas e respetivo estado de deformação, coeficiente de segurança, níveis de tensão e condições favoráveis de trabalho (Banabic, 2010). A FLC define a fronteira entre os estados de tensão de rotura e não rotura (Antonio, 2020), e varia com as propriedades e características do material – ductilidade, espessura, lei de encruamento, imperfeições da chapa e coeficiente de anisotropia; e com os parâmetros do processo de estampagem – velocidade de deformação, geometria dos elementos de estampagem e temperatura de estampagem (Banabic, 2010). Por resultante, a distância entre a FLC e as deformações previstas caracterizam o coeficiente de segurança (Stoughton & Zhu, 2004).

Como dito anteriormente, o FLD é um diagrama obtido experimentalmente, descoberto e desenvolvido, pioneiramente, por Keeler/ Backhofen e Goodwin (Stoughton & Zhu, 2004). Contudo, têm surgido inúmeros modelos matemáticos de previsão do FLD, de destacar os trabalhos de Marciniak e Kuczynski (M-K), Swift-Hill, Sing-Rao, North American Deep Drawing Research Group (NADDRG) e Cayssials (Banabic, 2010; Slota & Spišák, 2005).

Com o avanço da fiabilidade de previsão de resultados dos *softwares*, consoante as características do material, o FLD tem vindo a ser incorporado nas simulações numéricas, perdendo visibilidade o seu estudo independente (Isik et al., 2014). Nos programas de simulação numérica especializados em conformação plástica de chapa, a avaliação de falhas tem como referência a FLC do material.

Para além de determinar os valores de deformação no processo de estampagem, o FLD identifica os estados de deformação: enrugamento, compressão, estiramento insuficiente, zona *safe*, risco de rotura, tração bi-axial e rotura (Figura 2.19)

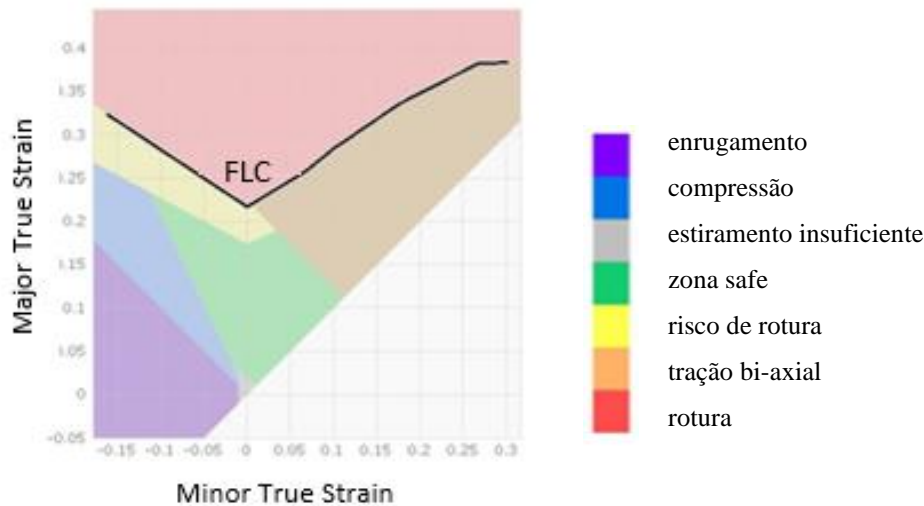


Figura 2.19 - Estados de deformação, representados no gráfico FLD (*AutoForm Plus R7*).

2.3 Simulação Numérica

Nos dias de hoje, a previsão do comportamento mecânico de um material é essencial e imprescindível num processo de conformação, por um lado, para determinar o estado de tensão e de deformação do material, por outro, para prever alterações com minimização de custos e tempos. De modo a facilitar a análise estrutural de problemas de engenharia, a simulação numérica, baseada em modelos numéricos matemáticos, é uma solução (Wang et al., 2007). O princípio do MEF consiste na divisão do domínio em geometrias simples (triangulares, quadriláteras, cúbicas, entre outras), designadas por elementos finitos. Os elementos finitos são conectados entre si através de pontos, denominados por nós. Ao conjunto de elementos finitos e nós dá-se o nome de malha. A simplificação deste método é o estudo individualizado de cada elemento finito, podendo assim avaliar uma geometria complexa através de inúmeras geometrias simples.

O processo de desenvolvimento de uma ferramenta de estampagem sem suporte numa simulação numérica é de elevado risco, uma vez que só é possível analisar o desempenho da ferramenta na última fase do processo, a fase de testes em prensa. Este processo baseia-se na experiência de projeto e em métodos de tentativa/ erro, o que acarreta um alto risco de alteração de peça ou processo tardio e elevados custos na fase de afinação da ferramenta – número indefinido de ensaios. Um processo sem suporte numérico tem como base a incerteza dos resultados experimentais – movimentos dos elementos, forças necessárias, *springback* da peça e consumo de chapa. Pelo contrário, o desenvolvimento de uma ferramenta com recurso à simulação numéricas possibilita a

obtenção de resultados numéricos no final de cada etapa. Este fator permite a avaliação numérica etapa a etapa, operação a operação, antecipando e eliminando dificuldades no processo de estampagem, antes de entrar no processo produtivo. Todavia, a simulação numérica não anula nem substitui a experiência de projeto nem o conhecimento empírico, somente suporta o projeto em resultados numéricos. A diferença entre o processo de desenvolvimento de uma ferramenta de estampagem sem e com auxílio de simulação numérica está ilustrada na Figura 2.20 e Figura 2.21.

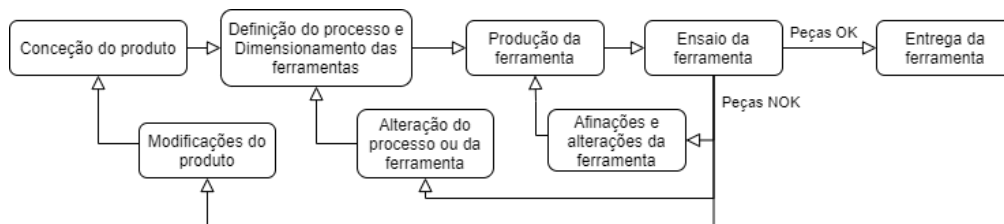


Figura 2.20 - Processo de desenvolvimento de uma ferramenta de estampagem sem suporte numa simulação numérica. Adaptado de Tisza & Lukács (2008).



Figura 2.21 - Processo de desenvolvimento de uma ferramenta de estampagem com suporte numa simulação numérica. Adaptado de Tisza & Lukács (2008).

A simulação numérica de processos de conformação plástica em chapa tem sido alvo de investigação e desenvolvimento ao longo dos últimos anos (Tisza, 2013). Este interesse deve-se à capacidade da simulação numérica, numa fase inicial de projeto, prever e analisar o comportamento da chapa, sem a necessidade de ensaios práticos, associados às modificações na ferramenta de estampagem por métodos de tentativa/ erro, com custos e tempos elevados (Banabic, 2010). O objetivo final da simulação numérica será avaliar o comportamento da chapa, determinar a geometria dos elementos de estampagem e os parâmetros ótimos do processo, reduzir o tempo de desenvolvimento de novos produtos e otimizar o processo produtivo (Tekkaya, 2000; Tisza, 2013). O tempo de desenvolvimento de uma ferramenta de estampagem com suporte numa simulação numérica é reduzido em cerca de 30 a 50% (AutoForm Forming Reality, 2020a; Roll, 2008), como apresentado na Figura 2.22.

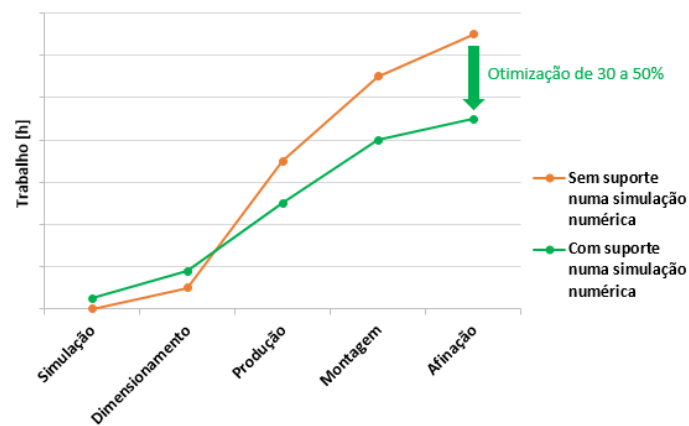


Figura 2.22 - Otimização do tempo de desenvolvimento de uma ferramenta de estampagem, por auxílio de simulação numérica. Adaptado de AutoForm Forming Reality (2020a).

O desenvolvimento de programas de simulação numérica tem sido no sentido de aproximar a simulação à realidade experimental, focando-se no estudo das leis que traduzem os materiais e o seu comportamento mecânico, na otimização do código de programação e na modelação da chapa. Estes devem possibilitar a simulação total do ciclo de estampagem e de todas as operações a ele associadas (corte, dobragem e embutidura) e garantir a fiabilidade dos resultados numéricos e a aplicabilidade a uma gama larga de materiais, num tempo de simulação plausível (Tekkaya, 2000).

A realização deste trabalho será suportada pelo *software* de simulação numérica com recurso ao método dos elementos finitos *AutoForm Plus R7*. O *AutoForm Plus R7* é um *software* especializado no processo de estampagem de chapa, que surgiu em meados da década de 90, em Zurique, na Suíça. As soluções apresentadas pelo *AutoForm Plus R7* focam-se no planeamento digital do processo total, com uma abordagem multidimensional baseada na qualidade, funcionalidade, tempo de processamento e custo. O processo de estampagem com auxílio do *AutoForm Plus R7* é ilustrado na Figura 2.23.

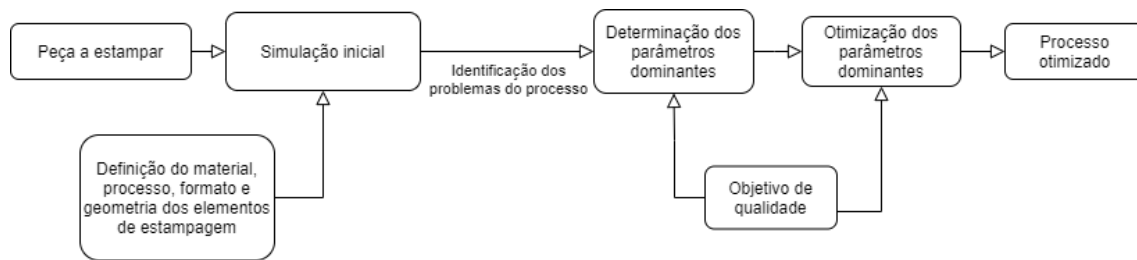


Figura 2.23 - Simulação e otimização do processo de estampagem no *AutoForm Plus R7* (Wang et al., 2007).

Através do planeamento digital do processo total, pode-se definir o fluxo de trabalho, com a produção rápida de peças de qualidade a um custo total baixo. O *AutoForm Plus R7* oferece respostas que englobam (Autoform R7 Forming Reality, 2020):

- Planeamento e orçamentação do processo – viabilizar estimativas de custos rápidas e transparentes para a produção de peças pelo processo de estampagem selecionado;
- Viabilidade de peças – identificar rapidamente os pontos problemáticos na peça, como roturas, redução de espessura excessiva e possíveis rugas;
- Engenharia do processo – permitir um resultado virtual de todo o processo de estampagem, possibilitando a avaliação, modificação e escolha do ótimo;
- Ensaio de ferramentas – reduzir o número de ciclos de tentativa/ erro, fundamentando os resultados experimentais em resultados numéricos de simulação com uma avaliação precisa;
- Produção de peças – determinar as medidas apropriadas de correção para a produção de peças bem-sucedida e analisar a capacidade do processo, reduzindo o índice de rejeição de peças.

Atualmente, o *AutoForm Plus R7* é possivelmente o software de simulação numérica mais usado na indústria de estampagem de chapa (Banabic, 2010).

3. CASO DE ESTUDO

Neste capítulo, é formulado o modelo numérico do processo de estampagem. De acordo com uma análise inicial das peças a estampar e das exigências do cliente ao processo, são definidos o ciclo de estampagem e a geometria dos elementos de cada operação.

3.1 Peça

O estudo em causa assenta na análise da conformação plástica por estampagem do conjunto de peças, esquerda e direita, representado na Figura 3.1. Este conjunto é de aplicação automóvel e faz parte do reforço metálico da estrutura plástica do porta-bagagens (Figura 3.2). Para além da funcionalidade das peças, não é possível especificar o cliente, marca ou modelo automóvel, dada a confidencialidade exigida pelo cliente,.

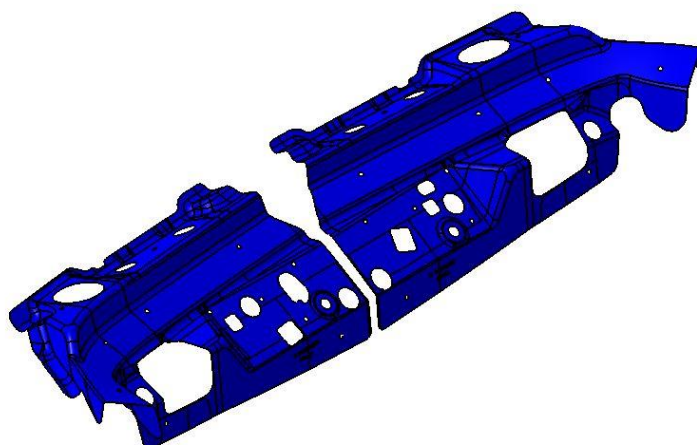


Figura 3.1 - Peças em estudo (CATIA V5 6R2019).

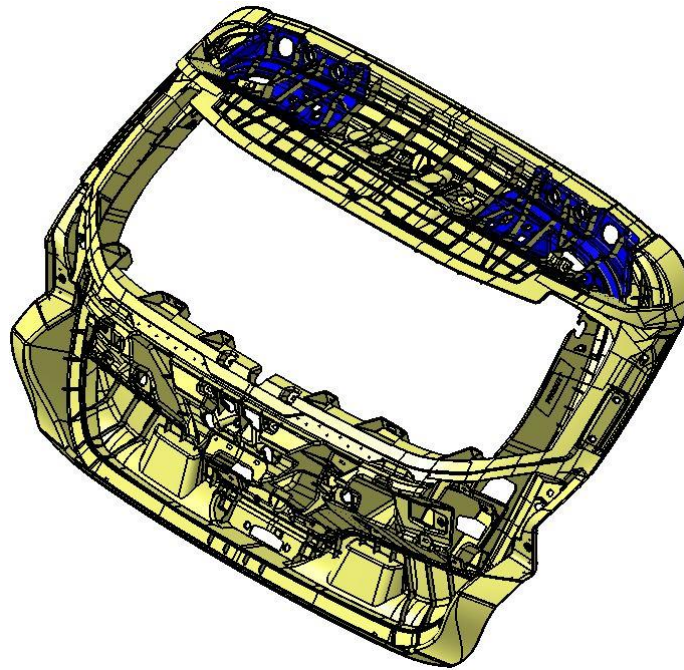
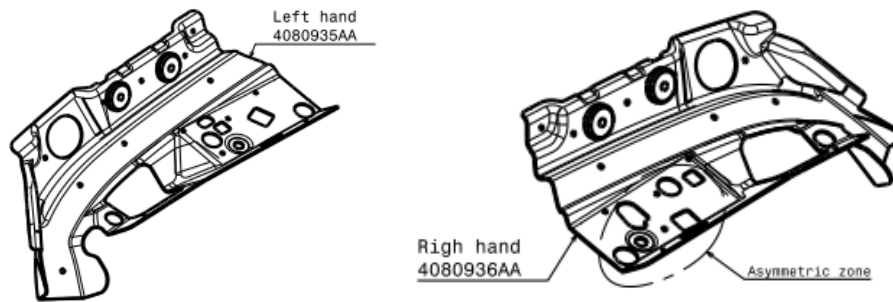


Figura 3.2 - Aplicação das peças em estudo (CATIA V5 6R2019).

A matéria-prima utilizada no processo será chapa laminada a quente de 1,5 mm de espessura de aço E335 (Figura 3.3), definido segundo a norma EN 10025-2:2019. Analisando o desenho 2D, apresentado no *ANEXO I – Desenho 2D das peças*, e o CAD 3D das peças, é possível verificar que as peças são geometricamente simétricas, diferenciando-se unicamente na furação (Figura 3.4). Quanto ao toleranciamento geométrico, a tolerância geral de um perfil de linha é descentrada de - 0,5 mm a + 0,8 mm, já a tolerância geral de um perfil de superfície é centrada de $\pm 1,5$ mm. Como explicado mais à frente, as tolerâncias de um perfil de linha não serão consideradas no processo de simulação, uma vez que os cortes serão realizados após a deformação. Por outro lado, as tolerâncias de um perfil de superfície são de extrema importância durante o processo de simulação, já que é nesta fase que se estabelece a geometria de cada elemento de deformação da ferramenta. Na Figura 3.5 são apresentadas as tolerâncias específicas de um perfil de superfície – detalhes [a], [b], [c] e [d]. Os 3 primeiros são tolerâncias centradas de $\pm 0,75$ mm, ± 1 mm e $\pm 0,6$ mm, respectivamente; no que diz respeito ao detalhe d, é uma tolerância descentrada de - 0,75 mm a - 0,25 mm.

CUSTOMER'S OWN REFERENCE			MATERIAL		THICKNESS (mm)
NAME	REFERENCE	Nb	DESIGNATION	SUPPLIER	
HINGE REINF LH STAMPED VIM P51	4080941AA	-	E335 G7/7 S/ PSAB53 3312	----- ----- -----	1,5
HINGE REINF RH STAMPED VIM P51	4080943AA	-	E335 G7/7 S/ PSAB53 3312	----- ----- -----	1,5

Figura 3.3 - Características do material.



ISOMETRIC VIEW	YES
DRAWING CREATED WHILE USING LEFT PART	X
RIGHT PART SYMMETRICAL	X

Figura 3.4 - Zona assimétrica entre peça esquerda e direita.

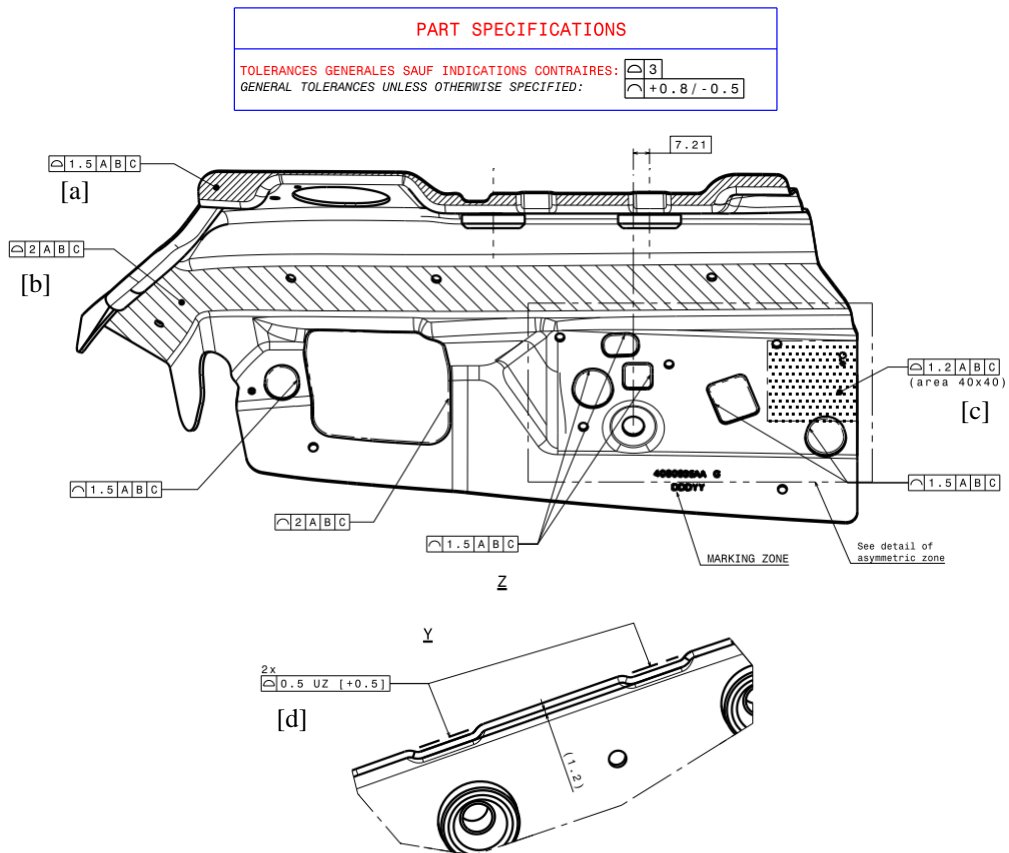


Figura 3.5 - Tolerâncias gerais e específicas.

O *Reference Points System* (RPS) tem como finalidade garantir referências dimensionais iguais em todas as fases de desenvolvimento, produção e montagem das peças. Estes são pontos de partida para o posicionamento espacial da peça, definindo as condições físicas de controlo através da restrição dos 6 graus de liberdade, com tolerâncias de posição nulas. Representados por letras maiúsculas, os RPS podem ser furos ou pontos na superfície. Nas peças em estudo, os RPS são os pontos na superfície A1, A2, A3 e C1 e o furo B, ilustrados na Figura 3.6.

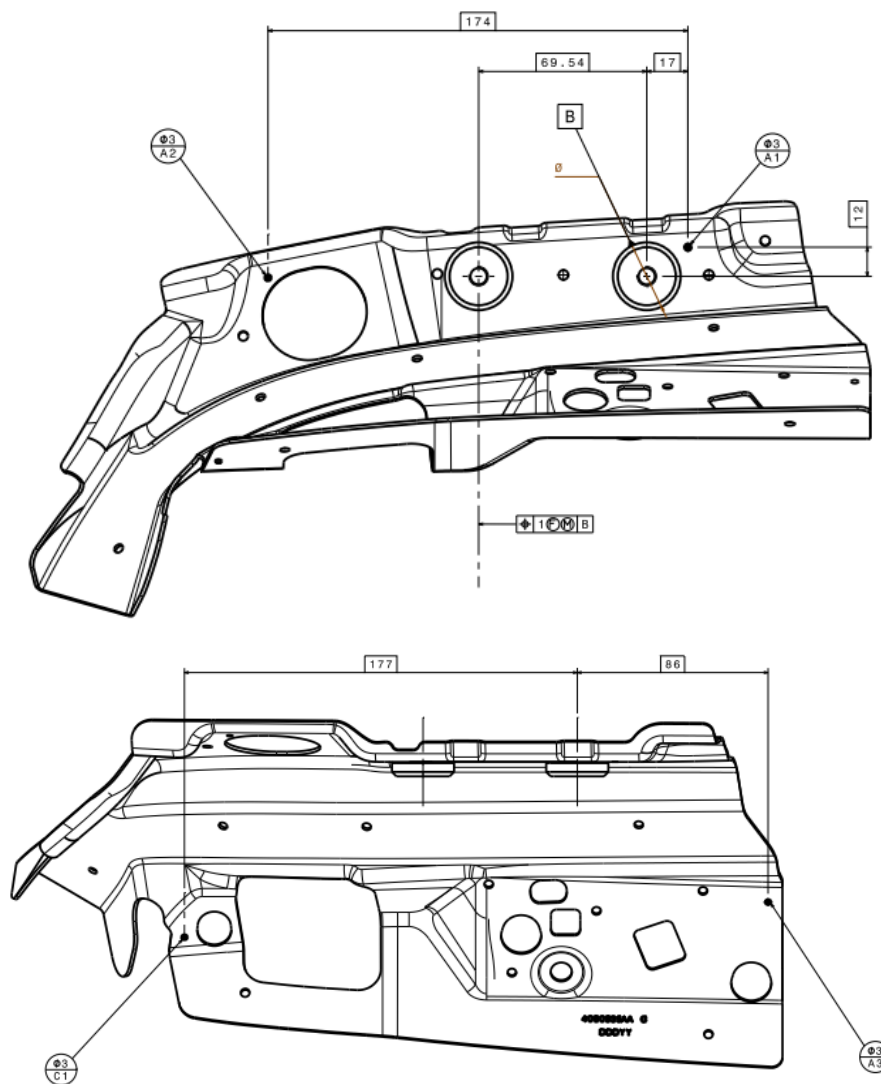


Figura 3.6 - RPS da peça.

3.2 Requisitos do Processo

As informações fornecida pelo cliente tem um peso preponderante na definição do processo, nomeadamente no que se refere à matéria-prima, modo de alimentação e transporte da chapa entre operações, dimensionamento dos elementos da ferramenta, tipo de ferramenta e características da prensa. Na Tabela 3.1 são apresentadas as informações do cliente mais relevantes para a simulação.

Tabela 3.1- Requisitos do cliente ao processo.

Informação cliente	Valor
Matéria-prima	Chapa laminada a quente de aço E335 G7/ 7
Espessura da chapa	1,5 mm \pm 5 %
σ_0	342 MPa \pm 12 %
R_m	439 MPa \pm 12 %
Tamanho máximo da sucata	200 mm
Processo	Estampagem a frio
Alimentação	Bobine
Ferramenta	<i>Transfer</i>
Prensa	CATTANEO 800 Ton

3.3 Modelo Numérico

A simulação do processo no *AutoForm Plus R7* necessita da definição da matéria-prima, da espessura da chapa, das operações e da geometria de cada elemento de estampagem ou corte. Através da seleção das superfícies pretendidas, define-se cada elemento de ferramenta. Estas superfícies têm como base a superfície inferior do desenho 3D da peça fornecida pelo cliente e foram construídas no módulo *Generative Shape Design* do software *CATIA V5 6R2019*, para cada operação. A referência de construção de superfícies, superfície inferior, bem como a definição da espessura da chapa são essenciais na criação de *offsets*, necessários à conceção dos elementos de ferramenta por parte do *AutoForm Plus R7*. No caso das operações de corte, não é requerido a determinação da geometria dos componentes de corte, mas sim somente o perfil de corte, obtido diretamente das linhas de contorno de peça e furação.

3.3.1 Modelo Constitutivo da Chapa

A matéria-prima utilizada na estampagem, como referido anteriormente, é chapa de aço E335 laminada a quente de 1,5 mm de espessura. De acordo com a biblioteca de materiais do *AutoForm Plus R7*, as propriedades mecânicas da chapa são apresentadas na Figura 3.7. O aço E335 é um aço HSS anisotrópico, com uma resistência limite elástica de 342 MPa, uma resistência mecânica de 439 MPa e uma anisotropia normal média de 0,998. O comportamento do material é descrito conforme a lei de encruamento de *Ludwik* e o critério de plasticidade anisotrópico de *Hill*. No que diz respeito ao FLD, este está de acordo com os resultados experimentais da base de dados do *software* (Figura 3.8), não seguindo portanto qualquer modelo matemático – uma vez que os resultados experimentais originais são para uma espessura de 1,47 mm, diferente da espessura da peça, é necessária uma correlação à espessura (*Reference Thickness* = 1,5 mm).

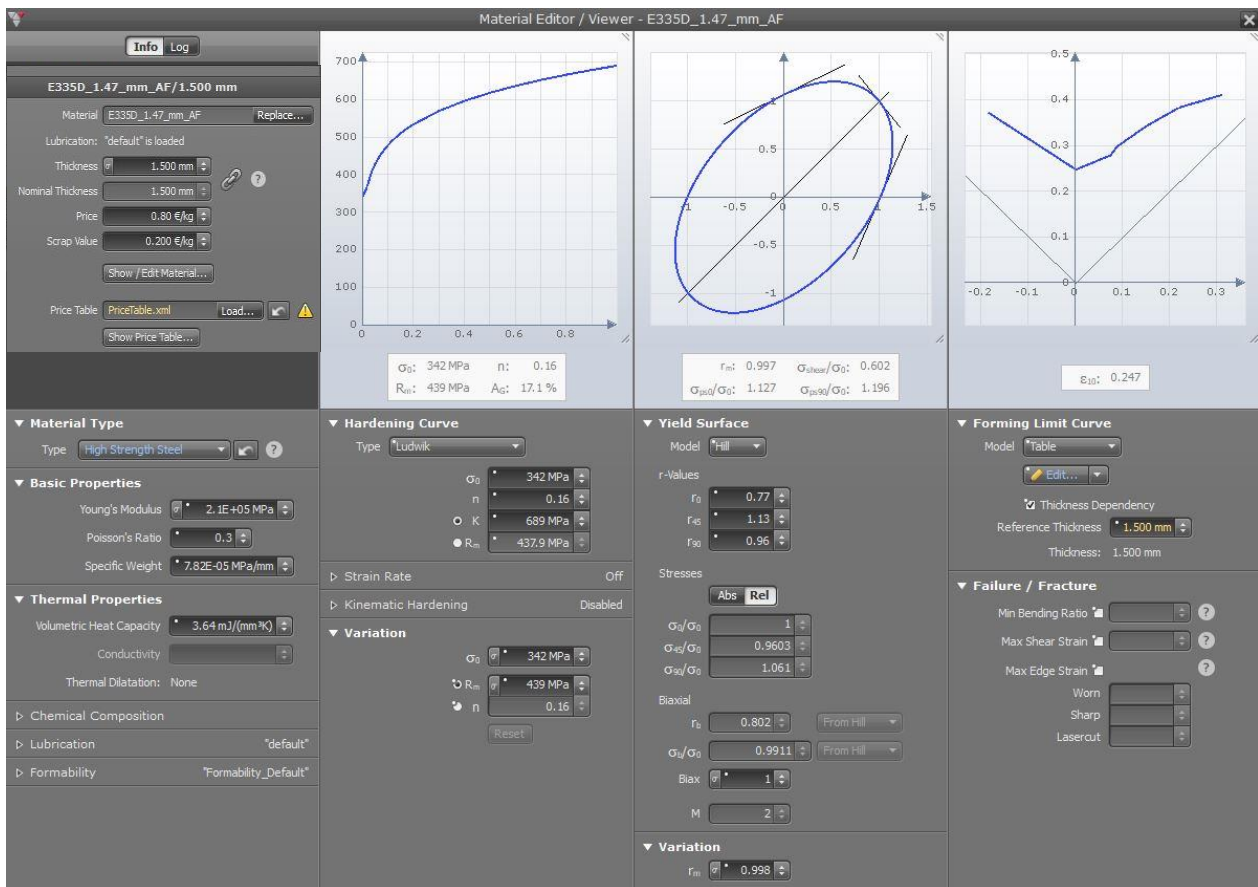


Figura 3.7 - Propriedades mecânicas da chapa (*AutoForm Plus R7*).

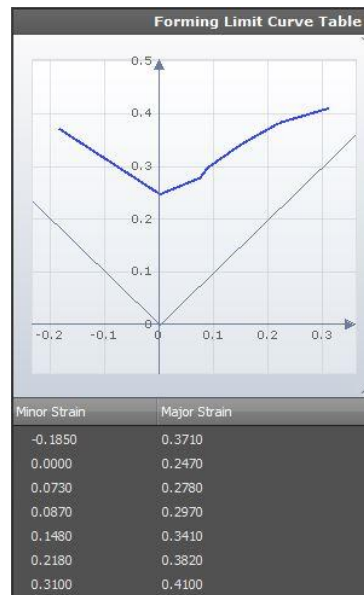


Figura 3.8 - Resultados experimentais de construção do gráfico FLD (*AutoForm Plus R7*).

3.3.2 Ciclo de Estampagem

O ciclo de estampagem é definido na fase inicial de projeto, onde, com base na experiência, se estabelece uma primeira sequência de operações de ferramenta, que posteriormente se irá ajustar, otimizar e viabilizar, perante as dificuldades mecânicas ou de conformação da chapa. Na definição do ciclo de estampagem final, pretende-se minimizar o número de operações e de componentes de ferramenta e otimizar o consumo de chapa, não esquecendo o cumprimento dos requisitos exigidos pelo cliente, a viabilidade do processo e a rentabilidade económica do mesmo.

O ciclo de estampagem inicial estabelecido para a produção do conjunto de peças em estudo foi:

- OP10: corte;
- OP20: embutidura;
- OP30: embutidura;
- OP40: corte;
- OP50: corte;
- OP60: corte;
- OP70: corte;
- OP80: dobragem;
- OP90: corte.

O ciclo de estampagem a simular deve ser em tudo semelhante ao real, maximizando assim a confiabilidade dos resultados numéricos. A sequência operatória introduzida no *AutoForm Plus R7* está representada na Figura 3.9. A OP10, OP40, OP50, OP60, OP70 e OP90 são operações de corte “*Trim*”; a OP20 e OP30 são operações de embutidura com uma parte móvel “*Single Action Draw*” – na OP20 a almofada, na OP30 o cerra-chapas; e a OP80 é uma operação de dobragem “*From Trim*”.



Figura 3.9 - Ciclo de estampagem numérico (*AutoForm Plus R7*).

3.3.3 OP10 – Corte

A alimentação do processo é automática por bobine. Contudo, tratando-se de uma ferramenta *transfer*, é necessário estabelecer um formato que garanta as dimensões suficientes de estampagem do conjunto e permita a transferência do mesmo de operação para operação, através do sistema automático *transfer* por garras mecânicas de transporte. Nesta primeira operação é cortado o formato a partir da bobine. Esta é constituída unicamente por um punção de corte e respetiva matriz de corte, denominado corte do formato por guilhotina – este é caracterizado por não apresentar desperdício de chapa (sucata).

A primeira tarefa passa por definir o formato inicial, que servirá de suporte para uma primeira simulação do processo. Ao longo das diferentes simulações de teste, este formato será otimizado, bem como todo o processo.

A estratégia de definição do formato inicial teve como referência a planificação do conjunto de peças, recorrendo à ferramenta *Formcheck* do *AutoForm Plus R7*. Partindo do desenho 3D das peças, fornecido pelo cliente, foi construído o conjunto (Figura 3.10), de forma a possibilitar a definição de um formato único para ambas as peças. Em relação à planificação do conjunto (Figura 3.11), as dimensões do formato inicial foram primeiramente majoradas, uma vez que a geometria da peça é de complexa planificação (Figura 3.12), não se conhece o comportamento da chapa durante o processo – o formato deve garantir a quantidade de chapa mínima para a obtenção das peças; e é necessária

uma margem dimensional para cortes. Com base nesta planificação, partiu-se de um formato retangular de 780 mm x 230 mm x 1,5 mm (Figura 3.13), com um consumo de chapa de 269100 mm³.

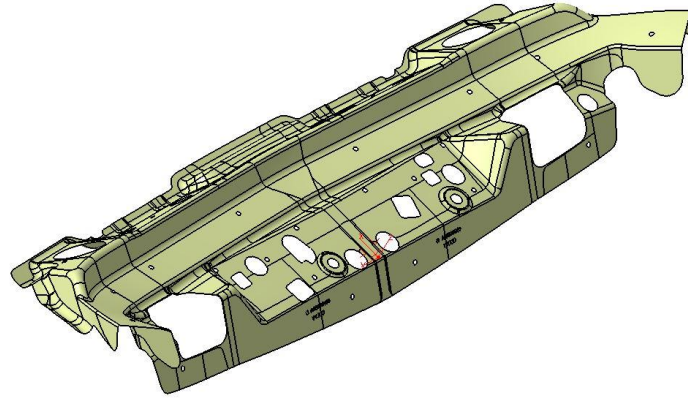


Figura 3.10 - Conjunto de referência para a planificação (CATIA V5 6R2019).

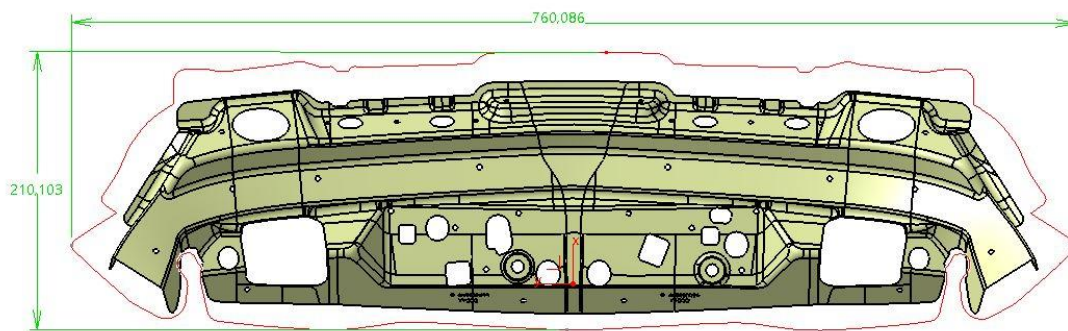


Figura 3.11 - Planificação do conjunto – linha vermelha [mm] (CATIA V5 6R2019).

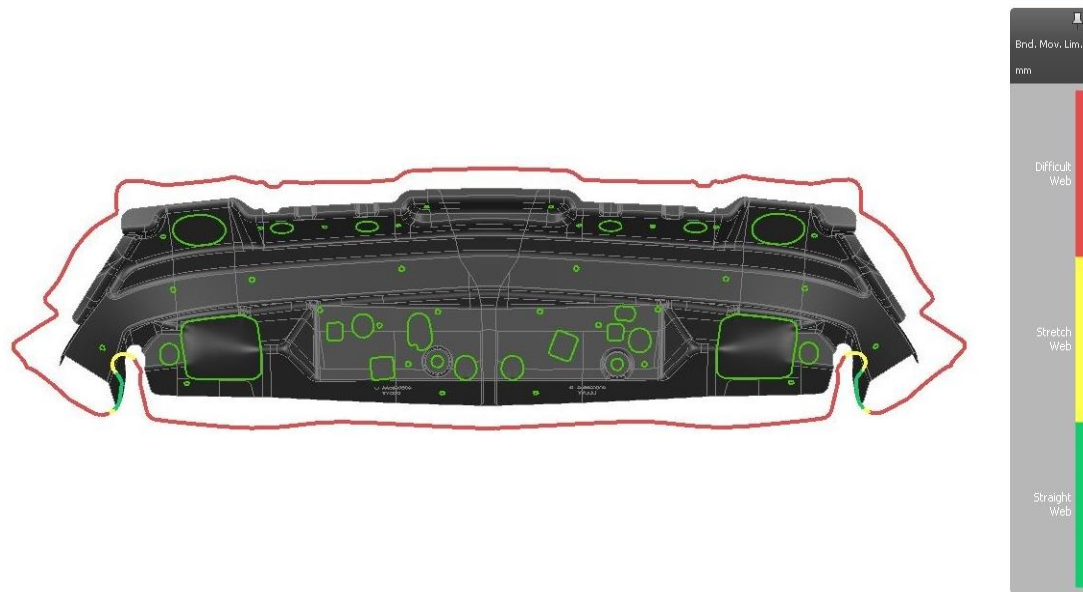


Figura 3.12 - Níveis de previsão da planificação pelo *Formcheck (AutoForm Plus R7)*.

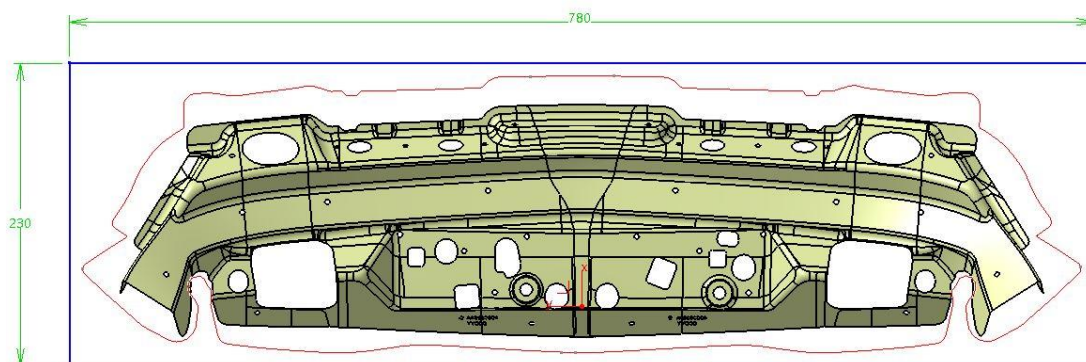


Figura 3.13 - Formato inicial – linha azul [mm] (*CATIA V5 6R2019*).

No *AutoForm Plus R7*, as operações de corte são definidas pelo contorno do corte por 4 meios (Figura 3.14):

- *Inner* – corte interno por contorno fechado;
- *Outer* – corte externo por contorno fechado;
- *Lance* – lancetamento da chapa;
- *Notch* – corte da área menor por contorno aberto ou fechado.

Definido pelo corte *notch*, o corte do formato é apresentado na Figura 3.15.

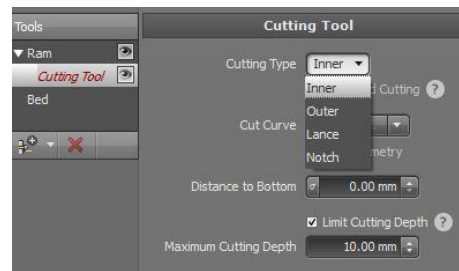


Figura 3.14 - Ferramentas de corte do *AutoForm Plus R7*.

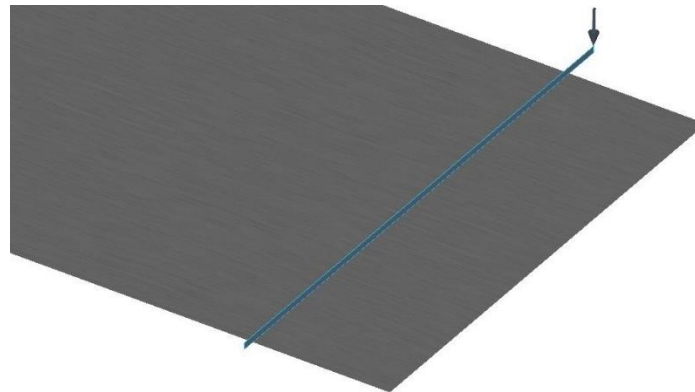


Figura 3.15 - Geometria e direção do corte da OP10 (*AutoForm Plus R7*).

3.3.4 OP20 – Embutidura

Dado que a peça apresenta uma grande altura de estampagem, a embutidura foi dividida em 2 operações, OP20 e OP30. A primeira operação de embutidura estabelece uma pré-forma da zona plana superior da peça. O formato anteriormente cortado é deformado pela ação de um conjunto punção/ matriz de estampagem, controlado pela força da almofada. A almofada é um elemento de estampagem com a mesma função do cerra-chapas, diferindo-se unicamente por se localizar na parte inferior da ferramenta.

Primeiramente, devido à força exercida por cilindros a gás sobre a almofada, a chapa é fixa entre a matriz e a almofada [Figura 3.18b)]. Quando a ação da prensa é superior à força da almofada, a matriz desce em direção ao punção. Ao longo da descida, até à concordância da almofada com o punção, a chapa é deformada, ganhando a forma do conjunto punção/ matriz/ almofada [Figura 3.18c)]. A deformação é controlada pela força contrária ao movimento exercida pela almofada.

A superfície que deu origem aos elementos de ferramenta da OP20 está representada na Figura 3.16. Na definição dos elementos de embutidura, teve-se especial atenção na almofada, onde é necessário indicar, para além da geometria do elemento, o avanço da almofada em relação ao punção. O avanço da almofada deve contemplar as

dimensões da matriz, de modo a que a chapa seja fixa contra a matriz antes de haver qualquer deformação provocada pelo conjunto punção/ matriz. Como se consta na Figura 3.17, o avanço mínimo da almofada, *Cushion Stroke*, é de 50 mm, face ao punção. As fases de movimento de elementos durante esta primeira operação de embutadura são ilustradas na Figura 3.18.

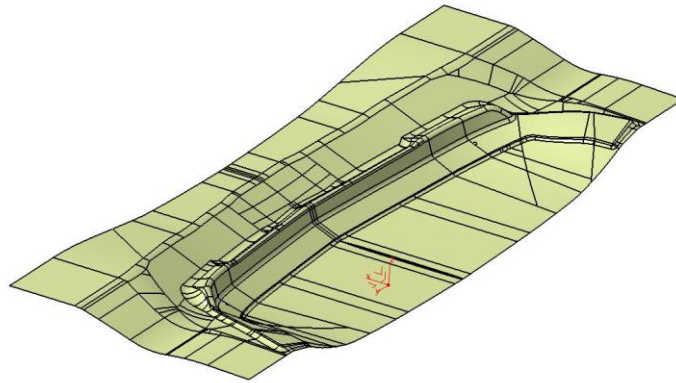


Figura 3.16 - Superfície suporte da OP20 (CATIA V5 6R2019).

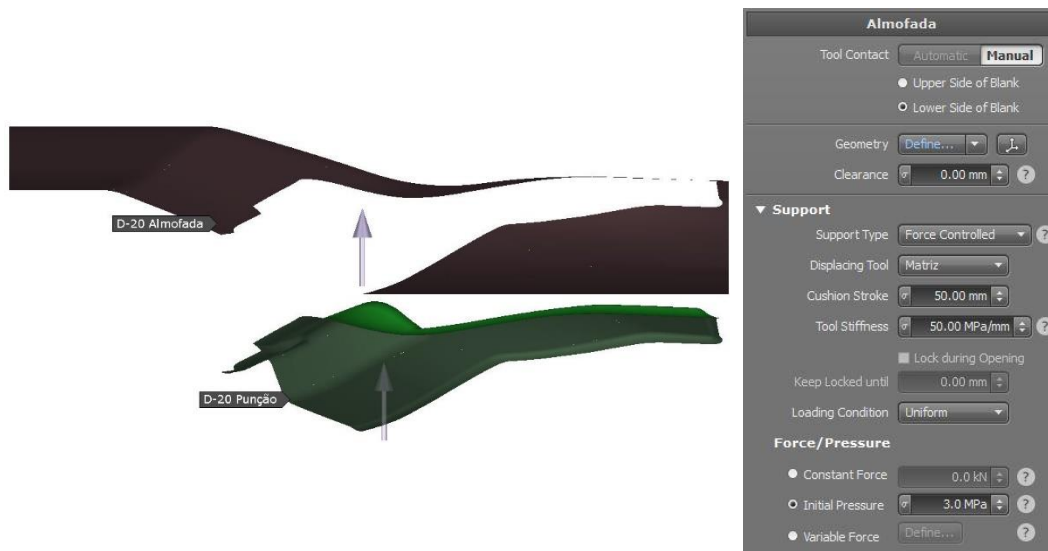


Figura 3.17 - Avanço mínimo da almofada, face ao punção (AutoForm Plus R7).

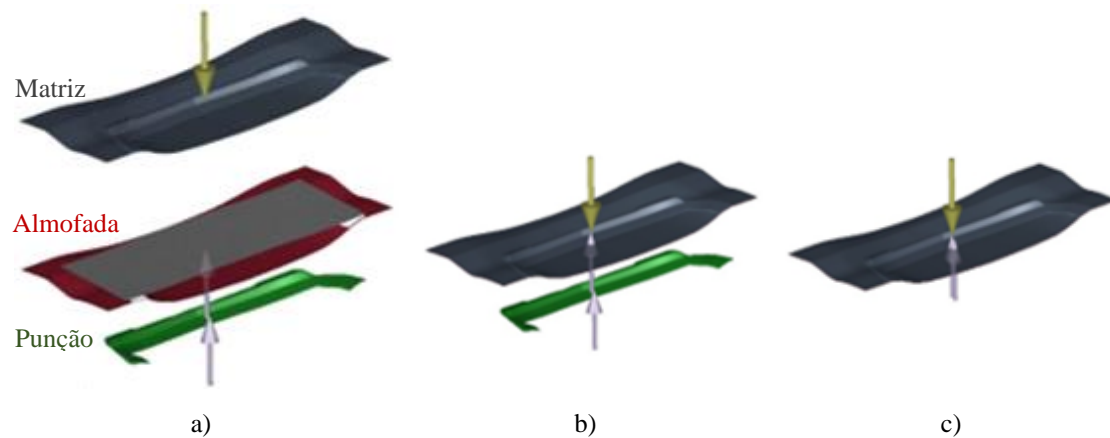


Figura 3.18 - Elementos e estágios de movimento da OP20: a) elementos abertos; b) fixação da chapa por ação do conjunto matriz/ almofada; c) elementos fechados (*AutoForm Plus R7*).

3.3.5 OP30 – Embutidura

Na segunda e última operação de embutidura conforma-se o restante da peça, deixando somente para uma seguinte operação a dobragem da aba. Esta conformação, tal como a anterior, é conferida pela ação de um conjunto punção/ matriz de estampagem. Em oposição à primeira operação de embutidura, a deformação da chapa é controlada pela força exercida pelo cerra-chapas. Esta diferença deve-se ao facto do embutido, na primeira operação de embutidura, ser no sentido contrário à ação da prensa; já nesta segunda, o embutido é no sentido de ação da prensa.

Inicialmente, devido ao avanço do cerra-chapas em relação ao punção provocado por cilindros a gás aplicadas ao cerra-chapas, a chapa é fixa entre o cerra-chapas e a matriz [Figura 3.21b)]. Quando a prensa começa o movimento descendente, a distância entre o cerra-chapas e o punção diminui, iniciando-se assim a conformação da chapa. Ao longo da deformação, até à concordância do punção com a matriz, o movimento da chapa é controlado pela ação do cerra-chapas e a forma final da embutidura é estabelecida pelo conjunto punção/ matriz/ cerra-chapas [Figura 3.21c)].

Os elementos de ferramenta foram definidos a partir da superfície apresentada na Figura 3.19. O avanço do cerra-chapas, em relação à matriz, foi também introduzido, de forma a que a chapa seja fixa entre o cerra-chapas e a matriz, antes do contacto da chapa com o punção. O avanço mínimo do cerra-chapas, em relação à matriz, é de 80 mm, como se observa na Figura 3.20. Os estágios de movimento, nesta segunda operação de embutidura, são representados na Figura 3.21.

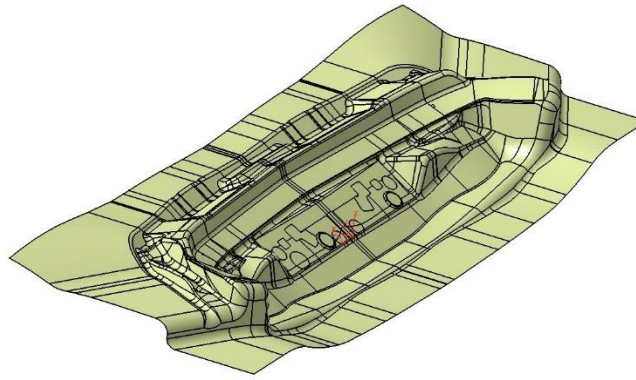


Figura 3.19 - Superfície suporte da OP30 (CATIA V5 6R2019).

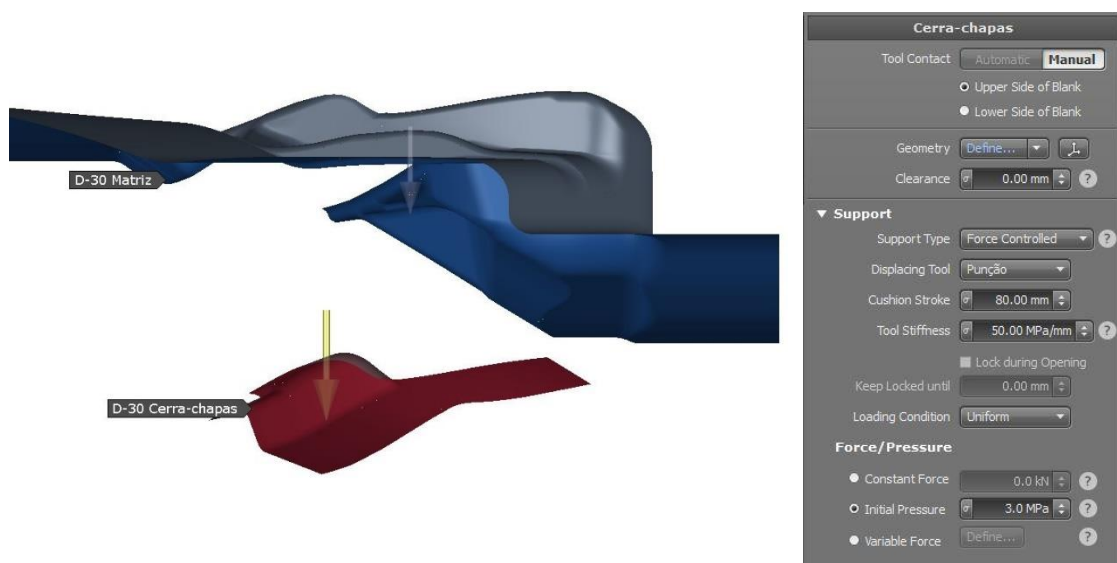


Figura 3.20 - Avanço mínimo do cerra-chapas, face à matriz (AutoForm Plus R7).

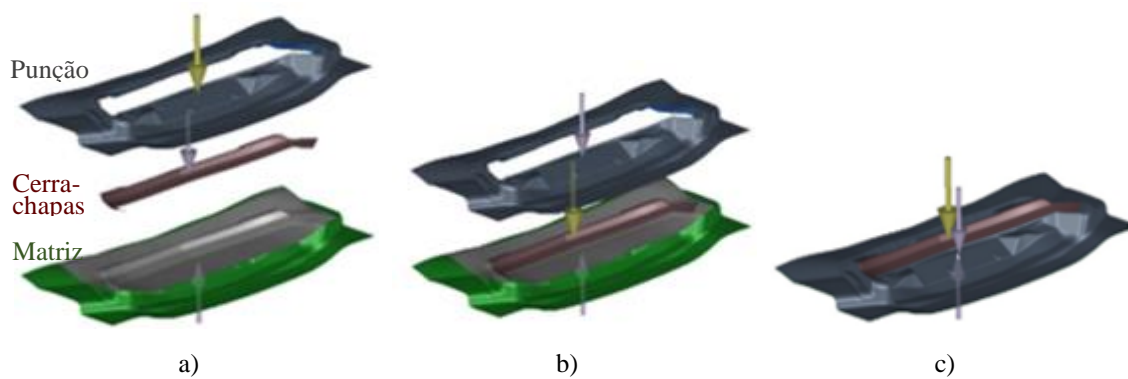


Figura 3.21 - Elementos e estágios de movimento da OP30: a) elementos abertos; b) fixação da chapa por ação do conjunto cerra-chapas/ matriz; c) elementos fechados (AutoForm Plus R7).

3.3.6 OP40 e OP50 – Corte

As operações de corte são limitadas pelo tamanho da sucata máximo definido pelo cliente, de modo a eliminar a possibilidade de acumulação de sucata nos escoantes da ferramenta e da prensa, e por questões mecânicas de funcionamento dos elementos de corte. Como tal, os cortes de contorno de peça e furação foram divididos em 4 operações.

Uma das características principais exigida nas operações de corte é a perpendicularidade de corte entre a superfície a cortar e os elementos de corte. Caso tal não aconteça, existe arrastamento de material, ficando o corte “em faca”, tradicionalmente denominado. A influência da direção de corte no acabamento da peça é evidenciada na Figura 3.22. Como nem todos os cortes se apresentam ou podem ser realizados numa superfície horizontal, existe muitas vezes a necessidade de transformar o movimento vertical da prensa em movimentos oblíquos à direção do movimento da prensa, cumprindo assim a perpendicularidade de corte. Isto é conseguido com o auxílio de componentes específicos chamados carros (Figura 3.23).

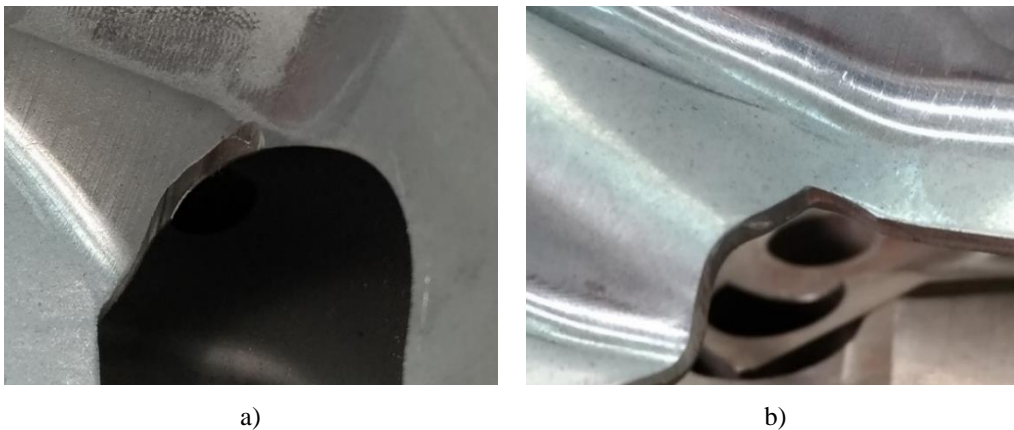


Figura 3.22 - Influência da direção de corte: a) corte não perpendicular/ “em faca”; b) corte perpendicular.

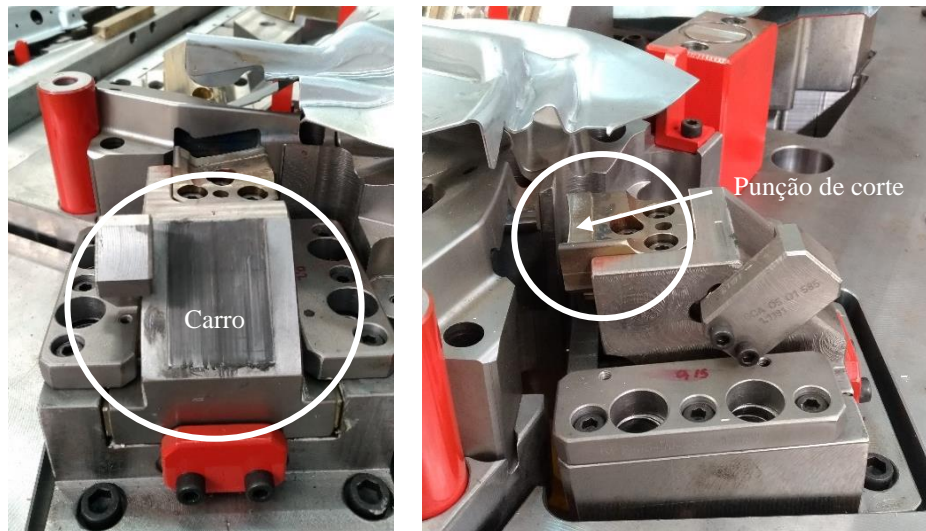


Figura 3.23 - Auxílio de carro numa operação de corte.

Idealmente, a furação e os cortes de contorno de peça devem ser executados antes das operações de deformação, de modo a serem realizados num plano perpendicular ao movimento da prensa, evitando assim o auxílio de carros. Contudo, devido à tolerância de perfil de linha de contorno das peças apertada e à localização dos furos em zonas que sofrem deformação – os furos devem ser realizados depois da estampagem, de maneira a evitar a sua deformação; optou-se por realizar os cortes de contorno e furação nos 4 passos seguintes à última operação de embutidura. Nestas operações de corte, a peça não fica definida geometricamente, uma vez que é necessário material para possibilitar a transferência de operação para operação, por garras mecânicas de transporte, e as peças permanecem ligadas até à última operação de separação.

A operação de corte OP40 apresenta não só cortes verticais, como também cortes oblíquos. Dado isto, a OP40 é constituída por 1 carro com uma inclinação de 20° , em relação ao eixo de movimento de prensa (eixo z). A OP50 contém unicamente cortes com auxílio de carros, sendo constituída por 6 carros com uma inclinação de 32° , 38° , 76° , 76° , 82° e 82° , em relação ao eixo z. Os cortes de furos são configurados por corte *inner*, já os cortes de contorno de peça são por corte *notch*. A geometria e a direção de cada corte na OP40 e OP50 são ilustradas na Figura 3.24 e Figura 3.25.

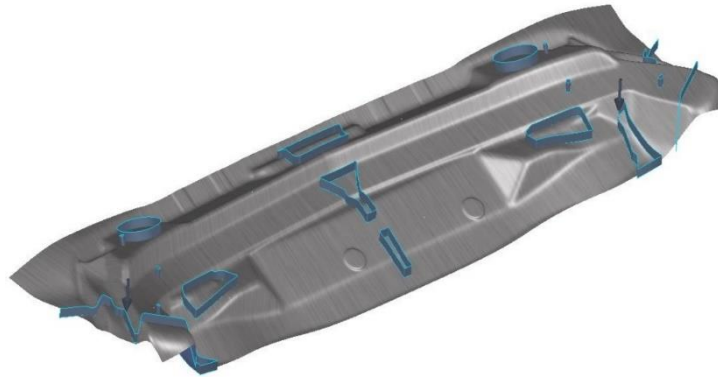


Figura 3.24 - Geometria e direção dos cortes da OP40 (*AutoForm Plus R7*).

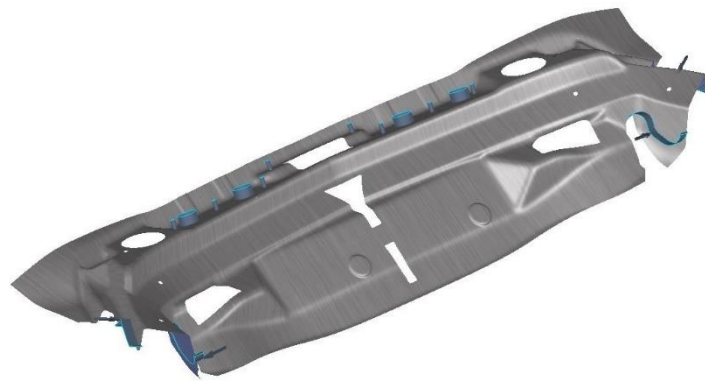


Figura 3.25 - Geometria e direção dos cortes da OP50 (*AutoForm Plus R7*).

Na definição dos cortes, para além da exequibilidade mecânica, é necessário assegurar que não existe acumulação de sucata nos escoantes da ferramenta de estampagem. Por tal, a dimensão maior da sucata está limitada pelo tamanho máximo da sucata exigido pelo cliente. Perante a Figura 3.26 e Figura 3.27, é de notar que a dimensão maior da sucata na OP40 e OP50 é inferior à exigência do cliente – 200 mm.

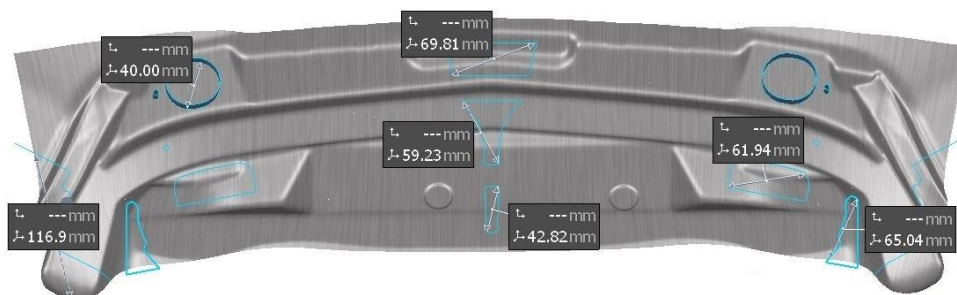


Figura 3.26 - Dimensões da sucata na OP40 [mm] (*AutoForm Plus R7*).

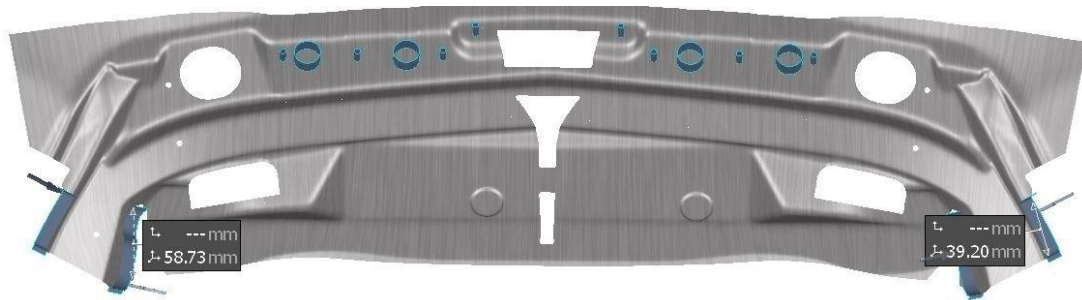


Figura 3.27 - Dimensões da sucata na OP50 [mm] (*AutoForm Plus R7*).

3.3.7 OP60 e OP70 – Corte

Com o objetivo de minimizar a utilização de carros para cortes oblíquos, que acarretam um custo elevado de produção e manutenção em comparação aos punções de cortes verticais, o resultado da operação anterior foi rodado 31°, segundo o eixo y (Figura 3.28). Isto possibilitou o corte vertical dos furos apresentados na Figura 3.29.

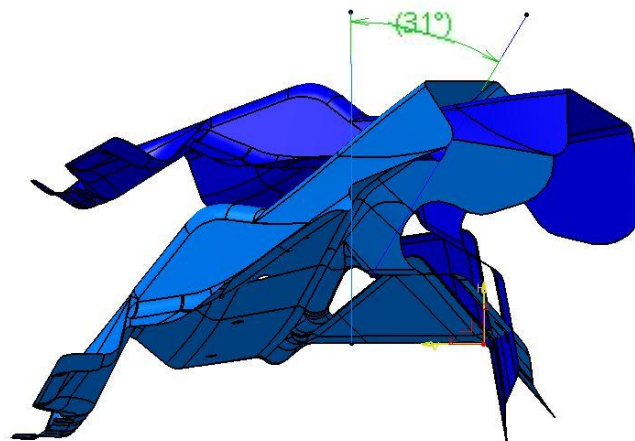


Figura 3.28 - Direção perpendicular dos furos: antes de rodar (azul escuro); depois de rodar (azul claro). (*CATIA V5 6R2019*).

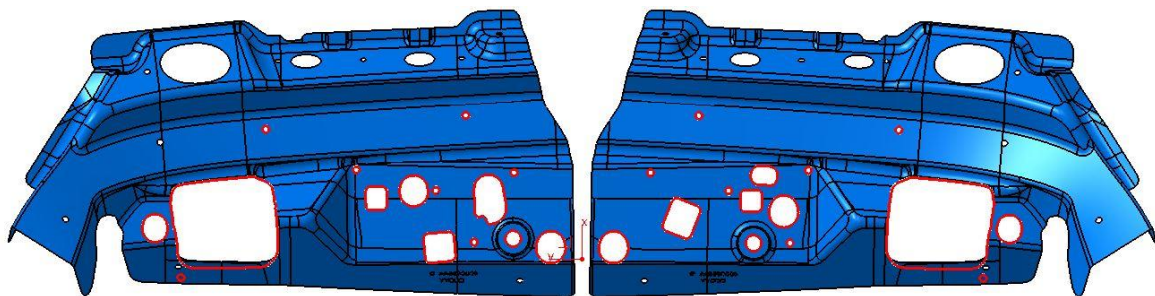


Figura 3.29 - Furos realizados verticalmente após rotação (*CATIA V5 6R2019*).

As operações OP60 e OP70 são constituídas unicamente por cortes verticais. À semelhança da OP40 e OP50, os cortes de furos são configurados por corte *inner* e os cortes de contorno de peça por corte *notch*. A geometria e a direção de cada corte são ilustradas na Figura 3.30 e Figura 3.31, na devida ordem para a operação OP60 e OP70.

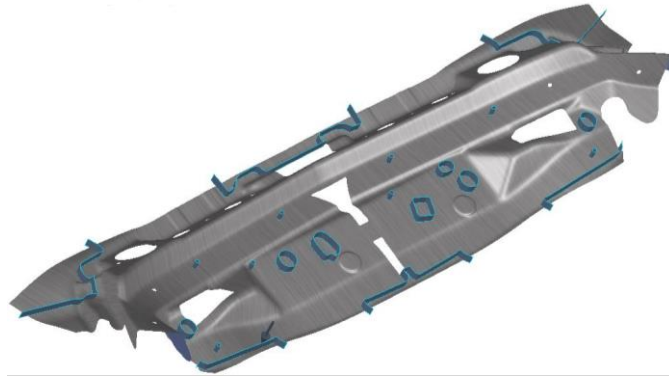


Figura 3.30 - Geometria e direção dos cortes da OP60 (*AutoForm Plus R7*).

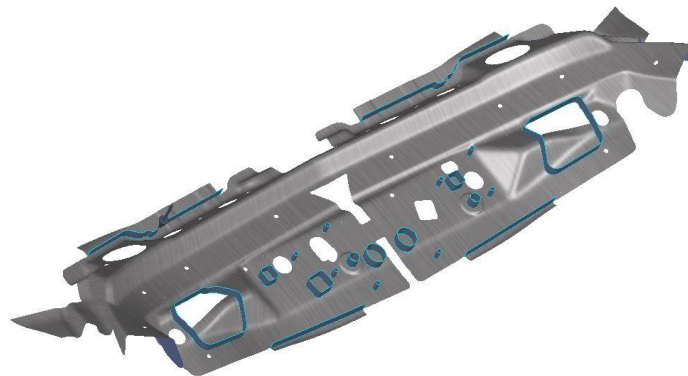


Figura 3.31 - Geometria e direção dos cortes da OP70 (*AutoForm Plus R7*).

De acordo com a análise da Figura 3.32 e Figura 3.33, a maior dimensão da sucata é de 174,4 mm e 169,5 mm, respetivamente na OP60 e OP70. Confirma-se portanto que o tamanho máximo da sucata não é superior a 200 mm.

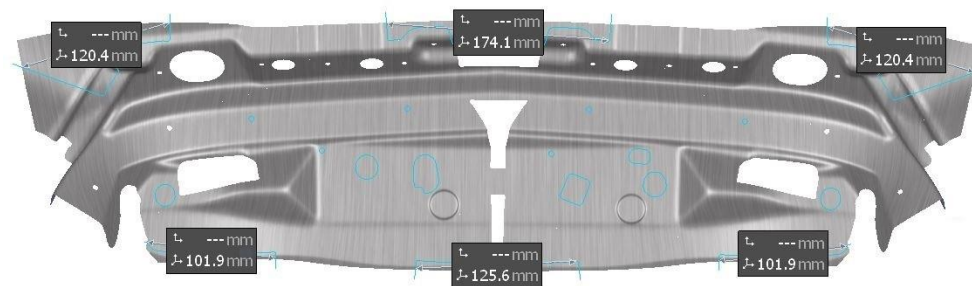


Figura 3.32 - Dimensões da sucata na OP60 [mm] (*AutoForm Plus R7*).

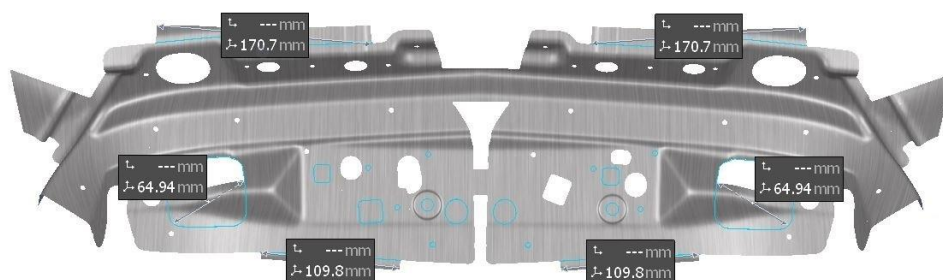


Figura 3.33 - Dimensões da sucata na OP70 [mm] (*AutoForm Plus R7*).

3.3.8 OP80 – Dobragem

A OP80 confere ao conjunto a forma final. Inicialmente, o resultado da operação OP70 é fixo entre o cerra-chapas e a matriz, por consequência do avanço do cerra-chapas em relação ao punção de dobragem provocado por cilindros a gás. Com o movimento da prensa, o punção dobra a aba de maneira a obter o ângulo requerido.

A superfície de suporte na definição dos elementos de dobragem é ilustrada na Figura 3.34. Como demonstrado na Figura 3.35, o elemento móvel da operação, cerra-chapas, terá de ter um avanço mínimo de 50 mm, de modo a garantir a fixação da chapa antes de se iniciar a deformação provocada pelo conjunto punção/ matriz. O punção de dobragem, o cerra-chapas e a matriz são representados na Figura 3.36, bem como os estágios de movimento durante a operação – elementos abertos [Figura 3.36a)]; fixação da chapa por ação do conjunto cerra-chapas/ matriz [Figura 3.36b)]; e elementos fechados [Figura 3.36c)].

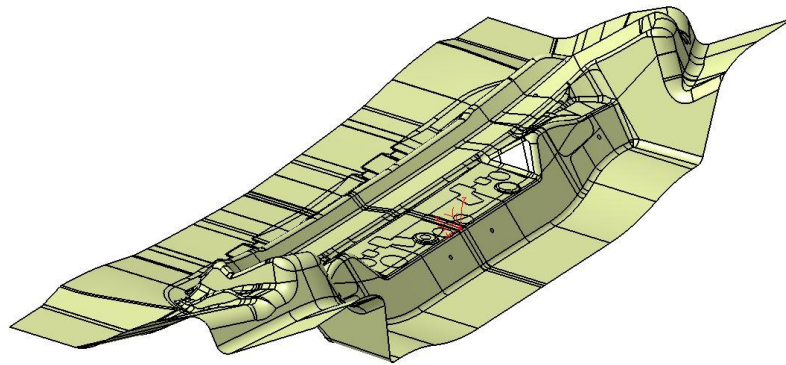


Figura 3.34 - Superfície suporte da OP80 (CATIA V5 6R2019).

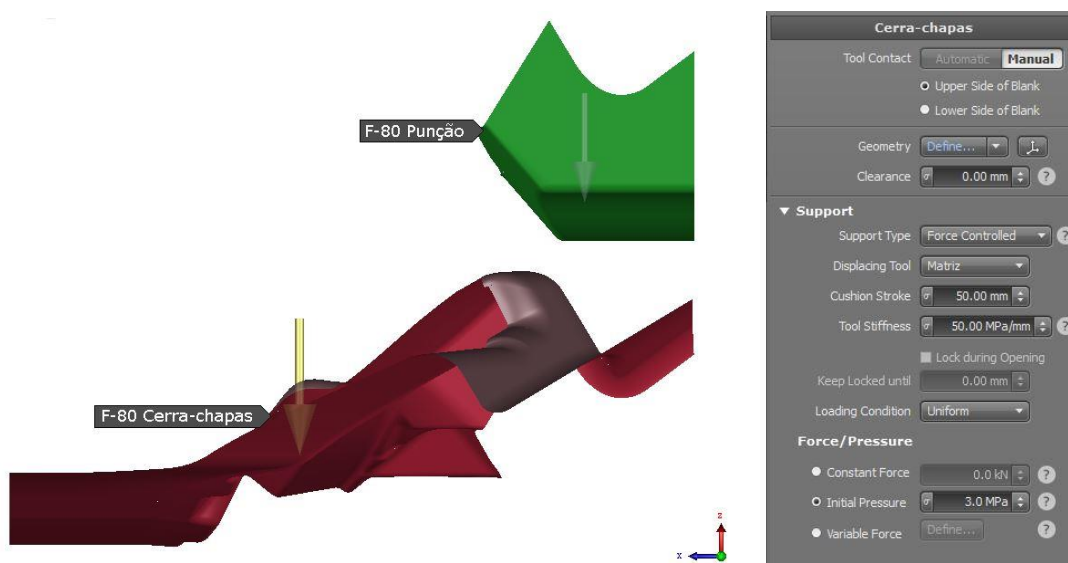


Figura 3.35 - Avanço mínimo do cerra-chapas, face ao punção (AutoForm Plus R7).

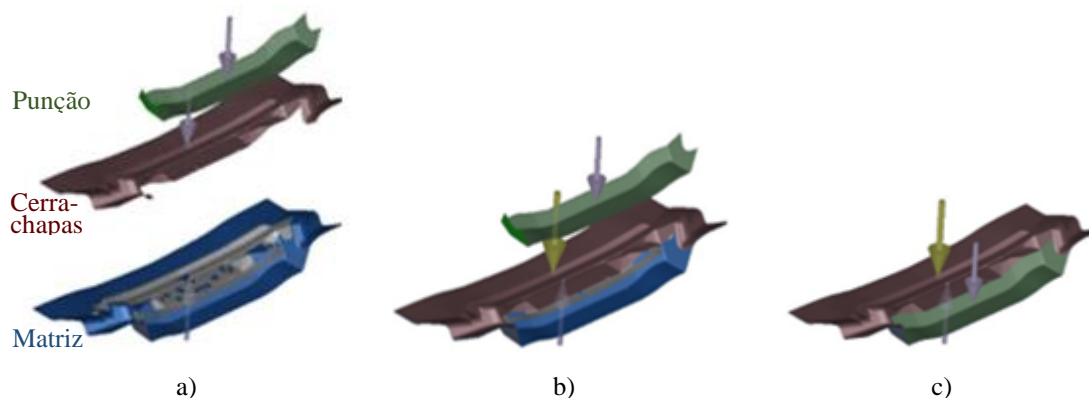


Figura 3.36 - Elementos e estágios de movimento da OP80: a) elementos abertos; b) fixação da chapa por ação do conjunto cerra-chapas/ matriz; c) elementos fechados (AutoForm Plus R7).

3.3.9 OP90 – Corte

A última operação do ciclo de estampagem estabelece a geometria final de cada peça. Nesta são efetuados os cortes de separação de peças, definidos por corte *inner*, e os cortes da pega de transporte, estabelecidos por corte *notch*. Isto é conseguido unicamente por cortes verticais, apresentados na Figura 3.37.

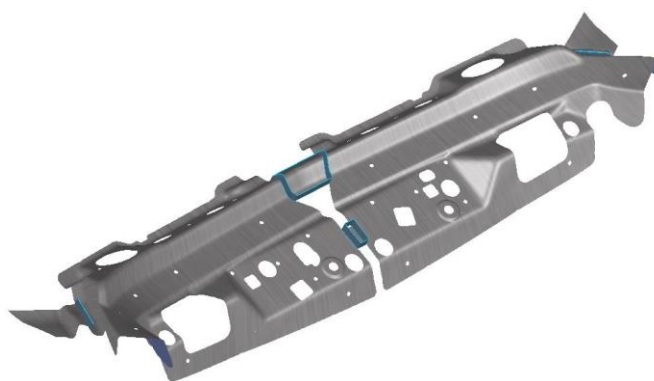


Figura 3.37 - Geometria e direção dos cortes da OP90 (*AutoForm Plus R7*).

Na OP90, o tamanho máximo da sucata exigido pelo cliente também é garantido, como é mostrado na Figura 3.38.

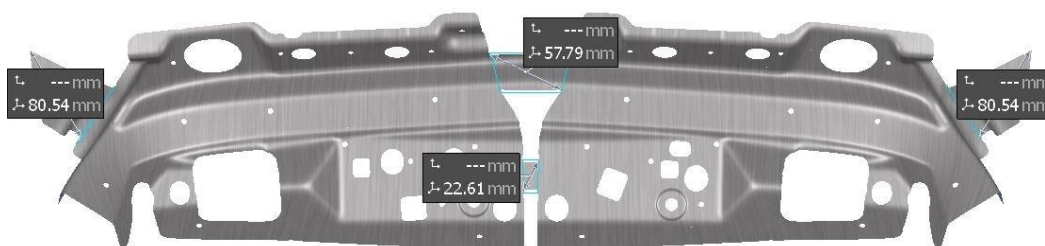
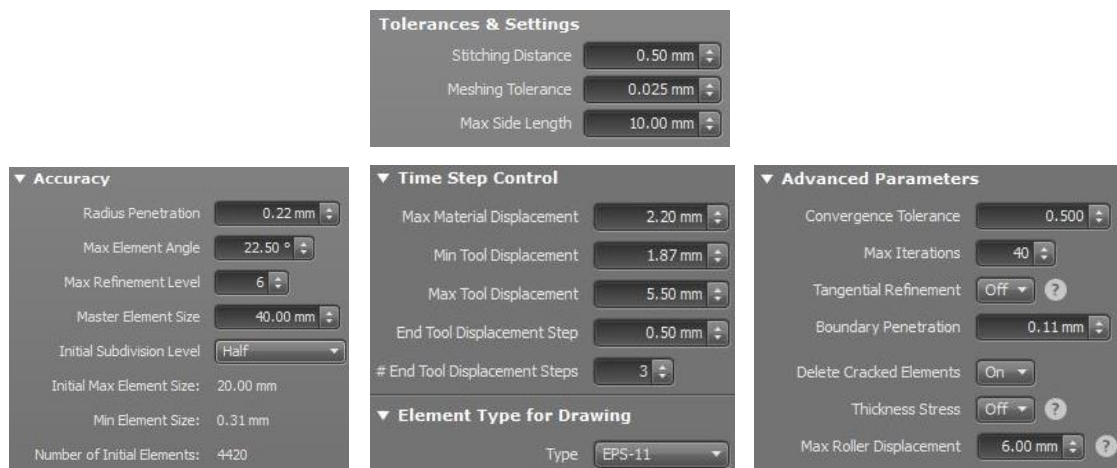


Figura 3.38 - Dimensões da sucata na OP90 [mm] (*AutoForm Plus R7*).

3.4 Parâmetros de Simulação

O modelo numérico adotado deve representar o modelo físico com rigor, implicando resultados de simulação coerentes com os experimentais. Para tal, o impacto dos parâmetros de simulação é evidente. Contudo, não sendo o foco deste trabalho, as simulações no *AutoForm Plus R7* assumem os parâmetros *standard* do *software*. Os parâmetros de processo e de simulação *final validation* (FV) são apresentados na Figura 3.39 e Figura 3.40, na devida ordem.

Figura 3.39 - Parâmetros de processo (*AutoForm Plus R7*).Figura 3.40 - Parâmetros de simulação (*AutoForm Plus R7*).

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

Neste capítulo, serão apresentados, discutidos, otimizados e validados os resultados numéricos do processo de estampagem. Aqui ter-se-á especial atenção à formabilidade, recuperação elástica, consumo da chapa, forças necessárias e capacidade do processo. Por último, serão comparados os resultados numéricos com os resultados verificados na estampagem.

4.1 Validação do Ciclo de Estampagem

A definição do ciclo de estampagem termina com a validação do mesmo. Esta é conseguida através de resultados numéricos, obtidos aqui a partir da simulação numérica do processo no *AutoForm Plus R7*. A validação do ciclo de estampagem assentou na análise da formabilidade e variação da espessura da chapa, do *springback* e das forças aplicadas. Esta análise foi unicamente para operações que impliquem conformação de chapa – idealmente, nas operações de corte a chapa não é sujeita a deformação. O processo numérico termina com a otimização do consumo de chapa e das forças necessárias e avaliação da capacidade do processo de estampagem.

Por experiência da equipa técnica de projeto e pelas exigências do cliente, é aconselhado que a deformação não provoque uma redução de espessura de chapa superior a 20%, nem um *Max. Failure* – quociente entre a deformação aplicada simulada e a deformação máxima (curva FLC); superior a 0,8 (zona amarela e vermelha do gráfico FLD). Estes serão os indicadores a cumprir na validação da formabilidade da peça, caso contrário, há grande probabilidade de rotura da chapa.

4.1.1 Formabilidade da Peça

4.1.1.1 OP20 – Embutidura

O embutimento da chapa num único passo leva facilmente à rotura da mesma, como é mostrado na Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3. Pelos valores numérico, esta afirmação comprova-se, uma vez que implica um *Max Failure* superior a 1, o que representa uma deformação superior à deformação máxima suportada pela chapa (zona vermelha), e uma redução de espessura de 22,7 %. Perante isto, a divisão do embutimento em duas operações foi a solução encontrada.

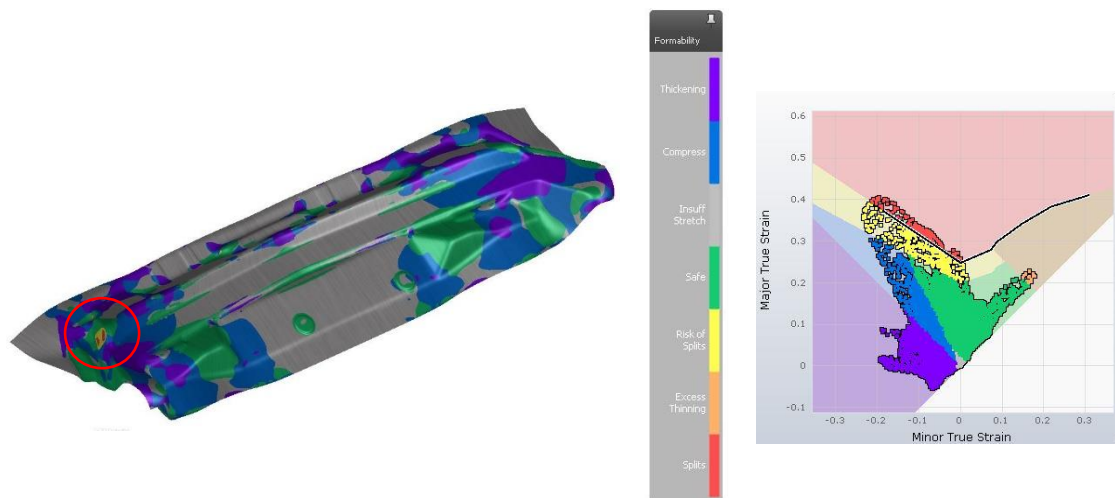


Figura 4.1 - Estados de deformação e respetivo gráfico FLD no embutimento por uma vez (*AutoForm Plus R7*).

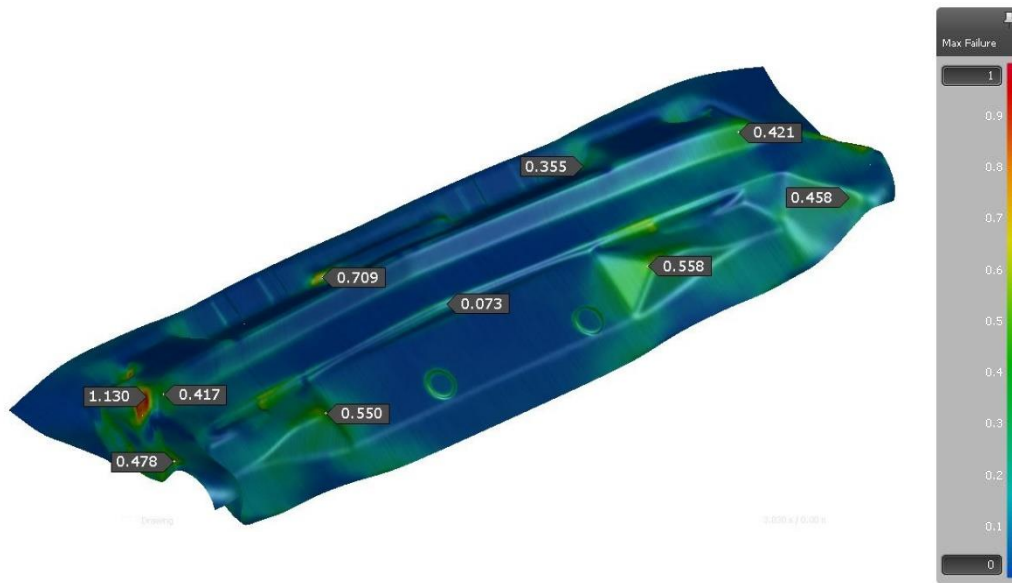


Figura 4.2 - *Max Failure* no embutimento por uma vez (*AutoForm Plus R7*).

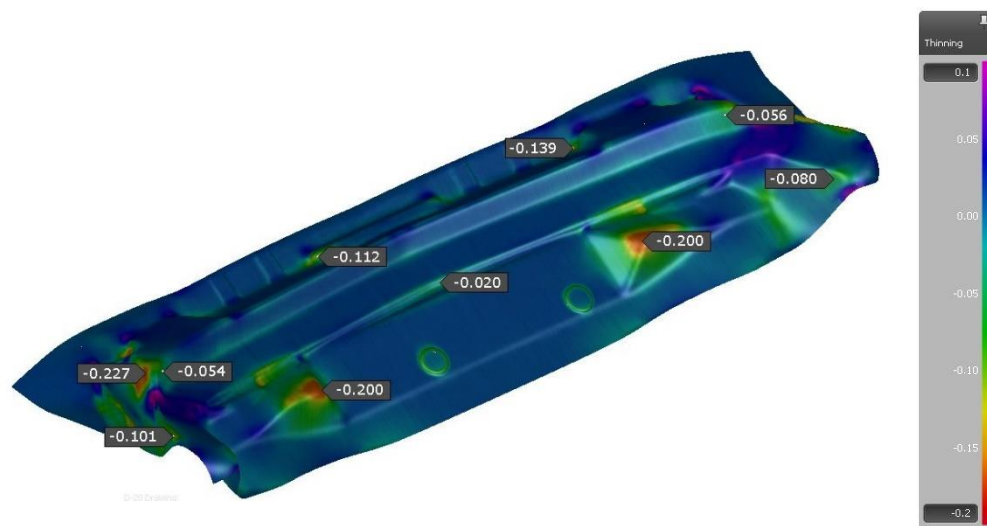


Figura 4.3 - Redução de espessura no embutimento por uma vez (*AutoForm Plus R7*).

Os resultados numéricos da OP20 são apresentados na Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.6. Como se pode verificar não existe qualquer problema quanto à formabilidade da chapa nesta operação. O regime de deformação encontra-se todo dentro das zonas verdes, azuis e roxas (Figura 4.4), com um *Max Failure* máximo associado de 0,699 (Figura 4.5). Quanto à redução de espessura, também não acarreta preocupações, dado que existe uma redução máxima da espessura da chapa de 13,9 % (Figura 4.6).

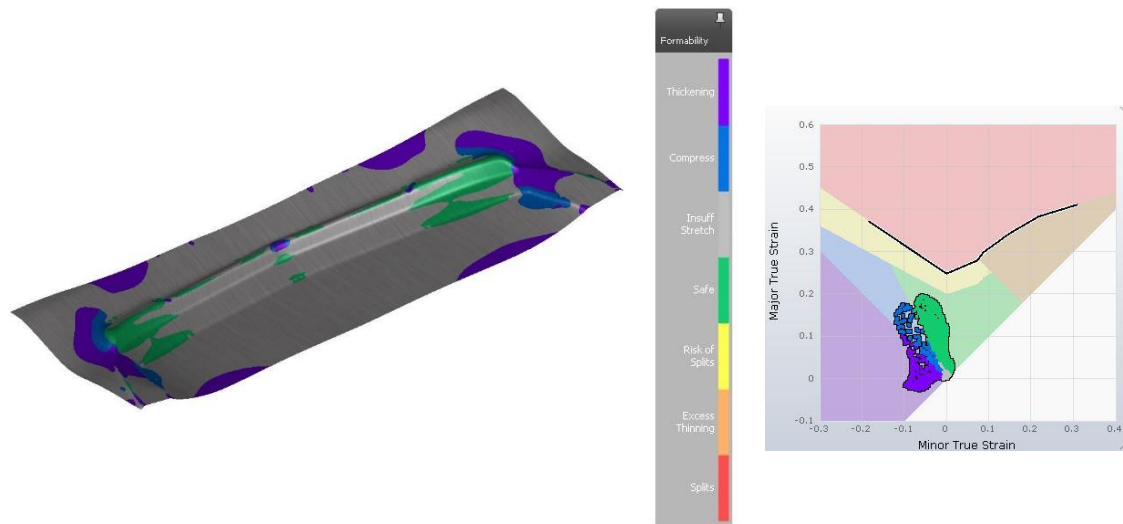


Figura 4.4 - Estados de deformação e respetivo gráfico FLD da OP20 (AutoForm Plus R7).

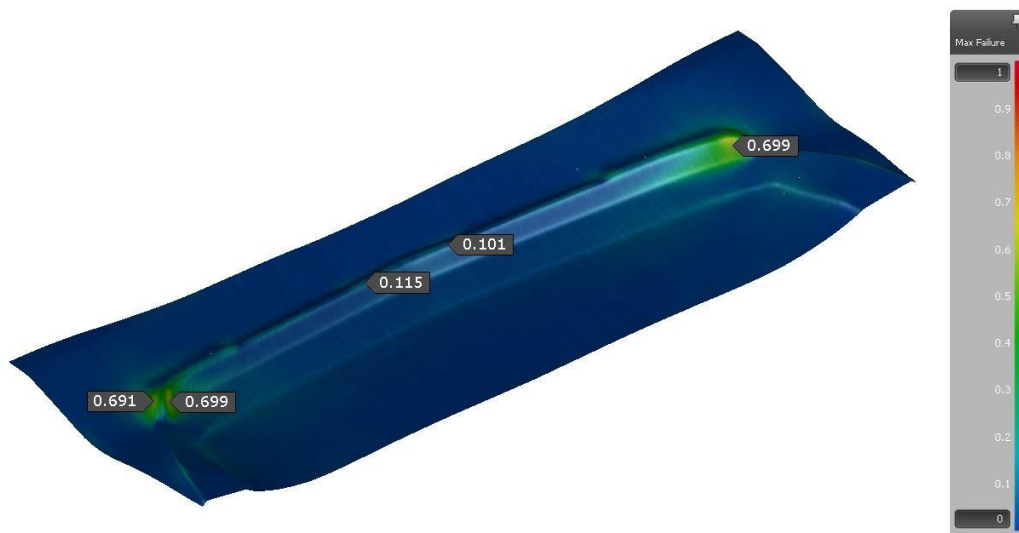


Figura 4.5 - Max Failure na OP20 (AutoForm Plus R7).

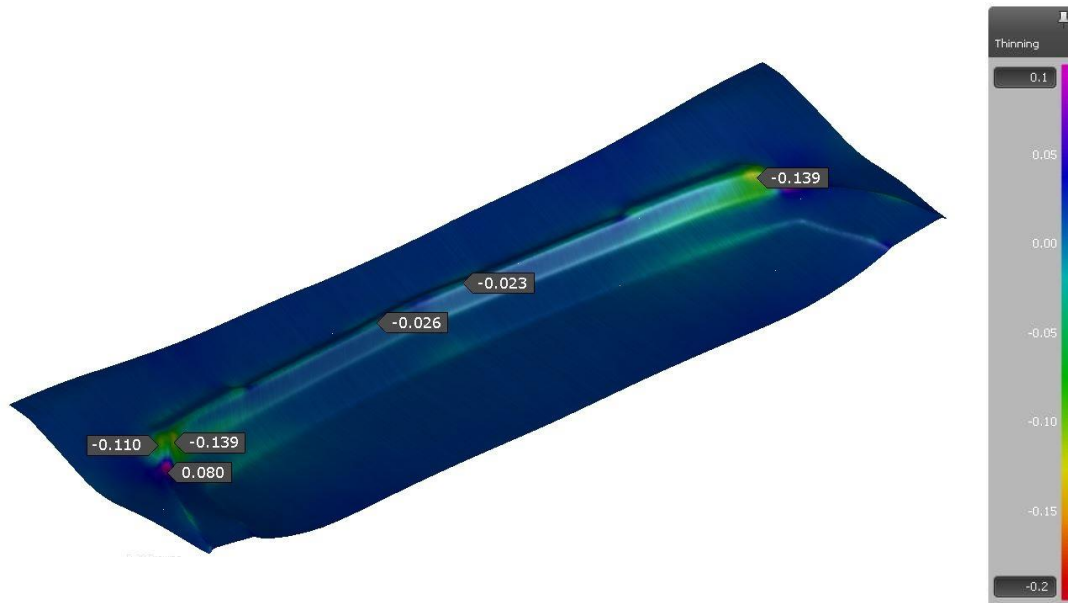


Figura 4.6 - Redução de espessura na OP20 (*AutoForm Plus R7*).

4.1.1.2 OP30 – Embutidura

Com a simulação verificou-se que existe uma zona de tendência de rotura na OP30, apresentada na Figura 4.7. Esta é principalmente provocada pelo estiramento excessivo resultante dos raios estabelecidos na construção da superfície. Como tal, a solução passou pelo alívio de raios, de modo a facilitar o fluxo da chapa.

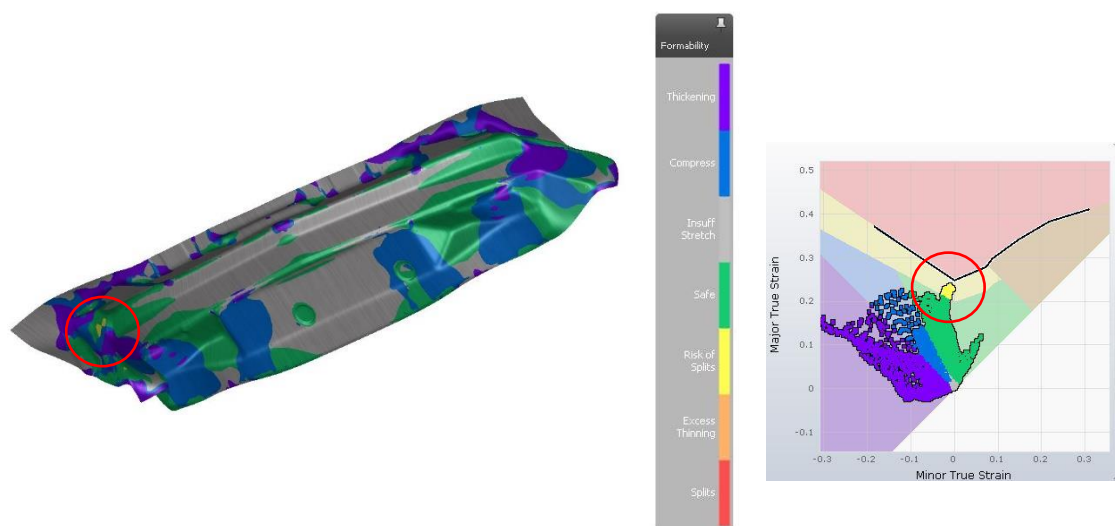


Figura 4.7 - Estados de deformação e respetivo gráfico FLD da OP30, antes da modificação (*AutoForm Plus R7*).

A modificação da superfície está apresentada na Figura 4.8. Analisando, houve um aumento do raio, com um desvio máximo de 1,18 mm, entre a superfície antes da modificação, a verde claro, e a superfície depois da modificação, a verde escuro. O mesmo foi espelhado para a peça esquerda, já que as peças são simétricas na forma. Para além disto, teve-se especial atenção em alterar a superfície numa zona fora da peça, de modo a não alterar a sua geometria.

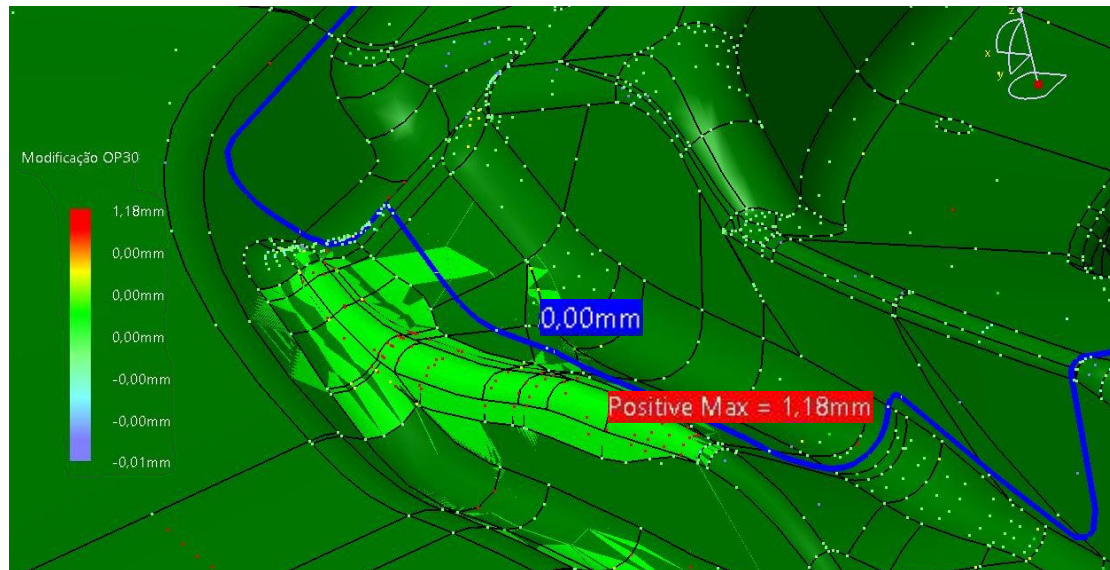


Figura 4.8 - Modificação da superfície da OP30: verde claro – superfície antes da modificação; verde escuro – superfície depois da modificação; azul – contorno da peça [mm] (CATIA V5 6R2019).

Com a modificação realizada, os resultados numéricos são apresentados na Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11. É possível verificar que a zona amarela foi removida, apresentando, nessa mesma zona, um *Max Failure* máximo de 0,782. No que toca à redução de espessura, há uma previsão de redução máxima de 18,6 %.

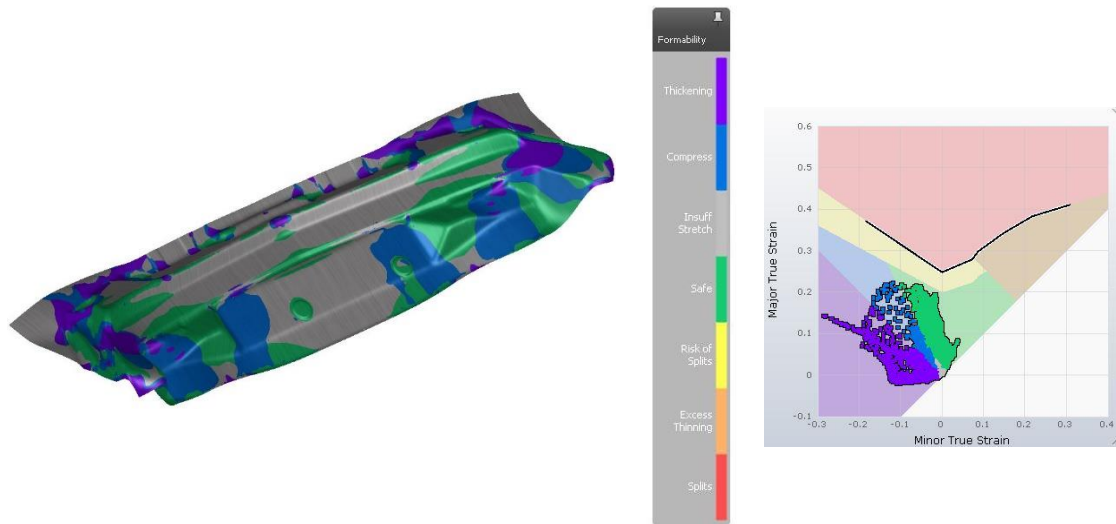


Figura 4.9 - Estados de deformação e respetivo gráfico FLD da OP30, depois da modificação (*AutoForm Plus R7*).

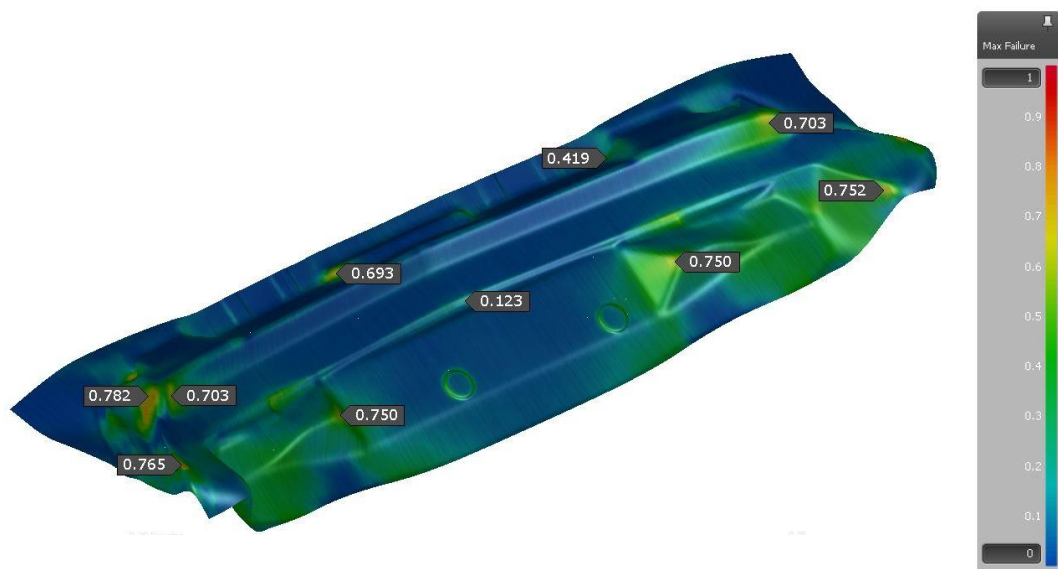


Figura 4.10 - *Max Failure* na OP30 (*AutoForm Plus R7*).

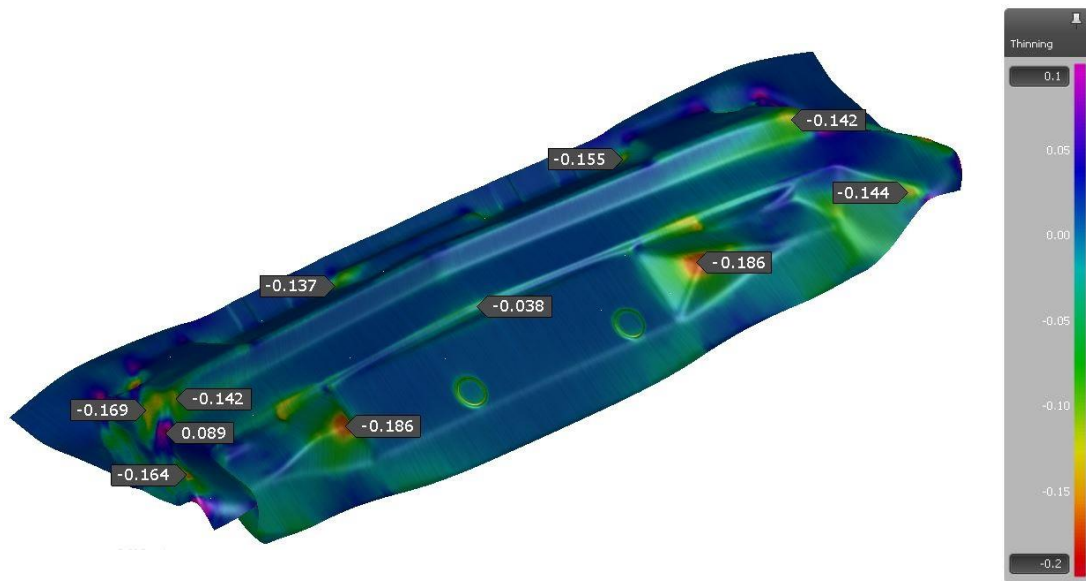


Figura 4.11 - Redução de espessura na OP30 (*AutoForm Plus R7*).

4.1.1.3 OP40 – Corte

Como indicado anteriormente, a formabilidade da chapa não foi analisada nas operações de corte, uma vez que a chapa não é sujeita a deformações. Através da análise da Figura 4.12, é possível verificar que a operação de corte OP40 em nada influencia os valores de deformação registado na operação anterior de embutidura OP30. A única variação que se nota é a redução do número de ponto no gráfico FLD, consequência de corte de chapa.

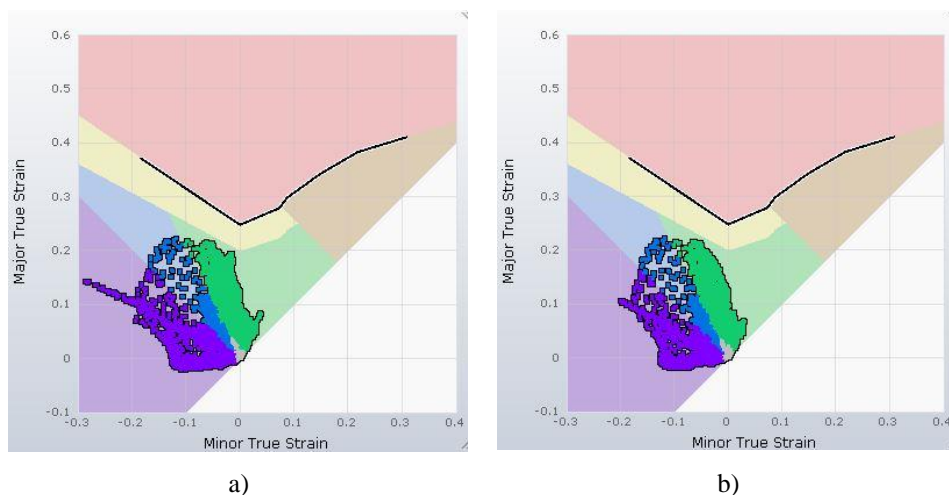


Figura 4.12 - Comparação do gráfico FLD numa operação de corte: a) antes da OP40; b) depois da OP40 (*AutoForm Plus R7*).

4.1.1.4 OP80 – Dobragem

A deformação durante uma operação de dobragem é unicamente aplicada no raio de concordância de dobragem. Isto é comprovado pelos resultados numéricos obtidos, Figura 4.13, Figura 4.14 e Figura 4.15, onde se verifica variações dos parâmetros de *Max Failure* somente no raio de dobragem. Analisando os valores, a operação é totalmente validada.

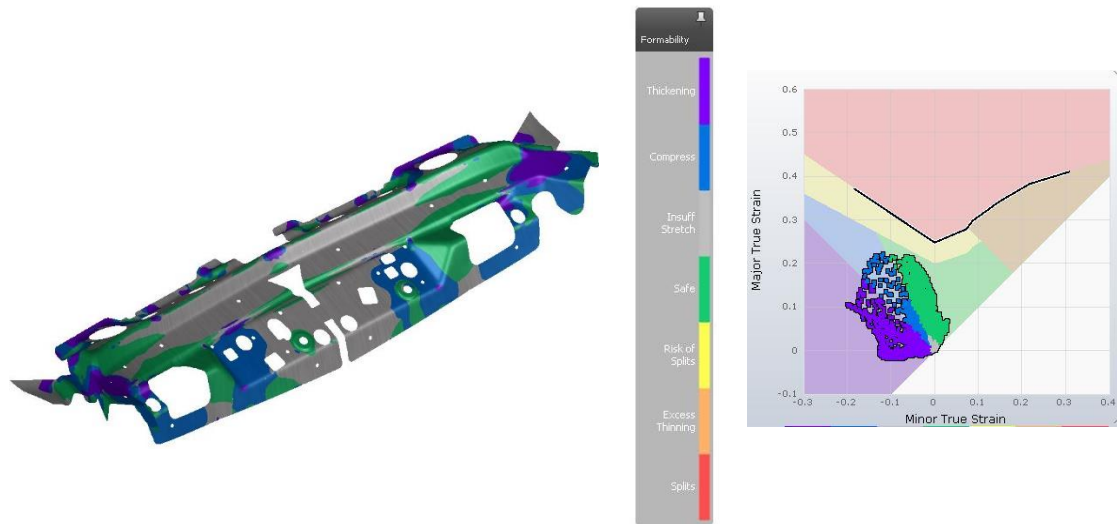
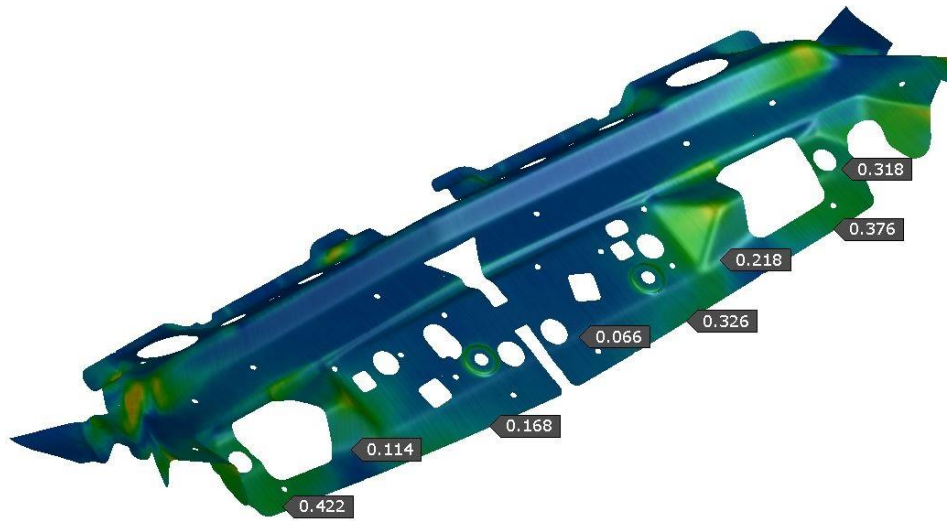
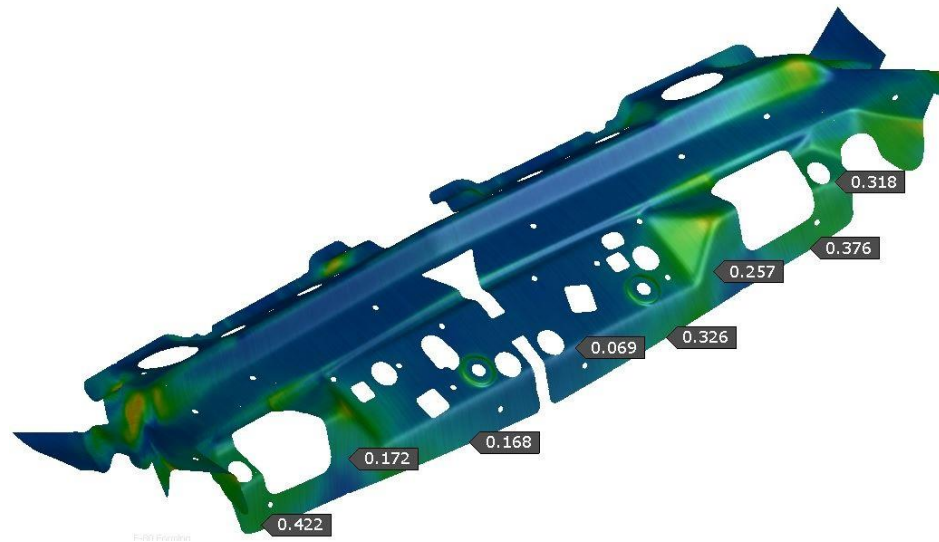


Figura 4.13 - Estados de deformação e respetivo gráfico FLD da OP80 (*AutoForm Plus R7*).



a)



b)

Figura 4.14 - Max Failure na OP80: a) antes da dobragem; b) depois da dobragem (*AutoForm Plus R7*).

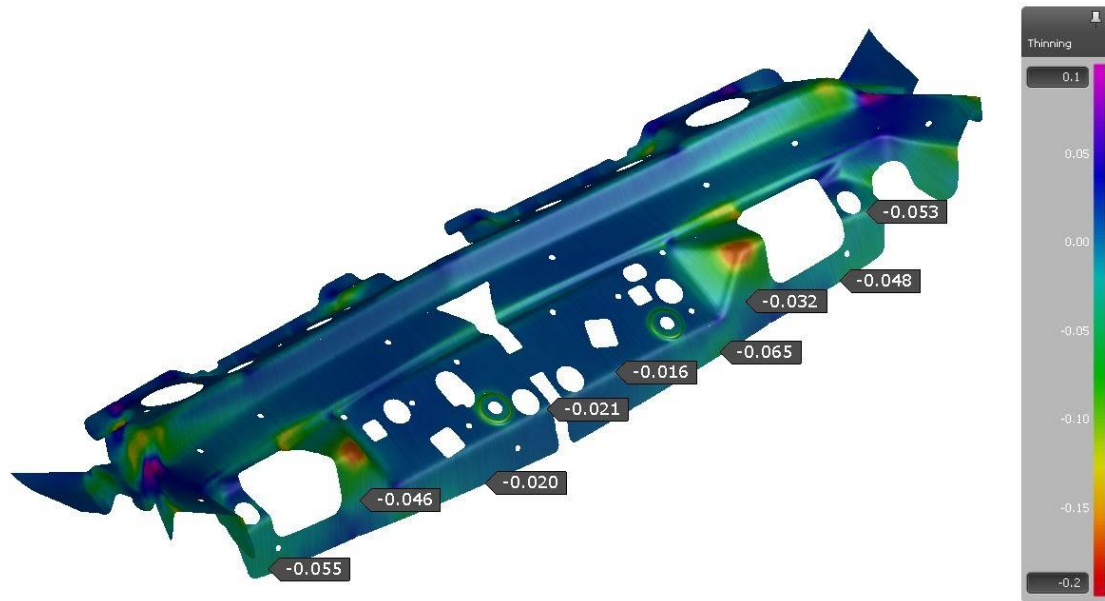


Figura 4.15 - Redução de espessura na OP80 (*AutoForm Plus R7*).

4.1.2 Otimização do Consumo de Chapa

A matéria-prima representa cerca de 65% do preço final de uma peça estampada (Leite et al., 2014). Por isto, a minimização do desperdício de chapa por otimização do formato é de especial atenção. Otimizando o formato por tentativa/ erro, sem afetar a viabilidade do processo, chegou-se ao formato final ideal ilustrado na Figura 4.16. Por par de peças, existe um consumo de 252000 mm³ de chapa, o que representa uma redução de 6,4 % do consumo de chapa e uma poupança de 0,11 € em relação ao formato inicial, Equação 4-1 e Equação 4-2. Feita esta análise, são definidas as dimensões da bobine – 762 mm x 1,5 mm [largura x espessura].

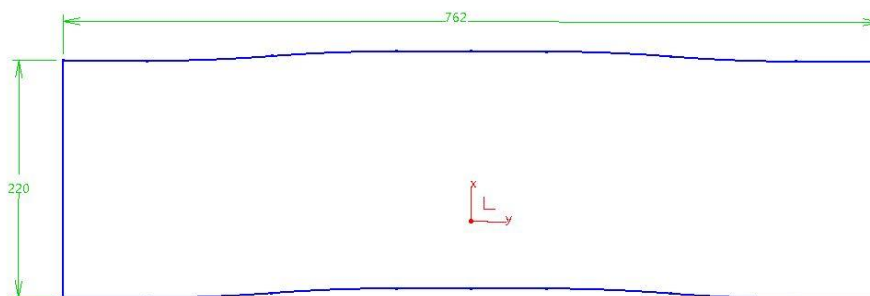


Figura 4.16 - Formato final [mm] (*CATIA V5 6R2019*).

Redução do consumo de chapa

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{Consumo inicial} - \text{Consumo final}}{\text{Consumo inicial}} \times 100 \\
 &= \frac{269100 \text{ mm}^3 - 252000 \text{ mm}^3}{269100 \text{ mm}^3} \times 100 \\
 &= 6,4 \text{ \%}/\text{par de peças}
 \end{aligned}$$

Equação 4-1

Redução do consumo de chapa

$$\begin{aligned}
 &= (\text{Consumo inicial} - \text{Consumo final}) \times \rho_{\text{chapa}} \times \frac{\text{€ chapa}}{\text{Kg}} \\
 &= (269100 \text{ mm}^3 - 252000 \text{ mm}^3) \times 0,0000078 \frac{\text{Kg}}{\text{mm}^3} \times 0,8 \frac{\text{€}}{\text{Kg}} \\
 &= 0,11 \text{ €/par de peças}
 \end{aligned}$$

Equação 4-2

Com isto, a geometria do corte da OP10 foi redefinida, apresentando-se como ilustrado na Figura 4.17. Esta modificação implica que o primeiro formato cortado da bobine seja descartado, uma vez que origina um formato diferente ao requerido, ilustrado na Figura 4.18.

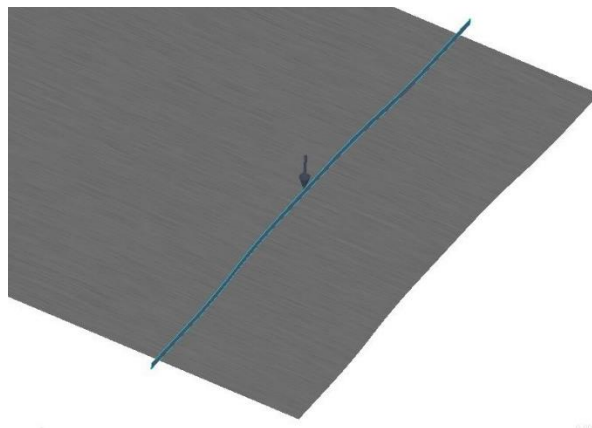


Figura 4.17 - Geometria e direção do corte da OP10 (AutoForm Plus R7).

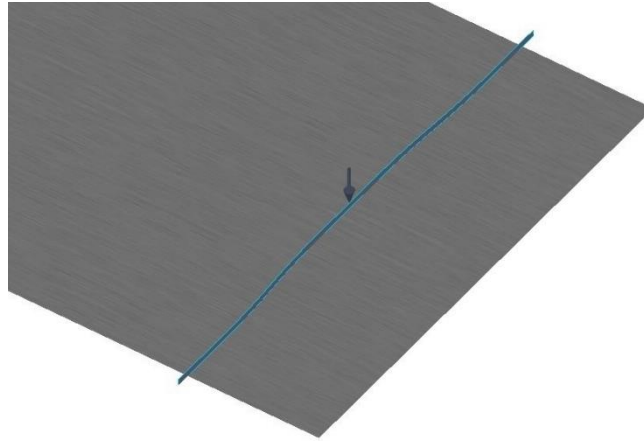


Figura 4.18 - Primeiro formato da bobine (*AutoForm Plus R7*).

Com a formabilidade da chapa totalmente validada, o formato otimizado e os requisitos do cliente cumpridos, define-se por completo o ciclo de estampagem. A sequência operatória numérica é apresentada na Figura 4.19.

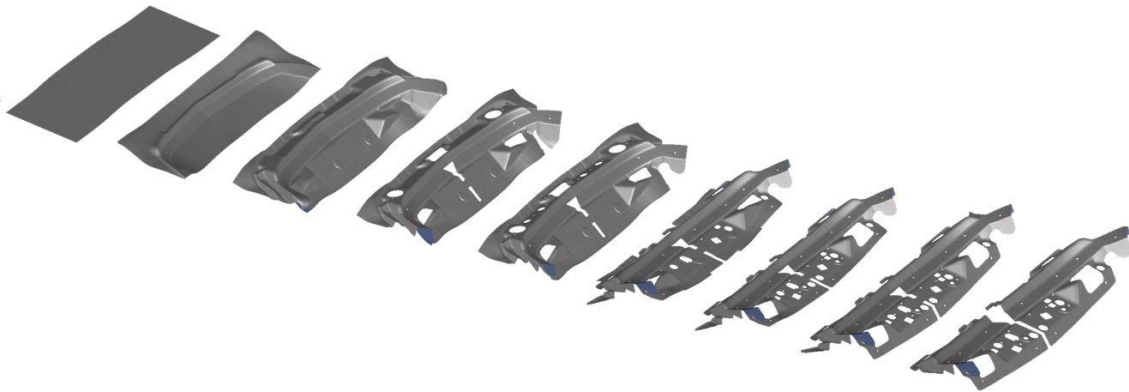


Figura 4.19 - Sequência operatória numérica (*AutoForm Plus R7*).

4.1.3 Springback

O *springback* é o fenómeno que implica maior dificuldade para afinação das ferramentas de estampagem. De modo a cumprir as exigências dimensionais da peça, contrariando este fenómeno, é necessário a compensação das superfícies, inicialmente construídas com base na superfície nominal da peça. Esta construção apoia-se na previsão do *springback* obtida pelo *AutoForm Plus R7*. Devido à simetria quase total da forma das peças, optou-se por analisar apenas a peça esquerda.

Normalmente, o controlo da qualidade de peças é um processo simplificado com sistemas de fixação e calibres passa/ não passa. Contudo, durante o processo de afinação

de ferramenta, onde é útil perceber o comportamento da chapa, a análise do *springback* deverá ocorrer sem qualquer restrição de peça – *free springback*. A Figura 4.20 demonstra a configuração de análise do *springback*, com a definição do tipo de *springback* [Figura 4.20a)] – *free springback (Free springback at End of Operation)*; e da geometria de referência para cálculo do desvio [Figura 4.20b) e Figura 4.20c)] – superfície inferior da peça nominal (*Lower Side of Blank*).

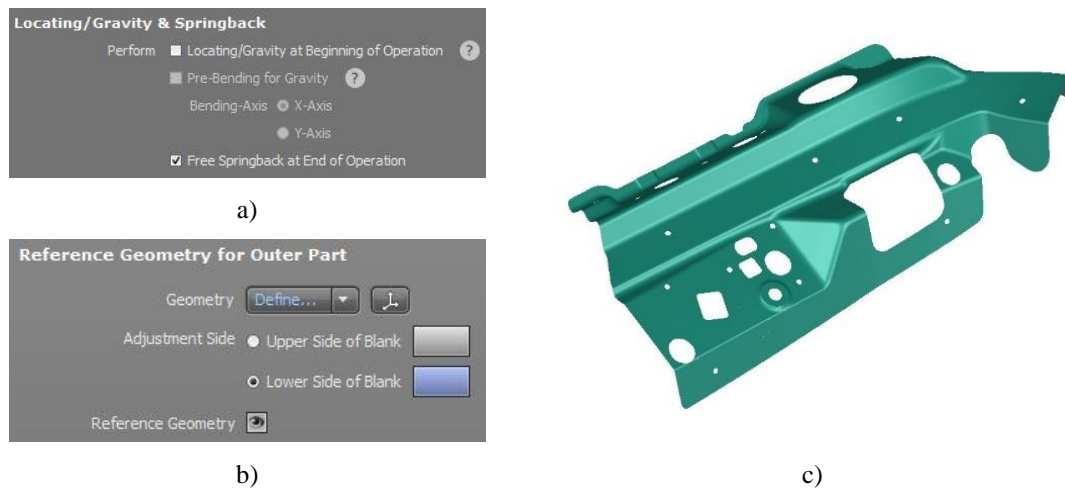


Figura 4.20 - Configuração de análise do *springback*: a) tipo de *springback*; b) lado da geometria de referência; c) geometria de referência (*AutoForm Plus R7*).

A compensação dos elementos de deformação pode ser manual, reajustando e reconstruindo novamente as superfícies para cada operação. Isto é válido e eficiente para peças simples, constituídas maioritariamente por dobragens. Em contrapartida, tratando-se de peças com geometria complexa, a compensação manual é de extrema dificuldade e demorosa. A utilização da ferramenta *Design for springback compensation* do *AutoForm Plus R7* é uma ótima solução nestes casos. Nesta ferramenta, definindo a operação e as regiões a compensar, é feita uma compensação direta do *springback* na superfície que dá origem aos elementos. Na grande parte dos casos, é necessário mais que uma iteração deste processo, uma vez que a compensação do *springback* não é direta.

Idealmente, a compensação da recuperação elástica da peça deverá ser feita na operação que lhe dá origem, ou seja, na operação onde se conformou a zona a compensar. Desta forma, foi analisado o *springback* da peça final, com o intuito de determinar as modificações em cada operação. O resultado obtido é apresentado na Figura 4.21.

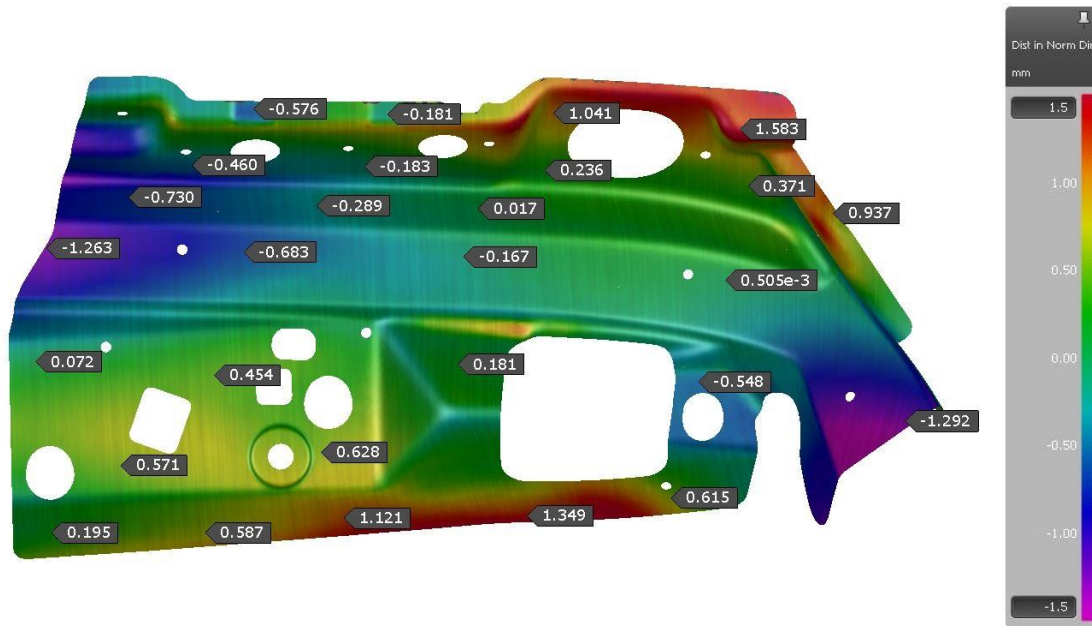


Figura 4.21 - *Springback* inicial da peça final: resultado da OP90 [mm] (*AutoForm Plus R7*).

Analisando a Figura 4.21 e de acordo com a Figura 2.7, é possível verificar que a alteração por *springback* é do tipo torção. Desta forma, não podendo assim analisar o *springback* da dobragem na OP80, foram apenas compensadas as operações OP20 e OP30, numa primeira iteração. A compensação destas operações teve o auxílio da ferramenta *Design for springback compensation*. Como indica a Figura 4.22, ambas as operações foram diretamente compensadas – *Compensation Factor* unitário [Figura 4.23a) e Figura 4.24a)]; a partir do resultado obtido da operação OP90 (Figura 4.21), definindo as regiões de compensação:

- *Direct* – região com compensação direta do valores de *springback*;
- *Fixed* – região que não sofre alterações;
- *Transition* – região de transição entre a região *Fixed* e *Direct*.

As regiões de compensação são ilustradas na Figura 4.23b) e Figura 4.24b). De salientar que a região *Direct* da OP20 é uma região *Fixed* na OP30, uma vez que não é ideal compensar uma região compensada e/ ou conformada numa operação anterior.

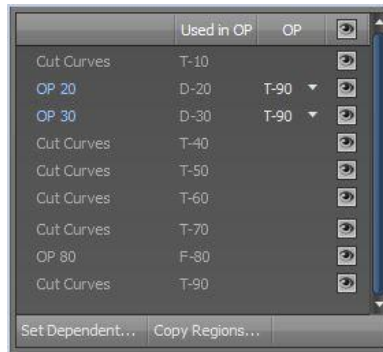
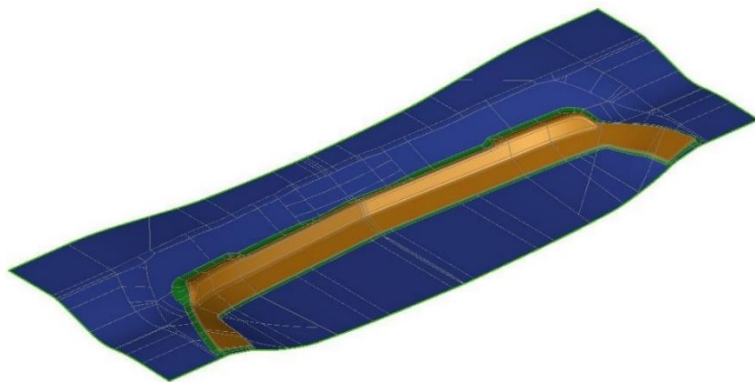


Figura 4.22 - Plano de compensação (AutoForm Plus R7).



a)

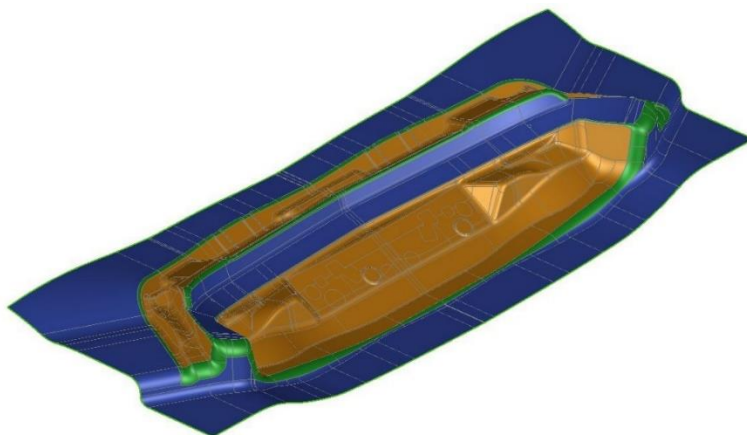


b)

Figura 4.23 - Configuração da compensação da OP20: a) quadro de configuração; b) regiões de compensação (AutoForm Plus R7).



a)



b)

Figura 4.24 - Configuração da compensação da OP30: a) quadro de configuração; b) regiões de compensação (AutoForm Plus R7).

As superfícies resultantes da compensação são apresentadas nas Figura 4.25 e Figura 4.26, exportadas para o *CATIA V5 6R2019*.

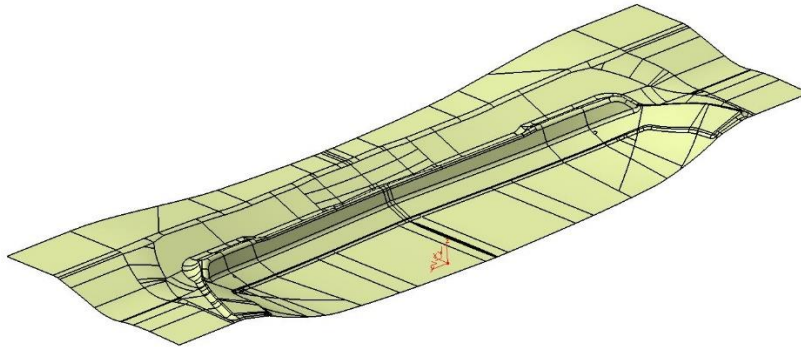


Figura 4.25 - Superfície suporte da OP20 compensada (*CATIA V5 6R2019*).

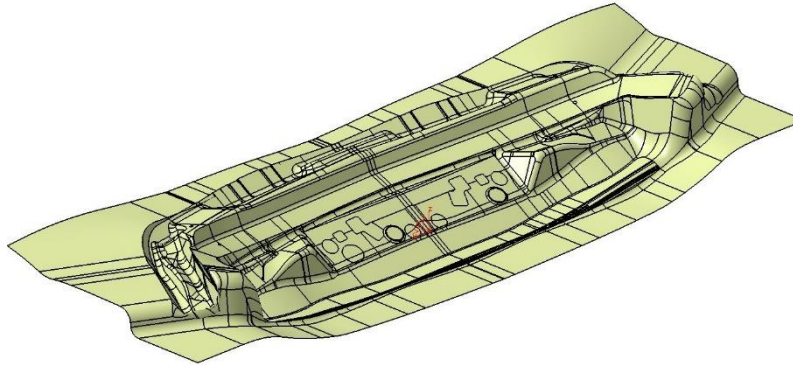


Figura 4.26 - Superfície suporte da OP30 compensada (*CATIA V5 6R2019*).

A ferramenta de compensação do *AutoForm Plus R7* implica, na maioria dos casos, retrabalhos nas superfícies resultantes, uma vez que não garante a tangência entre regiões na superfície. Esta característica é fundamental para assegurar e facilitar o processo de polimento dos elementos de estampagem e o fluxo da chapa durante a deformação. A análise de tangências é conseguida através da ferramenta *Shading with edges without smooth edges* do *CATIA V5 6R2019*, onde as falhas de tangência são representadas por linhas pretas. Como é possível verificar na Figura 4.27 e na Figura 4.28, existem falhas de tangência em ambas as superfícies.

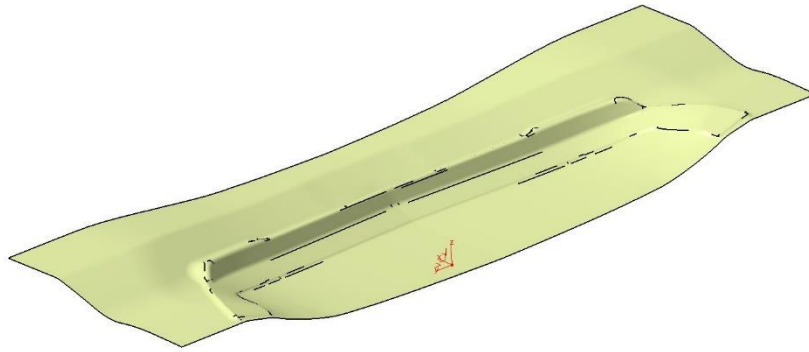


Figura 4.27 - Análise de tangências na superfície suporte da OP20 compensada (CATIA V5 6R2019).

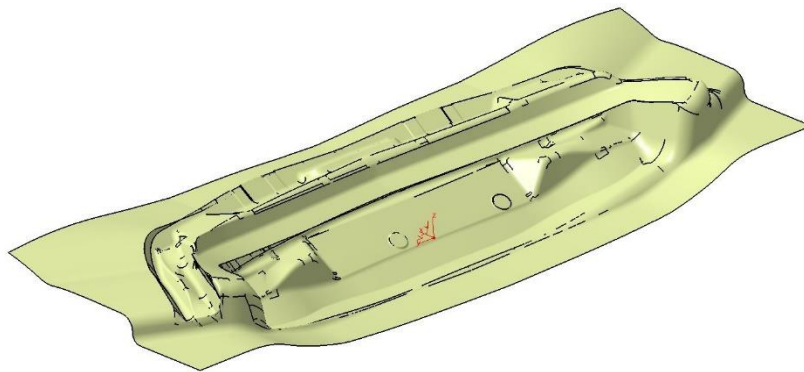


Figura 4.28 - Análise de tangências na superfície suporte da OP30 compensada (CATIA V5 6R2019).

A compensação do *AutoForm Plus R7*, pelo ponto indicado anteriormente, torna-se assim um auxílio na construção da superfície compensada, e não uma solução direta. As superfícies compensadas retrabalhadas no *CATIA V5 6R2019* são apresentadas na Figura 4.29 e na Figura 4.30, na devida ordem, para a OP20 e OP30. Analisando as figuras, é de notar que foi garantida a tangência total nas superfícies.

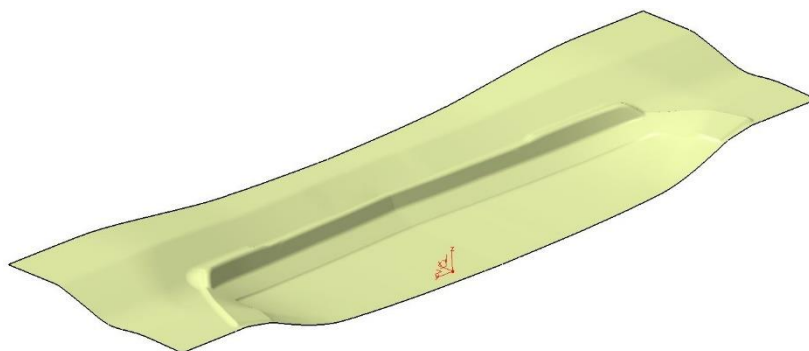


Figura 4.29 - Superfície suporte da OP20 compensada e retrabalhada (CATIA V5 6R2019).

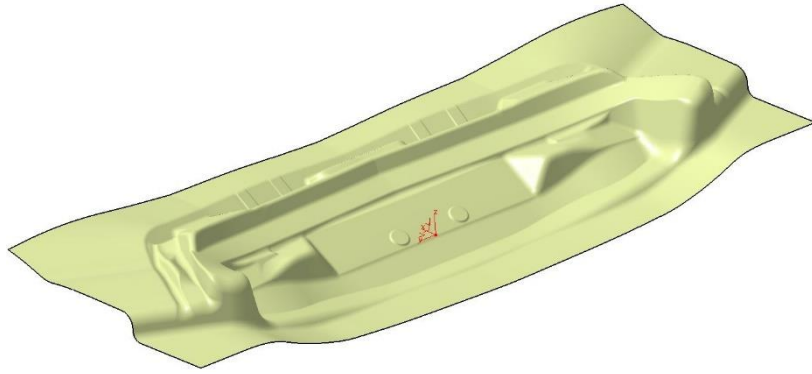


Figura 4.30 - Superfície suporte da OP30 compensada e retrabalhada (CATIA V5 6R2019).

Após a construção das superfícies compensadas, através da observação da Figura 4.31 e da Figura 4.32, é possível comprovar que a compensação foi direta e contrária à tendência de recuperação elástica apresentada pela peça (Figura 4.21).

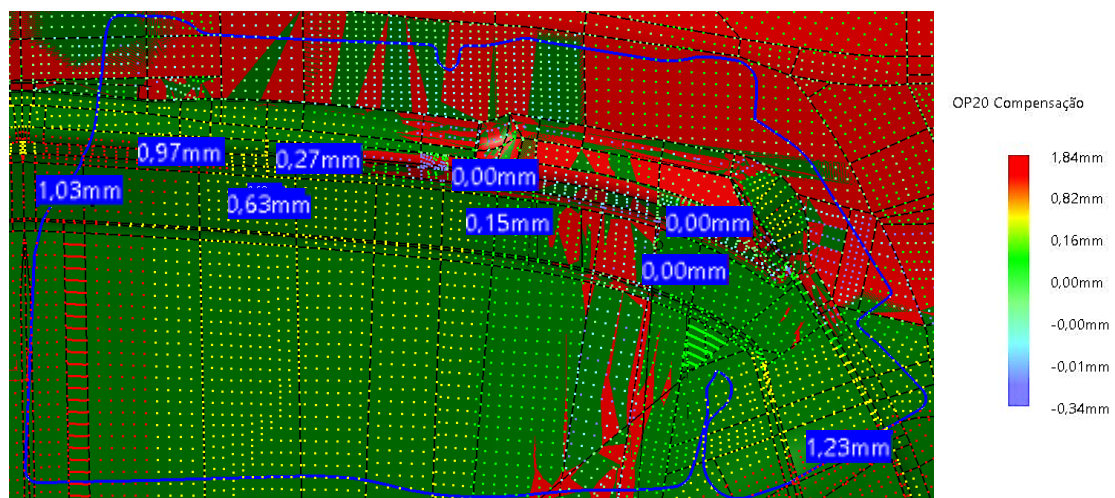


Figura 4.31 - Compensação do *springback* na OP20: linha azul – contorno de peça; superfície vermelha – superfície de suporte nominal; superfície verde – superfície de suporte compensada [mm] (CATIA V5 6R2019).

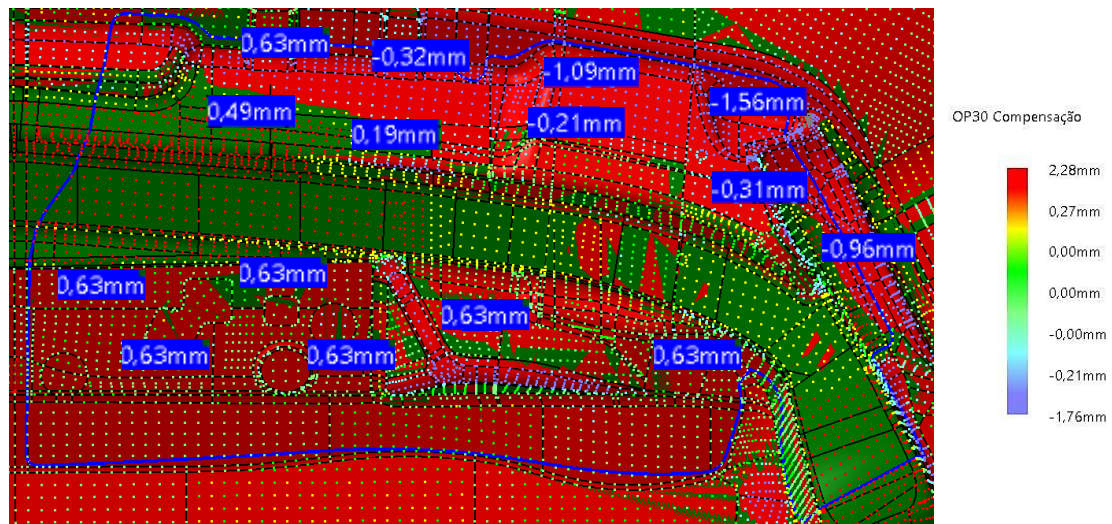


Figura 4.32 - Compensação do *springback* na OP30: linha azul – contorno de peça; superfície vermelha – superfície de suporte nominal; superfície verde – superfície de suporte compensada [mm] (CATIA V5 6R2019).

Terminada esta primeira iteração, os elementos de estampagem foram atualizados com as superfícies compensadas e uma nova simulação no *AutoForm Plus R7* foi corrida. O resultado do *springback* da peça é apresentado na Figura 4.33, Figura 4.34.

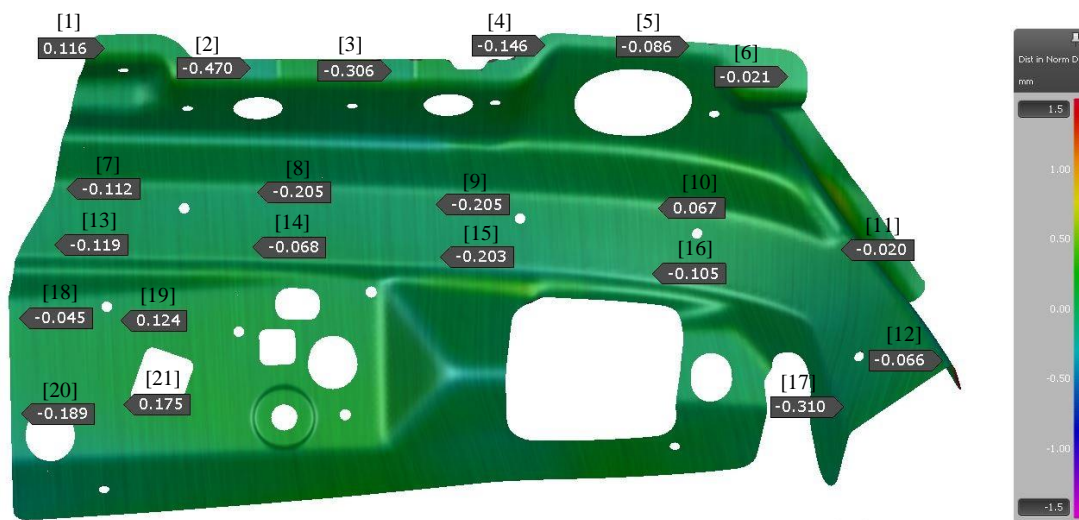


Figura 4.33 - *Springback* da peça final com compensação, iteração 1 tolerâncias específicas [mm] (*AutoForm Plus R7*).

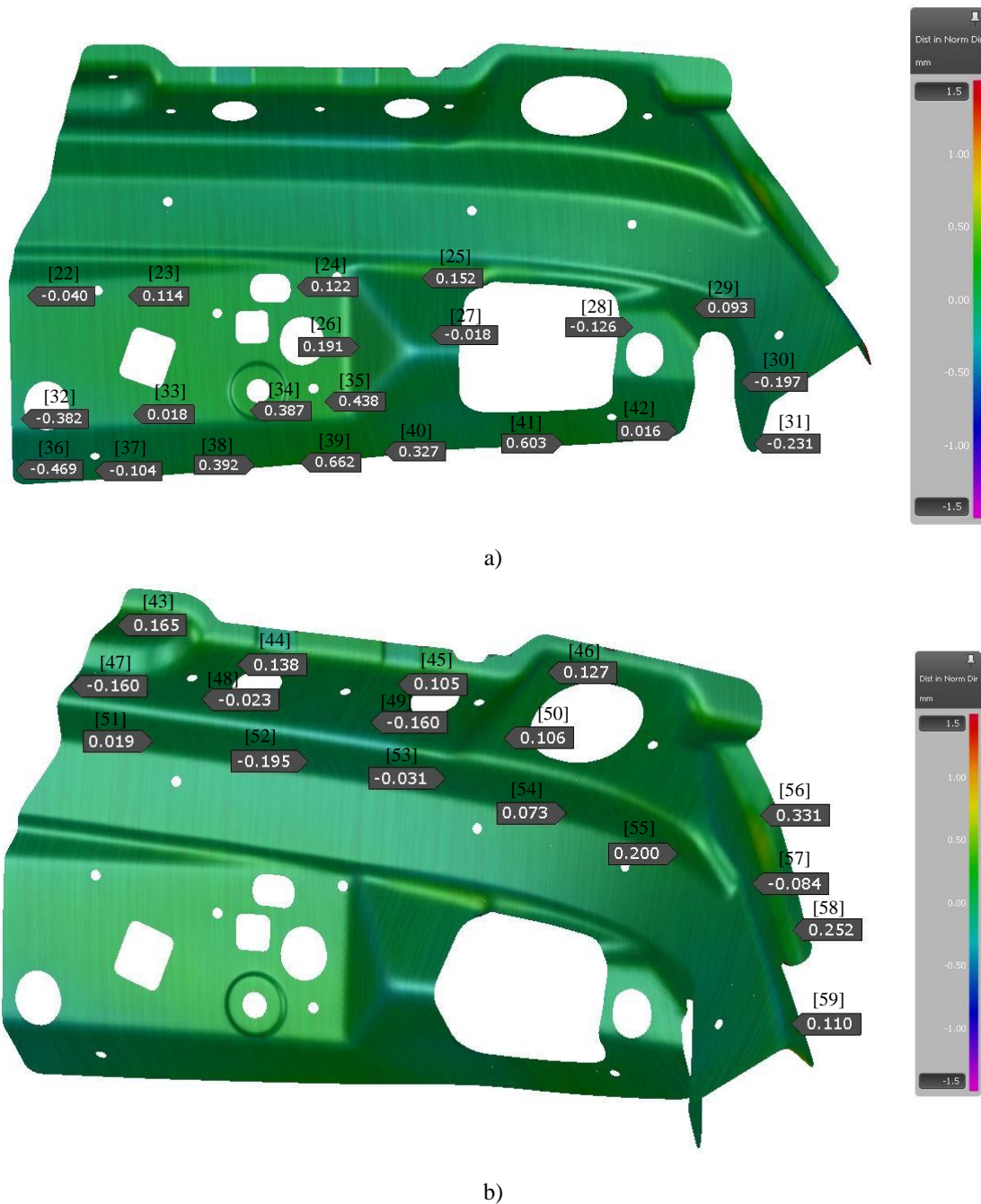


Figura 4.34 - *Springback* da peça final com compensação, iteração 1 tolerâncias gerais: a) vista de topo; b) vista auxiliar [mm] (*AutoForm Plus R7*).

De acordo com os resultados de *springback* da primeira iteração de compensação e com o ANEXO I – *Desenho 2D das peças*, o toleranciamento da peça é cumprido. Como se pode observar, a compensação foi realizada para o valor central da tolerância de cada superfície. No caso da aba dobrada, a superfície ainda apresenta uma ligeira torção, contudo a OP80 não foi alterada, uma vez que é cumprido o toleranciamento e a alteração do ângulo de dobragem não iria resolver os valores apresentados. As restantes superfícies

de tolerância geral coincidem, na maior parte, com a posição nominal de peça – desvio de 0 mm. No que diz respeito às superfícies mais importante, com tolerâncias específicas, o desvio em relação ao valor central da tolerância ronda os 0,124 mm, não sendo superior a 0,310 mm, de acordo com a Tabela 4.1. De salientar que, com o pressuposto inicialmente estabelecido de compensar apenas as operações OP20 e OP30, foram obtidos os resultados esperados. Por outro lado, conclui-se também que o *springback* apresentado na aba dobrada na OP80 não é provocado por alteração de ângulo ou empenamento da parede, mas sim resultante do *springback* de operações anteriores. Em termos de toleranciamento de um perfil de linha, não foi realizada qualquer análise, uma vez que os cortes de contorno de peça e de furos são realizados posteriormente à deformação, não havendo necessidade de procurar a posição e a geometria dos cortes. Conclui-se assim a formabilidade e a compensação das peças.

Tabela 4.1 - Desvio absoluto em relação ao valor central de tolerância (tolerâncias específicas) [mm].

Resultado Numérico	Tolerância central	Desvio Absoluto	Resultado Numérico	Tolerância central	Desvio Absoluto	Resultado Numérico	Tolerância central	Desvio Absoluto
0,116	0,000	0,116	-0,205	0,000	0,205	-0,203	0,000	0,203
-0,470	-0,500	0,030	-0,205	0,000	0,205	-0,105	0,000	0,105
-0,306	-0,500	0,194	0,067	0,000	0,067	-0,310	0,000	0,310
-0,146	0,000	0,146	-0,020	0,000	0,020	-0,045	0,000	0,045
-0,086	0,000	0,086	-0,066	0,000	0,066	0,124	0,000	0,124
-0,021	0,000	0,021	-0,119	0,000	0,119	-0,189	0,000	0,189
-0,112	0,000	0,112	-0,068	0,000	0,068	0,175	0,000	0,175
0,116	0,000	0,116	-0,205	0,000	0,205	-0,203	0,000	0,203
Média								0,124

4.1.4 Otimização de Forças

A utilização de elementos móveis, cerra-chapas e almofadas, que necessitem de um avanço em relação aos elementos fixos, punções e matrizes, requerem a utilização de cilindros a gás, tradicionalmente denominados por cilindros. Estes representam um custo adicional e indesejado, já que, idealmente, um processo de estampagem deve utilizar somente a força de prensa. Contudo, nem sempre isto é conseguido e, como tal, é necessário avaliar e otimizar a utilização de cilindros.

Inicialmente, os elementos móveis são configurados na simulação pelo *Force Controlled*, onde a força aplicada pelos cilindros estabelece uma pressão constante de 3 MPa. A configuração inicial dos elementos móveis é apresentada na Figura 4.35, detalhadamente para cada operação, OP20, OP30 e OP80. A utilização desta consideração garante a fixação total da chapa entre o elemento móvel e o elemento fixo durante todo o curso descendente da prensa, sendo essencial na factibilidade dos resultados numéricos e na viabilidade do processo. Com este ponto de partida, a força total de processo é de 8317,1 kN e a força de cilindros necessária é de 333,7 kN, 354,7 kN e 937,2 kN, respetivamente para OP20, OP30 e OP80, de acordo com a Figura 4.36.

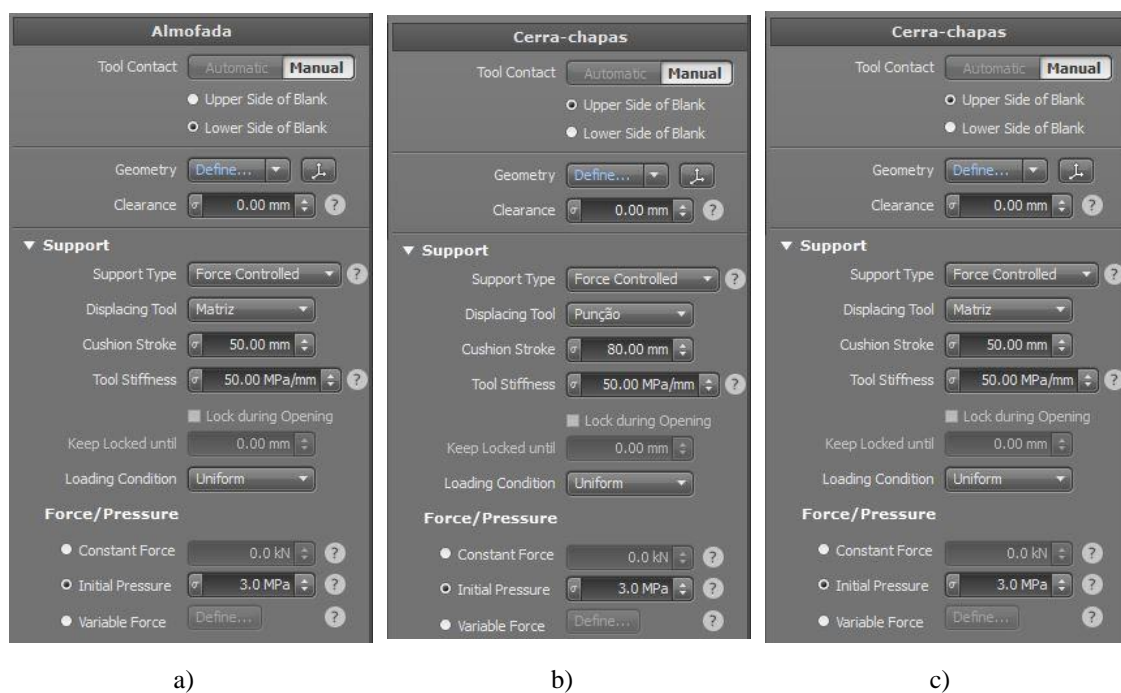


Figura 4.35 - Configuração inicial dos elementos móveis: a) OP20; b) OP30; c) OP80 (*AutoForm Plus R7*).

Tool Forces Overview					
Tool Name	Max Force	Tool Name	Max Force	Tool Name	Max Force
T-10		Cortes de Carro 1	15.7 kN	Weight	13.90 N
Cortes Verticais	473.7 kN	Cortes de Carro 2	190.7 kN	T-90	
Weight	19.70 N	Cortes de Carro 6	34.8 kN	Cortes Verticais 1	83.5 kN
D-20		Cortes de Carro 5	49.2 kN	Cortes Verticais 2	82.2 kN
Matriz	1011.5 kN	Cortes de Carro 4	48.0 kN	Weight	13.00 N
Punção	677.8 kN	Cortes de Carro 3	32.3 kN		
Almofada	333.7 kN	Weight	17.00 N		
Weight	19.70 N	T-60			
D-30		Cortes Verticais 1	328.4 kN		
Matriz	1842.3 kN	Cortes Verticais 2	659.8 kN		
Punção	2197.0 kN	Weight	15.30 N		
Cerra-chapas	354.7 kN	T-70			
Weight	19.70 N	Cortes Verticais 1	452.9 kN		
T-40		Cortes Verticais 2	363.4 kN		
Cortes Verticais 1	607.8 kN	Weight	13.90 N		
Cortes de Carro	180.4 kN	F-80			
Cortes Verticais 2	519.9 kN	Matriz	985.9 kN		
Weight	17.50 N	Punção	48.7 kN		
T-50		Cerra-chapas	937.2 kN		

Figura 4.36 - Forças aplicadas necessárias com a configuração *Force Controlled*, por operação e elemento [kN] (*AutoForm Plus R7*).

Como indicado anteriormente, a força de cilindros deve ser tal que garanta a fixação da chapa. Com a configuração *Force Controlled*, para além da fixação da chapa, é assegurada a fixação total da chapa, como é evidenciado na Figura 4.37, onde o desvio entre a chapa e o elemento móvel – almofada da OP20 , cerra-chapas da OP30 e cerra-chapas da OP80; é nulo durante todo o curso. Contudo, quando se garante a fixação total, é necessária uma força de cilindros elevada. Assim sendo, é fundamental estabelecer um equilíbrio entre a força de cilindros e o desvio entre a chapa e o elemento móvel. Por experiência, o valor padrão utilizado na empresa estabelece um desvio máximo de 0,1 mm, ou seja, a força de cilindros deverá ser tal que, quando aplicada a força de deformação, o elemento móvel não ceda mais que 0,1 mm.

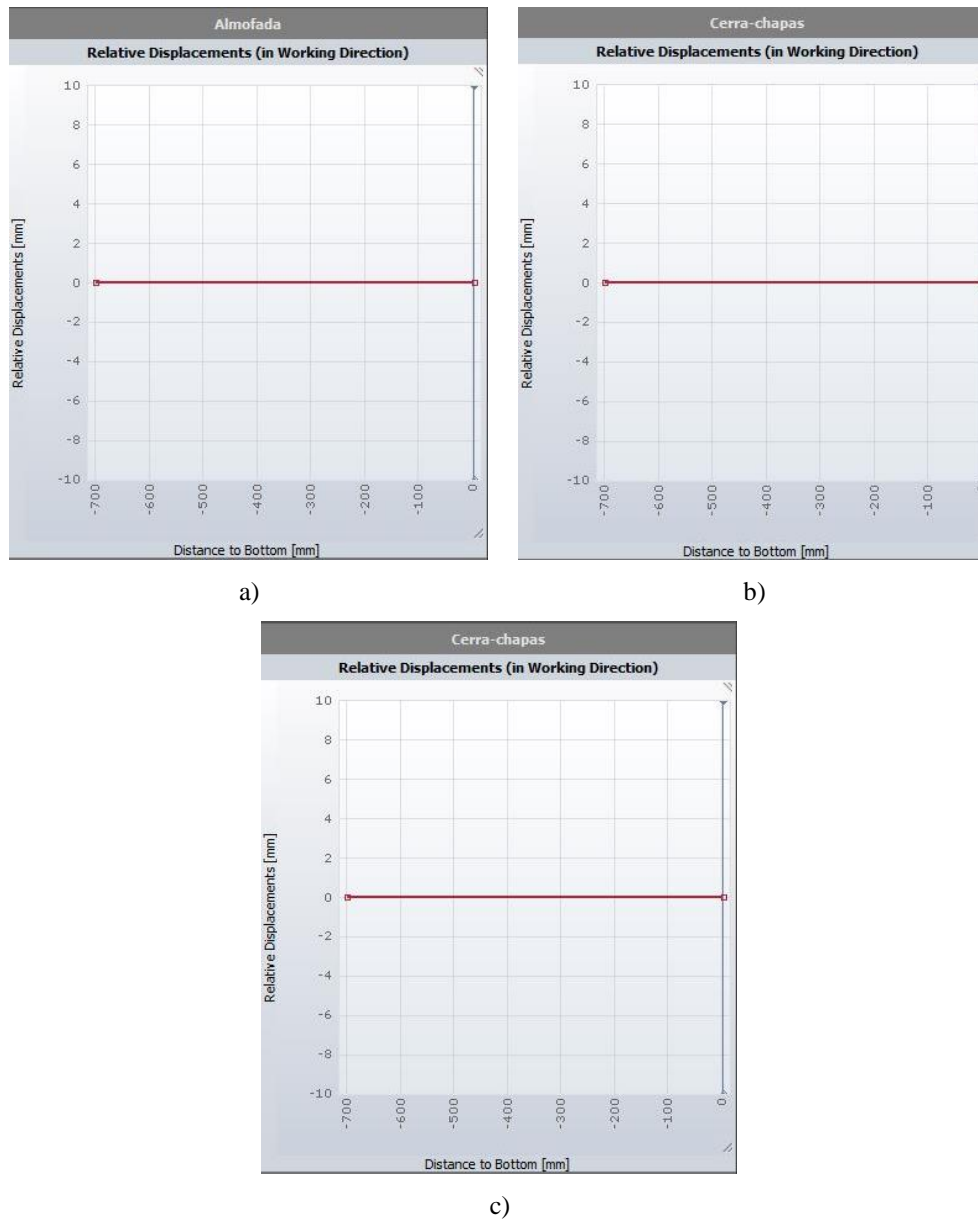


Figura 4.37 - Cedência dos elementos móveis na configuração inicial de *Force Controlled*, em função do curso: a) OP20; b) OP30; c) OP80 (*AutoForm Plus R7*).

No processo de otimização de força de cilindros, os elementos móveis são configurados pelo *Spring Controlled*, de modo a melhor traduzir o comportamento dos cilindros – variação da força com o curso. A configuração otimizada de cada elemento móvel é apresentada na Figura 4.38. Por iterações manuais, onde as forças aplicadas foram sucessivamente diminuídas, chegou-se aos resultados apresentados na Figura 4.39. A força de cilindros mínima inicial necessária, *Preload Force*, é de 109,8 kN, 168,0 kN e 296,0 kN, respetivamente para OP20, OP30 e OP80 (Figura 4.38). Após otimização de forças, reduziu-se em cerca de 60 % a força de cilindros total. Neste ciclo de simulações,

teve-se em atenção não exceder o desvio máximo estabelecido anteriormente de 0,1 mm. Como se verifica na Figura 4.40, o elemento móvel cede 0,0 mm, 0,05 mm e 0,08 mm nas operações OP20, OP30 e OP80, na devida ordem. Com base no curso e na força inicial mínima necessária de cilindros, cabe ao projetista, durante o dimensionamento da ferramenta, seleccionar a dimensão e o tipo de cilindro.



Figura 4.38 - Configuração otimizada dos elementos móveis: a) OP20; b) OP30; c) OP80 (AutoForm Plus R7).

Tool Forces Overview					
Tool Name	Max Force	Tool Name	Max Force	Tool Name	Max Force
T-10		Cortes de Carro 1	15.7 kN	Weight	13.90 N
Cortes Verticais	473.7 kN	Cortes de Carro 2	191.3 kN	T-90	
Weight	19.70 N	Cortes de Carro 6	35.2 kN	Cortes Verticais 1	90.5 kN
D-20		Cortes de Carro 5	48.4 kN	Cortes Verticais 2	81.5 kN
Matriz	834.4 kN	Cortes de Carro 4	48.6 kN	Weight	13.00 N
Punção	672.4 kN	Cortes de Carro 3	31.5 kN		
Almofada	162.0 kN	Weight	17.10 N	T-60	
Weight	19.70 N	T-60		Cortes Verticais 1	333.4 kN
D-30		Cortes Verticais 1	333.4 kN	Cortes Verticais 2	625.1 kN
Matriz	1832.3 kN	Cortes Verticais 2	625.1 kN	Weight	15.30 N
Punção	2099.5 kN	Weight	15.30 N	T-70	
Cerra-chapas	267.2 kN	T-70		Cortes Verticais 1	459.4 kN
Weight	19.70 N	Cortes Verticais 1	459.4 kN	Cortes Verticais 2	367.7 kN
T-40		Cortes Verticais 2	367.7 kN	Weight	13.90 N
Cortes Verticais 1	605.4 kN	Weight	13.90 N	F-80	
Cortes de Carro	179.1 kN	F-80		Matriz	768.2 kN
Cortes Verticais 2	515.2 kN	Matriz	768.2 kN	Punção	50.2 kN
Weight	17.50 N	Punção	50.2 kN	Cerra-chapas	718.0 kN
T-50		Cerra-chapas	718.0 kN		

Figura 4.39 - Forças aplicadas necessárias com a configuração *Spring Controlled*, por operação e elemento [kN] (AutoForm Plus R7).

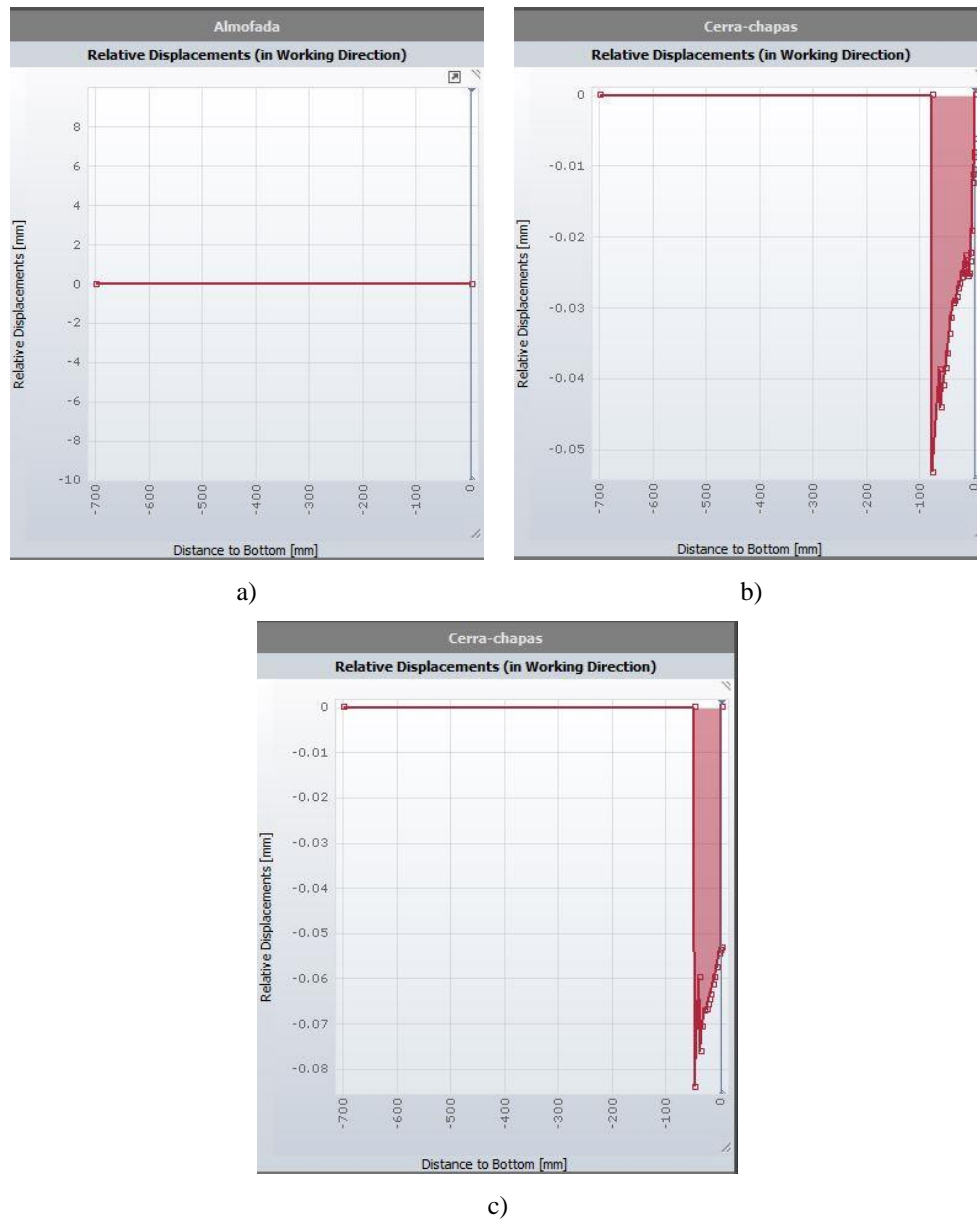


Figura 4.40 - Cedência dos elementos móveis na configuração *Spring Controlled*, em função do curso: a) OP20; b) OP30; c) OP80 (*AutoForm Plus R7*).

A força total necessária ao processo de estampagem está limitada, por imposição do cliente na definição da prensa na qual a ferramenta irá operar. Neste caso, a ferramenta destina-se a uma prensa *CATTANEO 800 Ton*, com uma capacidade máxima de força de estampagem de 7848 kN. Perante os resultados iniciais, a solução passaria pela alteração da prensa, uma vez que era ultrapassada a capacidade da prensa indicada pelo cliente em cerca de 469,1 kN, conforme os valores apresentados anteriormente na Figura 4.36. Por tais situações, é fundamental avaliar e otimizar as forças envolvidas no processo de estampagem. Após a otimização da utilização de cilindros, a força de estampagem total

necessária é de 7803,8 kN (795,5 ton), inferior à capacidade máxima da prensa apresentada pelo cliente. Este valor será ainda otimizado durante o dimensionamento da ferramenta de estampagem, com estratégias como o alívio de raios ou corte por biselagem, apresentado no *Capítulo 4.2 Dimensionamento, Produção, Montagem e Ensaio*.

4.1.5 Capacidade do Processo

A variabilidade é uma das causas principais da falta de qualidade dos produtos. Considerando que as propriedades da matéria-prima variam de bobine para bobine e que as variáveis do processo não são constantes, ocorrem inconsistências na produção de peças. O melhor momento para avaliar e resolver este problema é durante as etapas de definição e conceção do processo, com a diminuição da variabilidade e aumento da robustez do processo. Processos com baixa variabilidade apresentam um *output* previsível, o que permite produzir peças idênticas dentro da tolerância com um possível ciclo de melhoria de processo. Um processo capaz é contínuo com o tempo de atividade, apresenta uma alta taxa de falhas e uma baixa sensibilidade ao ambiente externo. Quanto mais alta for a capacidade de um processo, menor será a probabilidade de ocorrência de defeitos (Figura 4.41).

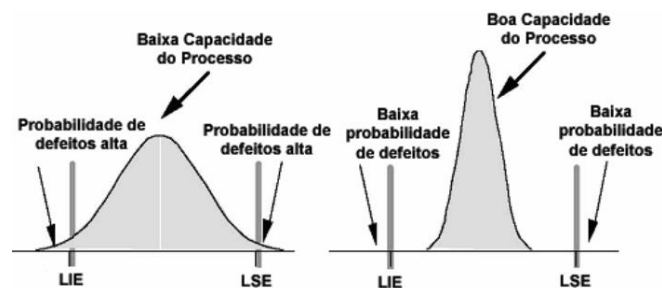


Figura 4.41 - Capacidade do processo (Correia et al., 2004).

O *AutoForm Plus R7* apresenta um ambiente de produção realístico, que permite a previsão e quantificação do efeito da variabilidade na consistência do processo de estampagem. Isto é conseguido através da aplicação da ferramenta *Robust Systematic Process Improvement (RSPI)*, onde é feita uma análise da influência das variáveis do processo nos índices de capacidade de processo, C_p e C_{pk} . Estes índices comparam a tolerância do processo, enquadrada entre o Limite Inferior da Especificação (LIE) e o Limite Superior da Especificação (LSE), com a dispersão da distribuição normal associada ao mesmo, definida pela média, μ , e pelo desvio-padrão, σ , dos resultados

numéricos (Figura 4.42). O C_p compara a amplitude da dispersão com o intervalo de tolerância e é definido pela Equação 4-3. O C_{pk} avalia a localização da distribuição relativamente ao intervalo de especificação, comparando cada um dos limites da distribuição associada ao processo com os limites da tolerância do processo (Equação 4-4). Um processo está controlado quando os valores de C_p e C_{pk} são simultaneamente superiores a 1,33, cumprindo com as especificações impostas (Correia et al., 2004). Quando o processo é definido unilateralmente, não é possível avaliar o valor de C_p . Nestes casos, o processo diz-se controlado quando o valor do C_{pk} relativo ao limite considerado é superior a 1,33. A escala de resultados obtidos no RSPI é apresentada na Tabela 4.2.

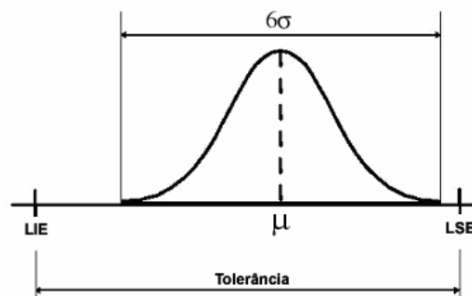


Figura 4.42 - Tolerância e dispersão do processo (Correia et al., 2004).

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad \text{Equação 4-3}$$

$$C_{pk} = \min\left(\frac{\mu - LIE}{3\sigma}; \frac{LSE - \mu}{3\sigma}\right) \quad \text{Equação 4-4}$$

Tabela 4.2 - Escala de resultados dos índices de capacidade de processo no RSPI (*AutoForm Forming Reality*, 2017).

Capacidade do processo	Reliable	Control required	Unreliable	Unacceptable
C_p e C_{pk}	> 1,33	[1;1,33]	[0,67;1]	< 0,67
Taxa de rejeição	< 0,004%	[0,004; 0,14] %	[0,14; 2,22] %	> 2,22 %

Na avaliação da capacidade do processo foi tida em conta a variação das variáveis apresentadas na Tabela 4.3. As primeiras 3 derivam essencialmente da matéria-prima e são fornecidas pelos requisitos impostos pelo cliente. O coeficiente de atrito depende da lubrificação do processo e do polimento dos elementos de estampagem – razão pela qual é dada importância extrema à tangência das superfícies estabelecida anteriormente. O

posicionamento do formato, após transporte de operação para operação, varia por consequência da folga dos centradores – folga máxima de 0,1 mm. A configuração das variáveis no RSPI é apresentada na Figura 4.43.

Tabela 4.3 - Variáveis e respectivas variações em estudo.

Variáveis	Variação
σ_0	342 MPa \pm 12 %
R_m	439 MPa \pm 12 %
Espessura da chapa	1,5 mm \pm 5 %
Coefficiente de atrito	0,15 \pm 10 %
Posicionamento do formato segundo eixo x	\pm 0,05 mm
Posicionamento do formato segundo eixo y	\pm 0,05 mm

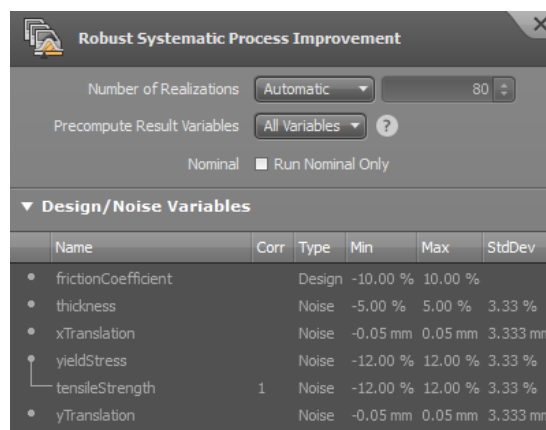


Figura 4.43 - Configuração das variáveis no RSPI (AutoForm Plus R7).

A capacidade do processo resulta da análise da variação dos resultados dos parâmetros *Max Failure*, *Thinning* e *Springback*. A tolerância do processo é estabelecida pelos limites LIE – *Upper Spec Limit*; e LSE – *Lower Spec Limit*. Os limites para cada parâmetro são apresentados na Figura 4.44. Relativamente à formabilidade, os limites são unilaterais e iguais aos apresentados anteriormente – *Max Failure* inferior a 0,8 e redução de espessura inferior a 20% (*Thinning* superior a - 0,2); já ao nível do *springback*, optou-se por definir os limites de acordo com a tolerância geral de um perfil de superfície (\pm 1,5 mm). De frisar que o aumento de espessura não tem um valor limite, uma vez que o aparecimento de rugas, consequência principal, não é diretamente resultante de um valor específico de aumento de espessura.

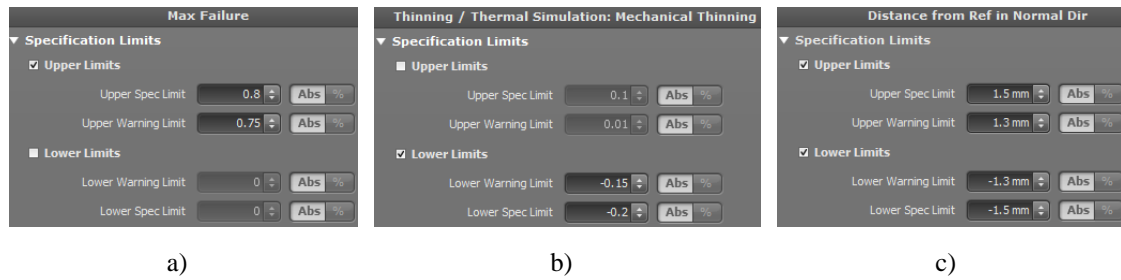


Figura 4.44 - Limites de especificação: a) *Max Failure*; b) *Thinning*; c) *Springback (AutoForm Plus R7)*.

Após configuração completa do RSPI, procedeu-se à simulação da capacidade do processo. Os resultados são apresentados na Figura 4.45, Figura 4.46, Figura 4.47 e Figura 4.48. No que concerne ao *Max Failure* e *springback*, o processo apresenta uma distribuição centrada com uma baixa variação de resultados, com índices de capacidade superiores a 1,33. Em ambos os casos, as tendências evidenciadas anteriormente são mantidas na avaliação da capacidade do processo, onde nas zonas problemáticas são apresentados os valores mínimos de C_p e C_{pk} . Contudo, no que diz respeito à variação de espessura, o processo não cumpre as exigências limite, apresentando um C_{pk} de 1,109 e uma taxa de rejeição compreendida entre 0,004 % e 0,14 %. Por isto, é possível afirmar que o processo não tem capacidade.

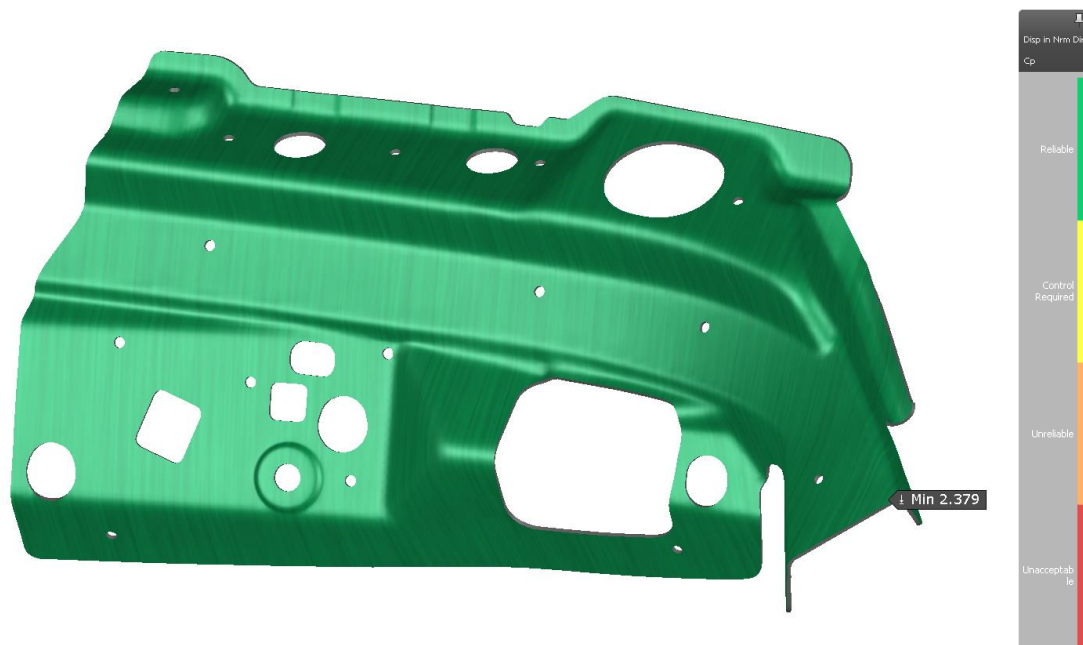


Figura 4.45 - Índice de capacidade de processo C_p : *springback (AutoForm Plus R7)*.

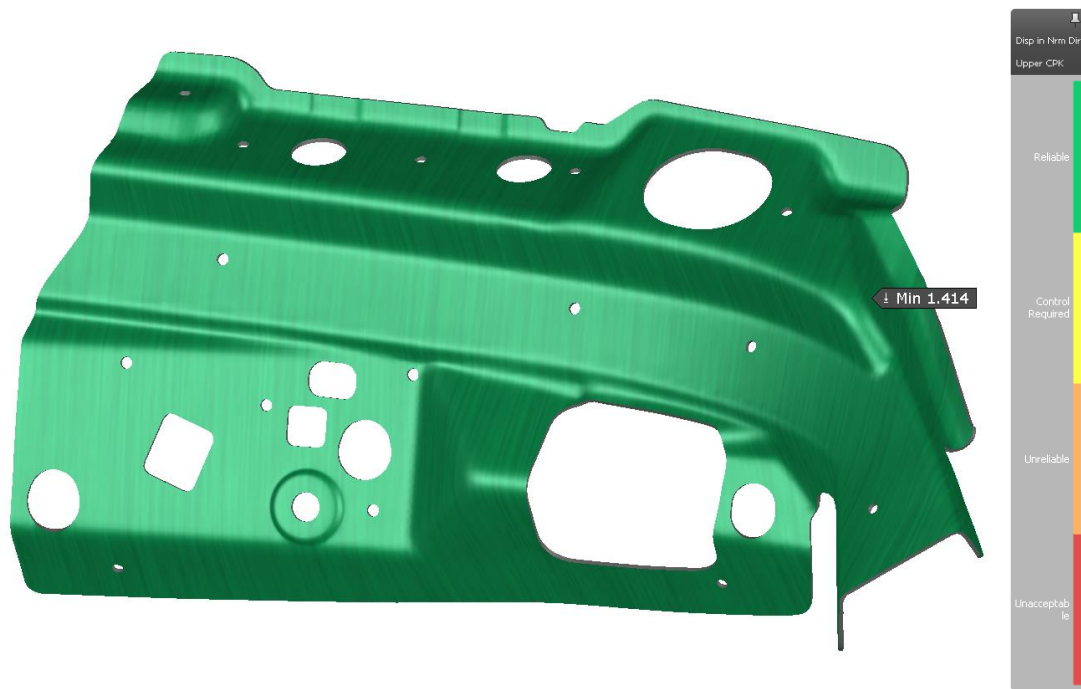


Figura 4.46 - Índice de capacidade de processo C_{pk} : Max Failure (AutoForm Plus R7).

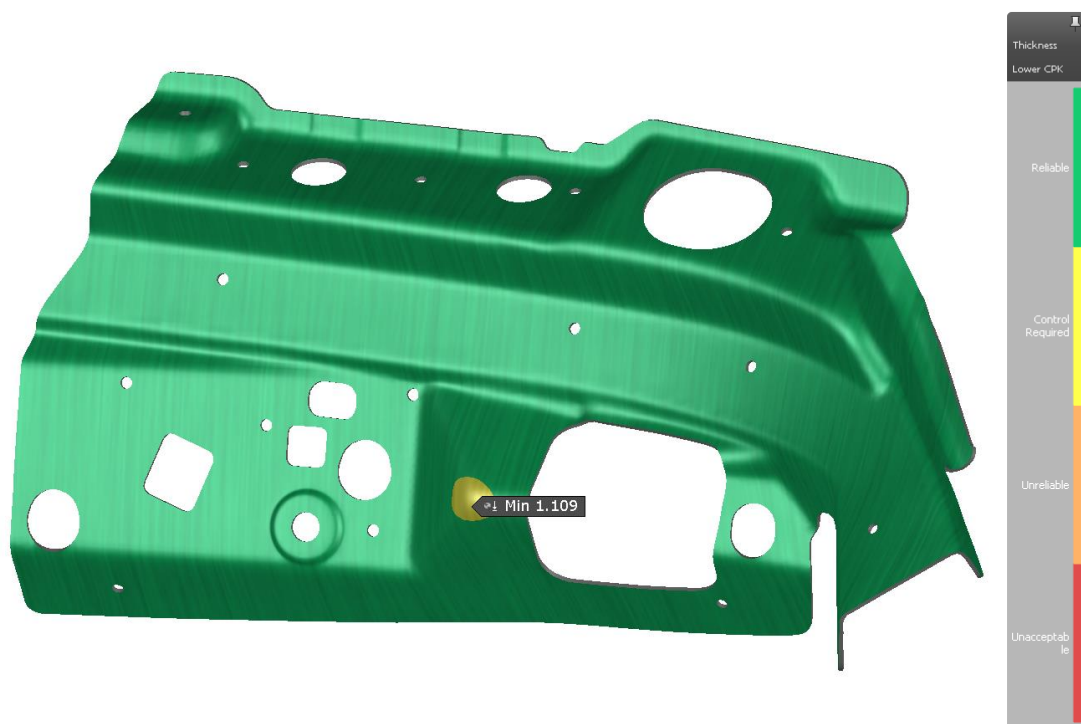


Figura 4.47 - Índice de capacidade de processo C_{pk} : Thinning (AutoForm Plus R7).

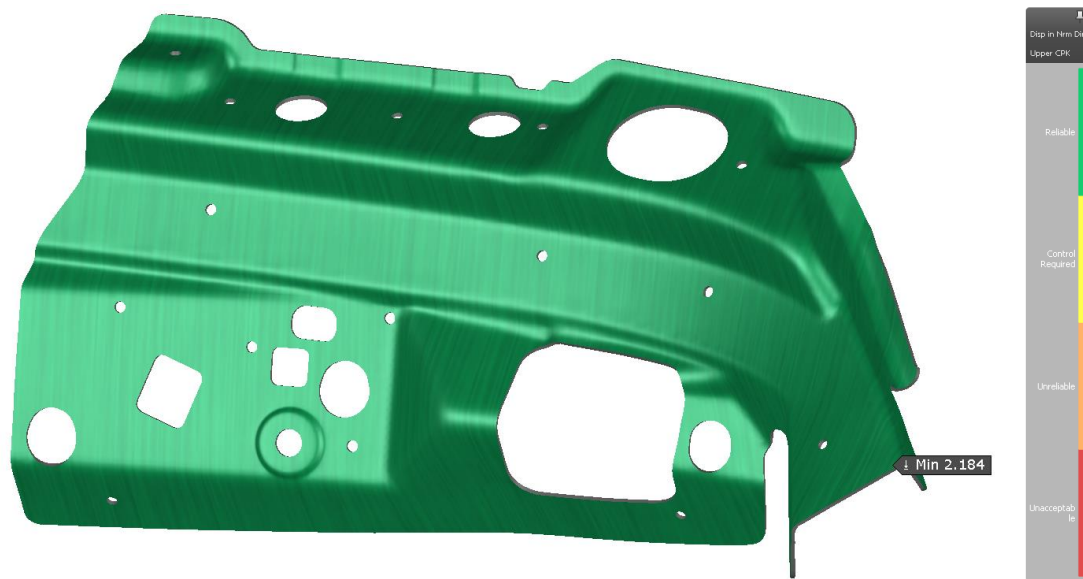


Figura 4.48 - Índice de capacidade de processo C_{pk} : *springback* (AutoForm Plus R7).

Perante os resultados obtidos, a solução passou por apresentar uma modificação de peça. Esta modificação consistiu na redução da altura de estampagem na zona problemática, o que diminuiria a redução de espessura apresentada. A Figura 4.49 ilustra a solução apresentada ao cliente. De salientar que a proposta de modificação foi igual para ambas as peças, esquerda e direita.

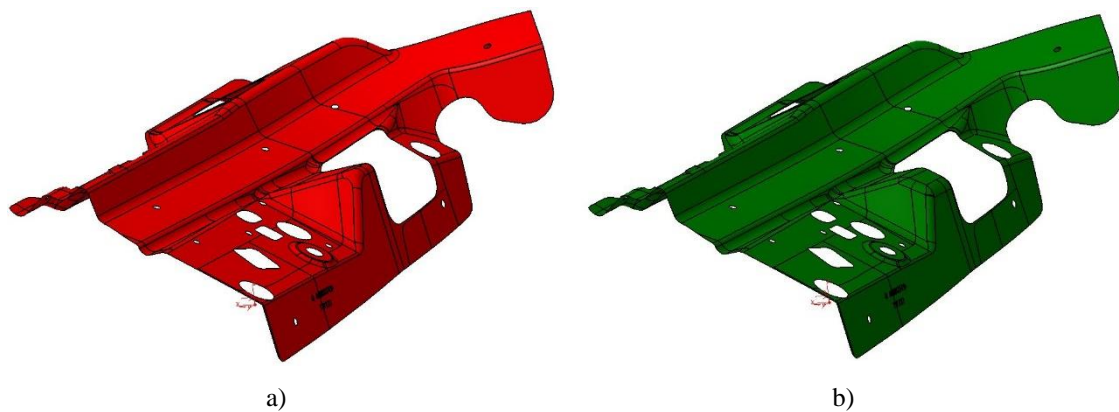


Figura 4.49 - Modificação sugerida para colmatar o problema na capacidade do processo: a) peça original; b) modificação de peça (CATIA V5 6R2019).

Por ser uma zona funcional da peça e por incompatibilidade da solução apresentada na montagem do conjunto final, a modificação não foi aceite e o cliente garantiu responsabilidades face a possíveis falhas provocadas por este problema. Diante os resultados, o processo requer um controlo especial da redução de espessura nesta zona.

4.2 Dimensionamento, Produção, Montagem e Ensaio

Terminada a validação do ciclo de estampagem, o processo prossegue para o dimensionamento da ferramenta de estampagem. O dimensionamento tem como base o ciclo de estampagem simulado, sendo fornecido pela simulação as superfícies e as forças aplicadas necessárias em cada operação. Este foi desenvolvido com auxílio do *software* CAD 3D *Creo Parametric 6*. O projeto 3D da ferramenta de estampagem é apresentado na Figura 4.50 – vista total da ferramenta de estampagem; e Figura 4.51 – detalhe de dimensionamento por operação.

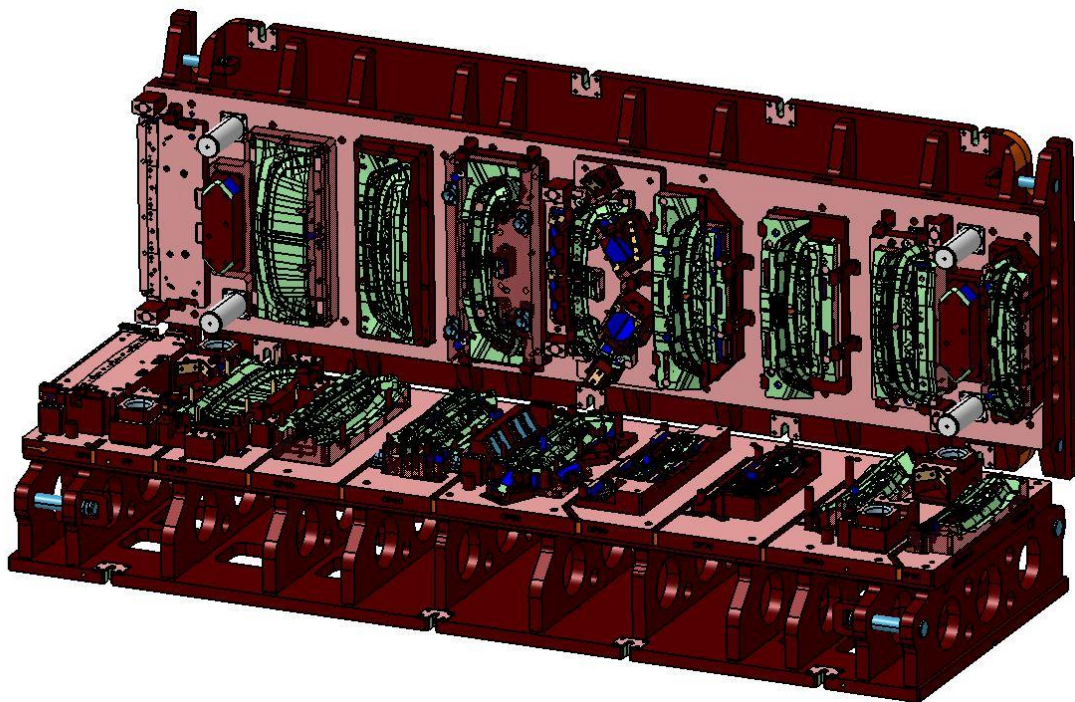


Figura 4.50 - Projeto 3D da ferramenta de estampagem (*CATIA V5 6R2019*).

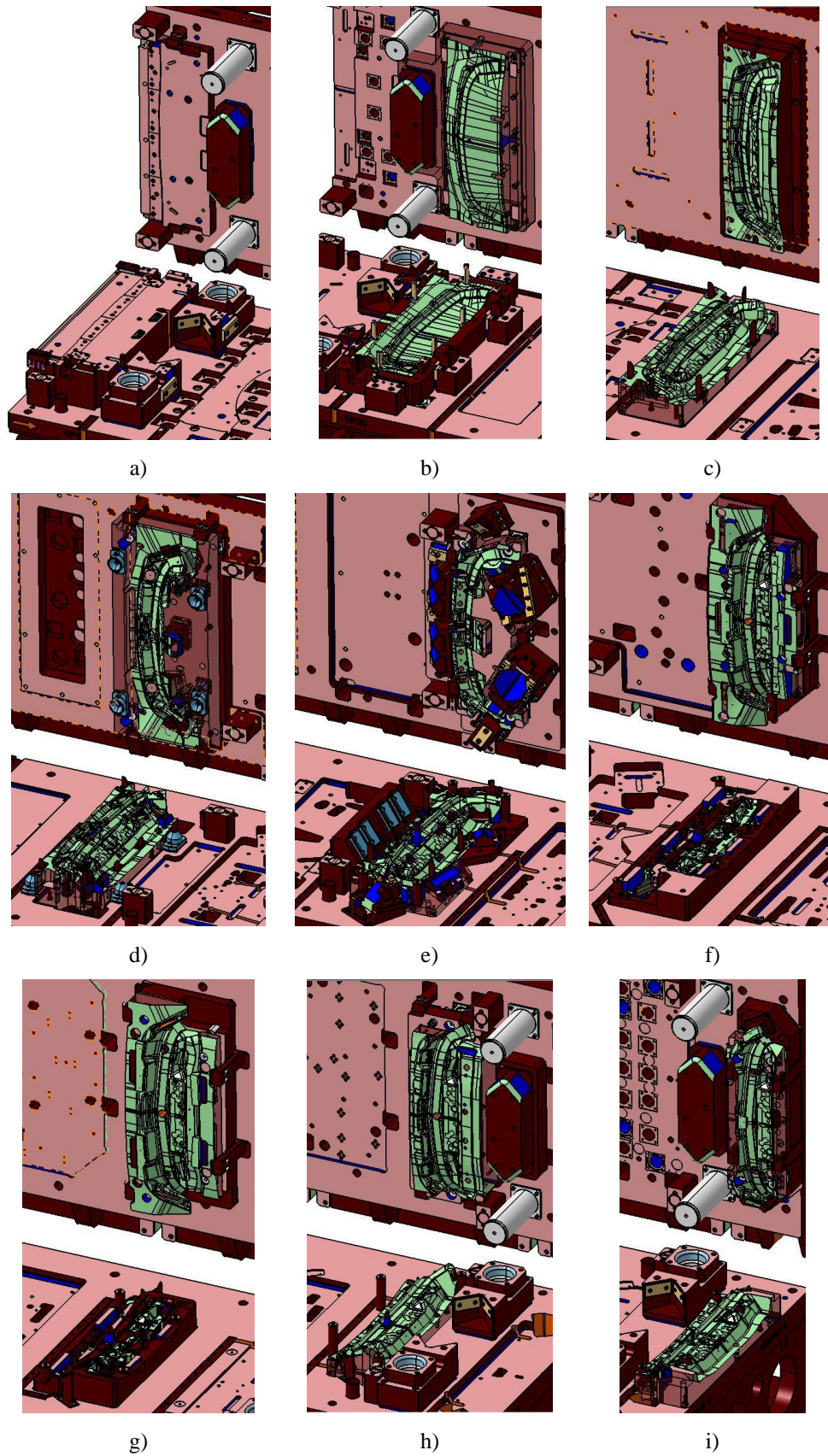


Figura 4.51 - Projeto 3D da ferramenta de estampagem, detalhado por operação: a) OP10; b) OP20; c) OP30; d) OP40; e) OP50; f) OP60; g) OP70; h) OP80; i) OP90 (CATIA V5 6R2019).

Como indicado anteriormente, a otimização de forças do processo só é concluída durante o dimensionamento da ferramenta de estampagem, com a escolha do tipo e dimensão dos cilindros, o alívio de raios e o corte por biselagem. No que diz respeito à escolha dos cilindros, garantindo a força inicial mínima simulada, na operação OP20, foram aplicados 10 cilindros *Tecapres Micro 63Vx50* [Figura 4.52a)], com uma força inicial de 150,0 kN e uma força de fim de curso de 230,5 kN; na OP30 6 cilindros *Tecapres Micro 95x80* [Figura 4.52b)], com uma força inicial de 252,0 kN e uma força de fim de curso de 398,1 kN; e na OP80 10 cilindros *Tecapres Micro 45x50* [Figura 4.52c)], com uma força inicial de 74,0 kN e uma força de fim de curso de 117,5 kN. A ficha técnica de cada cilindro está detalhada no *ANEXO II – Ficha técnica dos cilindros utilizados* e a configuração dos elementos móveis apresentada na Figura 4.53.

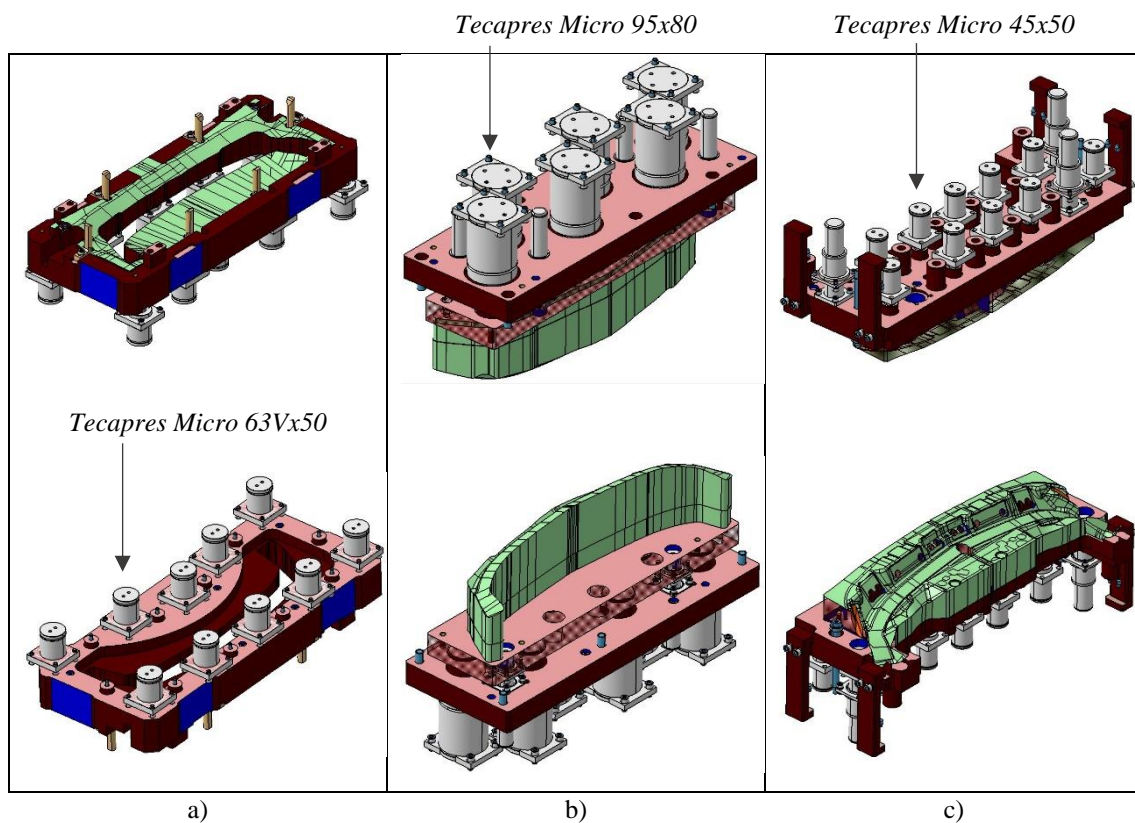


Figura 4.52 - Aplicação de cilindros na ferramenta: a) OP20; b) OP30; c) OP80 (CATIA V5 6R2019).



Figura 4.53 - Configuração dos elementos móveis com a aplicação dos cilindros dimensionados: a) OP20; b) OP30; c) OP80 (*AutoForm Plus R7*).

Numa operação de corte ou de dobragem é necessária a fixação da chapa. Contudo, esta não deve ser total, devendo-se fixar a chapa em zonas específicas – planos; por um lado, porque as zonas a fixar já foram deformadas e, por outro lado, porque existe um consumo de força de prensa para fixar raios desnecessário. Por tal, nestas operações, a superfície usada na construção dos elementos – cerra-chapas, almofada ou matriz; deve ser trabalhada no alívio de raios. A construção da superfície dos elementos da parte superior da ferramenta é distinta da dos elementos da parte inferior, uma vez que o alívio dos raios é no sentido oposto. Na Figura 4.54 é ilustrada a modificação na superfície de construção da matriz da operação OP80, bem como o desvio em relação à superfície sem alívio de raios. Na Figura 4.55 é feita a mesma análise para a superfície de construção do cerra-chapas da operação OP80.

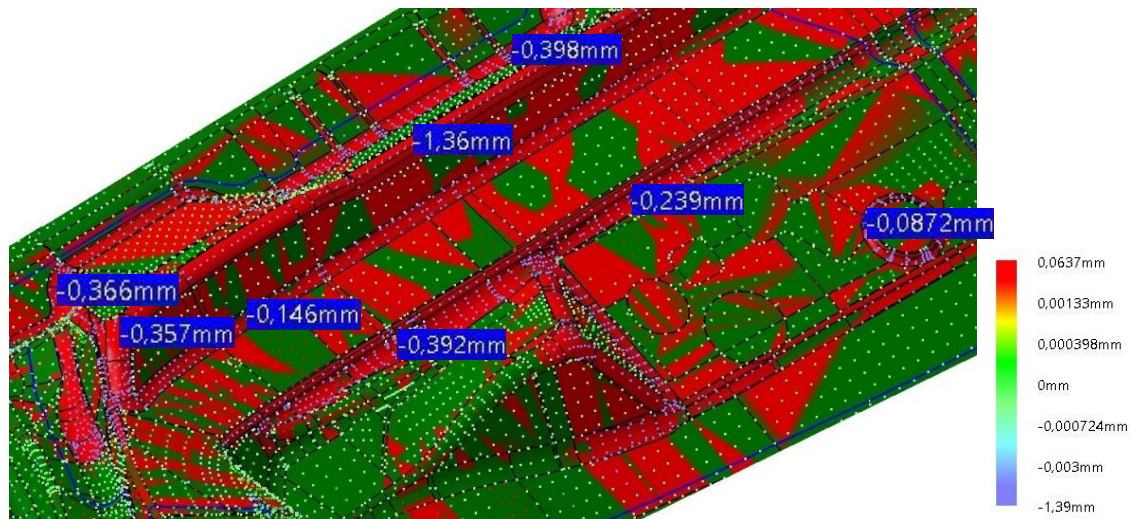


Figura 4.54 - Alívio de raios na superfície de construção da matriz da operação OP80: linha azul – contorno de peça; superfície vermelha – superfície sem raios aliviados; superfície verde – superfície com raios aliviados [mm] (CATIA V5 6R2019).

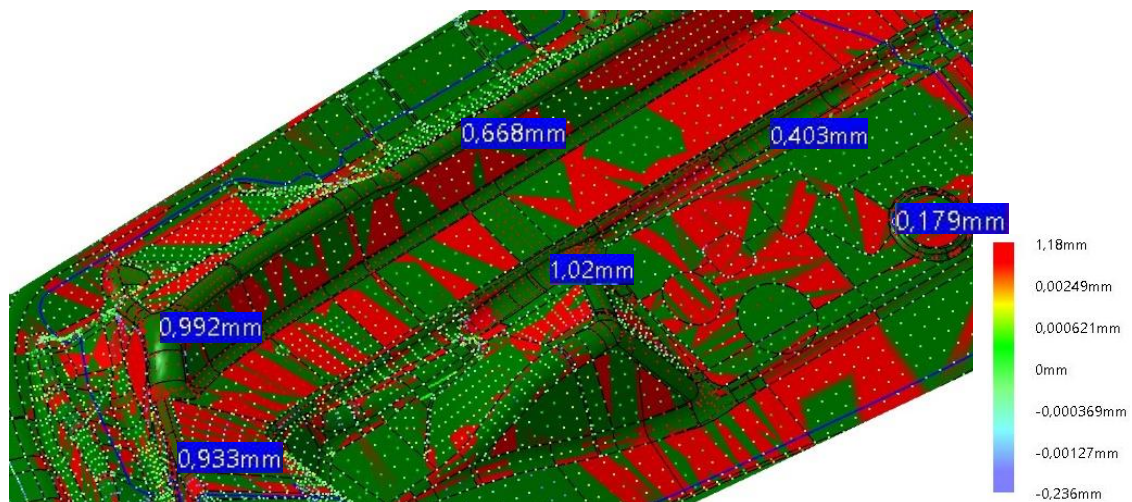


Figura 4.55 - Alívio de raios na superfície de construção do cerra-chapas da operação OP80: linha azul – contorno de peça; superfície vermelha – superfície sem raios aliviados; superfície verde – superfície com raios aliviados [mm] (CATIA V5 6R2019).

O “corte por biselagem”, tradicionalmente denominado, é a aplicação do conceito de corte em guilhotina, onde o ângulo entre o punção de corte e a matriz de corte, ângulo de corte α , é diferente de zero (Figura 4.56). Para um dado material, a força de corte depende principalmente do ângulo de corte e da espessura da chapa. Sendo o material e a espessura constantes neste estudo, a influência do ângulo de corte é a variável predominante na otimização da força de corte. Para além disto, a aplicação de um ângulo de corte superior a 0° permite obter uma superfície de corte com melhor qualidade e aumentar a vida útil dos componentes de corte. Na prática, o ângulo de corte recomendado

compreende-se entre $0,5^\circ$ e 3° (Wisselink, 2000). O ângulo de corte aplicado no dimensionamento dos punções de corte foi de 3° , como ilustrado na Figura 4.57. Num estudo desenvolvido por Saanouni et al. (2010), é demonstrado que a aplicação de um ângulo de corte de 3° implica uma redução de 22 % do trabalho mecânico de corte, em comparação com um corte ortogonal.

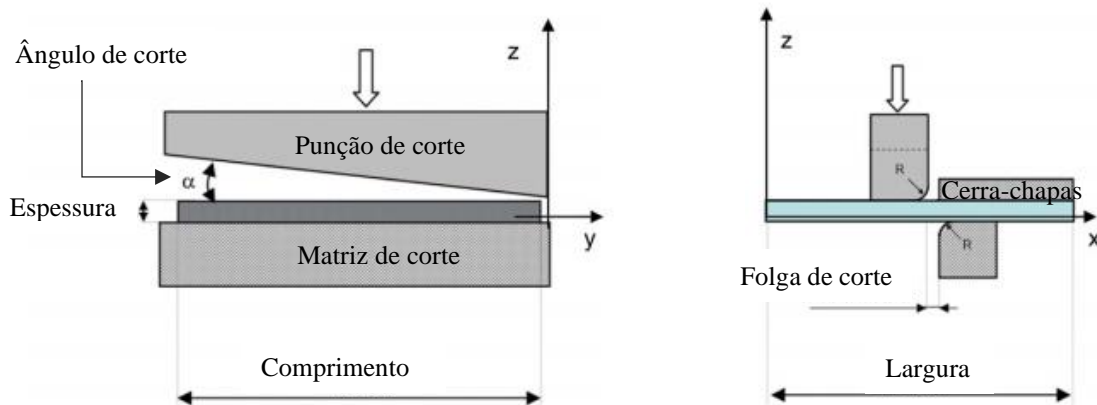


Figura 4.56 - Ângulo de corte. Adaptado de Saanouni et al. (2010).

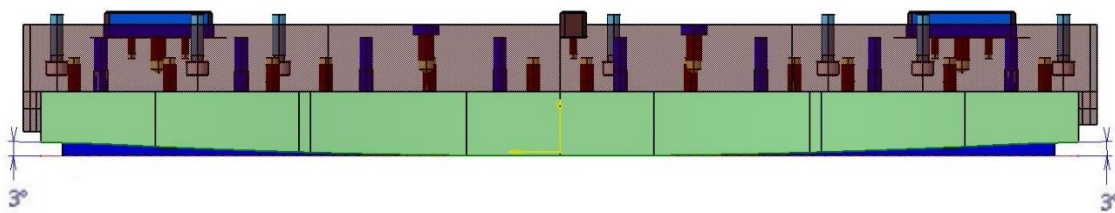


Figura 4.57 - Ângulo de corte aplicado aos punções de corte: OP10 (CATIA V5 6R2019).

Posteriormente ao dimensionamento, avaliou-se novamente as forças e a cedência dos elementos móveis, aplicando os cilindros dimensionados e substituindo as superfícies dos elementos das operações OP20, OP30 e OP80. Neste caso, a formabilidade e o *springback* da chapa não foram analisados, uma vez que durante o projeto da ferramenta não houve modificações da forma das superfícies fornecidas pela simulação, nem alterações nas geometrias de corte. Os resultados numéricos são apresentados na Figura 4.58 e Figura 4.59. Analisando a Figura 4.58, evidencia-se que a cedência do elemento móvel é desprezável, sendo nas 3 operações inferior a 0,1 mm. Em termos de forças, de acordo com a Figura 4.59 e aplicando uma redução de 22 % na força total de corte, a força de estampagem total necessária é de 7216,1 kN (735,6 ton). Com estas estratégias e um

bom dimensionamento de cilindros, conseguiu-se uma otimização de 13,2 % de força de prensa, em comparação com o resultado inicial (Figura 4.36).

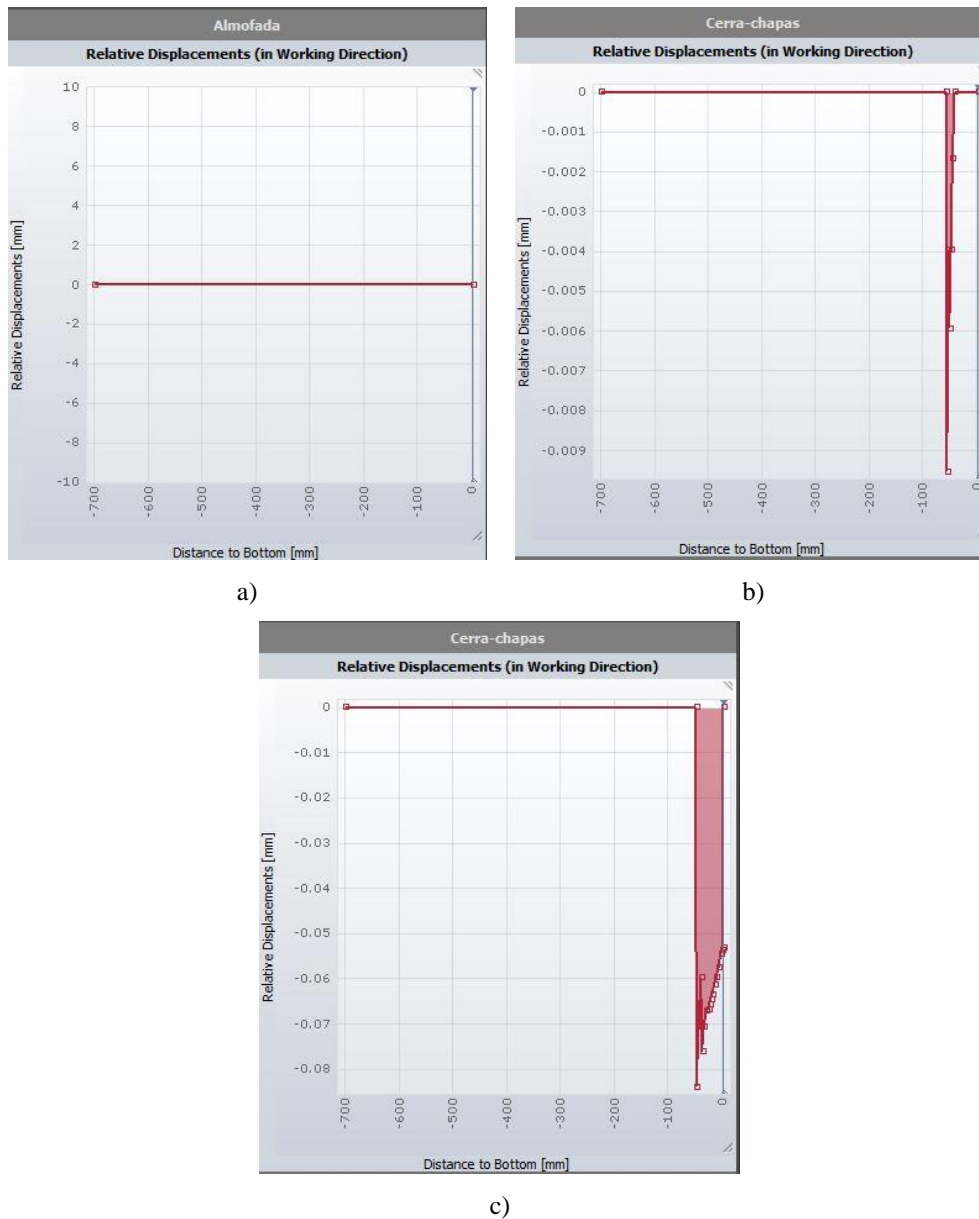


Figura 4.58 - Cedência dos elementos móveis com a aplicação dos cilindros dimensionados, em função do curso: a) OP20; b) OP30; c) OP80 (AutoForm Plus R7).

Tool Forces Overview					
Tool Name	Max Force	Tool Name	Max Force	Tool Name	Max Force
T-10		Carro 1	16.0 kN	Weight	13.90 N
Punção Corte	473.7 kN	Carro 2	190.8 kN	T-90	
Weight	19.70 N	Carro 6	35.7 kN	Punção Corte 1	100.6 kN
D-20		Carro 5	48.4 kN	Punção Corte 2	81.3 kN
Matriz	908.0 kN	Carro 4	48.2 kN	Weight	13.00 N
Punção	677.6 kN	Carro 3	31.9 kN		
Almofada	230.5 kN	Weight	17.00 N		
Weight	19.70 N	T-60			
D-30		Punção Corte 1	327.2 kN		
Matriz	1847.2 kN	Punção Corte 2	629.4 kN		
Punção	2245.3 kN	Weight	15.30 N		
Cerra-chapas	398.1 kN	T-70			
Weight	19.70 N	Punção Corte 1	462.4 kN		
T-40		Punção Corte 2	366.3 kN		
Punção Corte 1	602.2 kN	Weight	13.90 N		
Carro	178.6 kN	F-80			
Punção Corte 2	514.2 kN	Matriz	448.7 kN		
Weight	17.50 N	Punção	47.2 kN		
T-50		Cerra-chapas	401.4 kN		

Figura 4.59 - Forças aplicadas necessárias com os cilindros dimensionados e alívio de raios na OP80, por operação e elemento [kN] (*AutoForm Plus R7*).

Após aprovação do ciclo de estampagem e do dimensionamento da ferramenta por parte do cliente, a ferramenta entra em processo produtivo e consequente montagem. O planeamento, acompanhamento e controlo da produção têm o auxílio do *software* modular de gestão de produção *Mirakon*. A ferramenta de estampagem montada é ilustrada na Figura 4.60 – parte inferior da ferramenta de estampagem por operação com o respetivo resultado de cada operação; e Figura 4.61 – parte superior da ferramenta de estampagem por operação. A Figura 4.62 evidencia o pormenor da aplicação de cilindros na OP20 e OP30. Na OP80, a aplicação de cilindros não é visível perante a montagem total dos elementos, razão pela qual não se evidenciou este pormenor nesta operação.

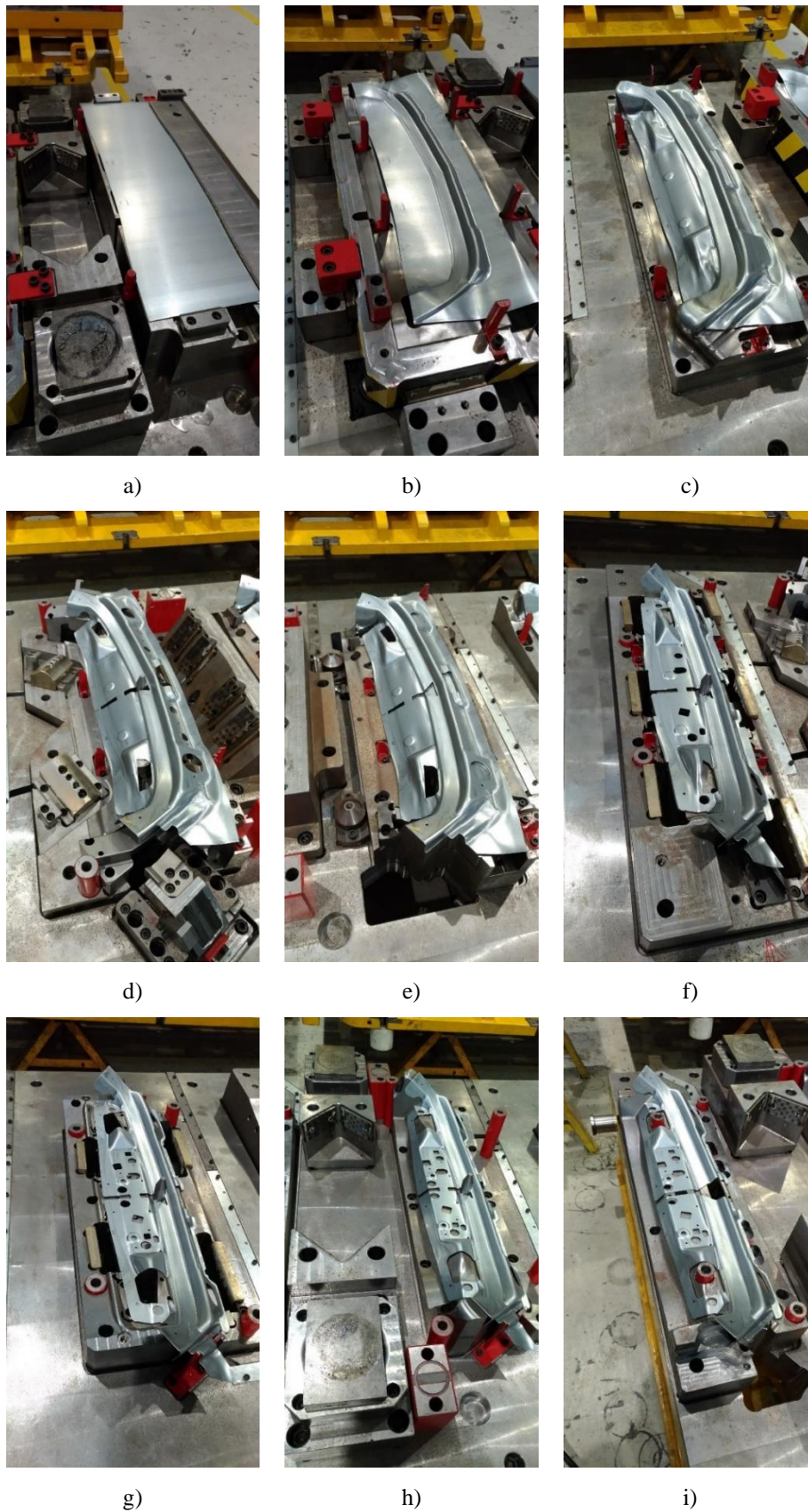


Figura 4.60 - Ferramenta de estampagem por operações e com o respetivo resultado (parte inferior): a) OP10; b) OP20; c) OP30; d) OP40; e) OP50; f) OP60; g) OP70; h) OP80; i) OP90.

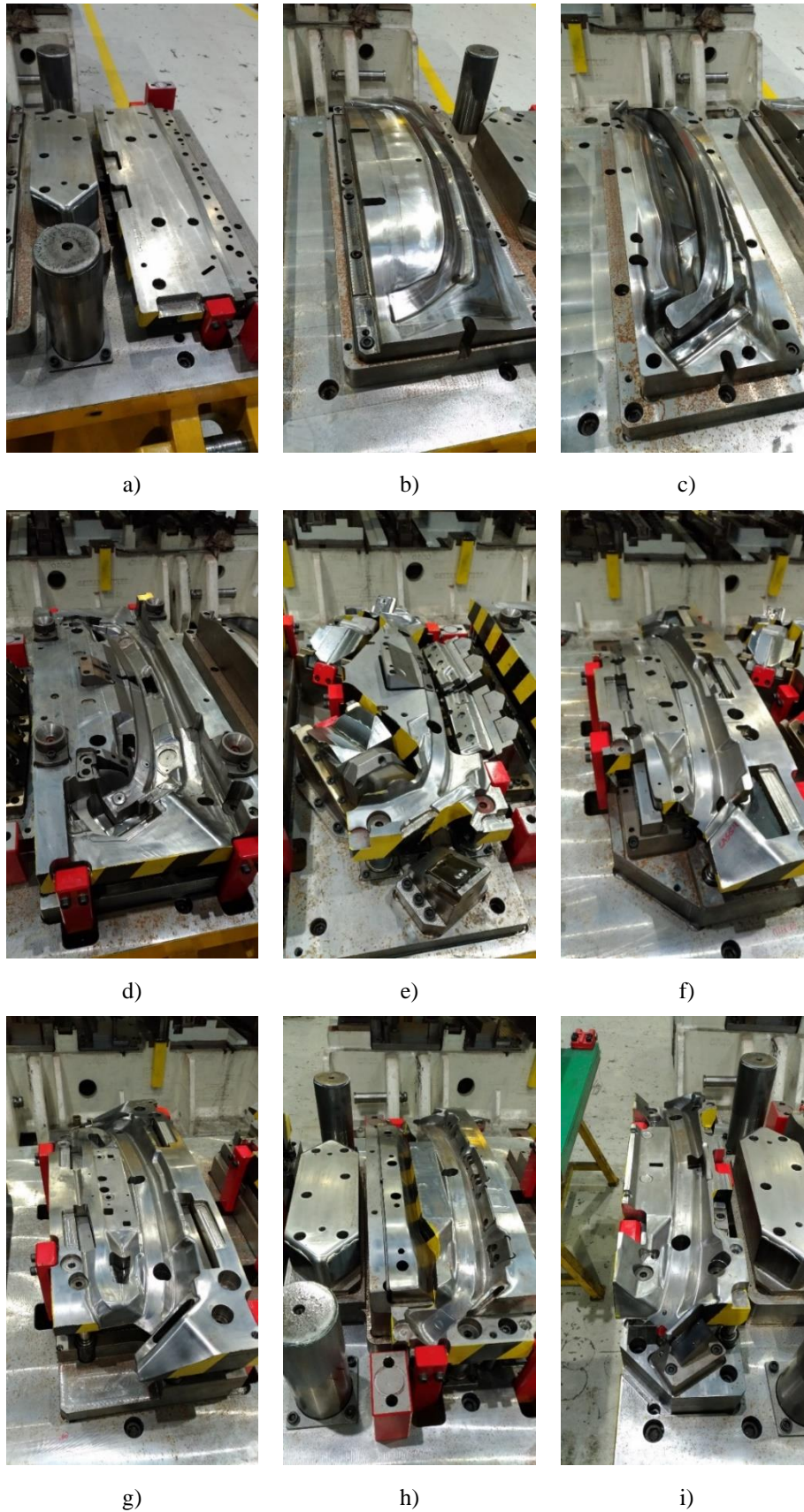


Figura 4.61 - Ferramenta de estampagem por operações (parte superior): a) OP10; b) OP20; c) OP30; d) OP40; e) OP50; f) OP60; g) OP70; h) OP80; i) OP90.

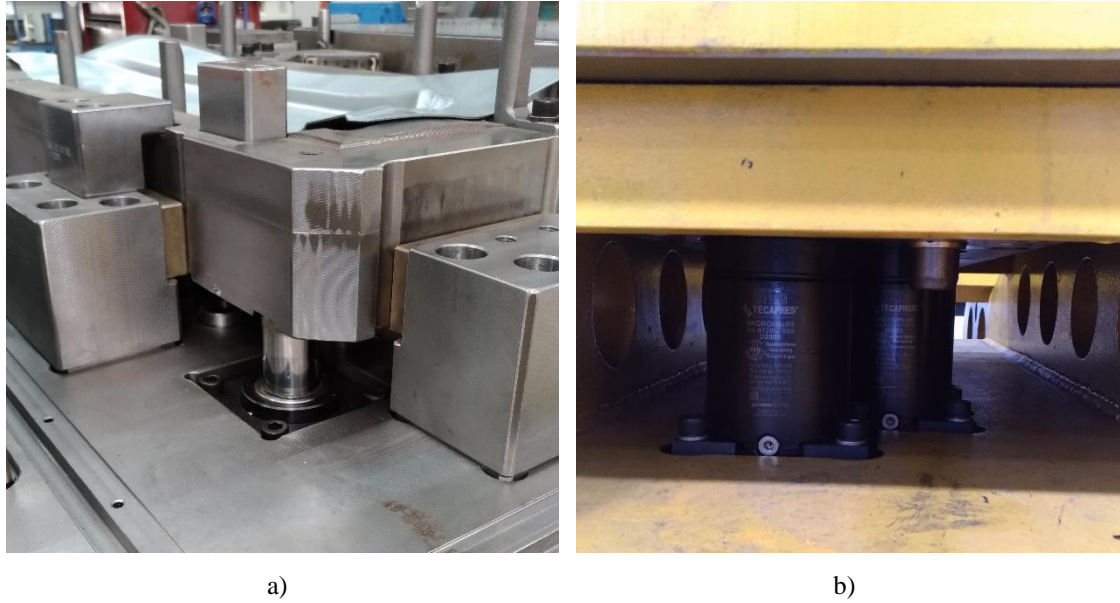


Figura 4.62 - Aplicação de cilindros: a) OP20; b) OP30.

Com a produção e montagem da ferramenta completa, as condições para ensaio da ferramenta estão cumpridas. Os ensaios foram realizados na prensa mecânica *MOSSINI 1000 Ton* [Figura 4.64a)]. A alimentação de chapa do processo é automática a partir de bobine, constituída por um desenrolador *ELMEA* [Figura 4.63b)] e um endireitador *ELMEA* [Figura 4.63a)]. Todo este processo de desenvolvimento, produção, montagem e ensaios da ferramenta de estampagem foram desenvolvidos internamente na empresa, bem como a posterior medição das peças obtidas.

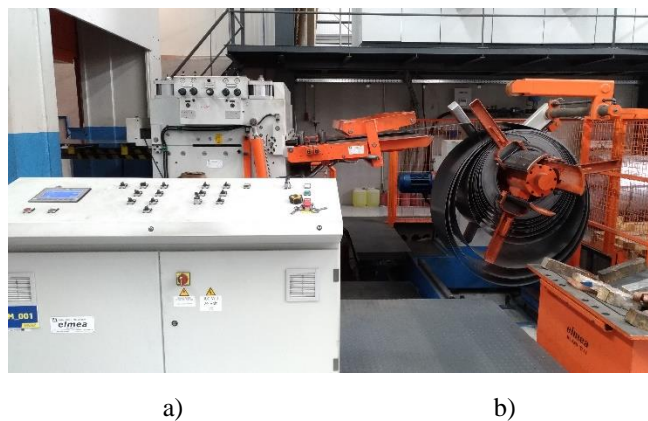


Figura 4.63 - Sistema de alimentação *ELMEA*: a) endireitador; b) desenrolador.

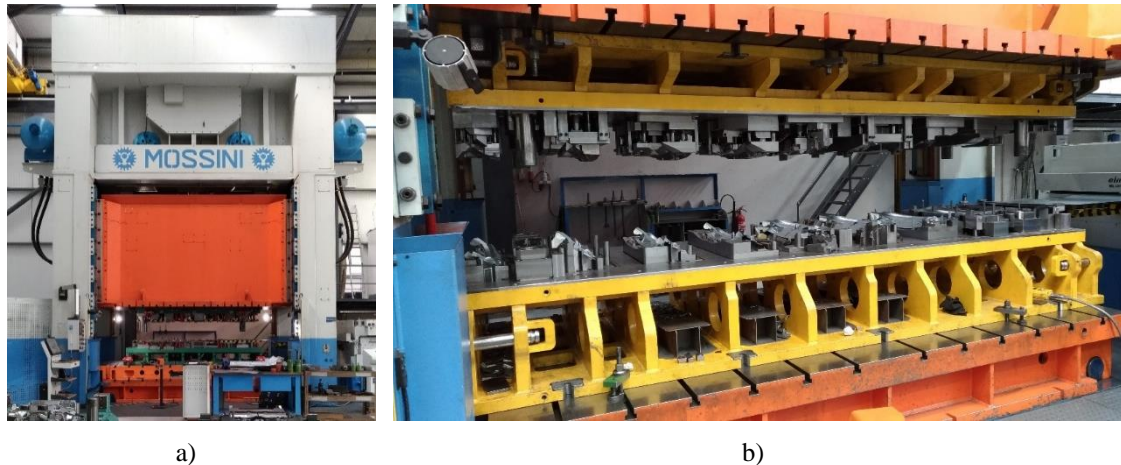


Figura 4.64 - Ensaio de ferramenta em prensa: a) Prensa *MOSSINI 1000 Ton*; b) ferramenta em prensa.

4.3 Validação dos Resultados Numéricos

Posteriormente aos ensaios em prensa da ferramenta de estampagem, as peças foram analisadas e comparadas com os resultados numéricos. As peças em análise são as primeiras peças finais com os elementos de deformação originais e sem interferências com problemas em elementos mecânicos, ou seja, são as primeiras peças finais sem qualquer alteração da geometria dos elementos de deformação e após afinações mecânicas dos elementos, como por exemplo, ajuste da altura dos batentes limitadores e da folga entre elementos, verificação e eliminação da existência de colisões e teste do funcionamento dos carros. Esta consideração é essencial para garantir a mesma base de comparação entre os resultados numéricos e experimentais – a deformação da chapa é provocada unicamente pelos elementos de deformação.

4.3.1 Formabilidade da Peça

O resultado da estampagem é apresentado na Figura 4.65. Analisando visualmente as peças, não existe o aparecimento de rugas nem de qualquer rotura. Ao nível da variação de espessura, existe uma visível redução de espessura na zona problemática apontada durante a avaliação da capacidade do processo, identificada na Figura 4.65. A redução de espessura é ilustrada na Figura 4.66, apesar da difícil demonstração por imagem. Esta apresenta uma espessura na ordem de 1,20 mm, o que implica uma redução de 20 %, face à redução de espessura numérica esperada de 18,6 %. Contudo, não é evidente qualquer fissura provocada pela redução de espessura limite nesta mesma zona. Portanto, no que

toca à formabilidade da peça, os resultados experimentais vão ao encontro dos resultados numéricos.



Figura 4.65 - Primeiras peças finais: linha vermelha – zona de visível redução de espessura.

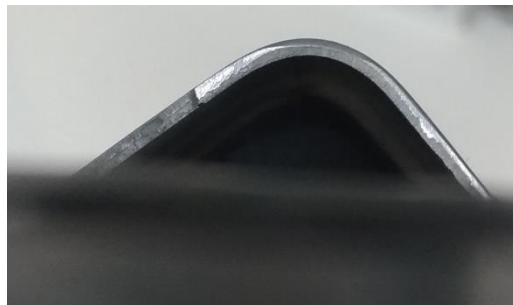


Figura 4.66 - Redução de espessura.

4.3.2 Controlo Dimensional

O cumprimento das tolerâncias são o fator mais importantes de aprovação de peças. Cada peça é única e apresenta tolerâncias específicas para cada detalhe, consoante a sua função e importância na montagem final. A informação das tolerâncias da peça é fornecida pelo cliente, especificando o tipo e valor da tolerância. O controlo dimensional torna-se portanto um passo importante na verificação dimensional das peças. Este pode ocorrer por dois meios: medição com peça livre e medição em maquete. Na medição em maquete, a peça está restringida de movimentos pelos RPS e o controlo é feito por calibres passa/ não passa. A Figura 4.67 apresenta a maquete das peças, peça direita [Figura 4.67a)] e peça esquerda [Figura 4.67b)]. Este é um processo bastante simplificado, ideal para uma verificação rápida. Na medição com peça livre, a peça não tem qualquer restrição. Esta é uma medição ideal para afinações de ferramenta, uma vez que não restringe o *springback* nem altera a forma da peça. Neste trabalho, foi somente realizada e analisada a medição com peça livre, tradicionalmente denominada *free springback* (Figura 4.68).

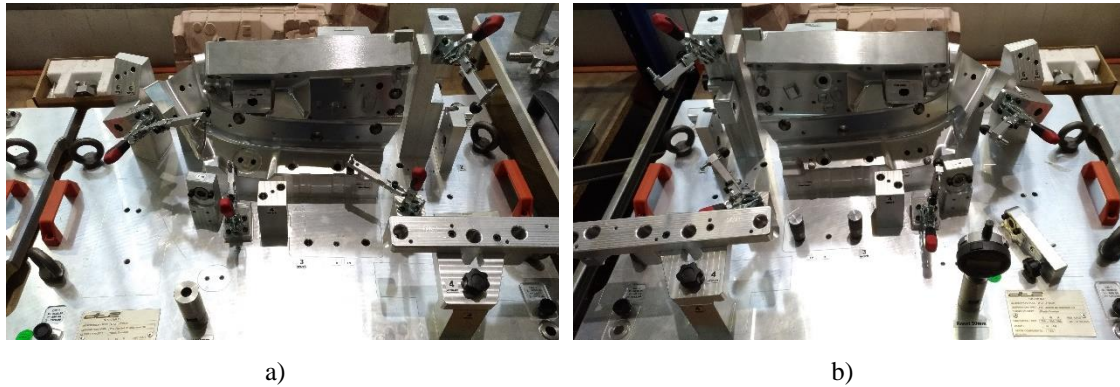


Figura 4.67 - Maquete de controlo dimensional das peças: a) peça direita; b) peça esquerda.

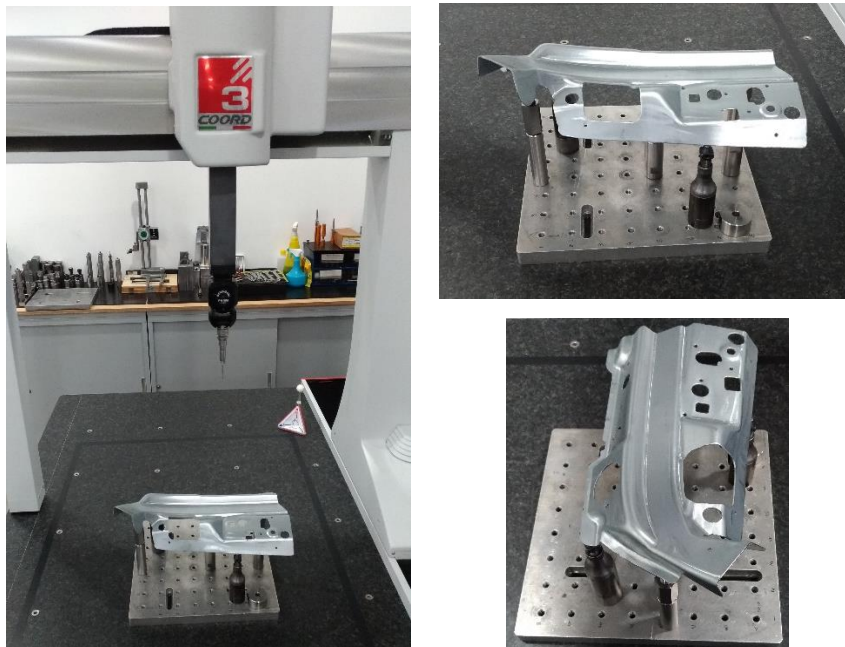


Figura 4.68 - Medição em peça livre.

De forma a comparar o resultado da simulação com o resultado experimental, para além da verificação dimensional da peça, foi realizada a medição das peças, nas máquinas de medição por coordenadas da empresa, *CRYSTA-APEX S 9166* [Figura 4.69a)] e *Ares NT* [Figura 4.69b)]. A medição é realizada por comparação da peça obtida com o CAD 3D da peça, fornecido pelo cliente. Seleccionando um conjunto de pontos críticos a analisar, é medida a distância entre o ponto na peça e no sistema de pontos de referência, dados pelos RPS, e apresentado o respetivo desvio.

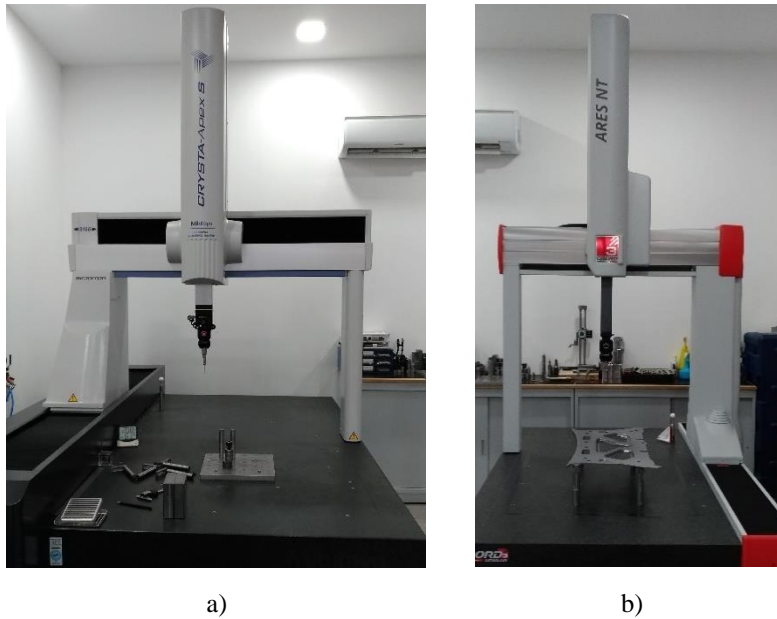


Figura 4.69 - Máquinas de medição por coordenadas da Epalfer: a) *CRYSTA-APEX S 9166*; b) *Ares NT*.

O resultado completo das medições das primeiras peças finais é apresentado no *ANEXO III.1 – Relatório dimensional peça esquerda*. Devido à simetria quase total da forma das peças, optou-se por analisar apenas um dos lados, a peça esquerda. Através da Figura 4.33, Figura 4.34 e da Tabela 4.4, é possível proceder à comparação e análise dos resultados. A correspondência entre o resultado numérico e o respetivo resultado experimental é identificada pelo mesmo número. Como se pode verificar, os resultados experimentais aproximam-se dos resultados numéricos, com um desvio médio de 0,444 mm e um desvio máximo de 1,214 mm no ponto [6]. Esta diferença é completamente aceitável, justificando-se essencialmente pela variação das inúmeras variáveis durante todo o ciclo do produto na empresa. Entre estas destacam-se o encruamento cinemático não contemplado na modelação do material, as propriedades da matéria-prima, a precisão da maquinação dos elementos, a lubrificação do processo, a velocidade de estampagem, o modo de acionamento e a precisão da prensa, a deformação dos elementos mecânicos da ferramenta e o erro posicional entre a medição do desvio dimensional numérico e o ponto de medição real. Contudo, pode-se concluir que existe uma total validação dos resultados numérico, sendo uma mais valia na previsão da recuperação elástica.

Tabela 4.4 - Comparação dos resultados numéricos com os resultados experimentais [mm].

Ponto	Resultado Numérico	Resultado Experimental	Desvio absoluto	Ponto	Resultado Numérico	Resultado Experimental	Desvio absoluto	Ponto	Resultado Numérico	Resultado Experimental	Desvio absoluto
[1]	0,116	0,192	0,076	[21]	0,175	0,636	0,461	[41]	0,603	1,749	1,146
[2]	-0,470	-0,227	0,243	[22]	-0,040	-0,023	0,017	[42]	0,016	1,086	1,070
[3]	-0,306	-0,118	0,188	[23]	0,114	0,197	0,083	[43]	0,165	-0,041	0,206
[4]	-0,146	0,641	0,787	[24]	0,122	0,350	0,228	[44]	0,138	-0,023	0,161
[5]	-0,086	1,064	1,150	[25]	0,152	-0,365	0,517	[45]	0,105	-0,325	0,430
[6]	-0,021	1,193	1,214	[26]	0,191	0,465	0,274	[46]	0,127	-0,103	0,230
[7]	-0,112	-0,904	0,792	[27]	-0,018	-0,418	0,400	[47]	-0,160	-0,612	0,452
[8]	-0,205	-0,417	0,212	[28]	-0,126	0,016	0,142	[48]	-0,023	-0,589	0,566
[9]	-0,205	-0,114	0,091	[29]	0,093	0,959	0,866	[49]	-0,160	-0,683	0,523
[10]	0,067	0,170	0,103	[30]	-0,197	0,037	0,234	[50]	0,106	-0,383	0,489
[11]	-0,020	0,043	0,063	[31]	-0,231	-0,074	0,157	[51]	0,019	-0,291	0,310
[12]	-0,066	-0,295	0,229	[32]	-0,382	0,561	0,943	[52]	-0,195	0,381	0,576
[13]	-0,119	-0,867	0,748	[33]	0,018	0,675	0,657	[53]	-0,031	0,716	0,747
[14]	-0,068	-0,116	0,048	[34]	0,387	0,650	0,263	[54]	0,073	1,045	0,972
[15]	-0,203	-0,025	0,178	[35]	0,438	0,706	0,268	[55]	0,200	1,248	1,048
[16]	-0,105	0,051	0,156	[36]	-0,469	-0,494	0,025	[56]	0,331	0,381	0,050
[17]	-0,310	-1,096	0,786	[37]	-0,104	-0,229	0,125	[57]	-0,084	-0,735	0,651
[18]	-0,045	0,051	0,096	[38]	0,392	0,647	0,255	[58]	0,252	0,313	0,061
[19]	0,124	0,104	0,020	[39]	0,662	1,189	0,527	[59]	0,110	-1,080	1,190
[20]	-0,189	0,474	0,663	[40]	0,327	1,378	1,051	Média		0,444	

5. CONCLUSÕES

Neste capítulo, são sumariadas as conclusões globais do trabalho e identificadas as propostas de trabalhos futuros.

A grande competitividade no setor automóvel estabelece níveis elevados de inovação, desenvolvimento e desempenho, onde a tendência característica é de introdução de produtos com geometrias mais complexas, redução dos ciclos de desenvolvimento e utilização de materiais com uma maior razão resistência/ peso. Por consequência, o processo de desenvolvimento de uma ferramenta de estampagem por métodos convencionais é de elevado risco, uma vez que a factibilidade do ciclo de estampagem assenta numa incerteza de resultados até à última fase do ciclo produtivo, a fase de testes em prensa. Desta forma, a previsão do comportamento da chapa é essencial, tornando parte integrante e imprescindível a utilização de ferramentas numéricas de simulação, com recurso ao método dos elementos finitos.

A validação do processo de estampagem de um componente metálico automóvel através da simulação numérica tem como objetivo reduzir o tempo de desenvolvimento de novos produtos, avaliar a formabilidade da chapa, determinar a geometria dos elementos de estampagem e os parâmetros ótimos do processo. Esta iniciou-se com a análise minuciosa da peça a estampar, bem como dos requisitos do cliente ao processo. Nesta etapa, teve-se em atenção as propriedades e a espessura do material, a simetria, as tolerâncias e o sistema *Reference Point System* da peça, o tipo de ferramenta de estampagem e a prensa à qual se destina. Posteriormente, baseado no comportamento da chapa, criou-se o modelo numérico do processo de acordo com a construção do ciclo de

estampagem, onde se caracteriza cada operação com as geometrias e movimentos dos elementos.

Definido o ciclo de estampagem, segue-se a simulação e apresentação dos resultados numérico, onde se avaliou a formabilidade e o *springback* da peça. No que diz respeito à formabilidade, a análise orientou-se pelos valores de *Max Failure* e de redução de espessura. De acordo com os resultados obtidos, verificou-se a necessidade da alteração das geometrias nominais dos elementos, por um lado pela previsão de rotura, por outro lado, pela compensação da recuperação elástica da peça. Nesta última, as alterações, contrárias ao comportamento da chapa, localizaram-se na operação onde se conformou a zona a compensar. No processo de compensação, teve-se especial atenção na garantia da tangência total das superfícies dos elementos, minimizando o processo de polimento e melhorando o escoamento da chapa durante a deformação. Garantindo a formabilidade da chapa, procedeu-se à otimização do processo, onde se reduziu o consumo de chapa em 6,4 %, por ajuste do formato, e a força total de processo em 13,2 %, por otimização da força de cilindros, alívio de raios e corte por biselagem, em comparação com os resultados iniciais. O trabalho de simulação termina com a avaliação da capacidade do processo, onde se constata uma taxa de rejeição compreendida entre 0,004 % e 0,14 %, de acordo com o efeito das propriedades e espessura da chapa, coeficiente de atrito e posicionamento do formato na variação do *Max Failure*, redução de espessura e *springback* da peça. Por último, comparou-se os resultados numéricos com os resultados experimentais; ao nível da formabilidade, os resultados experimentais foram ao encontro dos resultados numéricos, ao nível do *springback*, verificou-se um desvio médio absoluto de 0,444 mm, com um desvio máximo de 1,214 mm. Perante estes resultados, a simulação numérica do processo de estampagem do componente metálico automóvel conclui-se totalmente validada.

Na presença do trabalho desenvolvido, surgem perspectivas de trabalhos futuros, dos quais se salientam a utilização do *software* de simulação na fase de orçamentação, planeamento produtivo da ferramenta e acompanhamento da fase de ajustes e afinações, contemplando todo o ciclo produtivo de desenvolvimento de uma ferramenta de estampagem.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ablat, M. A., & Qattawi, A. (2017). Numerical simulation of sheet metal forming: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(1), 1235–1250. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9103-5>
- Antonio, J. (2020). *Análisis del efecto de la tensión fuera del plano en la conformabilidad de chapa metálica*. 16.
- AutoForm Forming Reality. (2017). *Robust compensation—Customized Training (Advanced) AutoForm Plus R7*.
- AutoForm Forming Reality. (2020a). *AutoForm Global Webinar: Ingeniería de procesos de estampación de matrices progresivas*.
- AutoForm Forming Reality. (2020b). *Cadeia de conformação de chapas metálicas*. <https://www.autoform.com/pt/topicos/cadeia-de-conformacao-de-chapas-metalicas/>
- Bałon, P., & Świątoniowski, A. (2015). Springback Compensation in Cold Forming Process for High Strength Steel. *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol. 60, iss. 4, 2471--2478. <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0401>

- Banabic, D. (2010). *Sheet Metal Forming Processes*. Springer Berlin Heidelberg.
<http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-88113-1>
- Brites, F. da S., Barbosa, I. da S., Santos, P. D. dos, & Ruibacki, W. de O. (2013). *Comparação do acabamento superficial e do nível de deformação entre um processo convencional de estampagem e o processo Guerin*.
- Callister, W. D. (2008). *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. LTC.
<https://www.booki.pt/loja/prod/ciencia-e-engenharia-de-materiais-uma-introducao/9788521615958/>
- Choomlucksana, J., Ongsaranakorn, M., & Suksabai, P. (2015). Improving the Productivity of Sheet Metal Stamping Subassembly Area Using the Application of Lean Manufacturing Principles. *Procedia Manufacturing*, 2, 102–107.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.090>
- Correia, G., Benatia, Y., & Schmidt, R. (2004). *UM SISTEMA DE GESTÃO DE QUALIDADE NA CONSTRUÇÃO RODOVIÁRIA QUALITY MANAGEMENT SYSTEM IN ROAD CONSTRUCTION*. 8.
- Djukanovic, G. (2017, Junho 23). *Steel Versus Aluminium: Who's Winning the Lightweighting Battle In Cars?* Aluminium Insider.
<https://aluminiuminsider.com/steel-versus-aluminium-whos-winning-lightweighting-battle-cars/>
- Ferrarini, J. L. (2004). *Caracterização de materiais para o processo de estampagem*.
<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/4696>
- Filho, E. B., Silva, I. B. da, Batalha, G. F., & Button, S. T. (2011). *Conformação Plástica dos Metais* (6ª Edição (Primeira digital)). Campinas: Editora da Unicamp.
<http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/CONFORMACAOPLASTICADOSMET AIS.pdf>

- Galan Lopez, J., Samek, L., Verleysen, P., Verbeken, K., & Houbaert, Y. (2012). Advanced high strength steels for automotive industry. *REVISTA DE METALURGIA*, 48(2), 118–131. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1158>
- Hu, H., & Wang, X. (2016). Effect of Heat Treatment on the In-Plane Anisotropy of As-Rolled 7050 Aluminum Alloy. *Metals*, 6(4), 79. <https://doi.org/10.3390/met6040079>
- Isik, K., Silva, M. B., Tekkaya, A. E., & Martins, P. A. F. (2014). Formability limits by fracture in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(8), 1557–1565. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.02.026>
- Jadhav, S., Schoiswohl, M., & Buchmayr, B. (2018). Applications of Finite Element Simulation in the Development of Advanced Sheet Metal Forming Processes. *BHM Berg- Und Hüttenmännische Monatshefte*, 163(3), 109–118. <https://doi.org/10.1007/s00501-018-0713-0>
- Kawka, M., Olejnik, L., Rosochowski, A., Sunaga, H., & Makinouchi, A. (2001). Simulation of wrinkling in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 109(3), 283–289. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00813-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00813-X)
- Kazan, H. (2019). Hybrid Single Shot Manufacturing of Multi-Materials Structure for Automotive Applications. *All Dissertations*. https://tigerprints.clemson.edu/all_dissertations/2435
- Keeler, S., & Kimchi, M. (2017). *Advanced high-strength steels application guidelines* (6.0). WorldAutoSteel. http://www.worldautosteel.org/download_files/AHSS%20Guidelines%20V6/00_AHSSGuidelines_V6_20170430.pdf

- Kim, J.-B., Yang, D.-Y., Yoon, J.-W., & Barlat, F. (2000). Effect of plastic anisotropy on compressive instability in sheet metal forming. *International Journal of Plasticity*, *16*(6), 649–676. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(99\)00064-9](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(99)00064-9)
- Kitamura, K., & Terano, M. (2014). Determination of local properties of plastic anisotropy in thick plate by small-cube compression test for precise simulation of plate forging. *CIRP Annals*, *63*(1), 293–296. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.038>
- Leite, M., Silva, A., & Henriques, E. (2014). *On the Influence of Material Selection Decisions on Second Order Cost Factors* (pp. 59–79). https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5544-7_4
- Osakada, K., Mori, K., Altan, T., & Groche, P. (2011). Mechanical servo press technology for metal forming. *CIRP Annals*, *60*(2), 651–672. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.007>
- Pham, Q.-T., Lee, B.-H., Park, K.-C., & Kim, Y.-S. (2018). Influence of the post-necking prediction of hardening law on the theoretical forming limit curve of aluminium sheets. *International Journal of Mechanical Sciences*, *140*, 521–536. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.02.040>
- Pimentel, A. M. F. (2018). *Caracterização experimental e modelação numérica do comportamento mecânico de chapas multi-camada e multi-material: Aplicação à indústria automóvel*. <http://repositorium.sdum.uminho.pt/>
- Pinheiro, B. L., Miguel, Á. T. G., Rodrigues, P. C. de M., & Abrão, A. M. (2013). *Influência do processo de fabricação de matrizes sobre a força da operação de estampagem*. 10.
- Rodrigues, J., Gouveia, B., Martins, P., & Cristino, V. (2010). *Tecnologia mecânica: Tecnologia da deformação plástica*. Escolar Editora.

- Roll, K. (2008). Simulation of sheet metal forming–Necessary developments in the future. *Int. Conf. NUMISHEET*, 3–11.
- Saanouni, K., Belamri, N., & Autesserre, P. (2010). Finite element simulation of 3D sheet metal guillotining using advanced fully coupled elastoplastic-damage constitutive equations. *Finite Elements in Analysis and Design*, 46(7), 535–550. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2010.02.002>
- Santos, A. D. dos, Duarte, J. M. F., & Rocha, A. D. C. B. da. (2005). *Tecnologia da embutidura: Princípios e aplicações*. INEGI - Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial.
- Schaeffer, L. (2005). *Conformação De Chapas Metálicas* (Edição: 1). Imprensa Livre.
- Slota, J., & Spišák, E. (2005). *COMPARISON OF THE FORMING - LIMIT DIAGRAM (FLD) MODELS FOR DRAWING QUALITY (DQ) STEEL SHEETS*. 6.
- Stoughton, T. B., & Zhu, X. (2004). Review of theoretical models of the strain-based FLD and their relevance to the stress-based FLD. *International Journal of Plasticity*, 20(8), 1463–1486. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2003.11.004>
- Tekkaya, A. E. (2000). State-of-the-art of simulation of sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 103(1), 14–22.
- Tisza, M. (2013). Recent development trends in sheet metal forming. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 8(1/2), 125–140. <https://doi.org/10.1504/IJMMP.2013.052651>
- Tisza, M., & Lukács, Z. (2008). Integrated Process Simulation and Die-Design in Sheet Metal Forming. *International Journal of Material Forming*. <https://doi.org/10.1007/s12289-008-0022-3>

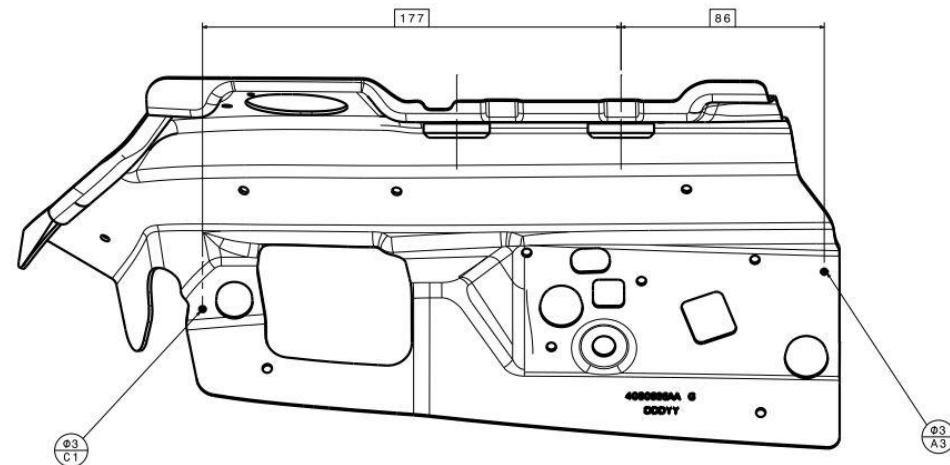
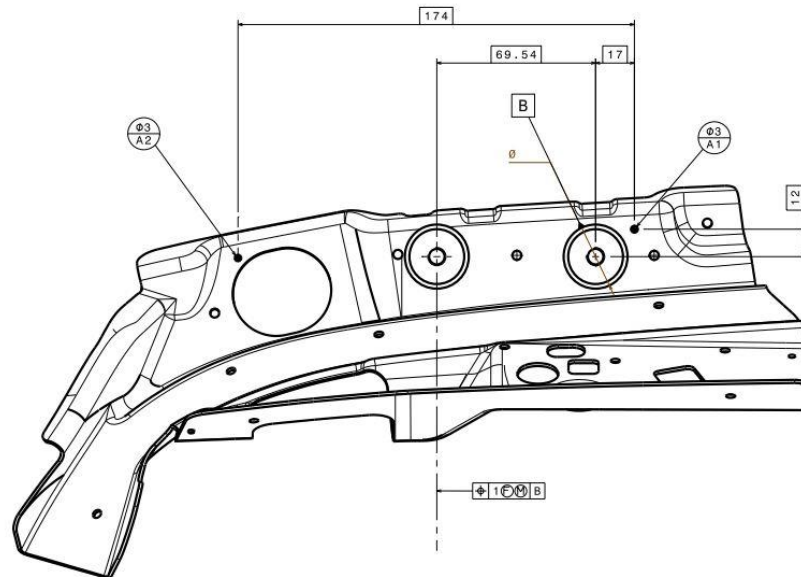
- Tisza, M., & Lukács, Z. (2014). Springback Analysis of High Strength Dual-phase Steels. *Procedia Engineering*, 81, 975–980. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.127>
- Vigneshwaran, S., Madhavan, R., Yoganjaneyulu, G., & Narayanasamy, R. (2020). Study on forming and fracture behavior of continuous Annealed, batch annealed and cold rolled SS 430 sheet metals. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.032>
- Vrh, M., Halilović, M., Starman, B., Štok, B., Comsa, D.-S., & Banabic, D. (2014). 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. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2013.11.013>
- Wang, X. Z., Masood, S. H., & Dingle, M. (2007). Numerical Simulation and Optimisation of Sheet Metal Forming for Auto-Body Panel Using AutoForm Software. *Materials Science Forum, Volumes 561-565*, 1911–1914. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.561-565.1911>
- Wisselink, H. (2000). *Analysis of guillotining and slitting, finite element simulations* [University of Twente]. <https://core.ac.uk/download/pdf/11456157.pdf>
- Yoon, J. W., Dick, R. E., & Barlat, F. (2011). A new analytical theory for earing generated from anisotropic plasticity. *International Journal of Plasticity*, 27(8), 1165–1184. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2011.01.002>
- Yoshida, T., Sato, K., Isogai, E., & Hashimoto, K. (2013). *Springback Problems in Forming of High-Strength Steel Sheets and Countermeasures*. 103, 7.
- Zaderii, B. A., Kotenko, S. S., Marinchenko, A. E., Polishchuk, E. P., & Yushchenko, K. A. (2005). Anisotropy of Mechanical Properties in Deformed Molybdenum Alloy

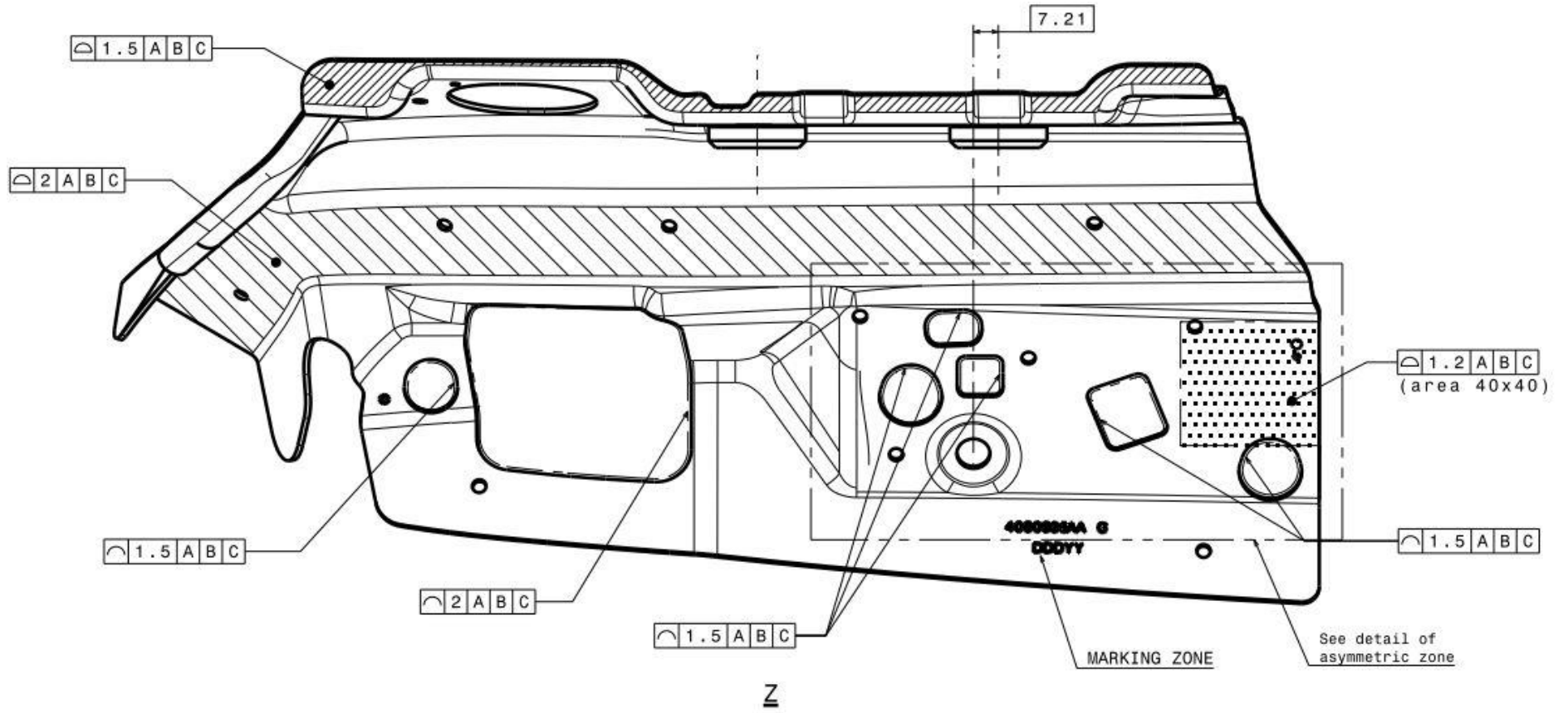
Sheets. *Strength of Materials*, 37(6), 566–572. <https://doi.org/10.1007/s11223-006-0003-z>

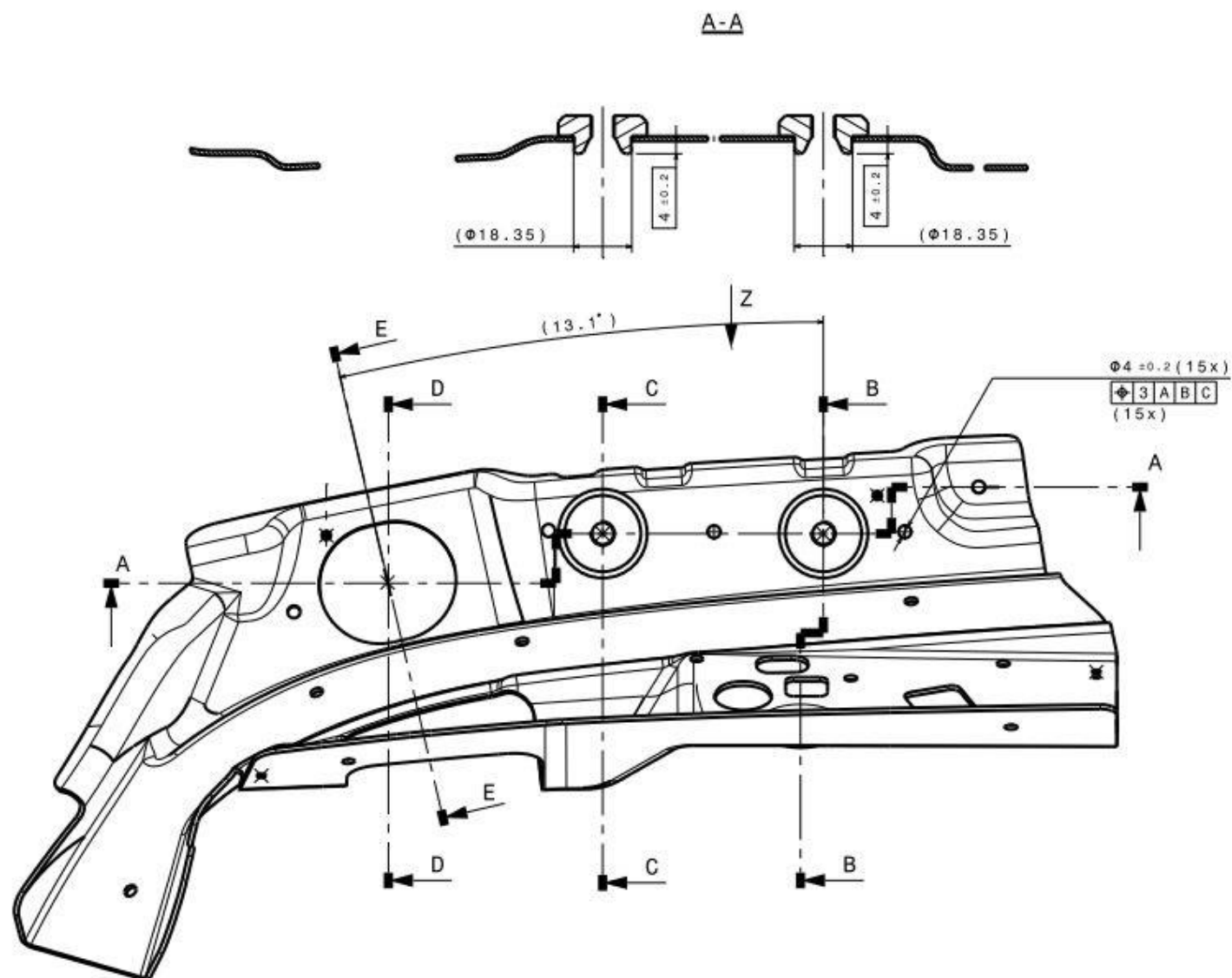
7. ANEXOS

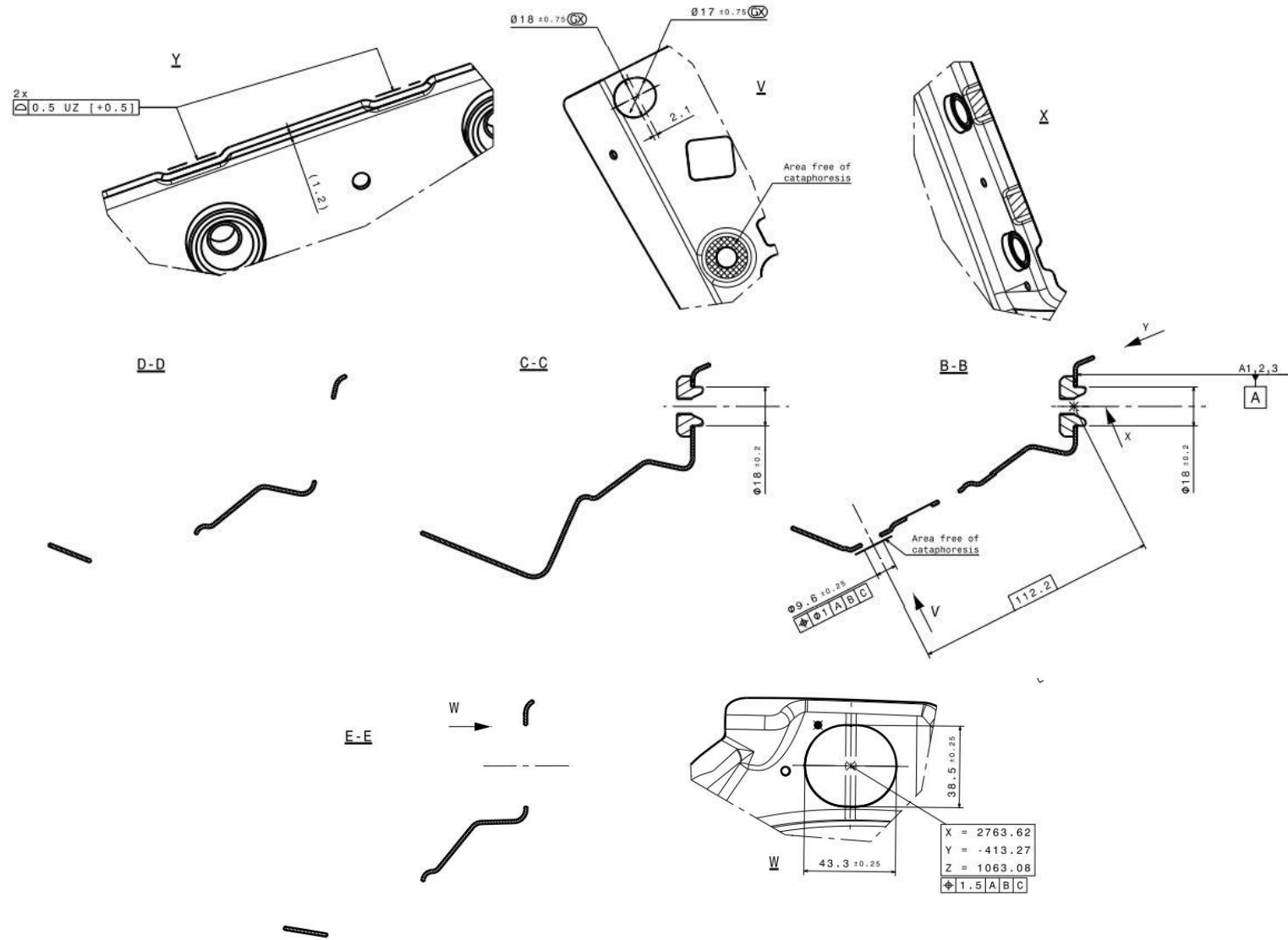
ANEXO I – Desenho 2D das peças

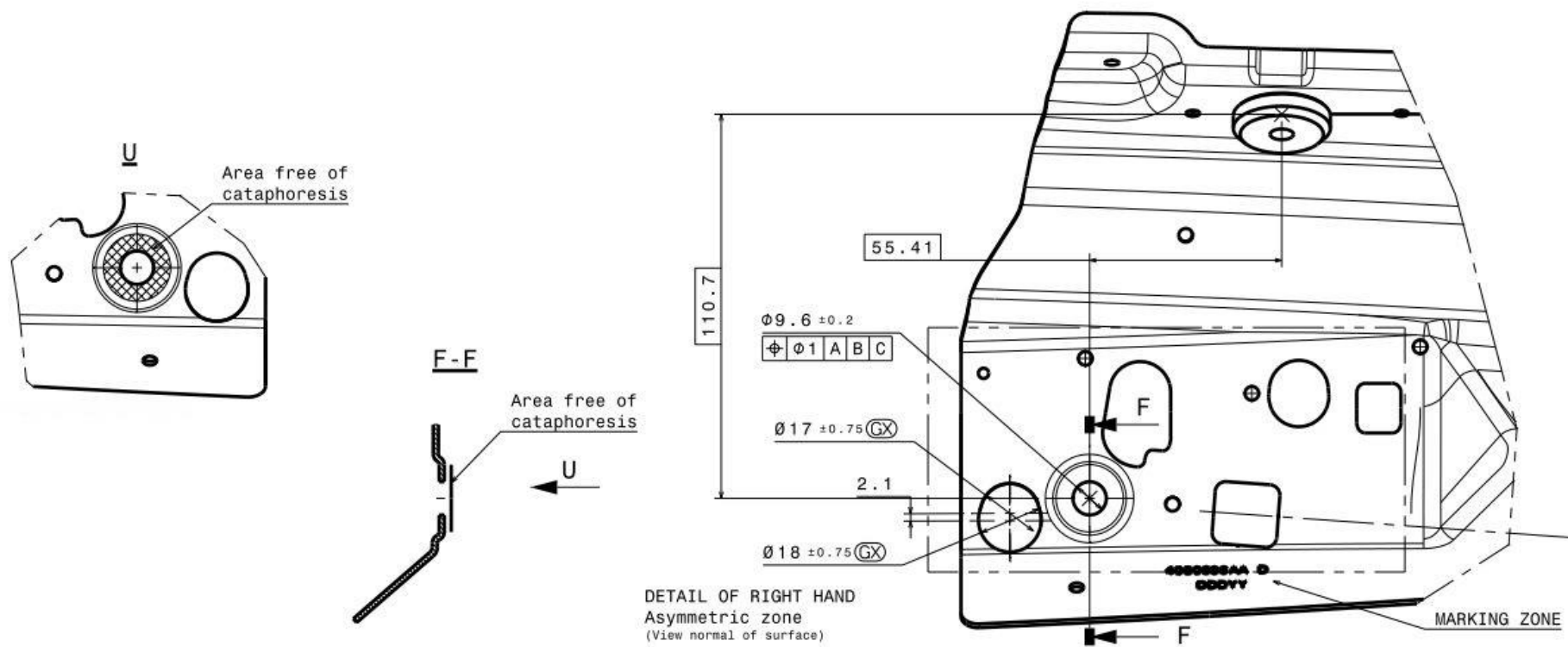
BILL OF MATERIAL													
POAE PART REFERENCE			CUSTOMER'S OWN REFERENCE			MATERIAL		THICKNESS (mm)	WEIGHT (gr)	PROJECTED SURFACE (cm2)	PAINTED or CHROMED	GRAIN TYPE DEPTH	GLOSS
KEOPS	TDM	TDM REV	NAME	REFERENCE	Nb	DESIGNATION	SUPPLIER						
----	----	-	HINGE REINF LH ASSY VIM P51	4080935AA	-	----	----	----	----	----	PN 500 S/PSA B15 5220	----	----
----	----	-	HINGE REINF LH STAMPED VIM P51	4080941AA	-	E335 G7/7 S/PSAB53 3312	----	1,5	----	----	----	----	----
----	----	-	WELDED NUT M8 x125 28 18 M8 VIM	7560390AA	-	C10E EN 10084	----	----	----	----	----	----	----
----	----	-	SUB PAINTING KTL PN 500	7000273AA	-	----	----	----	----	----	PN 500 S/PSA B15 5220	----	----
----	----	-	HINGE REINF RH ASSY VIM P51	4080936AA	-	----	----	----	----	----	PN 500 S/PSA B15 5220	----	----
----	----	-	HINGE REINF RH STAMPED VIM P51	4080943AA	-	E335 G7/7 S/PSAB53 3312	----	1,5	----	----	----	----	----
----	----	-	WELDED NUT M8 x125 28 18 M8 VIM	7560390AA	-	C10E EN 10084	----	----	----	----	----	----	----
----	----	-	SUB PAINTING KTL PN 500	7000273AA	-	----	----	----	----	----	PN 500 S/PSA B15 5220	----	----





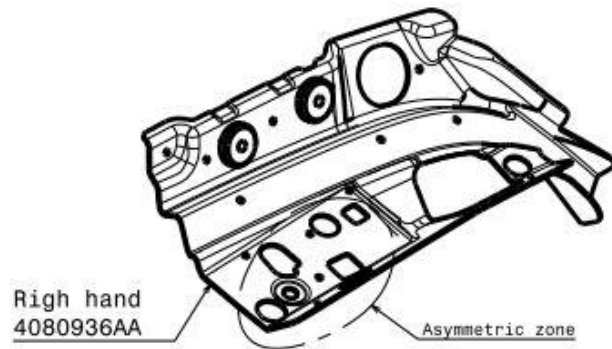
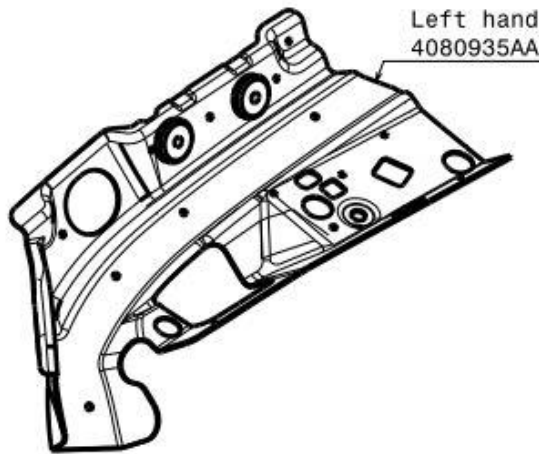






PRODUIT OBJET D'UN AGREMENT OFFICIEL
PRODUCT SUBJECT TO OFFICIAL APPROVAL

ISOMETRIC VIEW



REQUIREMENT OF MEASURE	YES	NO
To apply 80°C during 30 min before measurement		X

PART SPECIFICATIONS

TOLERANCES GENERALES SAUF INDICATIONS CONTRAIRES: $\boxed{3}$
 GENERAL TOLERANCES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: $\boxed{+0.8 / -0.5}$
 MARQUAGE: Not exceeding 0.2mm
 MARKING:
 DEPOUILLE: NA
 DRAFT ANGLE: NA
 TOLERANCE ARASAGE: NA
 CUTTING TOLERANCE: NA
 LIMITE DE GRAIN: NA
 GRAIN LIMIT: NA
 AXE DEMOULAGE AVEC ANGLE BASCULEMENT / REP VEHICULE: NA
 MOLD REMOVAL AXIS WITH DIE ANGLE / VEHICLE REFERENCE: NA
 NORME DE COTATION: ISO 8015-1660-1101-5458-5459
 SPECIFICATION OF DIM.: ISO 8015-1660-1101-5458-5459


SPECIAL CHARACTERISTIC TYPE	SYMBOL	NUMBER
CRITICAL CHARACTERISTIC	CC	--
SIGNIFICANT CHARACTERISTIC	SC	--
INSPECTION CHARACTERISTIC	IC	--

Special characteristic symbol(s) must be displayed in the drawing, identifying the location / concerned characteristic

		YES	NO
DRAWING CREATED WHILE USING LEFT PART		X	
RIGHT PART SYMMETRICAL		X	
<input checked="" type="checkbox"/>	ECE 26	YES NO X	
<input checked="" type="checkbox"/>	ECE 42	YES NO X	
<input checked="" type="checkbox"/>	DRAWING ASSEMBLY		<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	DRAWING DETAIL		<input checked="" type="checkbox"/>
Date of issue by Name of P.PAGNY 18/09/2019	RENFORT DE CHARNIERE -GAUCHE P51 HINGE REINF LH STAMPED VIM P51		
Echelle Scale 1:1	Non TDM / Name TDM Dra_4080935AA	Revision Revision A	Planchette Sheet 1/3
<small>In 2010 and for products in PDM, all drawings are signed (1100 0400) (France) or (1100 0400) (France) or (1100 0400) (France) and must be displayed on a controlled system, see specification.</small>		Format A0	

ANEXO II – Ficha técnica dos cilindros utilizados

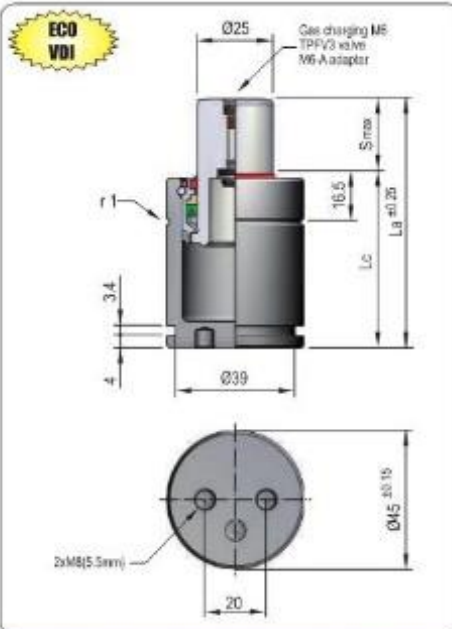
A ficha técnica dos cilindros utilizados está detalhada no presente anexo, por ordem de utilização, OP20, OP30 e OP80.



Ø45mm
740daN

MICRO 45

ECO VDI




Pressure medium Gas Nitrógeno (N₂)


Max. charging pressure	150 Bar
Min. charging pressure	35 Bar
Rod seal area	4,91 cm²
Operating temperature	0°C - 80°C
Force increase by temperature	0,33 %/°C
Max. stem speed	1,6 m/s
Maintenance kit	Kit M45

PED
2014/53/EEC

VDI SAFETY

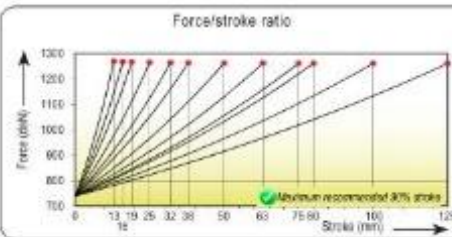


Maximum strokes / minute (at 20°C)

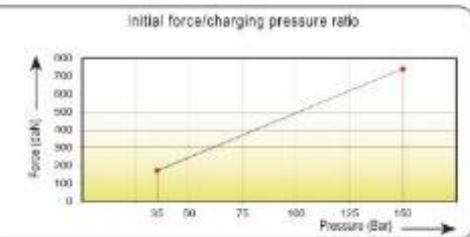


Code	Smax mm	La mm	Lc mm	Fa daN	90% F daN	100% Fc daN	P Bar	V l	Kg
MICRO 45x13	13	58	45	740 ±5% (20°C)	1180	1265	150 (20°C)	0,015	0,35
MICRO 45x16	16	64	48		1180	1260		0,019	0,39
MICRO 45x19	19	70	51		1175	1250		0,022	0,40
MICRO 45x25	25	82	57		1175	1260		0,030	0,44
MICRO 45x32	32	96	64		1175	1260		0,038	0,47
MICRO 45x38	38	108	70		1175	1255		0,045	0,50
MICRO 45x50	50	132	82		1175	1255		0,059	0,59
MICRO 45x63	63	158	95		1175	1255		0,075	0,65
MICRO 45x75	75	182	107		1175	1255		0,089	0,80
MICRO 45x80	80	192	112		1175	1255		0,095	0,85
MICRO 45x100	100	232	132		1175	1255		0,119	0,98
MICRO 45x125	125	282	157		1170	1255		0,149	1,15

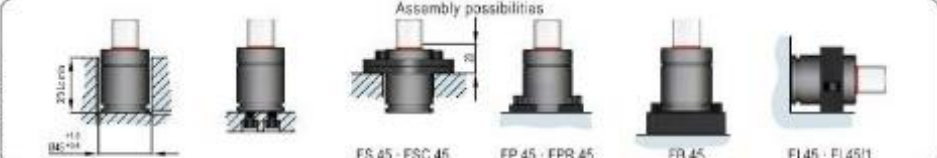
Force/stroke ratio



Initial force/charging pressure ratio



Assembly possibilities



FS 45 · FSC 45

FP 45 · FPR 45

FB 45

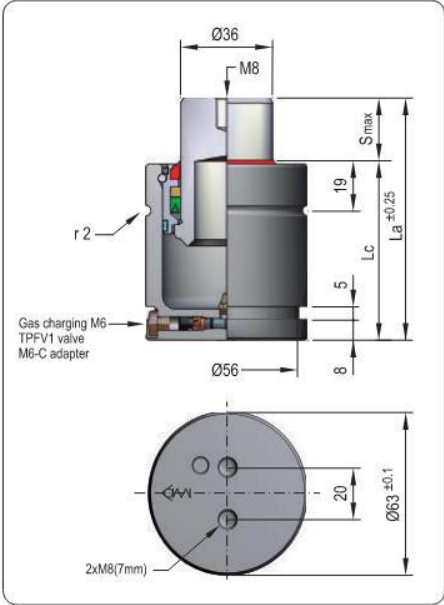
FI 45 · FI 45/1

Manufactured by Tivoclas Arucas de Prensão, S.L. - www.tecapres.com

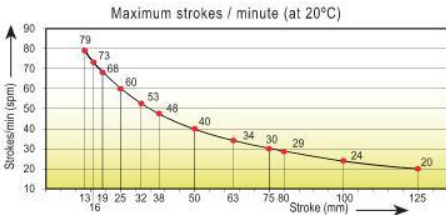
- MICRO
- TITAN
- TPH
- TPS
- TPSP
- TPF
- TPK
- TPC
- TPCT
- TPB
- TPR
- TPA
- TPG
- TPSR
- TPSRS
- TPNS
- STOP CYLINDER
- HOT FORMING
- TPHT
- TPSL

TECAPRES® Ø63mm 1500daN **MICRO 63V**

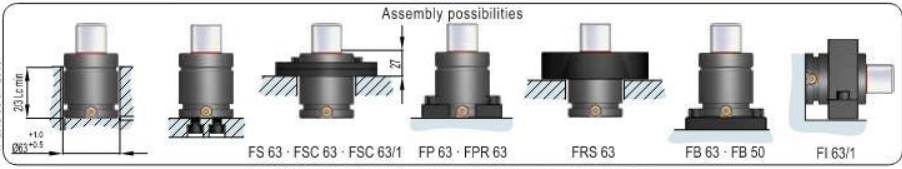
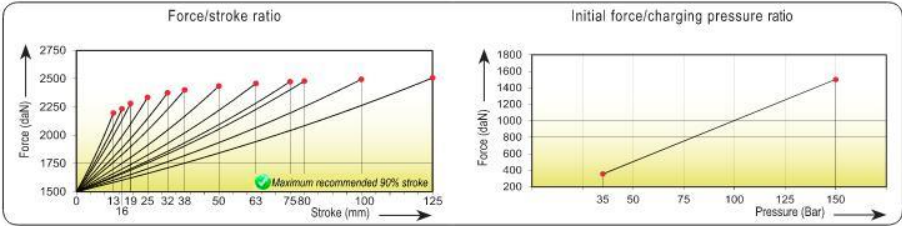
i
MICRO



- Pressure medium: **Gas Nitrógeno (N₂)**
- Max. charging pressure: **150 Bar**
- Min. charging pressure: **35 Bar**
- Rod seal area: **10,18 cm²**
- Operating temperature: **0°C - 80°C**
- Force increase by temperature: **0,33 %/°C**
- Max. stem speed: **1,6 m/s**
- Maintenance kit: **Kit M63V**



Code	Smax mm	La mm	Lc mm	Fa daN	90% F daN	100% Fc daN	P Bar	V l	Kg
MICRO 63Vx13	13	70	57	1500 ±5% (20°C)	2135	2245	150 (20°C)	0,040	0,95
MICRO 63Vx16	16	76	60		2165	2275		0,048	0,97
MICRO 63Vx19	19	82	63		2200	2320		0,054	1,15
MICRO 63Vx25	25	94	69		2235	2365		0,069	1,27
MICRO 63Vx32	32	108	76		2265	2405		0,086	1,35
MICRO 63Vx38	38	120	82		2280	2425		0,101	1,40
MICRO 63Vx50	50	144	94		2305	2455		0,131	1,55
MICRO 63Vx63	63	170	107		2320	2470		0,162	1,71
MICRO 63Vx75	75	194	119		2330	2485		0,192	1,83
MICRO 63Vx80	80	204	124		2335	2490		0,204	1,95
MICRO 63Vx100	100	244	144		2345	2500		0,253	2,32
MICRO 63Vx125	125	294	169		2355	2510		0,315	2,82



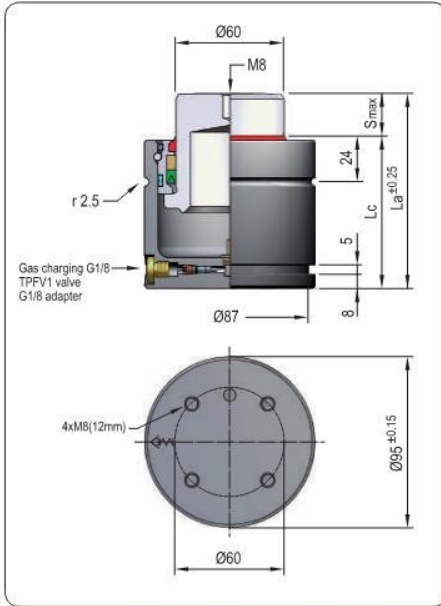
70

Manufactured by TÉCNICAS APLICADAS DE PRESION, S.L. · www.tecapres.com

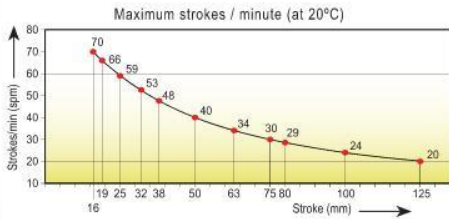
TECAPRES®

Ø95mm
4200daN

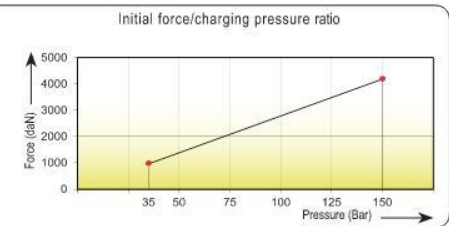
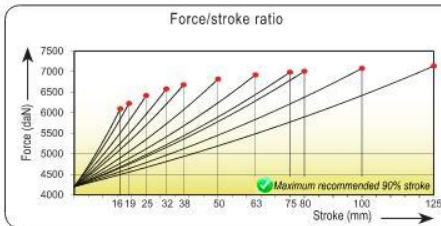
MICRO 95



Pressure medium	Gas Nitrógeno (N ₂)
Max. charging pressure	150 Bar
Min. charging pressure	35 Bar
Rod seal area	28,27 cm ²
Operating temperature	0°C - 80°C
Force increase by temperature	0,33 %/°C
Max. stem speed	1,6 m/s
Maintenance kit	Kit M95



Code	Smax mm	La mm	Lc mm	Fa daN	F _{90%} daN	F _{100%} daN	P Bar	V l	Kg
MICRO 95x16	16	90	74	4200 ±5% (20°C)	5890	6155	150 (20°C)	0,146	2,80
MICRO 95x19	19	96	77		6000	6285		0,165	2,90
MICRO 95x25	25	108	83		6160	6485		0,204	3,10
MICRO 95x32	32	122	90		6285	6645		0,250	3,25
MICRO 95x38	38	134	96		6370	6745		0,290	3,70
MICRO 95x50	50	158	108		6480	6885		0,368	3,90
MICRO 95x63	63	184	121		6565	6990		0,453	4,40
MICRO 95x75	75	208	133		6615	7055		0,532	4,75
MICRO 95x80	80	218	138		6635	7075		0,565	4,90
MICRO 95x100	100	258	158		6690	7145		0,695	6,00
MICRO 95x125	125	308	183		6735	7205		0,859	6,50



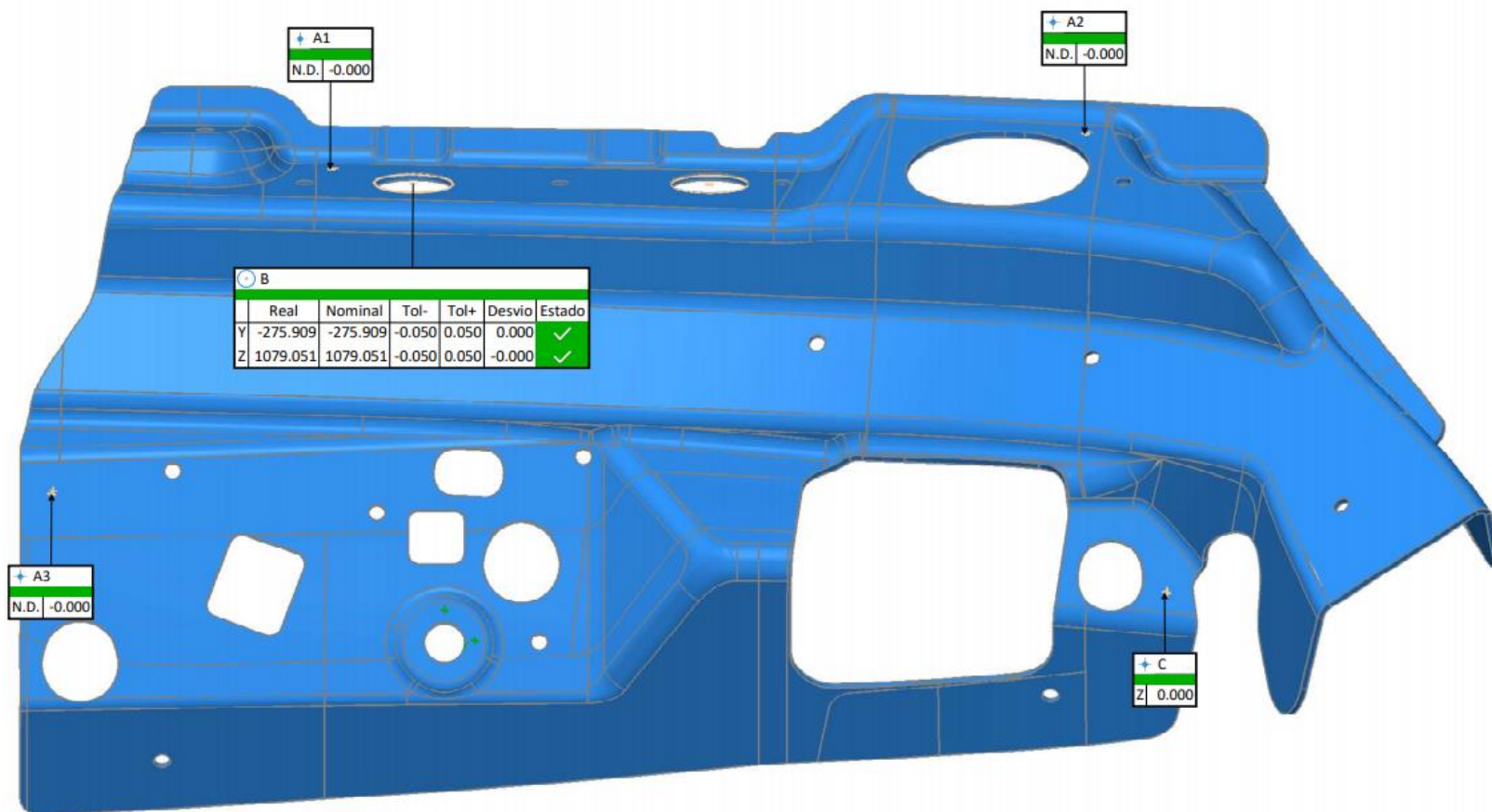
TPGAS 08-07-2019

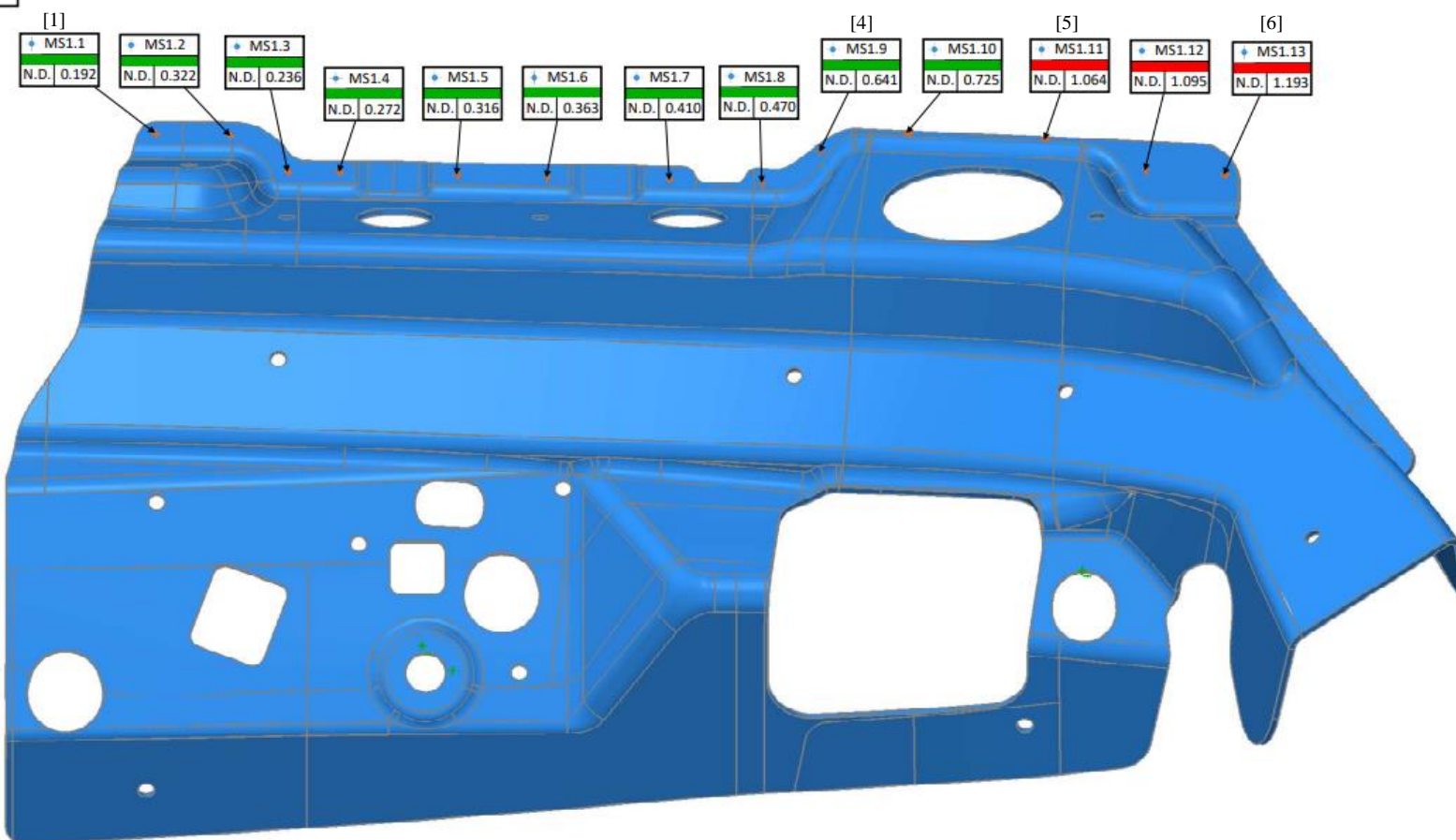
ANEXO III – Relatório dimensional

Neste anexo são apresentados os resultados completos das medições das primeiras peças finais, em relação à peça referência. Estas medições estão detalhadas por região de tolerância. A posição dos desvios dimensionais medidos é constante, tanto para os valores numéricos como para os valores experimentais. No entanto, as medições experimentais são mais detalhadas – maior número de pontos medidos.

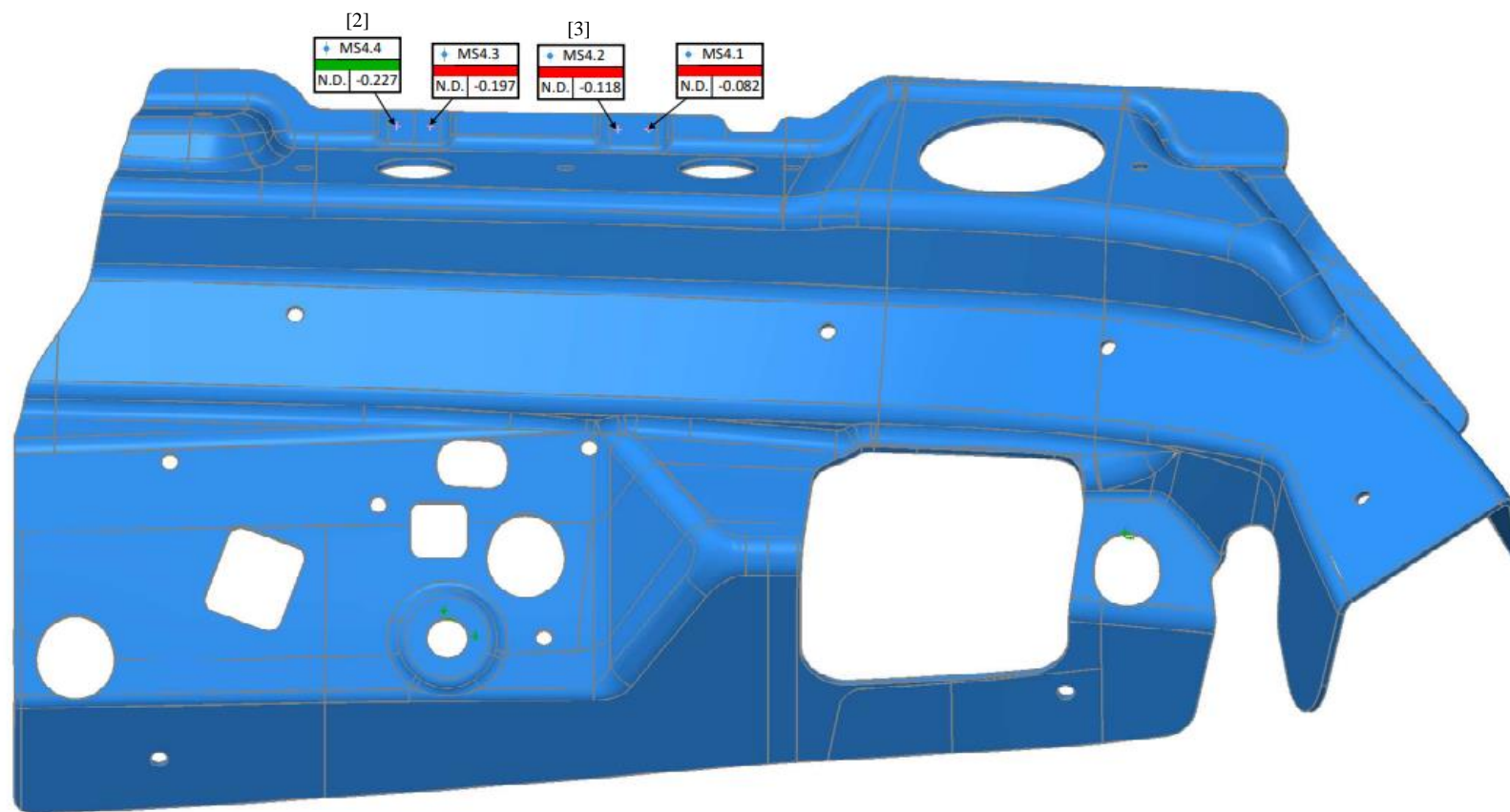
ANEXO III.1 – Relatório dimensional peça esquerda

RPS

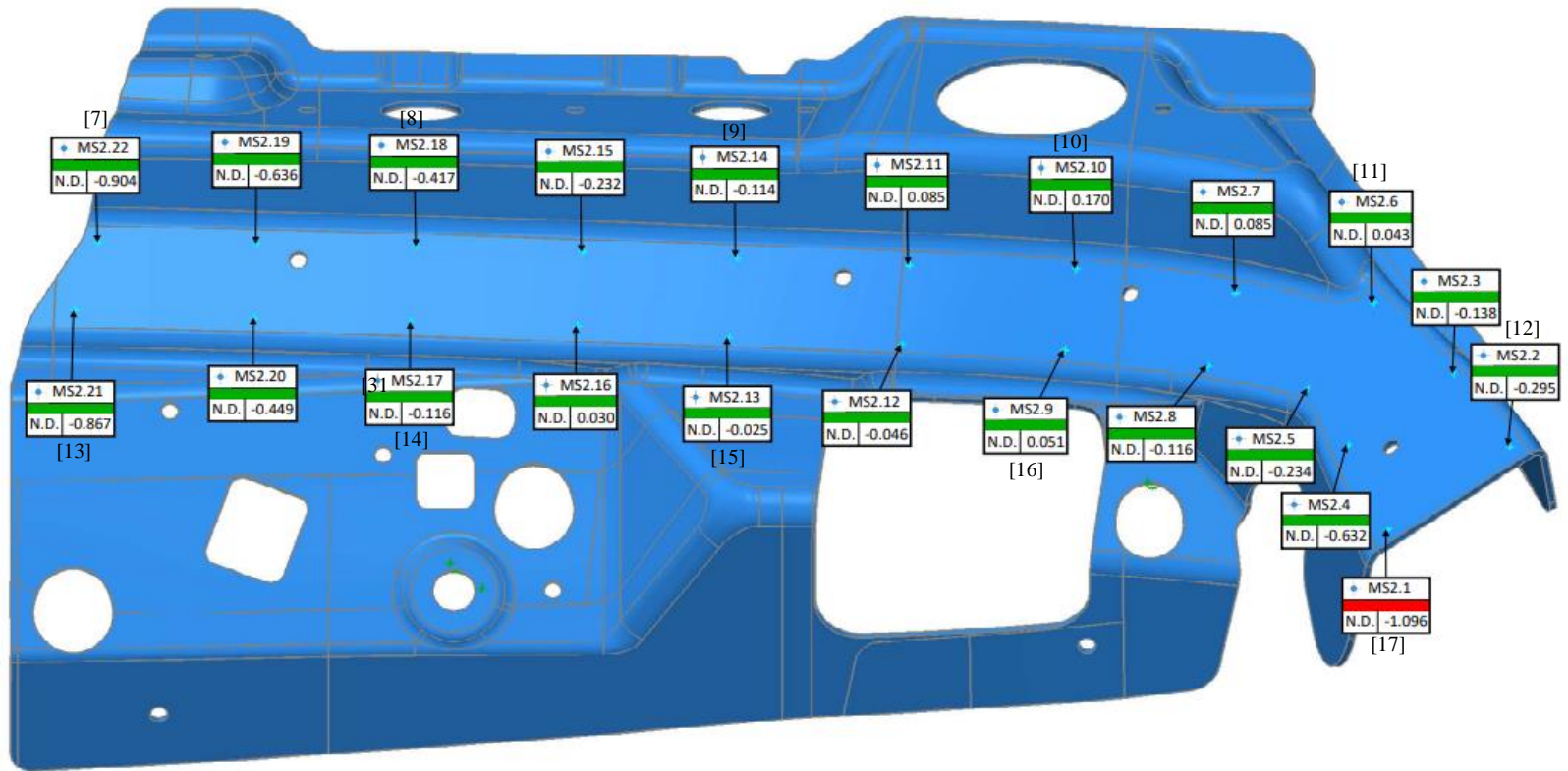


SUPERFICIE ± 0.75 

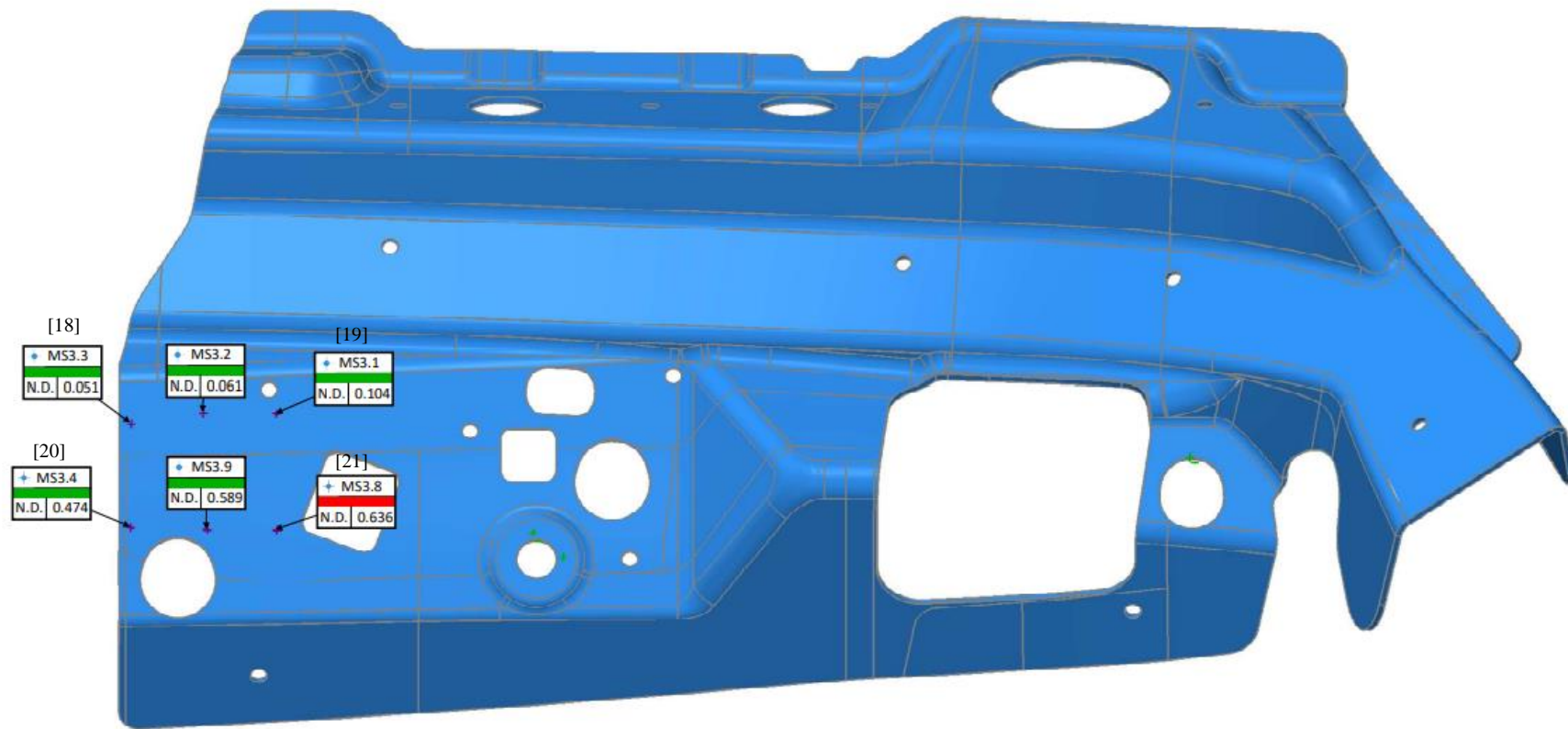
SUPERFICIE -0.75 -0.25



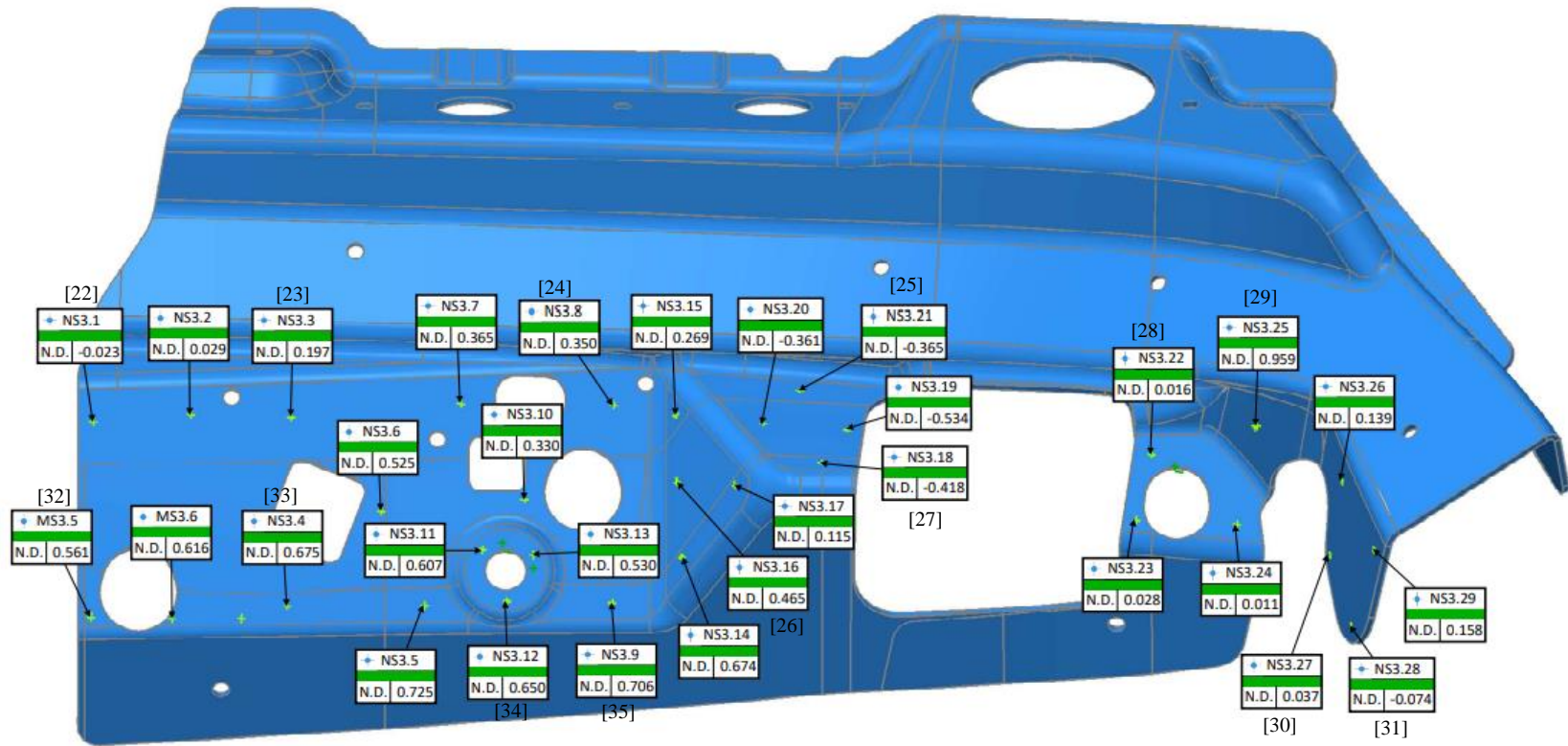
SUPERFICIE ±1



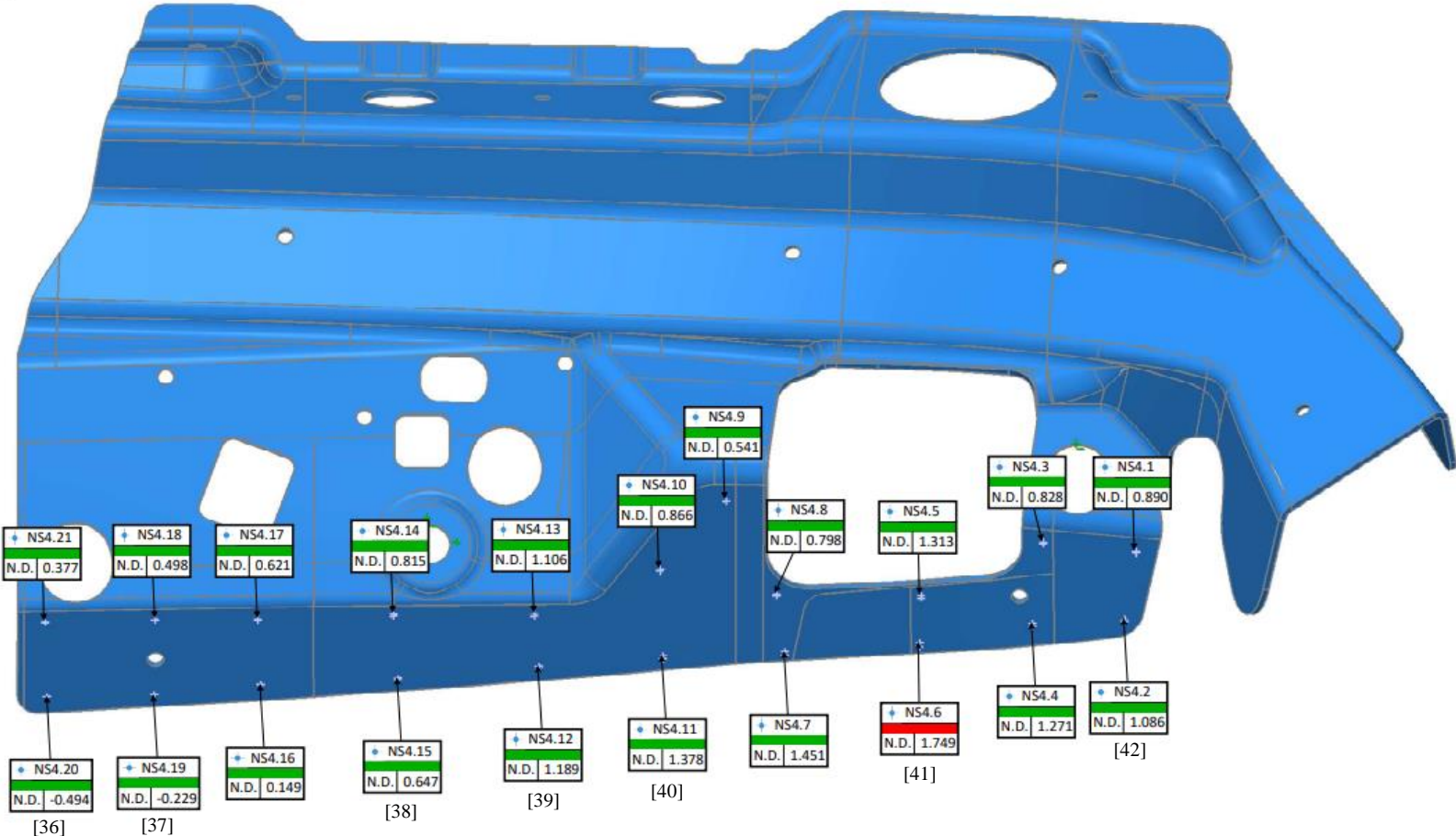
SUPERFICIE ±0.6



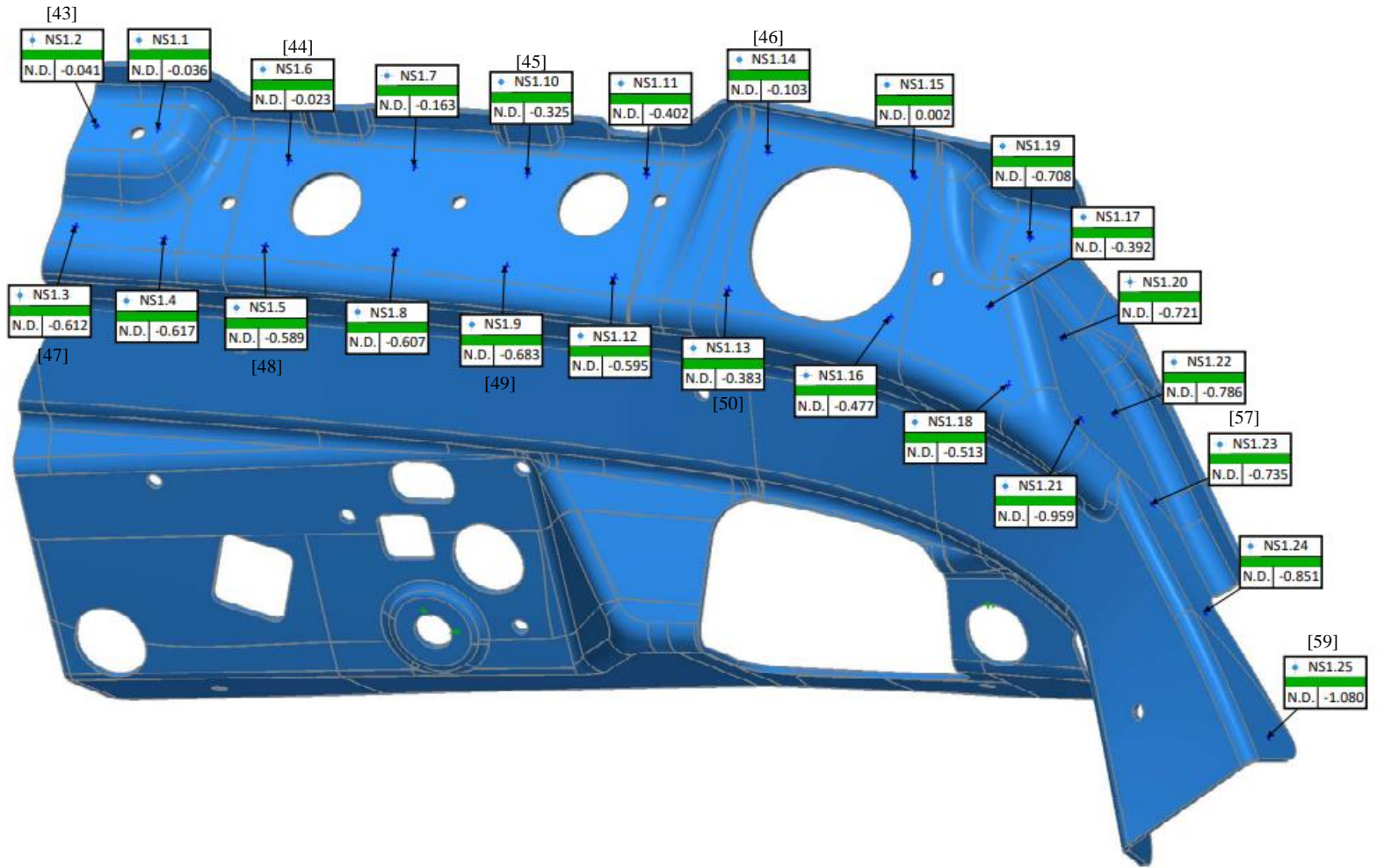
SUPERFICIE ±1.5



SUPERFICE ±1.5



SUPERFICIE ±1.5



SUPERFICIE ±1.5

