



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Previsão do fenómeno de retorno elástico em processos de estampagem multi-etapa

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Springback prediction in multi-step stamping processes

Autor

André Filipe dos Santos Travassos

Orientadores

Mário António Santos

Marta Cristina Cardoso Oliveira

Júri

Presidente	Professor Doutor Luís Filipe Martins Menezes Professor Catedrático da Universidade de Coimbra
Vogal	Professor Doutor Diogo Mariano Simões Neto Professor Convidado da Universidade de Coimbra Engenheiro Mário António Santos
Orientador	Coordenador de Desenho de Ferramentas na Volkswagen Autoeuropa

Colaboração Institucional



Volkswagen
Autoeuropa

Coimbra, Julho, 2016

Agradecimentos

Começo por agradecer à instituição de ensino, Universidade de Coimbra, mais concretamente ao Departamento de Engenharia Mecânica que me acolheu durante o meu percurso académico.

À professora Marta Oliveira, deixo aqui um reconhecimento pela ajuda, orientação, críticas e partilha de conhecimento que me deu durante a realização deste trabalho, bem como a permanente disponibilidade para tornar esta dissertação numa realidade.

Gostaria também de expressar o meu agradecimento à Unidade de Negócios de Cunhos e Cortantes, em especial ao meu orientador Mário Santos e restante equipa CAD que, durante a realização deste trabalho, sempre mostraram disponibilidade na ajuda e partilha de conhecimento.

Um especial agradecimento pelo apoio incondicional com que sempre pude contar por parte da minha família, nomeadamente dos pais e irmã. Sem o incentivo e dedicação deles não seria possível alcançar esta etapa.

Por fim, e com grande sentimento nostálgico, agradeço à cidade de Coimbra por me ter acolhido e dado a conhecer uma pessoa muito especial para mim. À minha namorada, um especial obrigado por toda a amizade e companhia durante estes 5 anos.

A todos, obrigado.

Resumo

O processo de estampagem de chapas metálicas é utilizado no fabrico de produtos de várias áreas, nomeadamente na indústria automóvel. Antes da produção em série de um componente estampado existe a fase de projeto, construção e ensaios da ferramenta. Para prever a ocorrência de potenciais problemas na fase de ensaios e assim ser possível atuar antecipadamente, são utilizados programas que permitem realizar a análise virtual do processo de estampagem. Uma fase de projeto eficaz reduz os tempos de construção e de ensaio da ferramenta e, consequentemente, os seus custos.

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de diferentes tipos de programas de simulação numérica, na análise do processo de estampagem virtual, com maior ênfase na previsão do retorno elástico da chapa. Neste trabalho foram utilizados os programas comerciais AutoForm® R3 e o PAMSTAMP® 2G 2015. Foram implementados os processos de estampagem multi-etapa de dois componentes automóveis, em cada um dos programas, e procedeu-se à comparação dos resultados numéricos com os experimentais. Apesar do principal foco incidir no retorno elástico, são também apresentados os resultados relacionados com a previsão do escoamento do material, na operação de embutissagem, e de análise de formabilidade. Na análise do escoamento do material observam-se diferenças relevantes entre os dois resultados numéricos e o experimental, que podem estar associados aos modelos utilizados nos travamentos lineares. Na análise de formabilidade existe correlação entre as zonas críticas detetadas na peça experimental e as previstas numericamente. No caso do componente em que a ferramenta apresenta uma superfície em quina viva, verificou-se que o AutoForm® apresenta uma melhor aptidão na previsão de rotura quando se aumenta o nível de refinamento automático. Quanto ao retorno elástico observou-se que os dois resultados numéricos, quando comparados com o experimental, apresentam desvios inferiores a 2 mm. No entanto, este valor não é satisfatório do ponto de vista da indústria automóvel, uma vez que reduz a eficiência da fase de compensação virtual da ferramenta.

Palavras-chave: Simulação numérica, Método dos elementos finitos, Retorno elástico, AutoForm R3, PAM-STAMP 2G 2015.

Abstract

The sheet metal forming process is used in the manufacturing of products in numerous areas, namely in the automotive industry. The series manufacturing of a stamped part is preceded by project, building and tools try-out stages. Software that enables the virtual analysis of the stamping process is a useful tool, in order to predict the occurrence of potential problems in the try-out stage, making possible to act from early on. An effective project stage reduces the construction and try-out time of the tools and, consequently, their costs.

The main goal of this study was to evaluate the performance of different virtual stamping software, particularly in terms of the springback prediction. The commercial software AutoForm® R3 and PAMSTAMP® 2G 2015 were used in this work. Two multi-stage stamping processes of different automotive parts were implemented, in each software, and the numerical simulation results were compared with the experimental ones. Even though the main focus of this work was the springback prediction, the results concerning the material flow, during the drawing operation and the formability analysis are also presented. The analysis of the results concerning the material flow indicates that there are differences between the numerical simulation results and the experimental ones, which can be related with the linear drawbeads models. In the formability analysis, correlations were found between the critical areas that were detected experimentally and numerically predicted. In case of the component that involves a tool with a sharp edge, AutoForm® is more apt to predict rupture when higher values of the automatic refinement level are used. Concerning the springback prediction, both numerical simulations results presented deviations to the experimental value in a range inferior to 2 mm. However, this value is not considered satisfactory by the automotive industry, since it decreases the efficiency of the tool's virtual compensation stage.

Keywords Numerical simulation, Finite element method, Springback, AutoForm R3, PAM-STAMP 2G 2015.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Guia de leitura.....	2
1.2. Retorno elástico	4
1.2.1. Integração temporal	6
1.2.2. Tipo e dimensão dos elementos finitos.....	7
1.2.3. Número de pontos de integração	9
1.2.4. Modelo constitutivo do Material	10
1.2.5. Modelação dos travamentos	16
1.2.6. Contacto com atrito	18
1.2.7. Curva limite de embutissagem (CLE)	19
1.3. Quantificação do retorno elástico	22
2. AUTOFORM® <i>versus</i> PAMSTAMP®	23
2.1. Discretização da chapa.....	24
2.2. Discretização das ferramentas.....	26
2.3. Contacto com atrito.....	27
2.4. Travamentos.....	27
2.5. Parâmetros recomendados para o cálculo numérico	28
3. CASOS DE ESTUDO	31
3.1. Materiais	32
3.2. Caso de estudo A) – painel exterior.....	33
3.2.1. Travamentos e <i>draw-in</i>	34
3.2.2. Operação de embutissagem	38
3.3. Caso de estudo B)	45
3.3.1. Travamentos e <i>draw-in</i>	46
3.3.2. Operação de embutissagem	48
3.3.3. Retorno elástico	52
4. CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
ANEXO A	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Peças selecionadas como casos de estudo: (a) painel exterior; (b) painel interior.	3
Figura 1.2. Influência de parâmetros materiais no retorno elástico: a) Módulo de elasticidade; b) Nível de deformação e de tensão; c) Tensão limite de elasticidade. (Duarte, 1997).	5
Figura 1.3. Fatores que influenciam o retorno elástico experimentalmente e numericamente (Teixeira, 2005).	5
Figura 1.4. Esquema representativo da diferença entre: (a) <i>increment step</i> e (b) <i>time step</i> . .	7
Figura 1.5. Representação de um elemento tipo: (a) membrana e (b) casca.	8
Figura 1.6. Esquematização dos métodos de refinamento (Schäfer, 2006).	9
Figura 1.7. Representação da evolução da superfície de plasticidade (Banabic, 2010).	10
Figura 1.8. Comparação entre os resultados experimentais e as superfícies de plasticidade obtidas a partir dos critérios de von Mises, Hill 1948 e Hill 1993 (valores em MPa): a) aço ST1405, b) liga de alumínio Al Mg Si [Banabic 1997].	12
Figura 1.9. Ciclo de tração-compressão do material ao entrar na matriz e ao passar nos travamentos geométricos (Banabic, 2010).	13
Figura 1.10. a) Zona de flexão e deflexão e consequente retorno elástico de um perfil U; (b) Zona de tração-compressão cíclica do material a passar no raio da matriz e c) representação da curva tensão-deformação com efeito de Bauschinger (linha contínua) e sem (linha a tracejado) (ESI a)), (Banabic, 2010).	13
Figura 1.11. Esquematização do efeito de Bauschinger devido à inversão de trajetória de deformação (tração-compressão) (Alves, 2003).	14
Figura 1.12. Comparação entre o retorno elástico experimental e numérico calculado com um modelo de encruamento isotrópico e um modelo que combina também encruamento cinemático (Banabic, 2010).	15
Figura 1.13. Variação do módulo elasticidade com o aumento percentual de deformação plástica (Lajarin, 2012).	16
Figura 1.14. a) Representação travamentos geométricos; b) Travamentos simples e duplos (Duarte, 1997).	16
Figura 1.15. a) Travamentos geométricos; b) Travamentos lineares (Banabic, 2010).	17
Figura 1.16. Comparação do retorno elástico previsto com o modelo de travamentos físico e um equivalente: a) após a fase de conformação; b) após uma operação de corte (Banabic, 2010).	18
Figura 1.17. CLE no espaço das deformações principais e respetiva análise de formabilidade do material no AutoForm®.	19

Figura 1.18. Trajetórias características na determinação da CLE, para um material com comportamento isotrópico (adaptada de (WMG)).	20
Figura 1.19. Provetes utilizados num ensaio de Nakazima com a respetiva grelha de círculos para avaliar as deformações (Safari, Hosseinipour, & Azodi, 2011).	20
Figura 1.20. Curva limite de estampagem obtida com: 1-Hasek; 2-Nakazima; 3-ensaio de tração uniaxial; 4-Keeler; 5-Bulge-test (Banabic, 2010).	21
Figura 1.21. Efeito de trajetórias de deformação complexas na curva limite de embutissagem (Butuc, 2004).	21
Figura 1.22. Peça antes (verde) e depois (vermelho) do retorno elástico livre.	22
Figura 2.1. Fluxo para a obtenção da geometria CAD de uma ferramenta de estampagem (ESI b).	23
Figura 2.2. Refinamento de um elemento. (a) quadrangular e (b) triangular, de nível n para nível n+1.	25
Figura 2.3. Discretização da ferramenta: (a) raio de curvatura definido por 9 elementos no caso em que o “ <i>angle criteria</i> ” é de 10; (b) detalhe da malha numa zona com curvatura.	26
Figura 2.4. Resultado da opção “ <i>Mesh and cleanup</i> ” do PAMSTAMP®.	27
Figura 2.5. Representação geométrica do travamento linear a) no AutoForm®; b) no PAMSTAMP®.	28
Figura 2.6. Simulação criada pelo PAMSTAMP® para cálculo de constantes a associar ao travamento linear.	28
Figura 3.1. Curva tensão-deformação dos materiais em estudo.	33
Figura 3.2. Curva limite de embutissagem dos materiais em estudo.	33
Figura 3.3. Sequência de operações utilizadas no processo de estampagem multi-etapa da peça A).	35
Figura 3.4. Matriz utilizada na operação de embutissagem da peça A) com travamentos lineares.	36
Figura 3.5. Geometria das secções transversais dos travamentos utilizados na matriz e pisador da operação de embutissagem da peça A).	36
Figura 3.6. Comparação do <i>draw-in</i> previsto com as forças para o travamento linear fornecidas pelo “ <i>Drawbead Generator</i> ”, “ <i>Drawbead Wizard</i> ” e “ <i>Drawbead Calibrator</i> ” com o resultado experimental obtido no <i>try-out</i> da peça A).	38
Figura 3.7. Fissuras nas linhas de detalhe do <i>design</i> do painel exterior, previstas no <i>try-out</i> da operação de embutissagem com uma força no pisador de 2600 kN.	39
Figura 3.8. Comparação do <i>draw-in</i> entre: PAMSTAMP®, AutoForm® e <i>try-out</i> , para a operação de embutissagem da peça A), com uma força de pisador de 2600 kN.	40
Figura 3.9. Resultado da simulação da operação de embutissagem da peça A) previsto pelo AutoForm®. Refinamento automático nível 6, superfície com raio de 0,1 mm e força do pisador 2600 kN.	41

Figura 3.10. Resultado da simulação da operação de embutissagem da peça A) previsto pelo PAMSTAMP®. Superfície em quina viva e força do pisador 2600 kN.	42
Figura 3.11. Resultado da simulação da operação de embutissagem da peça A) previsto pelo AutoForm®. Refinamento automático nível 7, superfície com raio de 0,1 mm e força do pisador 2600 kN.	43
Figura 3.12. Resultado da simulação da operação de embutissagem da peça A) previsto pelo AutoForm®. Refinamento automático nível 7, superfície com raio de 0,1 mm e força do pisador 2300 kN.	43
Figura 3.13. Resultado da simulação da operação de embutissagem da peça A) previsto pelo PAMSTAMP®. Superfície em quina viva e força do pisador 2300 kN.	44
Figura 3.14. Comparação do draw-in entre: PAMSTAMP®, AutoForm® e try-out, para a operação de embutissagem da peça A), com uma força de pisador de 2300 kN. .	44
Figura 3.15. Dispositivo de medição da peça A) – painel exterior.	45
Figura 3.16. Detalhes da sequência de operações utilizadas no processo de estampagem multi-etapa da peça B).....	45
Figura 3.17. Matriz utilizada na operação de embutissagem da peça B) com travamentos lineares.....	46
Figura 3.18. Geometria das secções transversais dos travamentos utilizados na matriz e pisador da operação de embutissagem da peça B).	47
Figura 3.19. Comparação do <i>draw-in</i> previsto com as forças para o travamento linear fornecidas pelo “ <i>Drawbead Generator</i> ”, “ <i>Drawbead Wizard</i> ” e “ <i>Drawbead Calibrator</i> ” com o resultado experimental obtido no try-out da peça B).	48
Figura 3.20. Comparação do <i>draw-in</i> entre: PAMSTAMP®, AutoForm® e try-out, para a operação de embutissagem da peça B).....	49
Figura 3.21. Zonas críticas de ocorrência de fissuras, detetadas no try-out da operação de embutissagem da peça B).	49
Figura 3.22. Resultado da simulação da operação de embutissagem da peça B) previsto pelo AutoForm®.	50
Figura 3.23. Resultado da simulação da operação de embutissagem da peça B) previsto pelo PAMSTAMP®.	51
Figura 3.24. Análise de formabilidade da peça B) com o PAMSTAMP®: (a) utilizando a opção de <i>speed up</i> ; (b) sem utilizar a opção de <i>speed up</i>	52
Figura 3.25. Medição da peça final com fixação nos pontos RPS, obtida no: (a) AutoForm®; (b) PAMSTAMP®.	53
Figura 3.26. Comparação entre as superfícies de espessura média obtidas pelo AutoForm® (cor-de-laranja) e pelo PAMSTAMP® (verde) alinhadas por RPS.	54
Figura 3.27. Análise do desvio entre as superfícies de espessura média obtidas com o AutoForm® e o PAMSTAMP®, alinhadas por RPS.....	54

Figura 3.28. a) Comparação do resultado da simulação realizada com o AutoForm® (cor-de-laranja) com a peça referência (azul). b) análise do desvio entre as superfícies obtidas com o AutoForm® e a peça de referência, alinhadas por RPS.....	55
Figura 3.29. a) Comparação do resultado da simulação realizada com o PAMSTAMP® (verde) com a peça referência (azul). b) análise do desvio entre as superfícies obtidas com o PAMSTAMP® e a peça de referência, alinhadas por RPS.	55
Figura 3.30. Comparação com a referência dos pontos de medição principais da peça obtida no AutoForm®, PAMSTAMP® e experimentalmente.....	57
Figura A.1. Medição da peça de <i>try-out</i> experimental da Zona A e B.....	63
Figura A.2. Medição da peça no PAMSTAMP® da Zona A e B.	63
Figura A.3. Medição da peça no AutoForm® da Zona A e B.....	64
Figura A.4. Medição da peça de <i>try-out</i> experimental da Zona C.	64
Figura A.5. Medição da peça no PAMSTAMP® da Zona C.	65
Figura A.6. Medição da peça de <i>try-out</i> experimental da Zona D.	65
Figura A.7. Medição da peça no PAMSTAMP® da Zona D.....	66
Figura A.8. Medição da peça no AutoForm® da Zona C e D.....	66

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Parâmetros utilizados nas simulações numéricas.	29
Tabela 3.1. Propriedades dos aços da peça A) e B) (EN 10346 (2009)).	32
Tabela 3.2. Forças associadas aos travamentos utilizados na peça A), segundo o AutoForm® e o PAMSTAMP®	37
Tabela 3.3. Parâmetros de discretização da chapa utilizados nas simulações da peça A)...	39
Tabela 3.4. Forças associadas aos travamentos utilizados na peça B), segundo o AutoForm e o PAMSTAMP®.	47
Tabela 3.5. Parâmetros de discretização da chapa utilizados nas simulações da peça B)...	50
Tabela 3.6. Média e valor máximo da diferença entre os desvios dimensionais virtuais e experimentais.....	58

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

α – Parâmetro de combinação da lei isotrópica de Swift-Hockett&Sherby

$\bar{\varepsilon}^p$ – Deformação plástica equivalente

ε_0 – Parâmetro da lei de encruamento isotrópico de Swift

σ_{0° – Tensão limite de elasticidade, determinada com base no ensaio de tração uniaxial com o provete orientado segundo a direção de laminagem

σ_{45° – Tensão limite de elasticidade, determinada com base no ensaio de tração uniaxial com o provete orientado a 45° com a direção de laminagem

σ_{90° – Tensão limite de elasticidade, determinada com base no ensaio de tração uniaxial com o provete orientado a 90° com a direção de laminagem

σ_{ij} – Componentes do tensor das tensões de Cauchy

μ – Coeficiente de atrito

ρ – Densidade do material

Δx – Menor dimensão do elemento finito

c – Velocidade de propagação do som no material

C – Número de Courant

C_Y – Parâmetro da lei de Voce e de Hockett&Sherby

E – Módulo de Elasticidade

F_0 – Força de abertura

F_r – Força de retenção

F_t – Força tangencial à superfície

F, G, H, L, M, N – Parâmetros de anisotropia do critério de Hill48

K – Parâmetro da lei de encruamento isotrópico de Swift

n – Coeficiente de encruamento

N – Força normal à superfície

r – Raio de curvatura da ferramenta

\bar{r} – Valor médio dos coeficientes de anisotropia

r_{0° – Coeficiente de anisotropia, determinado com base no ensaio de tração uniaxial com o provete orientado segundo a direção de laminagem

r_{45° – Coeficiente de anisotropia, determinado com base no ensaio de tração uniaxial com o provete orientado a 45° com a direção de laminagem

r_{90° – Coeficiente de anisotropia, determinado com base no ensaio de tração uniaxial com o provete orientado a 90° com a direção de laminagem

t – Espessura de chapa

Y – Tensão de escoamento

Y_0 – Tensão limite de elasticidade

Y_{Sat} – Parâmetro da lei de Voce e de Hockett&Sherby

Siglas

CAD – *Computer Aided Design*

CAM – *Computer Aided Manufacturing*

CLE – Curva Limite de embutissagem

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra

IGES – *Initial Graphics Exchange Specification*

RPS – *Reference Point System*

UNCC – Unidade de Negócios Cunhos e Cortantes

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho decorreu em ambiente industrial com o apoio e colaboração da empresa Volkswagen Autoeuropa. Dentro das várias áreas presentes na empresa, o trabalho decorreu inserido na seção UNCC-Prensas onde são produzidas ferramentas de estampagem para a indústria automóvel. O processo de produção das ferramentas envolve quatro etapas fundamentais: estudo e modelação (CAD), maquinação (CAM), montagem (Bancada) e ensaios (*try-out*) da ferramenta, que estão organizadas em departamentos. O trabalho que aqui se apresenta teve o seu principal foco no departamento de CAD.

A estampagem é um processo produtivo utilizado em larga escala na indústria automóvel. Através deste processo obtém-se painéis exteriores, painéis interiores e partes estruturais da carroçaria automóvel. De um modo geral, a chapa passa por várias etapas a fim de se obter a forma final desejada, num processo designado de estampagem multi-etapa. As etapas de conformação plástica a que a chapa é sujeita são normalmente classificadas em embutissagem, corte, calibração e dobragem.

As principais dificuldades na produção de peças estampadas relacionam-se com a redução excessiva de espessura da chapa (estrição ou rotura), defeitos de superfície e desvios dimensionais. O principal fenómeno que contribui para os desvios dimensionais que ocorrem entre a peça obtida e a peça nominal é o de retorno elástico (*springback*), cuja previsão com recurso à simulação numérica é o principal objeto de estudo deste trabalho. De facto, o processo de estampagem multi-etapa é dividido em operações e cada operação compreende a abertura e fecho da ferramenta. Assim, entre cada operação ocorre o fenómeno de retorno elástico. Este defeito dimensional leva a que a geometria da chapa conformada seja distinta em dois instantes de tempo: momento em que a ferramenta está fechada e momento em que a ferramenta está aberta. Quando a ferramenta está fechada a chapa tem uma geometria nominal imposta pelas ferramentas. Porém, quando esta abre, ocorre o retorno elástico da chapa, com a consequente recuperação de tensões, que conduz à alteração da geometria da chapa.

As peças resultantes deste processo têm tolerâncias dimensionais apertadas e as ferramentas são dispendiosas, obrigando a que exista uma fase de projeto e planeamento rigorosa. O projeto das ferramentas de estampagem é atualmente realizado com o auxílio de

programas de simulação numérica, de modo a permitir o *try-out* virtual do componente. No entanto, para que a conceção virtual seja eficaz é fundamental que a simulação numérica permita prever com exatidão os campos de deformações e tensões, induzidos por cada etapa na chapa metálica. Estes parâmetros são essenciais para a correta previsão do fenómeno de retorno elástico. A incorreta previsão das variáveis associadas ao processo de estampagem resulta inevitavelmente em maiores tempos de *try-out* das ferramenta e, consequente, no aumento dos custos.

Na realização deste trabalho serão utilizados dois *softwares* comerciais de simulação numérica, com recurso ao método dos elementos finitos: o PAM-STAMP® e o AutoForm®. A principal diferença entre os dois é a formulação adotada para a integração temporal: o AutoForm® recorre a uma formulação estática, associada a um método de integração temporal implícito; enquanto o PAMSTAMP® recorre a uma formulação dinâmica, associada a um método de integração temporal explícito. No entanto, o PAMSTAMP® permite adotar a formulação estática implícita em determinadas fases do processo de estampagem. No grupo Volkswagen o AutoForm® é utilizado como *software standard* e o PAMSTAMP® é utilizado para testes. A Volkswagen Autoeuropa apenas tem experiência na utilização do AutoForm®. O objetivo deste estudo é avaliar a potencialidade dos dois *softwares* na simulação de um processo multi-etapa, em particular, na previsão do retorno elástico.

1.1. Guia de leitura

Neste capítulo introdutório, serão apresentados alguns temas e conceitos indispensáveis à compreensão do trabalho, bem como as principais características dos *softwares* utilizados. No entanto, os dois *softwares* apresentam muitas diferenças, pelo que as mais relevantes serão apresentadas no capítulo 2. Em particular, destacam-se o tipo de elemento utilizado na discretização da chapa, incluindo o número de pontos de integração ao longo da espessura, os parâmetros utilizados na discretização das ferramentas, o algoritmo de contacto e o tipo de integração temporal. O grupo Volkswagen recomenda um conjunto de parâmetros numéricos para que um processo de simulação seja aprovado, i.e. seja considerado válido. Uma vez que os *softwares* apresentam formulações distintas, existe um conjunto de parâmetros diferentes a ser respeitado para que o processo de simulação seja considerado válido. Alguns dos parâmetros mais importantes são também apresentados no

capítulo 2. Neste contexto, é expectável a obtenção de resultados que apresentem algumas diferenças, que é necessário quantificar.

No capítulo 3 serão apresentados dois casos de estudo. A abordagem adotada teve por objetivo a análise do escoamento de material, a deformação plástica induzida pelo processo de embutissagem e o retorno elástico. A análise dos resultados baseia-se na comparação dos resultados das simulações numéricas com os resultados experimentais, uma vez que os componentes selecionados como casos de estudo estiveram em processo de *try-out* na empresa, no decurso deste trabalho. O componente inicialmente selecionado para estudo foi um painel automóvel exterior (ver Figura 1.1 (a)), produzido de uma chapa de aço macio CR4-GI40/40 (DX56D+Z). No entanto, o estudo deste componente revelou algumas dificuldades, que serão discutidas no capítulo 3. Estas motivaram a seleção de outro componente automóvel, correspondente à peça da Figura 1.1 (b), que é produzido a partir de uma chapa de aço macio CR3-GI40/40-U-O (DX54D+Z). De modo a cumprir o objetivo proposto, todas as etapas do processo de produção dos componentes foram simuladas com os dois *softwares*, AUTOFORM® e PAMSTAMP®, de modo a aproximar, tanto quanto possível, a simulação do processo real de produção.

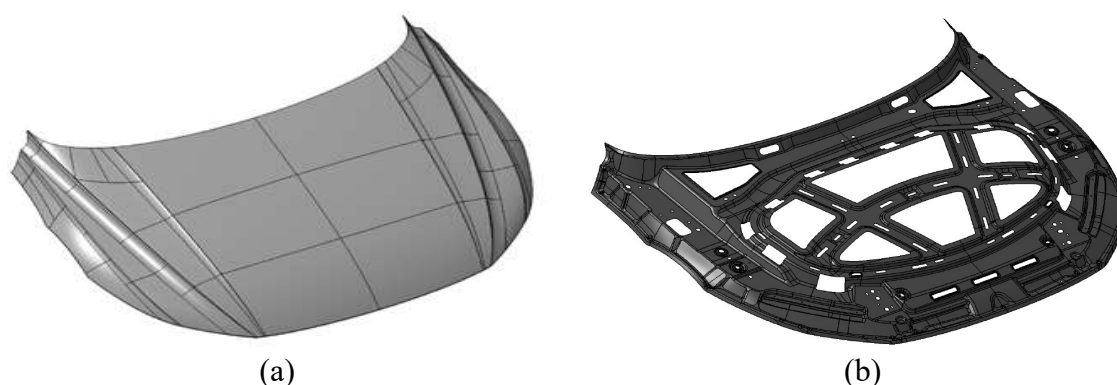


Figura 1.1. Peças selecionadas como casos de estudo: (a) painel exterior; (b) painel interior.

O objetivo principal deste trabalho é comparar os resultados da simulação numérica com os experimentais. Não é objetivo deste trabalho fazer uma comparação direta entre os dois *softwares*, até porque tal seria impossível e injusto. Impossível porque podem ser adotadas estratégias distintas para modelar o mesmo problema e não existe um modelo ótimo. Não sendo possível definir a estratégia de simulação ótima, optou-se por construir simulações que se aproximassem tanto quanto possível dos resultados experimentais, de

acordo com as recomendações da Volkswagen para ambos os *softwares*, com base na experiência da empresa com o AutoForm® e de acordo com a informação fornecida no manual do PAMSTAMP®. Por outro lado, seriam necessários inúmeros testes para estudar a influência dos vários parâmetros numéricos e assim verificar que combinação, ou combinações, que apresentam melhores resultados, tanto para um *software* como para o outro. Também seria injusto porque a versão do AutoForm® adotada neste trabalho é mais antiga que a versão do PAMSTAMP®. A versão do AutoForm® utilizada no trabalho é a mesma utilizada atualmente na empresa, que é a R3, existindo já no mercado a R4 e R6. A versão do PAMSTAMP® utilizada é a 2G 2015.

A dissertação termina com um resumo das principais conclusões.

1.2. Retorno elástico

A simulação numérica pode ser utilizado como um método de *try-out* virtual que permite realizar a análise do processo de estampagem e obter resultados com alguma fiabilidade, no que diz respeito à previsão de rotura, enrugamento e distribuição de tensões. No entanto, a correta previsão do retorno elástico continua a ser a principal dificuldade da simulação numérica. A importância deste defeito dimensional aumenta com o aumento da razão entre o valor da tensão limite de elasticidade e o módulo de elasticidade do material. De facto, o retorno elástico aumenta com a diminuição do módulo de elasticidade, com o nível de deformação/tensão e com o aumento da tensão limite de elasticidade (Duarte, 1997), como se ilustra na Figura 1.2.

Atualmente, o cálculo do retorno elástico assume elevada importância porque se observa a crescente utilização de aços de alta resistência, com elevada tensão limite de elasticidade, e ligas de alumínio que apresentam um módulo de elasticidade bastante inferior ao do aço. Para prever com precisão defeitos na conformação através da simulação, nomeadamente os dimensionais resultantes do retorno elástico, é necessário que a simulação represente com rigor as condições existentes na conformação, de modo a permitir uma correta previsão da distribuição de tensões. As principais variáveis que influenciam a simulação numérica do retorno elástico estão representadas na Figura 1.3 e podem ser divididas fundamentalmente em variáveis inerentes ao processo de conformação e variáveis numéricas (Teixeira, 2005).

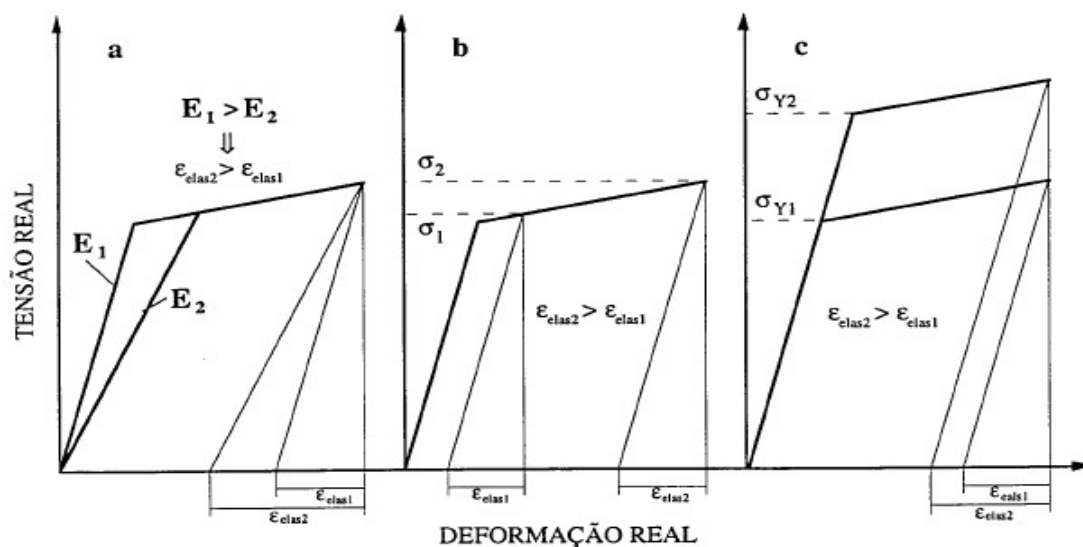


Figura 1.2. Influência de parâmetros materiais no retorno elástico: a) Módulo de elasticidade; b) Nível de deformação e de tensão; c) Tensão limite de elasticidade. (Duarte, 1997).



Figura 1.3. Fatores que influenciam o retorno elástico experimentalmente e numericamente (Teixeira, 2005).

As condições de processo, geometria do componente e propriedades do material influenciam diretamente a quantidade de retorno elástico sofrida pelo material, numericamente e experimentalmente. O retorno elástico previsto pela simulação está relacionado não só com estes fatores que influenciam o retorno elástico experimental, mas também é influenciado por parâmetros numéricos, tais como: tipo de elemento, tamanho de elemento, modelação do comportamento mecânico do material, modelação do atrito e tipo de integração temporal. Segundo (Banabic, 2010), são seis os parâmetros numéricos que têm maior relevância na correta previsão do retorno elástico: o tipo de elemento utilizado, o

tamanho do elemento utilizado, o número de pontos de integração por elemento, o tamanho do incremento temporal, o modelo constitutivo do material e o modelo dos travamentos. Nas secções seguintes analisam-se alguns detalhes acerca dos parâmetros numéricos que mais influenciam a previsão do retorno elástico.

1.2.1. Integração temporal

A simulação numérica de processos não-estacionários é geralmente realizada com recurso à formulação dinâmica ou estática do problema de equilíbrio. Em geral, a formulação dinâmica é associada a métodos de integração temporal explícitos, enquanto a estática é associada a métodos implícitos.

Na formulação estática implícita o tempo não intervém diretamente na equação de equilíbrio do problema, pelo que a simulação é realizada dividindo o processo em incrementos (*increment step*) de força ou de deslocamento (ver Figura 1.4 (a)). Em cada incremento o sistema de equações não lineares é resolvido com um método iterativo, de modo a garantir o estado de equilíbrio do sistema no final do incremento. O cálculo é realizado para o instante t (incremento n) com base na solução do instante de tempo conhecido $t - 1$ (incremento $n - 1$) e no instante de tempo desconhecido t .

Na formulação dinâmica explícita o tempo intervém diretamente na equação de equilíbrio do problema, pelo que a simulação é realizada dividindo o processo em incrementos de tempo (*time step*), como se mostra na Figura 1.4 (b). O tamanho máximo do incremento de tempo é imposto pela condição de estabilidade do método numérico explícito, designado por Δt_{\max} . O Δt_{\max} pode ser obtido com base na condição de Courant, definida por:

$$C = \frac{c \Delta t_{\max}}{\Delta x} \approx \frac{\sqrt{E/\rho} \Delta t_{\max}}{\Delta x} \leq 1 \quad (1.1)$$

Na qual, Δx é a menor dimensão do elemento finito, ρ é a densidade do material, E é o módulo de elasticidade e c é a velocidade de propagação do som nesse material. De acordo com a definição apresentada na equação (1.1), o número de Courant C deve ser menor que 1 para garantir a estabilidade do método numérico explícito. Isto significa que o produto entre c e Δt_{\max} deve ser menor que a dimensão característica do elemento finito. Quanto maior for o tamanho de elemento maior será o incremento de tempo admissível que garante estabilidade (Schäfer, 2006). No entanto, o tempo de computação tem uma relação direta

com o *time step*, pelo que elementos finitos de maiores dimensões apresentam tempos de computação mais aceitáveis, mas também podem ser incapazes de garantir o grau de precisão desejado. A condição de estabilidade permite que o cálculo do instante t seja realizado utilizando apenas a solução do instante de tempo conhecido $t - \Delta t$.

Em geral, o método implícito necessita de um maior tempo de cálculo em cada incremento do que o método explícito, uma vez que a resolução do sistema de equações é feita de forma iterativa. No entanto, o método explícito necessita de um número muito maior de incrementos que o método implícito.

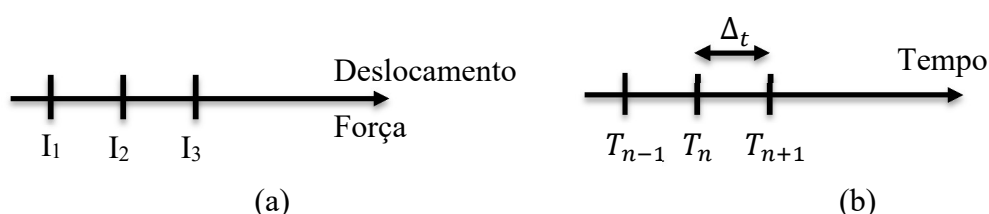


Figura 1.4. Esquema representativo da diferença entre: (a) *increment step* e (b) *time step*.

Ján & Jurcisin, (2012) realizaram um estudo com base no ensaio de flexão simples, com três tipos de aços, para comparar a influência dos fatores dinâmicos na previsão do retorno elástico. Neste estudo foram utilizados os *softwares* AUTOFORM® e PAMSTAMP®, sendo a etapa de retorno elástico calculada com o método implícito. Apesar de existirem ligeiras diferenças nos resultados, a conclusão dos autores é que os fatores dinâmicos não têm grande influência no cálculo do retorno elástico, i.e. não é o facto de o *software* utilizar uma formulação estática implícita ou uma formulação dinâmica explícita que conduz a resultados diferentes.

1.2.2. Tipo e dimensão dos elementos finitos

Na conformação de chapas metálicas são utilizados predominantemente elementos finitos 2D, tipo casca ou membrana (ver Figura 1.5), devido à elevada razão entre a dimensão da superfície da chapa e da espessura (Alves, 2003). Os elementos do tipo membrana são mais simples e computacionalmente eficientes. No entanto, na sua formulação são desprezados os efeitos de flexão, o que inviabiliza a simulação com rigor do retorno elástico. Os elementos tipo casca permitem simular efeitos de flexão e portanto são estes os mais utilizados na simulação de conformação de chapa onde os efeitos de flexão não devem ser desprezados (Alves, 2003).

Na sua maioria, os elementos do tipo casca baseiam-se na teoria de Kirchhoff-Love e na teoria de Mindlin-Reissner. De acordo com (Alves, 2003), de um ponto de vista prático, os elementos de casca baseados na teoria das cascas de Kirchhoff-Love são pouco utilizados, dado o seu elevado custo computacional. (Banabic, 2010) afirma que o elemento do tipo casca é o que permite obter resultados com maior exatidão, tanto no cálculo do retorno elástico como para a análise de ocorrência de rugas.

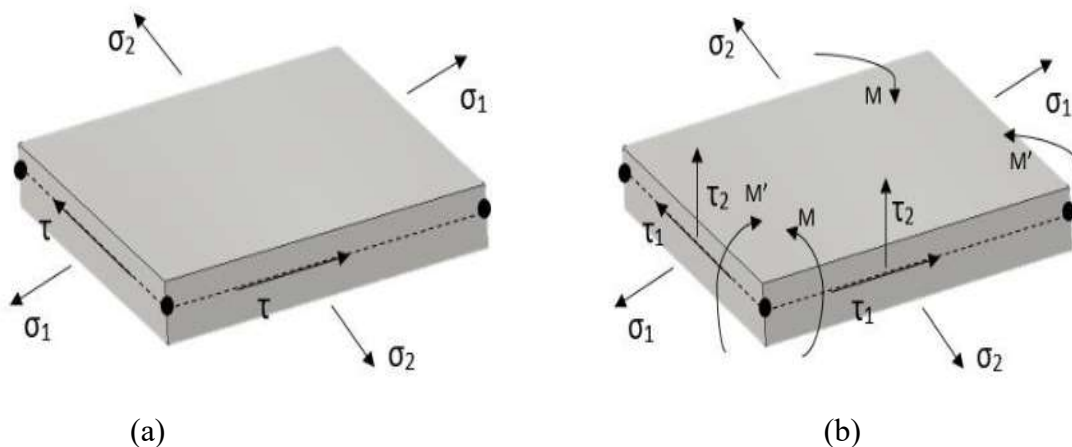


Figura 1.5. Representação de um elemento tipo: (a) membrana e (b) casca.

O tamanho do elemento finito deve ter uma relação direta com o menor raio de curvatura da ferramenta que se pretende simular, i.e. quanto menor o raio da ferramenta menor deverá ser o tamanho de elemento, para permitir uma correta previsão do retorno elástico. No entanto, quanto menor for o tamanho de elemento maior será o tempo de computação. Para relações r/t inferiores a 5, i.e. quando o raio de curvatura da ferramenta r é muito pequeno em comparação com a espessura de chapa t , é preferível a utilização de elementos sólidos 3D para uma boa previsão do retorno elástico (Li, Carden, & Wagoner, 2002).

Uma vez que existe uma relação direta entre a dimensão adotado para o elemento finito e o tempo de computação, é comum recorrer a estratégias que permitem alterar a dimensão dos elementos finitos no plano da chapa, ao longo da simulação. O refinamento automático tem 4 formas de funcionamento (Schäfer, 2006), *r-refinement*, *h-refinement*, *p-refinement* e métodos híbridos que são uma combinação dos mencionados anteriormente. Todos os métodos, representados na Figura 1.6, atuam nas zonas identificadas como mais críticas da malha:

- Movendo os nós para essas zonas (*r-refinement*);

- Adaptando o número de elementos e número de nós, de forma a diminuir o tamanho do elemento localmente (*h-refinement*);
- Aumentando a ordem dos elementos, i.e. aumentando o número de nós por elemento (*p-refinement*).

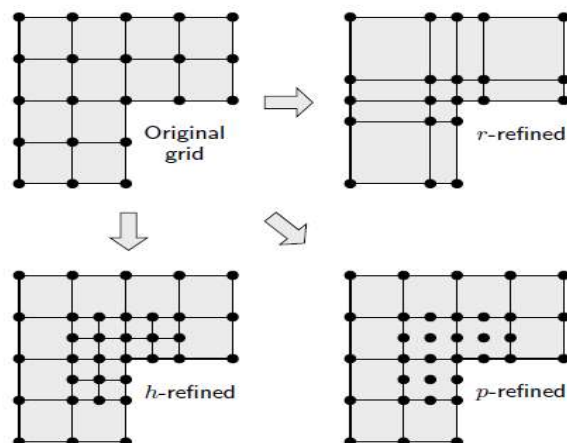


Figura 1.6. Esquematização dos métodos de refinamento (Schäfer, 2006).

1.2.3. Número de pontos de integração

O número de pontos de integração influencia o cálculo da distribuição de tensões ao longo da espessura da chapa e , consequentemente, o cálculo do retorno elástico. Os três esquemas de integração mais comuns são: integração de Gauss, integração combinada de Gauss-Simpson e integração de Lobatto. Existem vários estudos acerca do tipo e número de pontos de integração mínimo a utilizar segundo a espessura, mas os resultados não são consensuais. Por exemplo, (Li et al., 2002) recomendam para a análise de formabilidade, com precisão aceitável, a utilização de 5 a 9 pontos de integração na direção da espessura, em elementos casca. (Banabic, 2010) apresenta um estudo que mostra que com menos de três pontos de integração a simulação do retorno elástico não apresenta bons resultados, e que a partir de cinco pontos de integração os resultados começam a tornar-se estáveis, não existindo assim necessidade de utilizar um número maior, uma vez que o aumento tem um forte impacto no tempo de computação. No entanto, (Li et al., 2002) afirmam que para uma análise de retorno elástico com 1% de erro são necessários até 51 pontos de integração, sendo este valor função da espessura de chapa, do coeficiente de atrito e de outros parâmetros da simulação.

1.2.4. Modelo constitutivo do Material

Os modelos que descrevem o comportamento plástico de materiais metálicos são de dois tipos: os baseados na textura cristalográfica e os designados fenomenológicos (Alves, 2003). Os baseados na textura cristalográfica descrevem o comportamento do material tendo por base um ponto de vista microscópico e são de maior complexidade. Os designados por fenomenológicos descrevem o comportamento do material através de expressões matemáticas, cujos parâmetros são determinados de modo a descrever o comportamento do material. Dentro dos critérios de plasticidade fenomenológicos, distinguem-se os isotrópicos dos anisotrópicos. Os critérios de plasticidade isotrópicos mais conhecidos são: Tresca (1864) e Von Mises (1913). Quanto aos critérios de plasticidade anisotrópicos, destaca-se: Hill (1948, 1979, 1991 e 1993) (Alves, 2003). O critério de plasticidade define a superfície limite de elasticidade, característica de cada material, como se mostra na Figura 1.7.

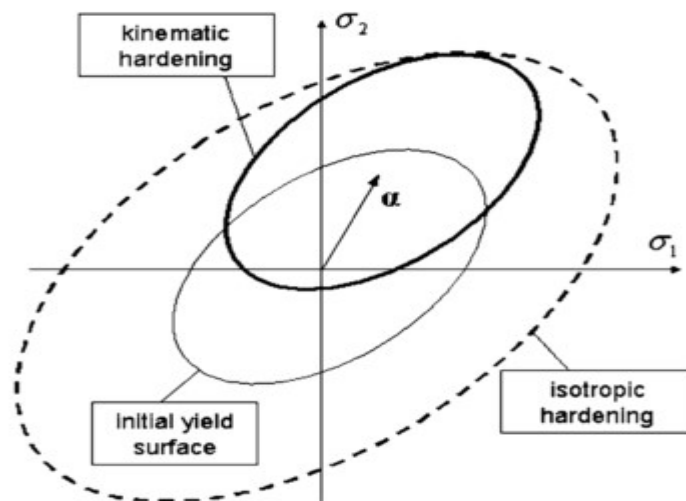


Figura 1.7. Representação da evolução da superfície de plasticidade (Banabic, 2010).

O critério de Hill 1948 (Hill48) é o mais utilizado para descrever o comportamento dos aços. Este critério traduz melhor o comportamento dos materiais metálicos quando estes apresentam um valor médio \bar{r} dos coeficientes de anisotropia superior a 1, sendo \bar{r} definido por:

$$\bar{r} = \frac{1}{4}(r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}), \quad (1.2)$$

em que r_{0° , r_{45° e r_{90° representam o coeficiente de anisotropia determinado no ensaio de tração, com o provete orientado segundo a direção de laminagem e segundo uma direção a

45° e 90° com a de laminagem, respetivamente (Alves, 2003). Em geral, os aços apresentam um valor de \bar{r} superior a 1 ao contrário de, por exemplo, as ligas de alumínio. Uma vez que neste trabalho as peças em estudo são obtidas por estampagem de chapa de aço, este será o critério de plasticidade ao qual será dada maior importância.

O critério de Hill48 é dado por:

$$F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2L\sigma_{yz}^2 + 2M\sigma_{xz}^2 + 2N\sigma_{xy}^2 = Y^2 \quad (1.3)$$

em que σ_{ij} representam as componentes do tensor das tensões de Cauchy no sistema de eixos material, Y é a tensão de escoamento e F, G, H, L, M, N são os parâmetros de anisotropia. Estes parâmetros podem ser obtidos com base nos resultados experimentais de três ensaios de tração uniaxial, em que são usados provetes cortados de uma chapa com orientações distintas, a 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminagem. Estes ensaios permitem determinar as curvas tensão-deformação, bem como os coeficientes de anisotropia, r_0, r_{45}, r_{90} . Nestas circunstâncias, os parâmetros de anisotropia podem ser definidos como:

$$\begin{aligned} F &= \frac{H}{r_{90}}, & G &= \frac{1}{r_0 + 1}, & H &= r_0 \cdot G, \\ N &= \frac{1}{2} \cdot \frac{(r_0 + r_{90}) \cdot (2r_{45} + 1)}{r_{90} \cdot (r_0 + 1)}. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Em chapas metálicas é comum considerar que os parâmetros L e M são iguais a N , admitindo assim tensões limite de elasticidade ao corte idênticas em todos os planos. Alternativamente, pode considera-se que L e M são iguais a 1,5, admitindo assim condições de isotropia. Este critério é o mais utilizado na simulação numérica de processos de estampagem porque: descreve adequadamente a anisotropia inicial da chapa, aplica-se a qualquer estado de tensão e é simples de implementar (Oliveira, 2005). Estes são os motivos que justificam a sua contínua utilização em relação a outros critérios, como o proposto por Hill em 1993, que também permite uma boa descrição do comportamento de matérias com \bar{r} inferior a 1, como se mostra na Figura 1.8.

Devido à deformação e história de carregamento introduzida no material, a superfície de plasticidade irá ter uma evolução de expansão ou translação. Na conformação de chapas metálicas é comum considerar que a superfície de plasticidade se expande isotropicamente (encruamento isotrópico) e se desloca no espaço das tensões (encruamento cinemático), como se mostra na Figura 1.7. Do ponto de vista do modelo constitutivo, a evolução da superfície de plasticidade é descrita recorrendo a leis de encruamento.

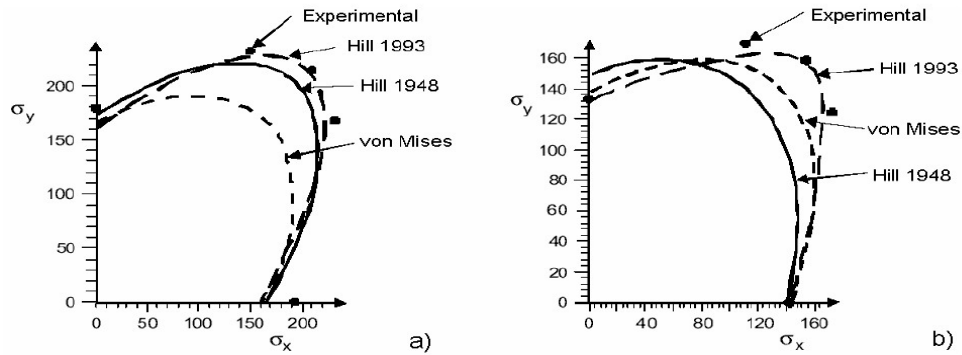


Figura 1.8. Comparação entre os resultados experimentais e as superfícies de plasticidade obtidas a partir dos critérios de von Mises, Hill1948 e Hill 1993 (valores em MPa): a) aço ST1405, b) liga de alumínio Al Mg Si [Banabic 1997]

As leis de encruamento isotrópico provocam a expansão da superfície de plasticidade, cuja geometria inicial é definida pelo critério de plasticidade. Destas leis destacam-se as seguintes

$$\text{Swift} \quad Y = K(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}^p)^n \quad (1.5)$$

$$\text{Voce} \quad Y = Y_0 + (Y_{\text{Sat}} - Y_0)[1 - \exp(-C_Y \bar{\varepsilon}^p)] \quad (1.6)$$

$$\text{Hockett\&Sherby} \quad Y = Y_0 + (Y_{\text{Sat}} - Y_0)[1 - \exp(-C_Y (\bar{\varepsilon}^p)^a)] \quad (1.7)$$

$$\begin{aligned} \text{Swift-} & Y = (1 - \alpha)[K(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}^p)^n] + \\ \text{Hockett\&Sherby} & \alpha\{Y_{\text{Sat}} + (Y_0 - Y_{\text{Sat}}) \exp(-C_Y (\bar{\varepsilon}^p)^a)\} \end{aligned} \quad (1.8)$$

Na definição destas leis de encruamento, $\bar{\varepsilon}^p$ é a deformação plástica equivalente, Y_0 é a tensão limite de elasticidade, K , ε_0 e n são os parâmetros da lei de Swift, sendo que o último é normalmente designado por coeficiente de encruamento. Y_{Sat} e C_Y são parâmetros da lei de Voce e de Hockett&Sherby, sendo que a lei de Voce corresponde ao caso particular da lei de Hockett&Sherby em que o parâmetro a é igual a 1,0. O parâmetro α da lei de Swift-Hockett&Sherby controla a proporção entre as leis, pelo que toma valores entre 0 e 1,0 (Prates, 2014).

A lei de Swift modela melhor o comportamento de materiais que apresentam encruamento sem saturação, como por exemplo os aços. Por outro lado, a lei de Voce tem capacidade de descrever um encruamento com saturação, tendo uma maior utilização na descrição do comportamento de alumínio (Alves, 2003). Muitas vezes recorre-se à combinação de algumas leis de forma a descrever com maior exatidão a curva de encruamento. Nos casos de estudo apresentados neste trabalho a curva de encruamento é modelada pela combinação da lei de Swift com a de Hockett&Sherby, equação (1.8).

Durante o processo de estampagem existem zonas da chapa que sofrem mudanças de trajetória, que podem incluir alterações de um estado de tração para compressão e *vice-versa*. Exemplo destas zonas são o raio de entrada na matriz e os travamentos geométricos, representados na Figura 1.9 e Figura 1.10. Nesta deformação cíclica ocorre o conhecido efeito de Bauschinger, que se caracteriza por uma alteração da tensão de escoamento, após a inversão de trajetória Figura 1.10 c). Os modelos de encruamento isotrópico não preveem com exatidão as tensões provocadas por esta deformação cíclica, porque não têm em conta o efeito de Bauschinger (ver Figura 1.11). Tal como referido anteriormente, a correta previsão do retorno elástico implica uma boa previsão das tensões durante o processo de estampagem. Neste contexto, é necessário que o modelo constitutivo do material tenha em conta este efeito (ESI a)).

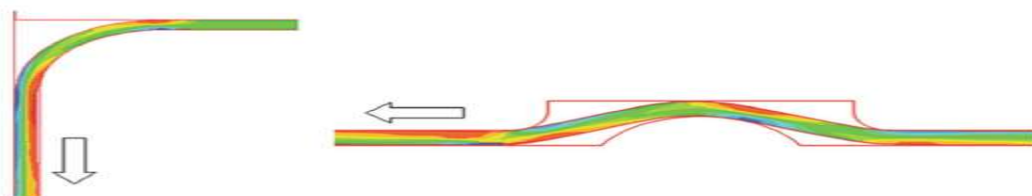


Figura 1.9. Ciclo de tração-compressão do material ao entrar na matriz e ao passar nos travamentos geométricos (Banabic, 2010).

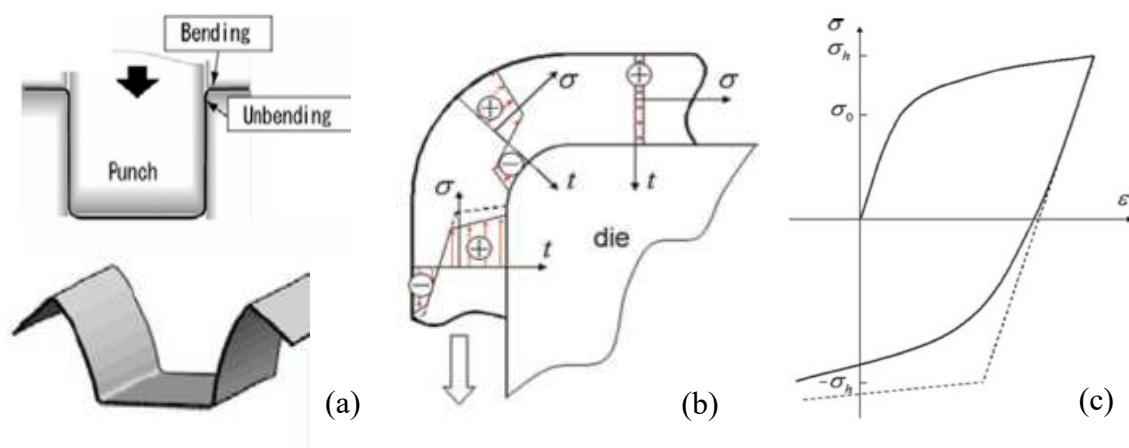


Figura 1.10. a) Zona de flexão e deflexão e consequente retorno elástico de um perfil U; (b) Zona de tração-compressão cíclica do material a passar no raio da matriz e c) representação da curva tensão-deformação com efeito de Bauschinger (linha contínua) e sem (linha a tracejado) (ESI a)), (Banabic, 2010).

As leis de encruamento isotrópico não contemplam qualquer translação da superfície de plasticidade o que não permite descrever o efeito de Bauschinger, associado a mudanças de trajetória como, por exemplo, compressão e tração cíclica. As leis de encruamento cinemático permitem descrever a translação da superfície de plasticidade,

quando existe inversão da trajetória da deformação, como se mostra na Figura 1.11. As leis de encruamento cinemático são combinadas com as leis de encruamento isotrópico, de modo a melhorar a descrição do comportamento mecânico dos materiais, incluindo assim o efeito de Bauschinger. Dentro destas leis, destacam-se a lei de Armstrong-Frederick e a proposta por Yoshida-Uemori, que é o modelo de encruamento cinemático mais utilizado na conformação de chapas metálicas (ESI a)).

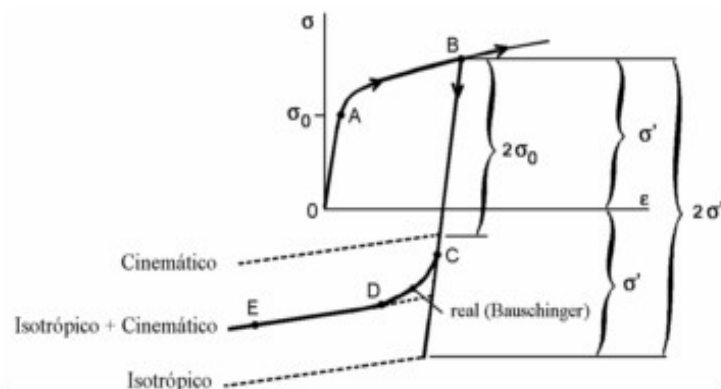


Figura 1.11. Esquemática do efeito de Bauschinger devido à inversão de trajetória de deformação (tração-compressão) (Alves, 2003).

Tal como acontece com o número de pontos de integração na direção da espessura, também o modelo constitutivo a adotar continua a ser alvo de estudo e discussão, uma vez que o modelo de encruamento do material tem grande influência no cálculo do retorno elástico. Na Figura 1.12 observa-se a diferença entre os resultados da simulação obtidos com um modelo de encruamento isotrópico e com um modelo que contempla também o encruamento cinemático, sendo possível observar uma melhor aproximação ao resultado experimental no último caso (Banabic, 2010). No entanto, o autor destaca que nem sempre se observa uma melhoria na previsão do retorno elástico com a utilização de um modelo que combina encruamento isotrópico e cinemático porque, existe outro fator de grande importância, que é a diminuição do módulo de Young com a deformação plástica. A redução do módulo de Young contribui para o aumento do retorno elástico, quando comparado com um valor constante, enquanto a inclusão do encruamento cinemático tende a diminuir o retorno elástico, quando comparado com o obtido apenas com encruamento isotrópico. Assim, a correta previsão do retorno elástico é influenciada por estes dois fatores em simultâneo. Importa referir que a inclusão no modelo constitutivo do encruamento cinemático pode também contribuir para aumentar o nível de retorno elástico previsto, uma

vez que tudo depende do nível de pré-deformação para que ocorrem as mudanças de trajetória.

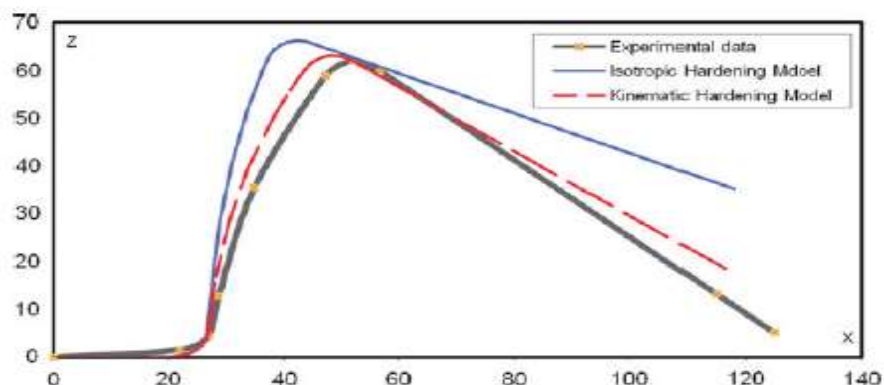


Figura 1.12. Comparação entre o retorno elástico experimental e numérico calculado com um modelo de encruamento isotrópico e um modelo que combina também encruamento cinemático (Banabic, 2010).

A correta previsão do retorno elástico requer uma boa descrição do comportamento elástico do material (Lajarin, 2012), uma vez que está associada à correta previsão da componente elástica da deformação. O comportamento elástico é em geral considerado isotrópico pelo que, normalmente, é descrito por duas constantes: o módulo de Young (E) e o coeficiente de Poisson (ν). No entanto, os resultados experimentais mostram que o valor do módulo de Young tende a diminuir com a percentagem de deformação plástica sofrida pelo material. Estes resultados geram alguma controvérsia, uma vez que o módulo de elasticidade é uma característica física do material, pelo que muitas vezes este efeito é denominado de redução do módulo de elasticidade aparente. Ao considerar um valor constante para o módulo de Young, a previsão de retorno elástico é menor do que obtido considerando a sua redução, como se observa na Figura 1.13. Isto é, para além da recuperação elástica também existe uma recuperação não elástica que contribui para o retorno elástico.

(Alves, J. L. et al. 2006) aborda o assunto da influência do comportamento elástico na previsão do retorno elástico. Segundo estes autores, na simulação de processos de estampagem, é comum considerar-se que o comportamento elástico é isotrópico e constante (independente do trabalho plástico). Na verdade, ambas as simplificações podem estar erradas. Este estudo mostra que a simplificação de considerar o módulo de Young constante tem um impacto na previsão do retorno elástico igual ou superior à influência de desprezar o efeito de Bauschinger.

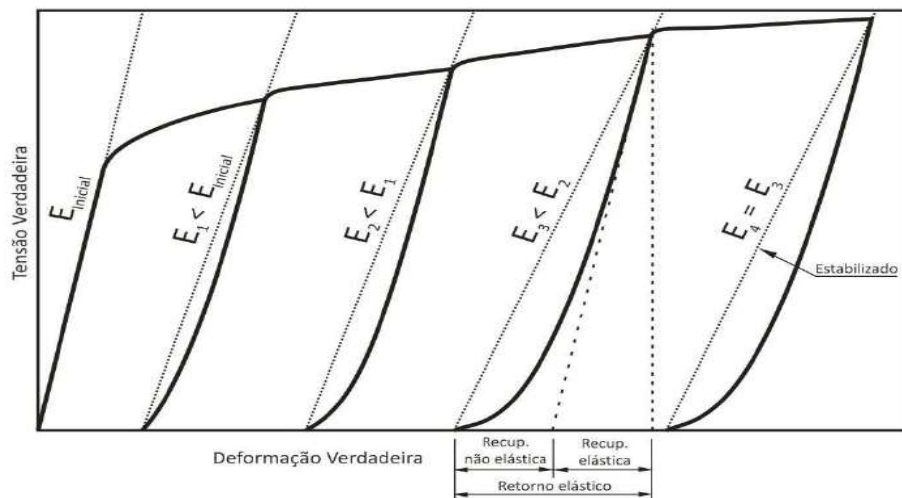


Figura 1.13. Variação do módulo elasticidade com o aumento percentual de deformação plástica (Lajarin, 2012).

1.2.5. Modelação dos travamentos

Em geral, no processo de embutissagem recorre-se a travamentos geométricos (freios de retenção) para controlar o escoamento do material. Os travamentos são geometrias que se criam no pisador e na matriz que permitem aumentar o estiramento do material e evitam a formação de rugas, durante o processo. Os travamentos podem ter geometrias variadas (ver Figura 1.14 (a)) e podem ser simples ou duplos, como se mostra na Figura 1.14 (b). Na simulação numérica do processo pode-se recorrer a um de dois modelos de travamentos: os travamentos geométricos, que correspondem à geometria real (ver Figura 1.15 a)), mas que são computacionalmente caros; e os travamentos lineares que, tal como o nome indica representam a geometria real apenas por uma linha (ver Figura 1.15 b)).

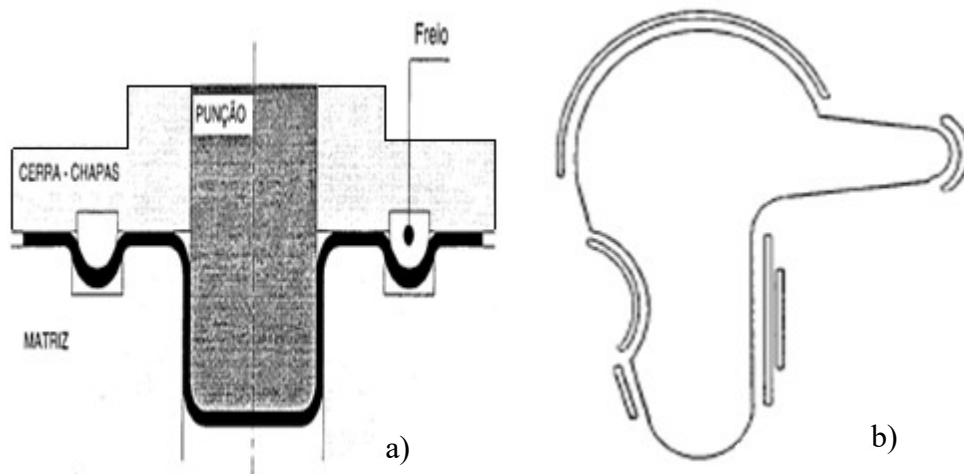


Figura 1.14. a) Representação travamentos geométricos; b) Travamentos simples e duplos (Duarte, 1997).

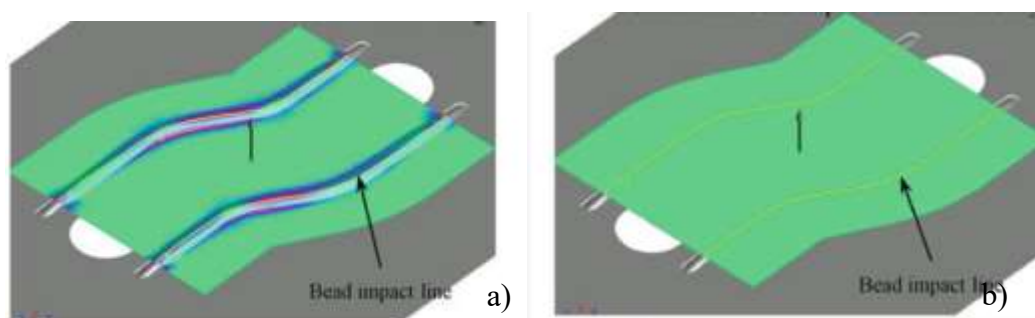


Figura 1.15. a) Travamentos geométricos; b) Travamentos lineares (Banabic, 2010).

Na simulação com os travamentos geométricos as ferramentas utilizadas têm a sua geometria, pelo que existe efetivamente a simulação do material a passar pelo mesmo. Na simulação com travamentos lineares este é representado por uma linha, na qual se impõe uma força de retenção e uma força de abertura da ferramenta. A força de retenção é a que se opõe ao escoamento do material. A força de abertura é a perpendicular ao sentido de escoamento e que é consequência da força necessária para deformar a chapa nos travamentos. Neste caso, é possível considerar outros fatores que serão impostos ao material quando atravessa o travamento linear, como por exemplo: redução de espessura, deformação plástica e encruamento do material.

Os travamentos geométricos permitem reproduzir o comportamento de flexão e deflexão da chapa, que ocorre devido ao escoamento pelo travamento. No entanto, esta metodologia aumenta o tempo de cálculo, devido ao elevado nível de refinamento da malha da chapa, exigido para descrever os raios de curvatura dos travões, desde o instante em que a ferramenta fecha. Frequentemente, o raio do travamento é tão pequeno que poderá pôr-se em causa a veracidade dos resultados numéricos, devido à baixa relação r/t que condiciona a precisão dos resultados obtidos com elementos casca. A simplificação dos travamentos é frequentemente utilizada devido às desvantagens anteriormente mencionadas na utilização de travamentos geométricos. Para além disso, demonstram boa aproximação aos resultados experimentais, em termos de formabilidade e de retorno elástico, tal como mostra na Figura 1.16 (Banabic, 2010).

A medição do escoamento do material para o interior da matriz é muitas vezes utilizado para garantir coerência entre o resultado experimental e o modelo numérico. O contorno da chapa é normalmente designado por *draw-in*. Um *draw-in* igual no resultado experimental e no numérico é um indicador da correta modelação dos travamentos e das forças, pelo que os valores de estiramento e deformação plástica do componente real devem

ser idênticos aos obtidos na simulação. O *draw-in* da simulação numérica é influenciado pela geometria dos travamentos (força de retenção e abertura da ferramenta), força do pisador e parâmetros numéricos, tais como dimensão de elemento e modelo de contacto com atrito.

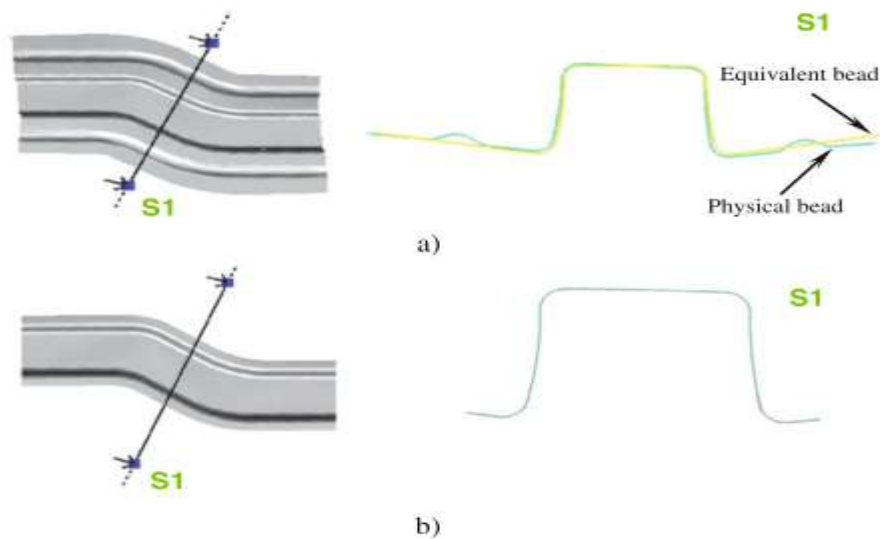


Figura 1.16. Comparação do retorno elástico previsto com o modelo de travamentos físico e um equivalente: a) após a fase de conformação; b) após uma operação de corte (Banabic, 2010).

1.2.6. Contacto com atrito

Na simulação numérica é necessário modelar o contacto que se estabelece entre os corpos. As condições de contacto e atrito são definidas para cada par. O modelo de contacto impede a penetração dos nós do corpo deformável (chapa) no corpo rígido (ferramenta) (Alves, 2003).

O atrito é normalmente descrito pela lei de Coulomb. Quando um elemento de um corpo rígido aplica uma força normal ao nó do corpo deformável, é também aplicada uma força tangencial, com sentido inverso à direção de escorregamento relativo entre os corpos. A força tangencial máxima é dada pela lei de Coulomb

$$F_t = \mu N, \quad (1.9)$$

em que N é a força normal e μ é o coeficiente de atrito, que depende do par de materiais que são usados e do seu acabamento superficial. Existem diferentes algoritmos de resolução do problema de contacto com atrito: penalidade (*penalty*), multiplicadores de Lagrange e Lagrangiano aumentado.

1.2.7. Curva limite de embutissagem (CLE)

Na simulação numérica de processos de estampagem de chapas metálicas é necessário estabelecer um critério de ocorrência de defeitos. Este é normalmente definido com base nas deformações principais no plano da chapa, e permite identificar os níveis para os quais surge uma instabilidade, como a formação de rugas e a ocorrência de estricção. As rugas acontecem quando o estado de tensão dominante é de compressão, o que contribui para uma tendência para o aumento de espessura do material. A estricção ocorre quando o estado de tensão provoca um aumento da área da superfície no plano da chapa, à custa da redução de espessura. O critério de ocorrência de defeitos é representado pela curva limite de embutissagem (CLE). Esta curva é característica de cada material e espessura, e permite avaliar a sua formabilidade, i.e. a sua capacidade de se deformar plasticamente (Butuc, 2004), (Teixeira, 2005). Na simulação numérica a CLE do material é utilizada para fazer a comparação com o valor das deformações principais calculadas para cada elemento finito. Assim, é possível avaliar o estado de deformação de um elemento, em função da sua localização no espaço das deformações, em relação à CLE, como se mostra na Figura 1.17.

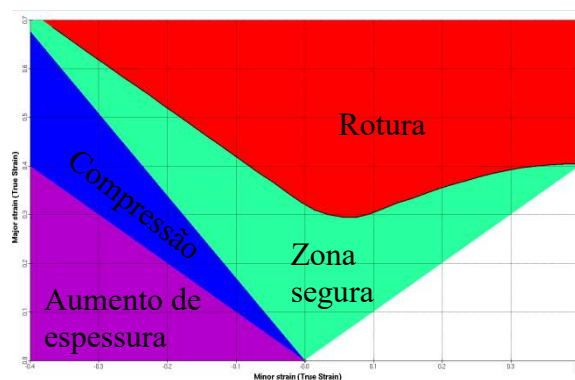


Figura 1.17. CLE no espaço das deformações principais e respetiva análise de formabilidade do material no AutoForm®.

A Figura 1.18 apresenta as cinco trajetórias de deformação características na CLE: corte puro, tração simples, deformação plana, expansão biaxial e tensão biaxial simétrica (WMG). As CLE são obtidas através de vários ensaios experimentais, realizados segundo diferentes estratégias. Podem ser utilizados ensaios como: o de tração uniaxial, o Bulge-test, o Marciniak test, o Nakazima test, o Keeler test e o Hasek test. Nestes ensaios são utilizados provetes com diferentes geometrias, para que seja possível obter diferentes trajetórias de deformação (Banabic, 2010). A Figura 1.19 mostra algumas geometrias de provetes utilizados no ensaio Nakazima.

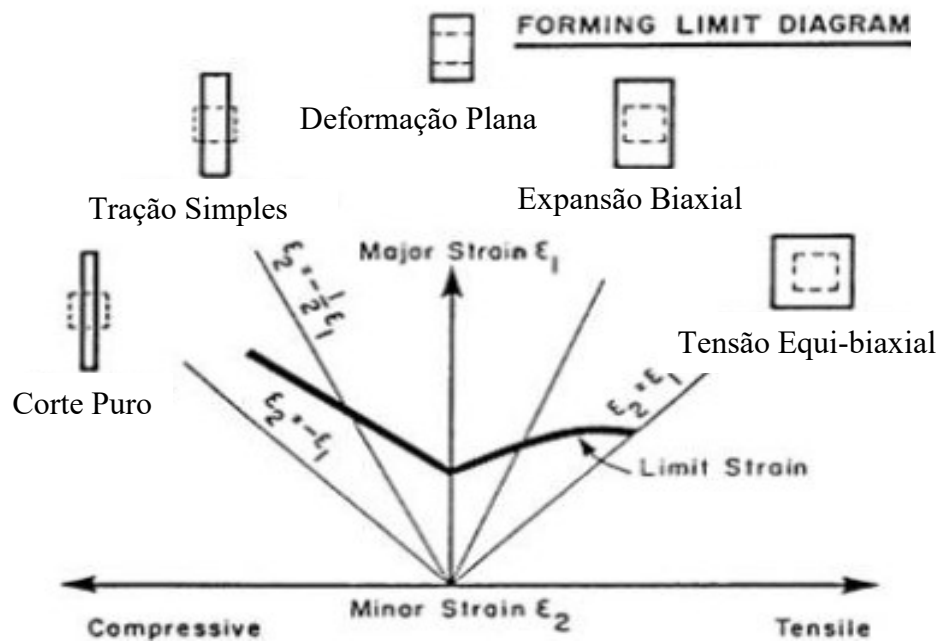


Figura 1.18. Trajetórias características na determinação da CLE, para um material com comportamento isotrópico (adaptada de (WMG)).

A medição experimental da deformação é, geralmente, feita recorrendo à impressão de círculos nos provetes antes do ensaio, como se observa na Figura 1.19. Estes círculos transformam-se em elipses, devido à deformação do material durante o ensaio. As deformações principais no plano são determinadas a partir do eixo maior e menor das elipses, respetivamente (Butuc, 2004). Atualmente, a estratégia de medição recorre a métodos óticos que garantem uma melhor precisão.



Figura 1.19. Provetes utilizados num ensaio de Nakazima com a respetiva grelha de círculos para avaliar as deformações (Safari, Hosseini-pour, & Azodi, 2011).

Estes testes nem sempre permitem uma caracterização completa da curva limite de embutissagem, como se mostra na Figura 1.20, onde também se observa que a CLE é

função do ensaio adotado. Para além disso, a CLE é obtida em trajetórias de deformação linear. No entanto, verifica-se que a curva depende da história de deformação do material, i.e. a formabilidade do material depende da trajetória de deformação a que é submetido. Na Figura 1.21 apresentam-se curvas limite de estampagem obtidas para diferentes trajetórias de deformação complexas. Nesta figura, observa-se, por exemplo, que existe um aumento de formabilidade quando o material é submetido a uma solicitação de tração seguida de expansão biaxial simétrica. Por oposição, verifica-se uma perda de formabilidade quando o material é submetido inicialmente a uma solicitação de expansão biaxial simétrica. Importa realçar que na conformação de chapas metálicas, estas são normalmente submetidas a trajetórias de deformação complexas.

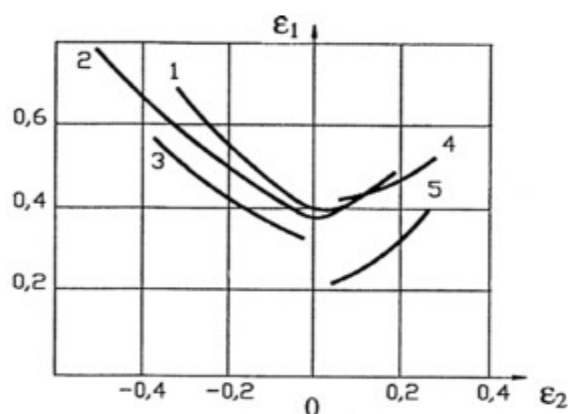


Figura 1.20. Curva limite de estampagem obtida com: 1-Hasek; 2-Nakazima; 3-ensaio de tração uniaxial; 4-Keeler; 5-Bulge-test (Banabic, 2010).

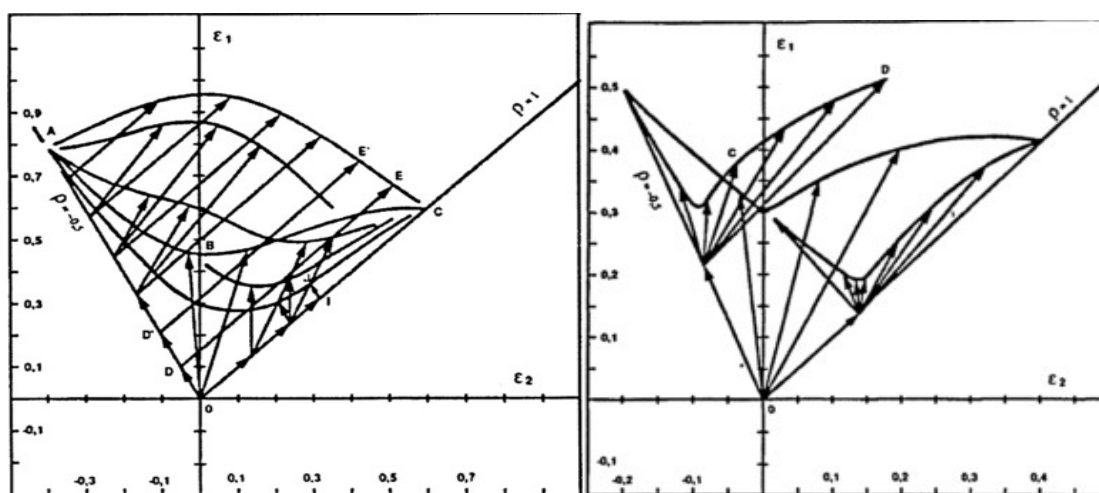


Figura 1.21. Efeito de trajetórias de deformação complexas na curva limite de embutissagem (Butuc, 2004).

1.3. Quantificação do retorno elástico

No final do processo de estampagem multi-etapa é necessário analisar a geometria da peça obtida, e comparar com a peça que queremos obter. Esta comparação geométrica e dimensional tem de ser feita tanto no *try-out* virtual como no *try-out* experimental. Em geral, opta-se por procurar minimizar os desvios dimensionais através de compensações geométricas na ferramenta, sendo que a realização desta compensação em fase de projeto é a solução que comporta menos custos.

No procedimento experimental não é possível comparar o resultado obtido antes e após retorno elástico. Para avaliar o retorno elástico da peça é necessário que esta seja colocada numa mesa de controlo dimensional, onde são medidos os desvios para a peça de referência. No procedimento virtual de simulação numérica é necessário impor condições de fronteira para proceder ao cálculo do retorno elástico. Existem duas estratégias para a definição das condições de fronteira: retorno elástico livre (*free springback*) ou constrangido (*constrained springback*). No retorno elástico livre apenas são definidas as condições de fronteira mínimas para fixar a peça e esta sofre a recuperação elástica com o menor número de constrangimentos possível, como se exemplifica na Figura 1.22. No constrangido as condições de fronteira são definidas de forma a replicar a mesa de controlo dimensional. A peça é fixa e posicionada tal e qual como no procedimento experimental.

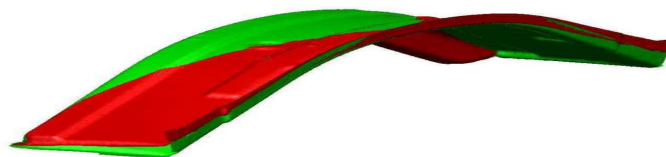


Figura 1.22. Peça antes (verde) e depois (vermelho) do retorno elástico livre.

O retorno elástico constrangido é o mais importante porque é o utilizado para suportar as decisões relativas à compensação da geometria da ferramenta. No entanto, é necessário ter em conta que a força utilizada para fixar a peça nos pontos escolhidos não pode ser elevada. Isto porque, depois do retorno elástico irá existir uma força nos pontos de fixação, que tende a alterar a geometria da peça, pelo que esta força deve ser mínima. Muitas vezes quando se faz a análise de retorno elástico virtual não são utilizados todos os pontos de fixação, para poder perceber melhor o comportamento da peça. Se a peça final obtida na simulação obedecer à tolerância dimensional, quando comparada com a peça de referência, com o mínimo de condições de fronteira também o irá estar quando se aumentar o número de pontos de fixação (Lingbeek, 2003).

2. AUTOFORM® VERSUS PAMSTAMP®

Atualmente, os *softwares* comerciais como o AUTOFORM® e o PAMSTAMP® oferecem soluções integradas para a indústria de ferramentas de conformação de chapa. Por isso, são ferramentas de apoio aos engenheiros nas várias etapas de desenvolvimento das ferramentas de estampagem, permitindo avaliar a viabilidade do método de obtenção da peça final.

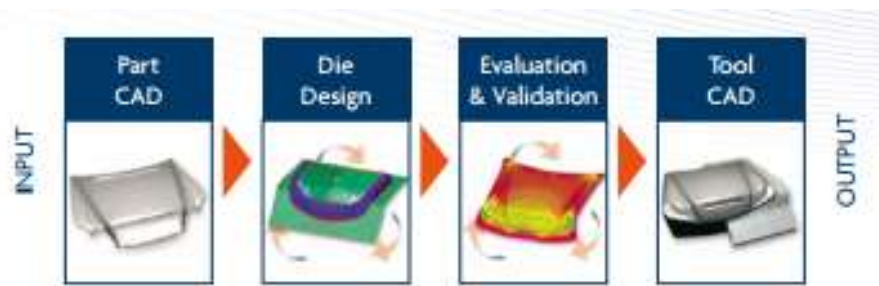


Figura 2.1. Fluxo para a obtenção da geometria CAD de uma ferramenta de estampagem (ESI b)).

Na generalidade, o fluxo para a obtenção da geometria da ferramenta no CAD decorre como representado na Figura 2.1. A base é a definição no CAD da geometria inicial da peça que queremos obter, também designada por peça de referência. Os *softwares* facilitam o desenvolvimento da geometria da ferramenta (*addendum*) e seus contornos principais, de modo a proceder ao planeamento do processo. Em paralelo com o desenvolvimento das ferramentas, estes *softwares* permitem a simulação de todo o processo de conformação, i.e. permitem replicar todo o tipo de operações, quer seja de embutissagem, corte, dobragem, calibração ou medição. Esta análise é realizada tendo em conta fatores e fenómenos que influenciam o *try-out*, como por exemplo: as condições de atrito, travamentos, retorno elástico, gravidade e pinos de posicionamento. Com os resultados da simulação é possível analisar e detetar problemas de formabilidade (*formability*) tais como, rotura, rugas, defeitos cosméticos e desvios dimensionais. Através de um procedimento iterativo é possível otimizar o processo e compensar a geometrias das ferramentas, para eliminar problemas de formabilidade e dimensionais detetados na simulação. Os desvios dimensionais, na sua maioria provocados pelo fenómeno de retorno elástico, são resolvidos através da compensação geométrica da ferramenta. Para resolver problemas de

formabilidade recorre-se à otimização de travamentos e forças associadas ao processo (AutoForm a)), (ESI b)).

Na elaboração deste trabalho foram utilizados os *softwares* de simulação numérica AUTOFORM® R3 e o PAMSTAMP® 2G 2015. Tal como referido no capítulo 1, a diferença de maior destaque entre os dois *softwares* é o método de integração temporal adotado. O AUTOFORM® recorre a um método de integração temporal implícito, associado a uma formulação *quasi*-estática, enquanto o PAMSTAMP® utiliza um método de integração temporal explícito, associado a uma formulação dinâmica. No entanto, o PAMSTAMP® permite e recomenda a utilização de um método implícito para o cálculo das fases de retorno elástico e gravidade. De facto, os programas puramente explícitos não são capazes de simular as fases de retorno elástico de modo fiável (Alves, 2003), devido aos efeitos dinâmicos. O método explícito é condicionalmente estável, pelo que o *time step* deve obedecer à condição de Courant (ver equação (1.1)). No entanto, o PAMSTAMP® permite aumentar o *time step*, de modo a diminuir o tempo de computação ao mesmo tempo que é garantida a precisão dos resultados. Esta funcionalidade, designada por *speed up*, é obtida através do aumento artificial da densidade do material. Segundo indicações do *software*, com esta opção activa o tempo de computação diminuiu cerca de três vezes e obtêm-se resultados fiáveis de redução de espessura, rugas e rotura. Para validação final, é necessário realizar uma simulação sem esta opção activa. É nesta simulação final que deve ser feita a avaliação do retorno elástico (ESI c)).

Nas secções seguintes analisam-se as outras diferenças entre os dois *softwares*, consideradas relevantes no âmbito deste trabalho. Importa realçar que nem sempre é possível conhecer ou divulgar em maior detalhe as opções utilizadas pelos *softwares*, uma vez que são comerciais.

2.1. Discretização da chapa

O PAMSTAMP® oferece a possibilidade de escolha de entre vários tipos de elementos finitos, mas por defeito utiliza o elemento casca de Belytschko-Tsay, que é um elemento quadrado, ou seja, tem quatro nós por elemento. O AutoForm® utiliza um tipo de elemento casca triangular com três nós por elemento.

Segundo (Li et al., 2002), são necessários mais nós de contacto para a simulação de avaliação do retorno elástico do que para a simulação de avaliação de formabilidade. Para

o retorno elástico é necessário existir um nó por cada ângulo de 5° no raio de curvatura da ferramenta. Para a formabilidade é recomendada a existência de um nó por cada ângulo de 10°. A malha da chapa inicial é feita de forma automática pelos *softwares* tendo em conta o tamanho máximo de elemento definido. No AutoForm® a dimensão do elemento inicial é definido pelo utilizador. No PAMSTAMP® a dimensão máxima do elemento da chapa inicial pode também ser definido pelo utilizador ou este pode recorrer ao “*Mesh size Wizard*”, em que a dimensão do elemento inicial é calculada com base na dimensão do elemento final necessário após refinamento. A dimensão de elemento final após refinamento terá de ser capaz de descrever o menor raio da ferramenta, valor que é definido pelo utilizador. O tamanho de elemento máximo inicial da chapa é calculado tomando em consideração o tamanho final do elemento pretendido e o nível de refinamento automático.

Para o cálculo do retorno elástico, o AutoForm® recomenda que sejam usados, na simulação de todas as etapas, 11 pontos de integração por elemento na direção da espessura. O PAMSTAMP® recomenda a utilização de apenas 5 pontos de integração em espessura, e recorre ao método de integração de Gauss. Importa mencionar que, tal como apresentado na secção 1.2.3, a definição do número de pontos de integração não é consensual, e depende do tipo de elemento finito adotado.

No AutoForm® e PAMSTAMP® o refinamento automático adapta a malha nas zonas necessárias com o método *h-refinement* (ver secção 1.2.2), de acordo com parâmetros previamente estabelecidos, tais como: máximo ângulo entre elementos, penetração radial máxima e refinamento máximo. Tanto na utilização de elementos quadrados (PAMSTAMP®) ou triangulares (AutoForm®) cada elemento, sempre que é refinado, é dividido em 4 partes iguais, como se mostra na Figura 2.2. A cada elemento é associado um nível de refinamento. No AutoForm® o nível inicial de refinamento é zero, enquanto no PAMSTAMP® é um. Isto significa que um elemento com nível de refinamento n no AutoForm® refinou n vezes, enquanto no PAMSTAMP® refinou $n - 1$ vezes.



Figura 2.2. Refinamento de um elemento. (a) quadrangular e (b) triangular, de nível n para nível $n+1$.

2.2. Discretização das ferramentas

A malha das ferramentas é realizada automaticamente em ambos os *softwares*, com base na informação de CAD (ficheiro IGES). O PAMSTAMP® recorre a elementos finitos quadrangulares e triangulares, enquanto o AutoForm® apenas recorre a elementos triangulares. Os elementos quadrangulares permitem um melhor controlo do erro geométrico enquanto os triangulares facilitam a geração de malhas automáticas. Os elementos finitos que descrevem as ferramentas podem ser considerados rígidos ou podem apresentar uma rigidez predefinida pelo utilizador. A malha tem uma dimensão característica de elemento máxima e um número mínimo de elementos finitos na descrição das zonas com curvatura da ferramenta, predefinidos pelo utilizador. O número mínimo de elementos para definir o raio da ferramenta é definido pelo “*angle criteria*”. Na Figura 2.3 (a) é representado um esquema em que o “*angle criteria*” é de 10° , i.e. são necessários 9 elementos para definir um arco de 90° na ferramenta. Na Figura 2.3 (b) apresenta-se um detalhe da malha obtida numa zona da ferramenta com curvatura. No PAMSTAMP® é recomendado que se faça uma verificação após a etapa de geração automática de malha. Nesta verificação é possível detetar e corrigir elementos de pequenas dimensões (ver Figura 2.4), que podem criar problemas de contacto.

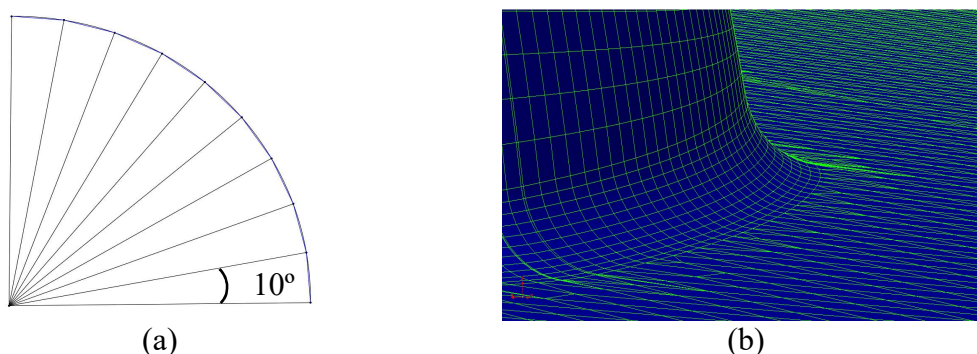


Figura 2.3. Discretização da ferramenta: (a) raio de curvatura definido por 9 elementos no caso em que o “*angle criteria*” é de 10; (b) detalhe da malha numa zona com curvatura no PAMSTAMP®.

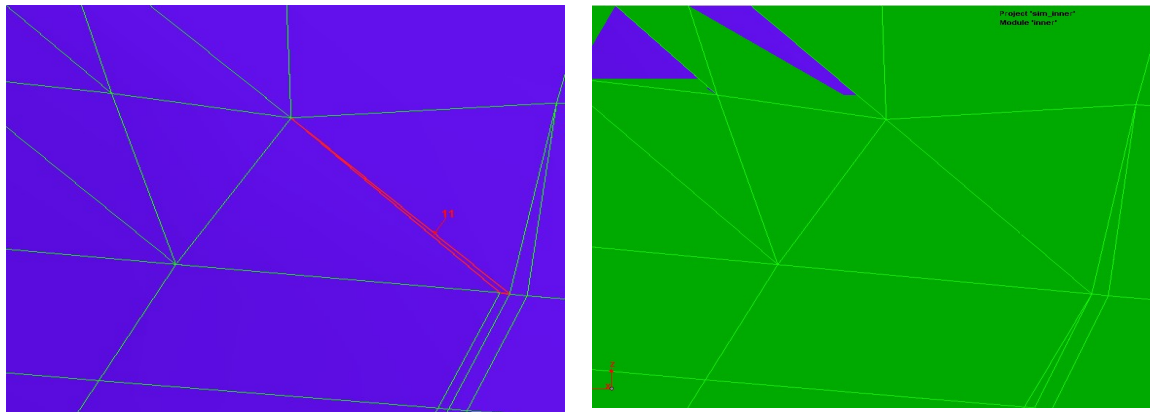


Figura 2.4. Resultado da opção "Mesh and cleanup" do PAMSTAMP®.

2.3. Contacto com atrito

Em relação ao algoritmo de resolução do problema de contato com atrito, o PAMSTAMP® possibilita que a escolha entre a estratégia *penalty* e *accurate* seja feita tendo em conta a qualidade da malha da ferramenta. Se a malha da ferramenta não tiver boa qualidade deverá usar-se o tipo *penalty*, sendo que cabe ao utilizador avaliar a qualidade da malha. Para o cálculo do retorno elástico, recomenda-se que as ferramentas tenham uma malha de boa qualidade e portanto deverá usar-se o tipo *accurate*. O algoritmo de contacto *accurate* proíbe permanentemente que os nós da chapa penetrem a ferramenta (ESI d)).

O AutoForm® utiliza o tipo de contacto *penalty*, que permite pequenas penetrações do objecto deformável (chapa) no objecto rígido (ferramenta). A penetração máxima é definida pelo utilizador através do parâmetro “*max radius penetration*”. Desta forma, garante-se que ocorre um refinamento local da malha sempre que o algoritmo prevê que a penetração da chapa pode ultrapassar o valor de penetração máximo estabelecido.

O coeficiente de atrito também deve ser ajustado tendo em conta o tipo de contacto usado na simulação. Para o caso de aços, o coeficiente de atrito predefinido quando se utiliza o tipo de contacto *accurate* no PAMSTAMP® é de 0,12. No AUTOFORM®, que recorre ao algoritmo de contacto *penalty*, o valor recomendado é de 0,15.

2.4. Travamentos

A utilização de travamentos lineares requer a associação de uma geometria, tal como representado na Figura 2.5, a uma linha de travamento. No AutoForm® e no PAMSTAMP®, a definição das dimensões características do travamento resulta no cálculo

das forças de retenção e de abertura, com base em relações analíticas. O PAMSTAMP® oferece também a possibilidade de definir a geometria do travamento, de modo a realizar a simulação do fecho e do escoamento do material, como apresentado na Figura 2.6. Esta simulação é construída de forma automática e fornece todos os valores necessários para definir a linha de travamento.

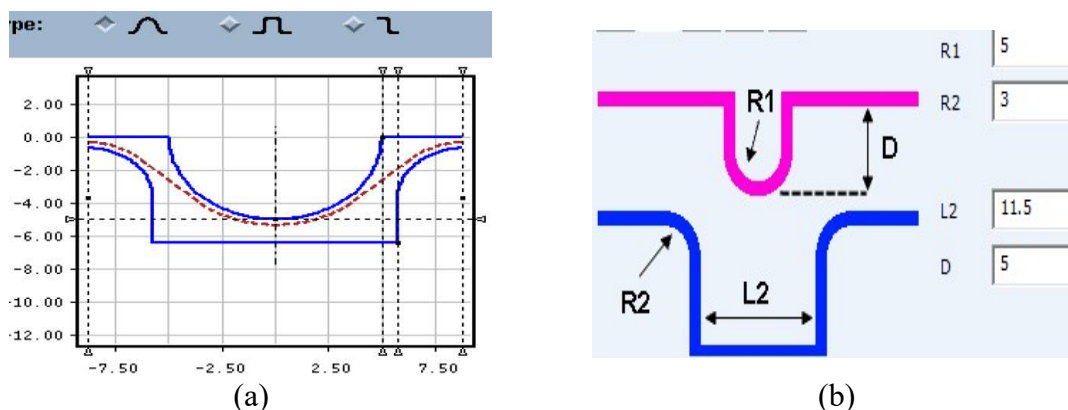


Figura 2.5. Representação geométrica do travamento linear a) no AutoForm®; b) no PAMSTAMP®.

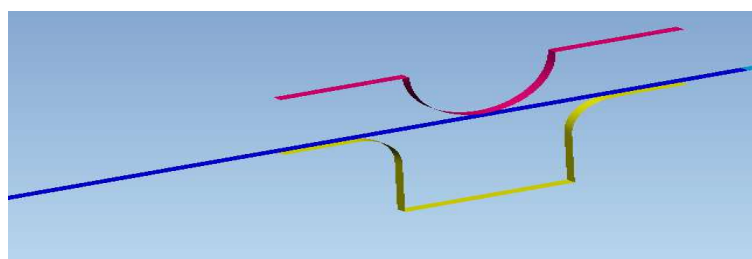


Figura 2.6. Simulação criada pelo PAMSTAMP® para cálculo de constantes a associar ao travamento linear.

2.5. Parâmetros recomendados para o cálculo numérico

Para que os resultados da simulação sejam coerentes com os experimentais é necessário que o modelo adotado represente com rigor o modelo físico, mas também que sejam utilizados parâmetros numéricos apropriados. Existem inúmeros trabalhos que estudam o impacto de variáveis numéricas na precisão dos resultados. No entanto, graças ao número de parâmetros existentes numa simulação e na interação entre eles, não é fácil determinar a combinação que permite obter o melhor compromisso entre tempo de computação e precisão nos resultados, para qualquer tipo de problema. De facto, existem inúmeras fontes de erro. Em geral, os parâmetros que conduzem a resultados mais precisos obrigam a um esforço computacional mais elevado. Por exemplo, um maior refinamento da malha da chapa conduz a uma melhor qualidade dos resultados, mas aumenta o tempo de cálculo. Muitas vezes são utilizadas simplificações que oferecem bons resultados, em tempo

computacionais aceitáveis, mas que apresentam um erro que varia em função do caso de estudo. Na Tabela 2.1 apresenta-se um resumo dos parâmetros numéricos adotados nas simulações realizadas no âmbito deste trabalho, para cada um dos *softwares*. Os casos excepcionais em que não foram estes os parâmetros considerados serão indicados no texto.

Tabela 2.1. Parâmetros utilizados nas simulações numéricas.

	PAMSTAMP®	AutoForm®
Discretização da ferramenta		
Tamanho máximo do elemento	30mm	30mm
“ <i>angle criteria</i> ”	7,5° (pelo menos 12 elementos num ângulo de 90°)	11.25° (pelo menos 8 elementos num ângulo de 90°)
Discretização da chapa		
Tamanho máximo de elemento inicial	Automático (“ <i>Mesh Size Wizard</i> ”) ou ao critério do utilizador.	20mm
Refinamento automático		
Ângulo máximo entre elementos	10°	22.5°
Penetração radial	Não aplicável (<i>accurate</i>)	0.22mm
Nível de refinamento	Automático (“ <i>Mesh Size Wizard</i> ”) ou ao critério do utilizador	6
Rigidez da ferramenta	Corpo rígido (automático)	50 para peças pequenas 30 para peças médias ≤ 10 para peças grandes

3. CASOS DE ESTUDO

Tal como referido na secção 1.1, foram seleccionados dois componentes automóveis como casos de estudo. O primeiro caso de estudo, designado por A), é um painel exterior (Figura 1.1 (a)). O segundo caso de estudo corresponde a um painel interior (Figura 1.1 (b)), designado por B).

No caso de estudo A) são testados os modelos de travamento lineares do AutoForm® e do PAMSTAMP®, através da comparação do *draw-in* previsto com o experimental. A análise de formabilidade do componente é realizada com base no resultado obtido com o modelo de travamento linear que garante maior proximidade ao *draw-in* experimental, de cada um dos *softwares*.

No caso de estudo B) é feita também uma análise comparativa do *draw-in* obtido na operação de embutissagem com os dois *softwares* e o experimental. Os resultados obtidos indicam algumas diferenças no *draw-in*, pelo que foi realizado um procedimento iterativo, de modo a determinar as forças de travamento que permitem garantir um escoamento do material idêntico ao experimental, i.e. para que o escoamento e o estiramento do material sejam semelhantes. Com base no resultado numérico obtido para a operação de embutissagem é feita uma comparação da formabilidade na embutissagem experimental e numérica, para os dois *softwares*. No caso do PAMSTAMP® é analisada a influência da utilização da opção de *speed up* na análise de formabilidade. Uma vez seleccionadas as condições para a operação de embutissagem, é realizada a simulação das restantes operações, nos dois *softwares*. Por último, é efetuada a comparação do retorno elástico obtido com o AutoForm® e o PAMSTAMP® e o experimental.

Todas as simulações apresentadas neste trabalho recorrem a travamentos lineares de forma a simplificar o modelo e reduzir o tempo de cálculo. Segundo (Banabic, 2010), esta simplificação poderá até dar melhores resultados do que a simulação com travamentos geométricos.

Na secção seguinte são apresentados os materiais utilizados em cada uma das peças.

3.1. Materiais

O material utilizado para a produção de ambas as peças é um aço macio de baixo carbono, laminado a frio. Trata-se de um aço com um comportamento ortotrópico, i.e. apresenta três planos de simetria de propriedades, mutuamente ortogonais em cada ponto material (Alves, 2003). A superfície de plasticidade é descrita pelo critério de Hill48 e a curva de encruamento é descrita por uma conjugação das leis isotrópicas de Swift e Hockett-Sherby.

Para o painel exterior é utilizado um aço CR4-GI40/40-E-O¹ com espessura de 0,7 mm, com capacidade extra de estiramento profundo. Segundo a norma europeia tem a designação DX56D+Z. Para o painel interior é utilizado um aço CR3-GI40/40-U-O¹ com espessura de 0,55 mm, com capacidade especial de estiramento profundo. Segundo a norma europeia tem a designação DX54D+Z (EN 10346 (2009)).

A Tabela 3.1 apresenta as principais propriedades dos aços utilizados neste estudo, sendo que σ_{0° , σ_{45° e σ_{90° correspondem às tensões limite de elasticidade em tração, definidas de acordo com o critério de Hill48 e os coeficientes de anisotropia. Na Tabela 3.1 estão também apresentadas as propriedades estabelecidas pela norma europeia EN10346 de 2009 para aços, sendo que σ_c corresponde à tensão limite de elasticidade. As simulações foram realizadas no AUTOFORM® e no PAMSTAMP® considerando as curvas de encruamento e as curvas limite de embutissagem apresentadas na Figura 3.1 e Figura 3.2, respetivamente. De realçar que foram definidas as mesmas propriedades nos dois *softwares*, uma vez que este foi considerado um fator fundamental para a comparação de desempenho.

Tabela 3.1. Propriedades dos aços da peça A) e B) (EN 10346 (2009)).

	E [GPa]	ν	r_{0°	r_{45°	r_{90°	Tensão rotura (R_m) [MPa]	n	σ_{0°	σ_{45°	σ_{90°
								[MPa]		
DX56D	200	0.3	1.7	1.4	2.1	310.3	0.235	160.2	178.6	166.2
EN10346 2009			$r_{90min} = 1.7$ (min.)			[260; 350]	0.2 (min.)	$\sigma_c = [120; 180]$		
DX54D	200	0.3	1.5	1.2	1.9	321.3	0.231	168.4	189.8	176.0
EN10346 2009			$r_{90min} = 1.4$ (min.)			[260; 350]	0.17 (min.)	$\sigma_c = [120; 220]$		

¹ Esta designação corresponde à comumente adotada pela Volkswagen, sendo que: CR designa que existiu laminagem a frio; -GI40/40 define o tipo de revestimento, que neste caso será de Zinco com $40g/m^2$ por lado; -U e -E especificam se a chapa é para uma peça interior ou exterior, respetivamente; -O caracteriza o tipo de tratamento superficial.

De notar que, as propriedades do material utilizado na simulação podem ser diferentes do material em *try-out*. Isto porque em termos experimentais apenas é garantido que o material em utilização tem propriedades compreendidas pelos intervalos de valores definidos pela norma, mas variam de lote para lote. Este fator poderá levar a que mesmo em produção contínua de um determinado componente, a utilização de uma nova bobine de aço pode conduzir a ocorrência de defeitos (rotura), que com o lote anterior não existiam.

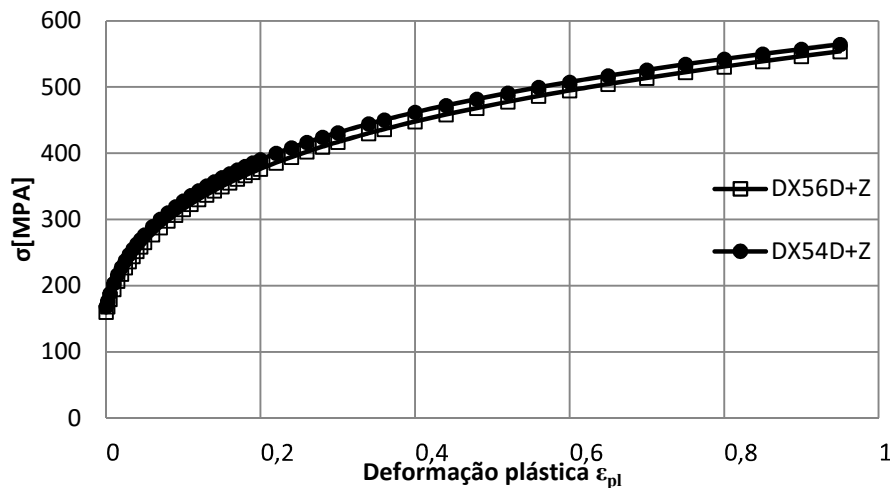


Figura 3.1. Curva tensão-deformação dos materiais em estudo.

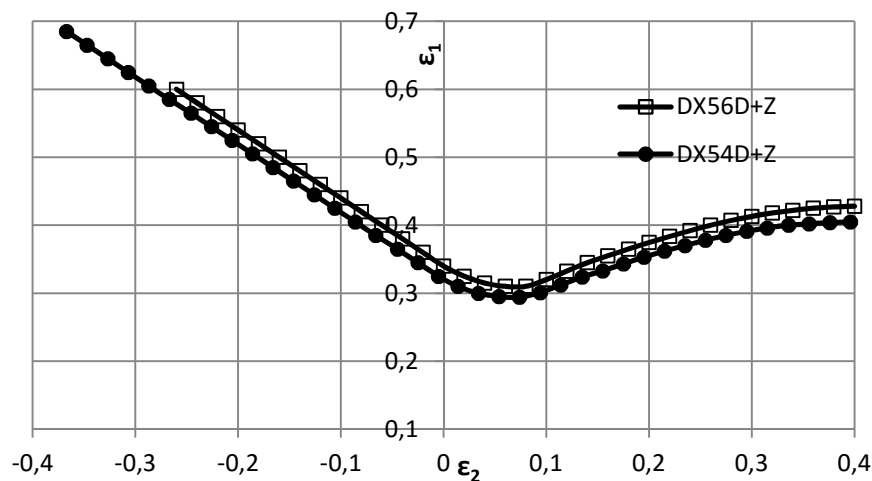


Figura 3.2. Curva limite de embutissagem dos materiais em estudo.

3.2. Caso de estudo A) – painel exterior

Para a obtenção deste componente estampado são necessárias cinco operações: uma operação inicial de embutissagem, seguida de duas operações de corte e duas de dobragem. Para a operação de embutissagem foi prevista inicialmente uma força no pisador

de 2600kN que, juntamente com os travamentos geométricos, opõe-se ao escoamento de material para o interior da matriz. O corte é feito em duas operações devido à geometria da peça e à dimensão da sucata. Nesta operação são produzidos dois furos que permitem o posicionamento da peça nas operações seguintes. Nas duas últimas operações é realizada a dobra de toda a extremidade da peça, de forma a ser possível, no final, montar e fixar a peça exterior (peça A)) na peça interior (peça B)). A dobra é realizada em duas operações porque têm um ângulo negativo em relação à direção principal de trabalho. Por esse motivo, são executadas através de cunhos que trabalham numa direção diferente da direção principal de embutissagem. A Figura 3.3 apresenta a sequência de operações utilizada na produção da peça A), obtida com o *software* AutoForm®.

3.2.1. Travamentos e *draw-in*

A simulação deste caso de estudo foi realizada recorrendo a modelos de travamentos lineares. Como representado na Figura 3.4, a embutissagem desta peça necessita de 5 linhas de travamento, colocadas em posições estratégicas de modo a evitar rugas e aumentar o estiramento do material. Às linhas de travamento identificadas como 1 e 2 correspondem duas geometrias de secção transversal diferente, que são apresentadas na Figura 3.5. A geometria do travamento representado a azul na Figura 3.4 bloqueia por completo o escoamento do material. Estas geometrias foram definidas durante a fase de projeto do componente, na qual foi utilizado o AutoForm®, e foram produzidas nas ferramentas na fase de maquinação.

Na definição do processo de embutissagem deste caso de estudo utilizaram-se geometrias de travamentos iguais no AutoForm® e no PAMSTAMP®, como se mostra na Figura 3.5. A definição destas geometrias permite calcular a força de retenção F_r e a força de abertura F_o , com o auxílio do “*Drawbead generator*” no AutoForm® e da utilização do “*Drawbead wizard*” ou do “*Drawbead calibrator*” no PAMSTAMP®. Os valores obtidos com cada uma destas estratégias são apresentados na Tabela 3.2. Esta tabela realça a diferença nos valores calculados para as forças de retenção e abertura dos travamentos lineares entre o PAMSTAMP® e o AutoForm®.

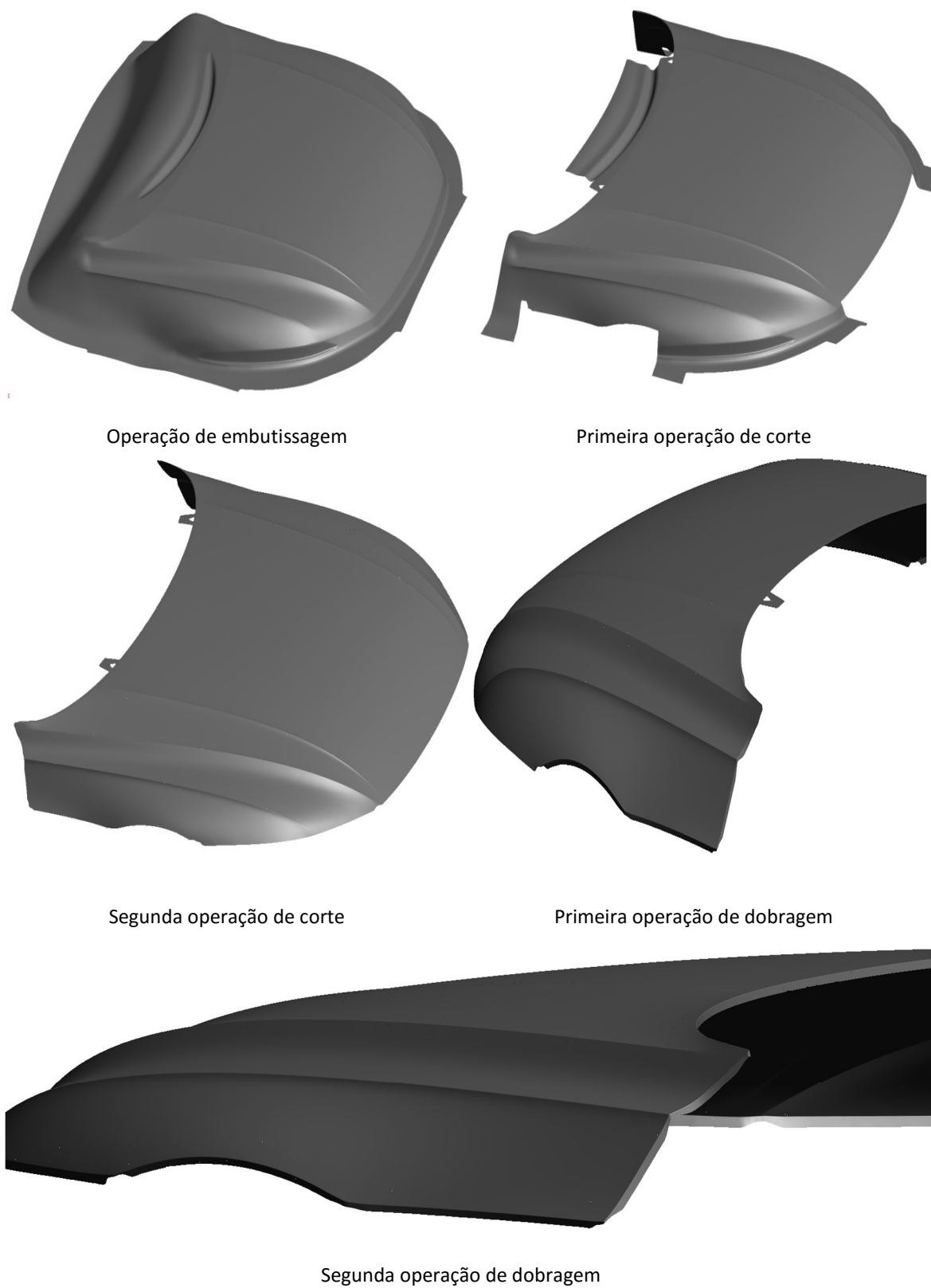


Figura 3.3. Sequência de operações utilizadas no processo de estampagem multi-etapa da peça A).

A diferença entre as forças provenientes do “*Drawbead Generator*” e do “*Drawbead Wizard*” podem ser explicadas pela utilização de equações analíticas distintas, mas também pelo facto de o coeficiente de atrito ser diferente nos dois *softwares*. No entanto, importa realçar que o maior valor de coeficiente de atrito (0,15) é utilizado no AutoForm®, pelo que seria expectável obter um valor maior para a força de retenção neste caso, o que não se verifica. Para o caso do “*Drawbead Calibrator*”, disponível no PAMSTAMP®, as forças são obtidas através de uma simulação (ver Figura 2.6), pelo que estas são dependentes do modelo constitutivo adotado para o material e de parâmetros numéricos.

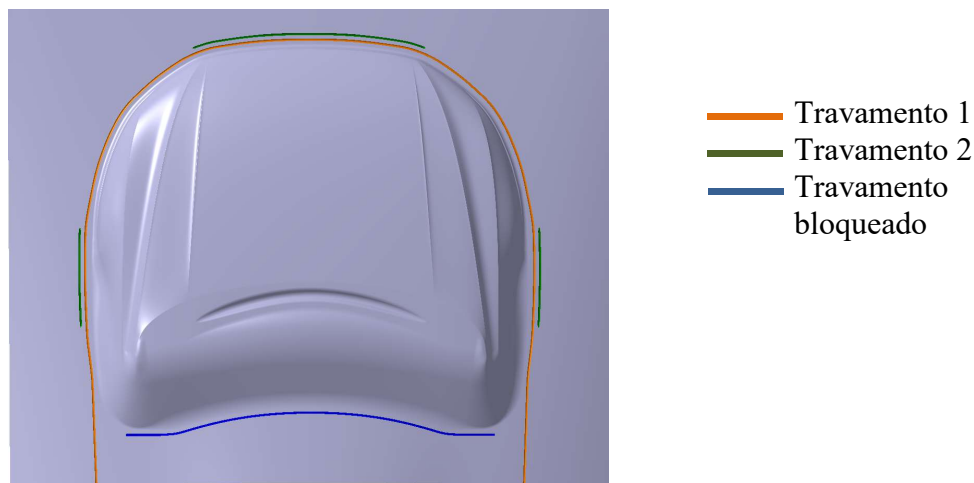


Figura 3.4. Matriz utilizada na operação de embutissagem da peça A) com travamentos lineares.

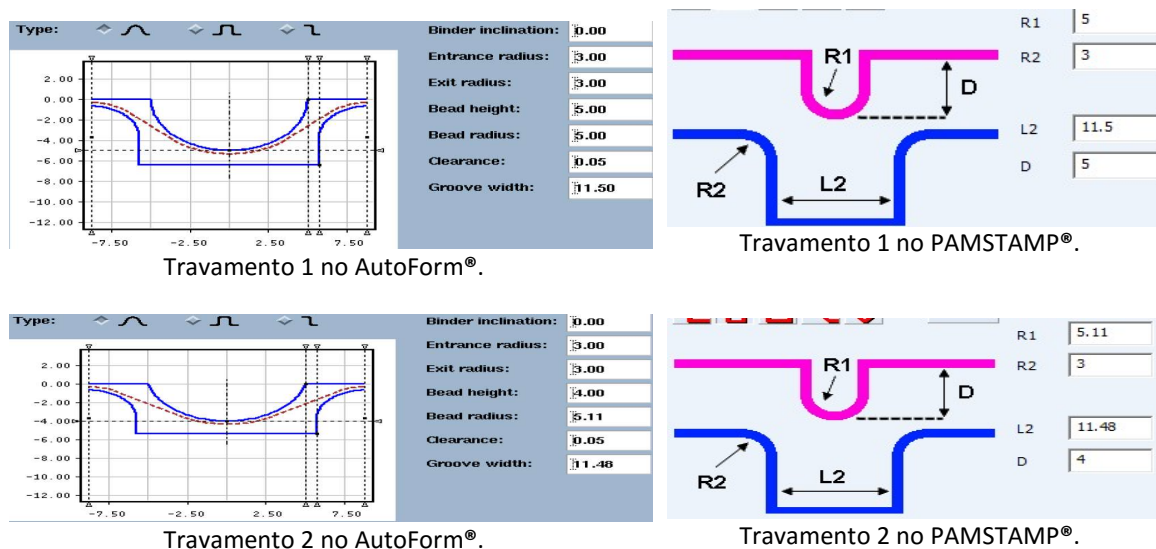


Figura 3.5. Geometria das secções transversais dos travamentos utilizados na matriz e pisador da operação de embutissagem da peça A).

Tabela 3.2. Forças associadas aos travamentos utilizados na peça A), segundo o AutoForm® e o PAMSTAMP®

[N/mm]		AutoForm® “Drawbead Generator”	PAMSTAMP® “Drawbead Wizard”	PAMSTAMP® “Drawbead Calibrator”
Travamento 1	F_r	45.1	65.3318	101.284
	F_o	41.9	50.2206	136.125
Travamento 2	F_r	26.1	50.4111	93.4078
	F_o	25.5	36.2047	136.98
Travamento 3	F_r	Bloqueado		

Foram realizadas simulações considerando as forças de retenção e abertura apresentadas na Tabela 3.2, de modo a avaliar qual a estratégia que permite uma melhor aproximação ao resultado experimental. Na Figura 3.6 apresenta-se o *draw-in* obtido com a utilização de cada uma das estratégias para a obtenção de forças e a comparação com alguns pontos experimentais de uma peça de *try-out*. Verifica-se que no AutoForm® as forças associadas aos travamentos lineares permitiram obter um *draw-in* idêntico ao experimental. No PAMSTAMP®, a utilização do “Drawbead Wizard” resulta numa força que conduz a um escoamento excessivo de material, principalmente na zona dianteira, na qual se nota que a chapa “escapa” ao travamento duplo existente. De facto, apesar de o “Drawbead Wizard” apresentar valores superiores para a força de retenção, também a força de abertura é maior, o que pode justificar que o efeito combinado com o pisador é insuficiente para obter um *draw-in* semelhante ao experimental e ao do AutoForm®. No entanto, a utilização da opção “Drawbead Calibrator” conduz a estimativas de força bastante diferentes das obtidas com o “Drawbead Wizard”, mas que permite que a entrada de material se aproxime dos valores obtidos no *try-out*. Assim, importa destacar a grande diferença de forças de travamento obtidas para o AutoForm® e o PAMSTAMP® que permitem obter *draw-in* idêntico.

A diferença entre forças de abertura geradas pelos travamentos provoca inevitavelmente que as forças de contacto entre a chapa, a matriz e o pisador sejam diferentes para o PAMSTAMP® e o AutoForm®. Assim, seria necessário aumentar a força do pisador no PAMSTAMP® para que a pressão entre a chapa e o pisador e a matriz fosse igual nos dois *softwares*. No entanto, a alteração da força do pisador irá resultar na alteração do *draw-in*. Os resultados apresentados nesta secção correspondem a uma força do pisador de 2600 kN.

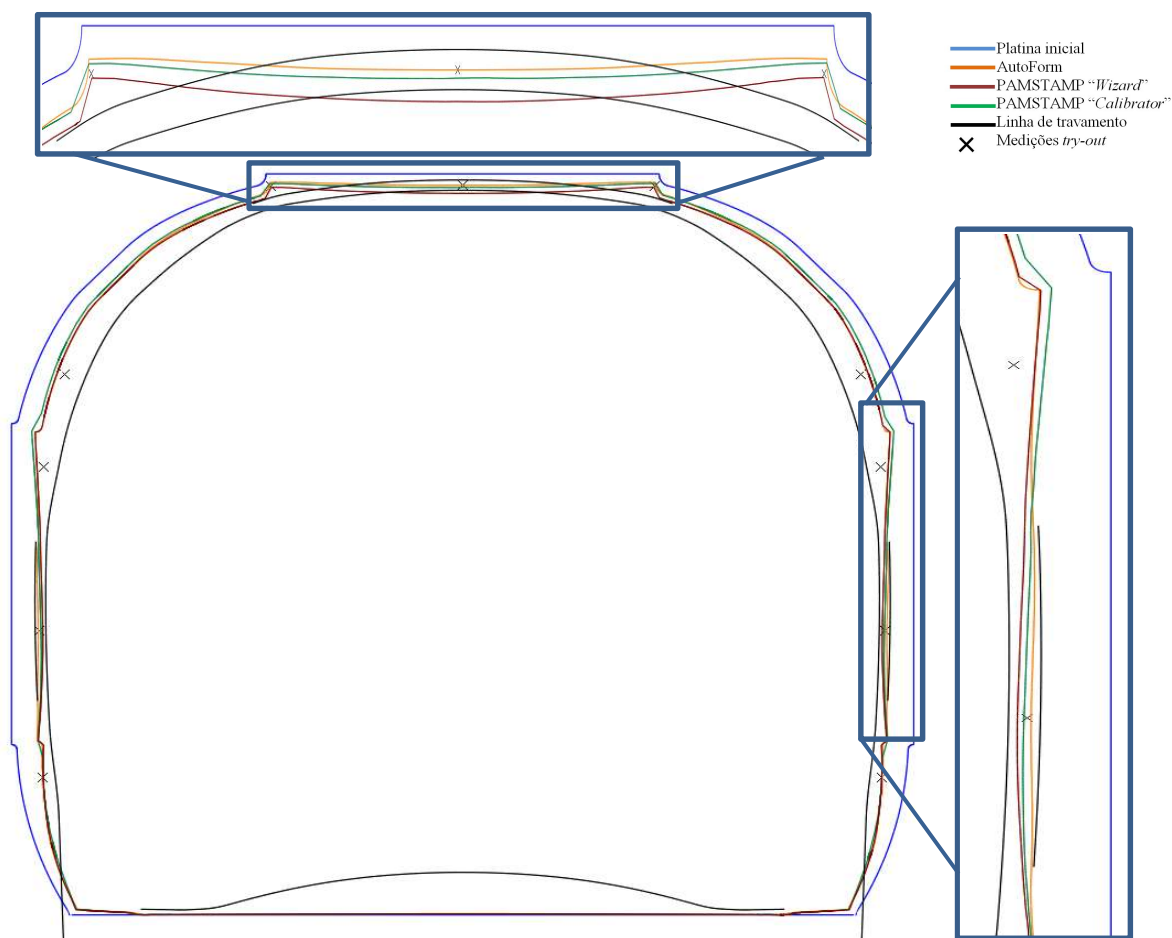


Figura 3.6. Comparação do *draw-in* previsto com as forças para o travamento linear fornecidas pelo “*Drawbead Generator*”, “*Drawbead Wizard*” e “*Drawbead Calibrator*” com o resultado experimental obtido no *try-out* da peça A).

3.2.2. Operação de embutissagem

Esta peça apresenta uma embutissagem crítica devido às linhas de *design*, que exigem uma superfície em quina viva no punção, que constitui um local preferencial para a ocorrência de rotura. Apesar de ter sido realizado o *try-out* virtual do componente, no *try-out* experimental não foi possível obter uma peça sem defeitos, com as condições inicialmente definidas com base nos resultados do AutoForm®. A Figura 3.7 apresenta o detalhe das fissuras ocorridas experimentalmente, para uma força do pisador de 2600 kN. No *try-out* experimental este problema de ocorrência de rotura foi ultrapassado com a diminuição da força do pisador, para 2300 kN, o que permitiu maior escoamento de material para o interior da matriz.

As simulações realizadas no AutoForm® e no PAMSTAMP® recorreram aos parâmetros apresentados na Tabela 2.1 e Tabela 3.3. Em todas as simulações foram

utilizadas as mesmas ferramentas e o mesmo material (Figura 3.1). Na geometria do punção existe uma diferença, uma vez que o PAMSTAMP® permite a definição de superfícies em quina viva, enquanto no AutoForm® as quinas vivas foram convertidas em raios de 0,1mm. Isto porque o AutoForm não permite utilizar superfícies em quina viva, para zonas com escorregamento de material. As forças de travamento utilizadas foram as que permitem obter uma melhor aproximação com o *draw-in* experimental.

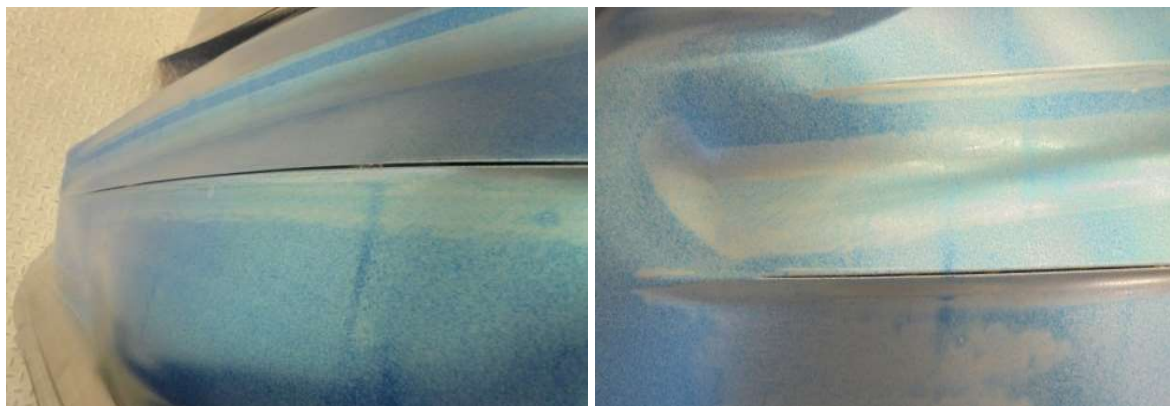


Figura 3.7. Fissuras nas linhas de detalhe do *design* do painel exterior, previstas no *try-out* da operação de embutissagem com uma força no pisador de 2600 kN.

Tabela 3.3. Parâmetros de discretização da chapa utilizados nas simulações da peça A).

	AutoForm®	PAMSTAMP®
Tamanho máximo inicial do elemento	20 mm	15 mm
Refinamento	Nível 6 e Nível 7; Refina 6 e 7 vezes, respetivamente.	Nível 6; Refina 5 vezes.

Nas primeiras simulações realizadas utilizou-se a força do pisador de 2600 kN, de acordo com o método inicialmente proposto. Na Figura 3.8 é apresentado o *draw-in* obtido com cada um dos *softwares* e alguns pontos característicos retirados do *try-out* experimental. Nesta mesma figura é apresentada a distância entre os pontos medidos no *try-out* e o *draw-in* previsto com cada um dos *softwares*. Globalmente, o AutoForm® prevê diferenças menores.

A Figura 3.9 apresenta o resultado obtido para a operação de embutissagem com o AutoForm®, sendo possível observar da análise de formabilidade a existência de algum

risco de ocorrer rotura. A Figura 3.10 apresenta o resultado obtido com o PAMSTAMP®, sendo possível observar a ocorrência de fissuras, tal como no resultado experimental (ver Figura 3.7). Assim, foi realizada uma outra simulação no AutoForm®, com o mesmo tamanho inicial do elemento finito na chapa, mas com um nível de refinamento automático de sete. O resultado obtido é apresentado na Figura 3.11, sendo possível observar que com este nível de refinamento o AutoForm® também prevê de forma inequívoca a ocorrência de rotura nas linhas *design*.

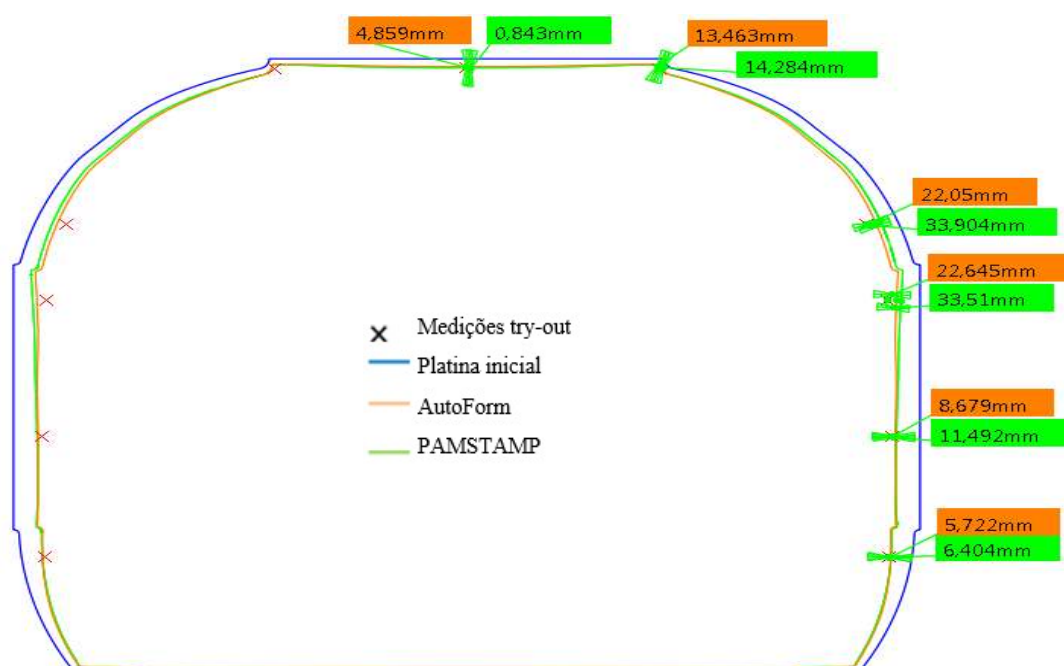


Figura 3.8. Comparação do *draw-in* entre: PAMSTAMP®, AutoForm® e *try-out*, para a operação de embutissagem da peça A), com uma força de pisador de 2600 kN.

Uma vez que a simulação no AutoForm® e no PAMSTAMP® apresentam fissuras, procedeu-se à alteração da força do pisador para 2300kN, de forma proceder à comparação com os resultados do *try-out* experimental. Com esta nova força no pisador, as simulações tanto no AutoForm® (refinamento 7) como no PAMSTAMP® continuam a prever rotura, nas linhas de *design*, como se mostra na Figura 3.12 e Figura 3.13, respetivamente. No entanto, o *try-out* experimental permite obter componentes sem defeitos. Esta discrepância entre os resultados numéricos e experimentais pode ser explicada com base na Figura 3.14, onde é perceptível que no *try-out* existe maior escoamento de material nas zonas laterais dianteiras. Por outro, na ferramenta utilizada no *try-out* experimental a superfície em quina viva foi transformada num pequeno raio. Importa realçar que, de acordo

com o resultado da simulação, a redução da força do pisador irá provocar a existência de zonas com estiramento insuficiente (ver Figura 3.12 e Figura 3.13), o que pode inviabilizar a validação do método.

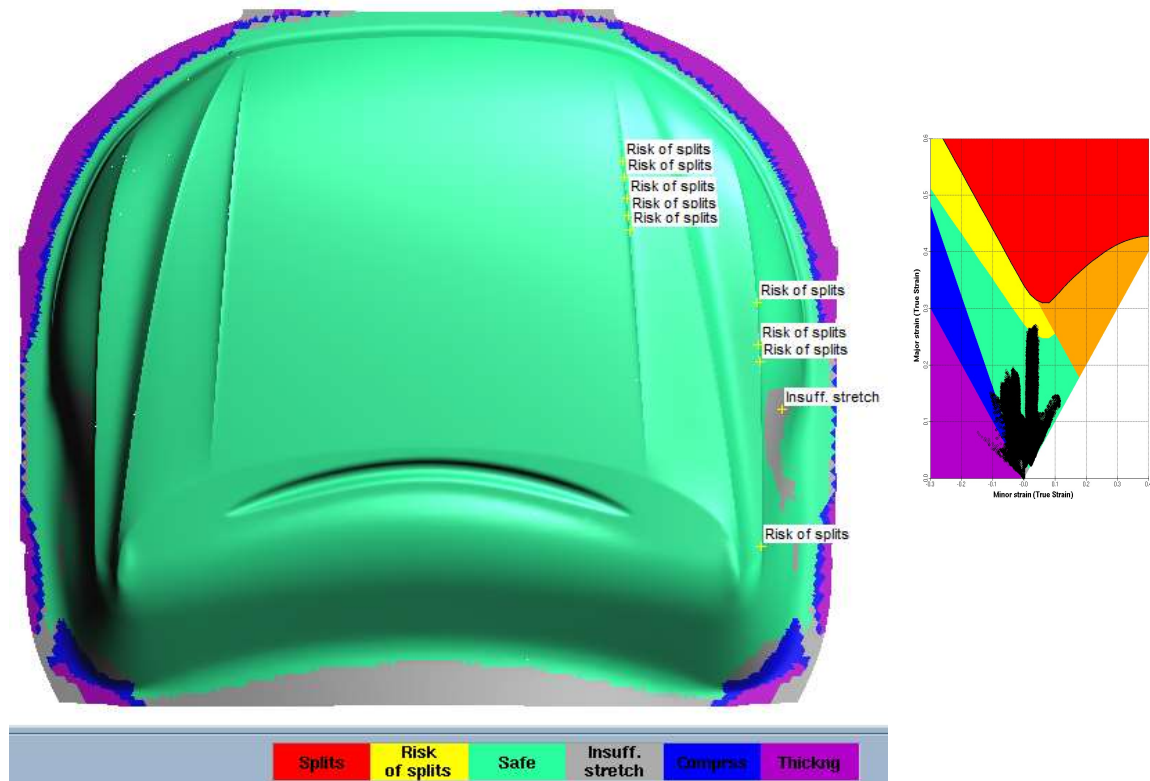


Figura 3.9. Resultado da simulação da operação de embutissagem da peça A) previsto pelo AutoForm®. Refinamento automático nível 6, superfície com raio de 0,1 mm e força do pisador 2600 kN.

De modo a aproximar os resultados numéricos do experimental, i.e. deixar de prever a ocorrência de problema de fissuras nas simulações, seria necessário alterar os travamentos e as ferramentas, de acordo com as alterações introduzidas no *try-out*. Este passo não foi realizado porque a introdução de alterações na ferramenta implica a perda de controlo da comparação inicialmente prevista.

Por último, não foi realizado o estudo do retorno elástico desta peça porque, para além de a peça apresentar fissuras, não é possível realizar a medição do retorno elástico constrangido no AutoForm®. Isto porque, a medição da peça real é feita no dispositivo apresentado na Figura 3.15, em que a peça assenta numa superfície. A versão utilizada do *software* AutoForm® não permite simular o retorno elástico constrangido nesta condição, uma vez que apenas permite a utilização de *clamps* que fixam pontos. O PAMSTAMP e versões mais recentes do AutoForm® permitem este tipo de medição.

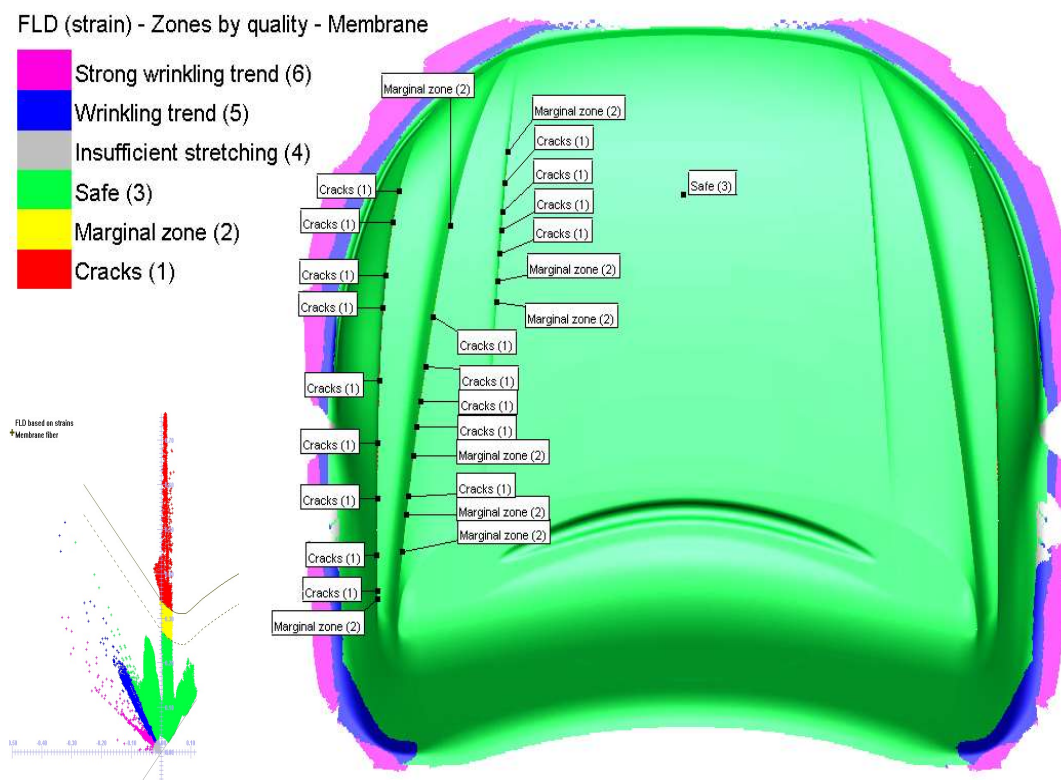
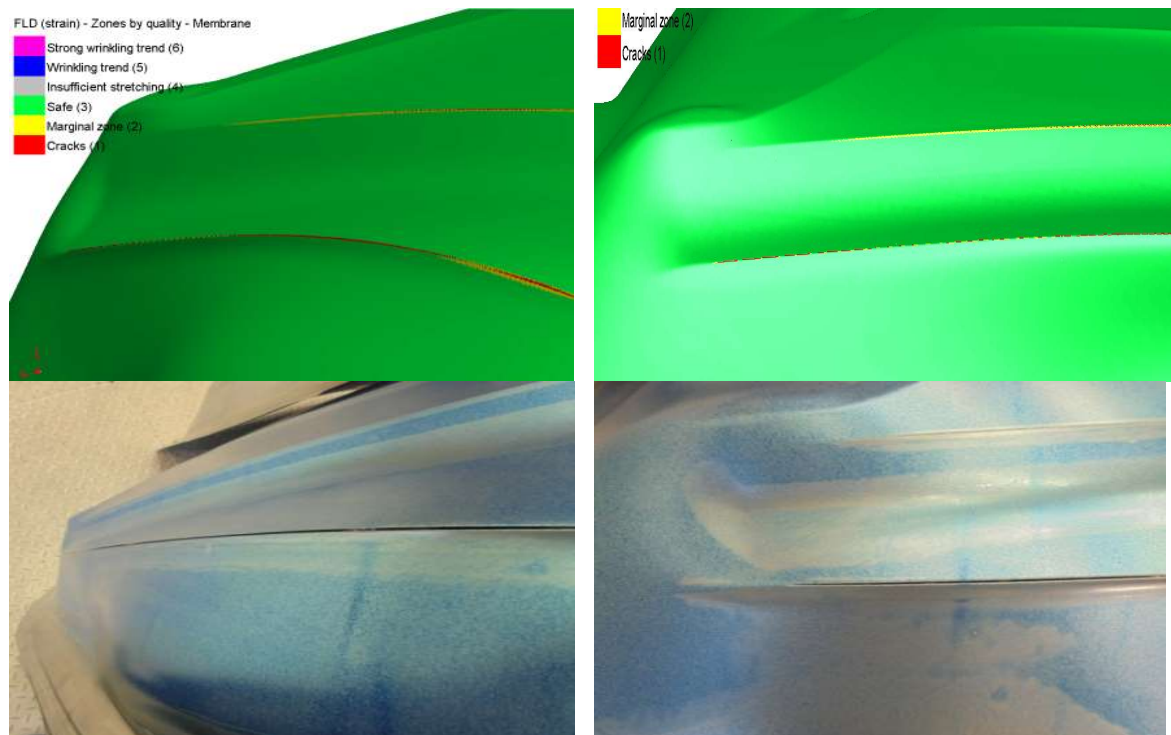


Figura 3.10. Resultado da simulação da operação de embutissagem da peça A) previsto pelo PAMSTAMP®. Superfície em quina viva e força do pisador 2600 kN.

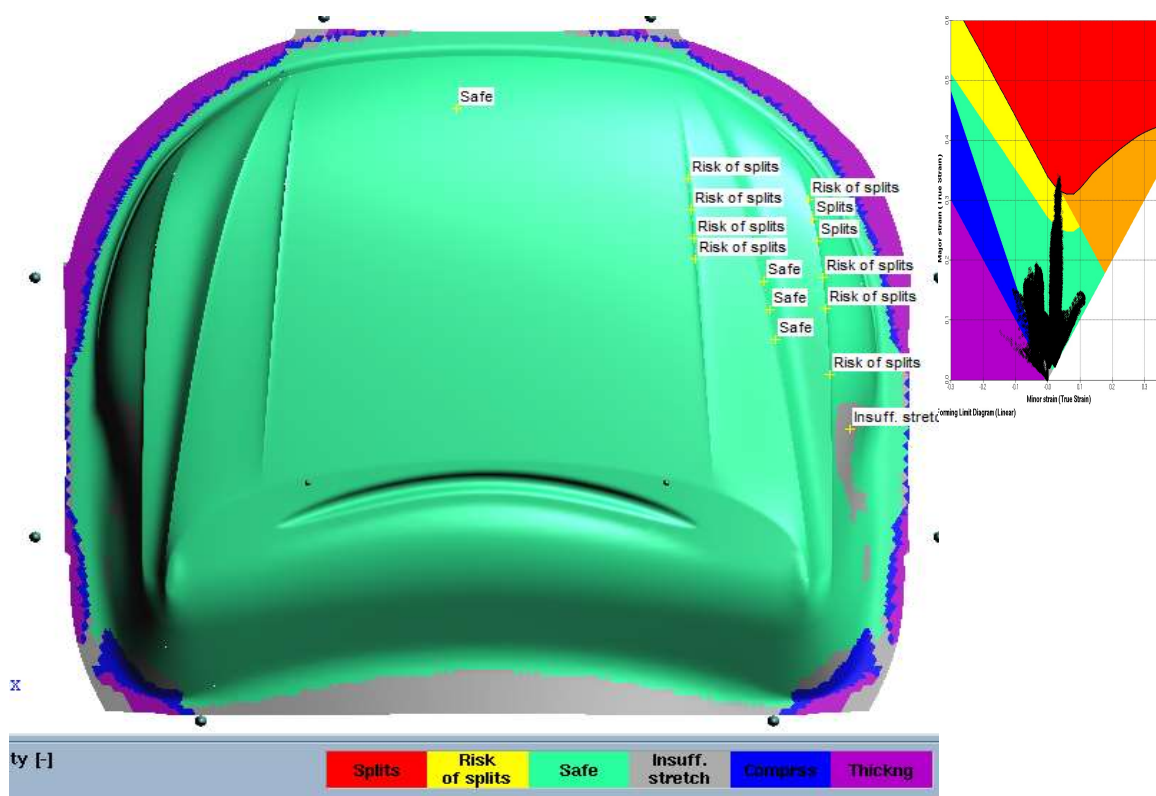


Figura 3.11. Resultado da simulação da operação de embutissagem da peça A) previsto pelo AutoForm®. Refinamento automático nível 7, superfície com raio de 0,1 mm e força do pisador 2600 kN.

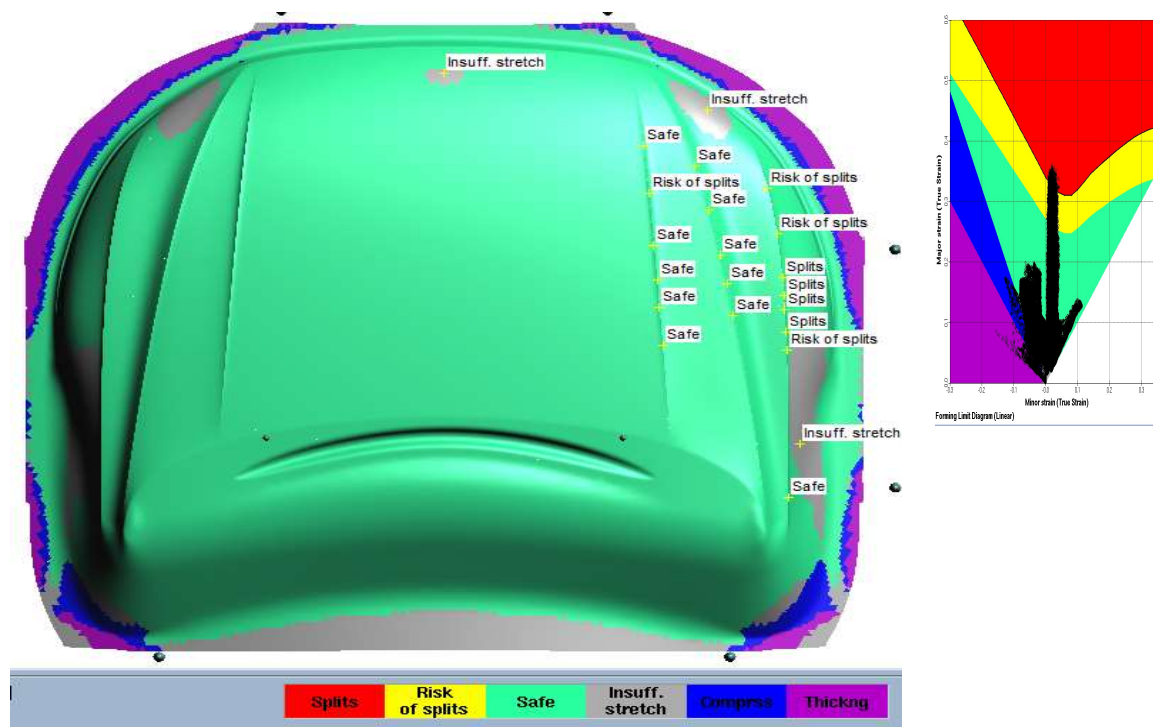


Figura 3.12. Resultado da simulação da operação de embutissagem da peça A) previsto pelo AutoForm®. Refinamento automático nível 7, superfície com raio de 0,1 mm e força do pisador 2300 kN.

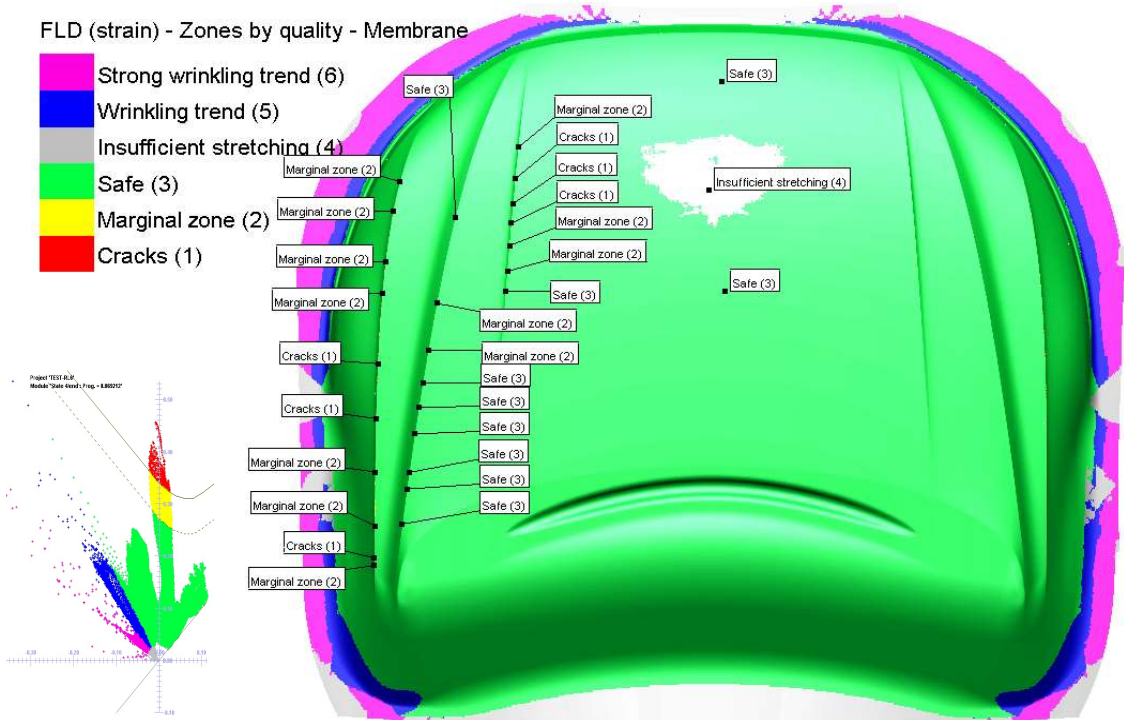


Figura 3.13. Resultado da simulação da operação de embutissagem da peça A) previsto pelo PAMSTAMP®. Superfície em quina viva e força do pisador 2300 kN.

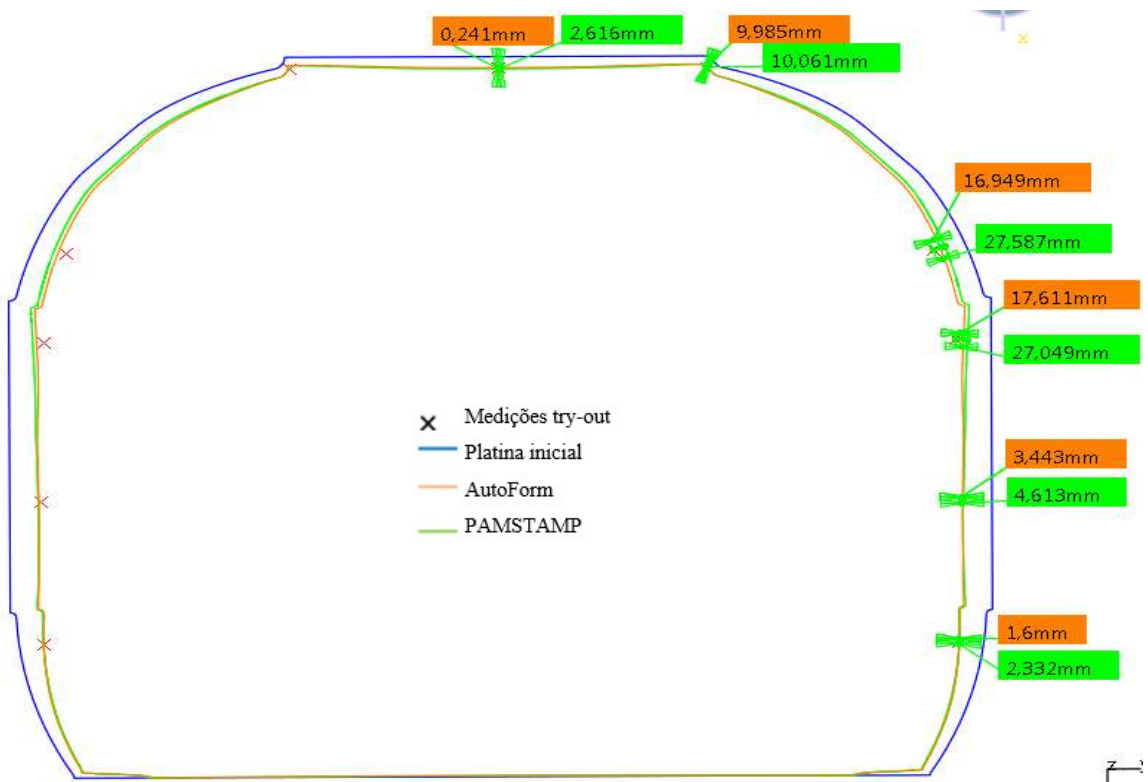


Figura 3.14. Comparação do draw-in entre: PAMSTAMP®, AutoForm® e try-out, para a operação de embutissagem da peça A), com uma força de pisador de 2300 kN.



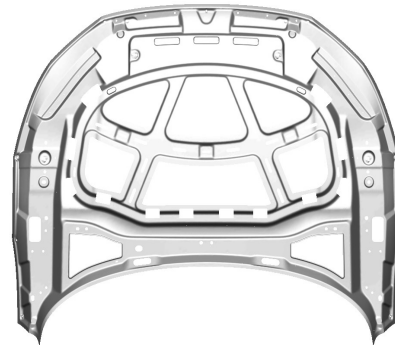
Figura 3.15. Dispositivo de medição da peça A) – painel exterior.

3.3. Caso de estudo B)

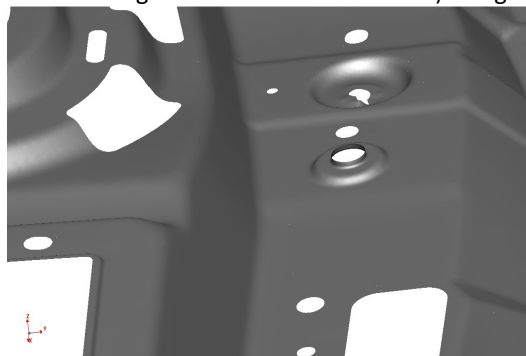
O componente B) é obtido através de quatro operações. A primeira operação é de embutissagem, onde é dada a forma principal da peça e se obtém o resultado apresentado na Figura 3.16 a). Nesta primeira operação é necessária uma força no pisador de 2300 kN. A segunda e a terceira operação são de corte obtendo-se no final a peça apresentada na Figura 3.16 b). Por último, é realizada uma operação de calibração, onde também é feita uma pequena gola num furo, como apresentado também na Figura 3.16 c). Este furo serve de posicionamento para o controlo dimensional da peça.



a) Operação de embutissagem



b) Segunda operação de corte



c) Operação de calibração

Figura 3.16. Detalhes da sequência de operações utilizadas no processo de estampagem multi-etapa da peça B).

3.3.1. Travamentos e *draw-in*

A estratégia de estudo para este componente seguiu os mesmos passos utilizados no caso de estudo anterior. A posição dos travamentos lineares utilizados na operação de embutissagem é apresentada na Figura 3.17. Foram definidas as geometrias transversais dos dois tipos de travamentos lineares nos *softwares*, tal como representado na Figura 3.18. As forças de retenção e de abertura, calculadas pelos *softwares*, são apresentadas na Tabela 3.4. Tal como no primeiro caso de estudo, também neste caso é possível observar uma grande diferença entre as forças fornecidas pelo “*Drawbead Generator*”, “*Drawbead Wizard*” e pelo “*Drawbead Calibrator*”. Assim, também neste caso observam-se diferenças de *draw-in* do material entre os dois *softwares*, como se mostra na Figura 3.19. De facto, neste caso o *draw-in* previsto pelo AutoForm® é semelhante ao experimental. Com o PAMSTAMP®, quer seja utilizado o “*Drawbead Wizard*” ou o “*Drawbead Calibrator*”, o *draw-in* previsto é muito diferente do experimental, sendo possível observar na Figura 3.19 que na zona lateral o escoamento da chapa permite que o material se “escape” ao travamento duplo.

De modo a permitir uma análise adequada de resultados com o PAMSTAMP®, foi necessário realizar um procedimento iterativo para aproximar os resultados de *draw-in* aos experimentais. O procedimento utilizado correspondeu ao aumento da força de retenção associada aos dois travamentos lineares, como se mostra na Tabela 3.4.

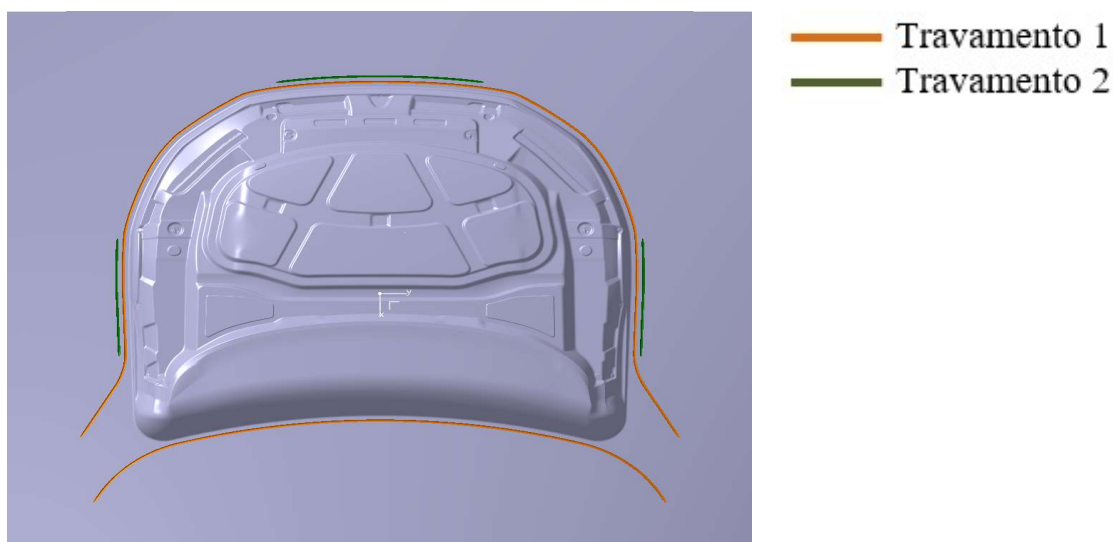


Figura 3.17. Matriz utilizada na operação de embutissagem da peça B) com travamentos lineares.

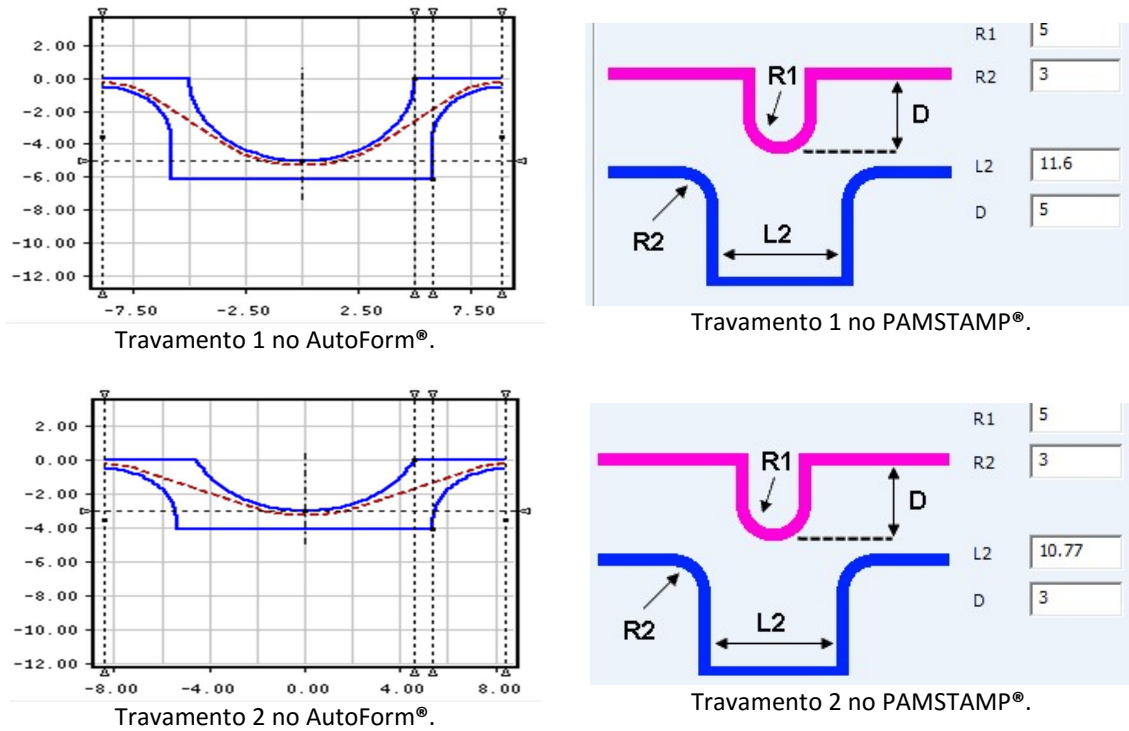


Figura 3.18. Geometria das secções transversais dos travamentos utilizados na matriz e pisador da operação de embutissagem da peça B).

Tabela 3.4. Forças associadas aos travamentos utilizados na peça B), segundo o AutoForm e o PAMSTAMP®.

[N/mm]		AutoForm® “Drawbead Generator”	PAMSTAMP® “Drawbead Wizard”	PAMSTAMP® “Drawbead Calibrator”	Força utilizada no PAMSTAMP®
Travamento 1	F_r	45.1	39.5494	62.4192	85
	F_o	41.9	30.3026	84.1602	84.1602
Travamento 2	F_r	26.1	22.9729	50.0796	110
	F_o	25.5	16.8486	81.6881	81.6881

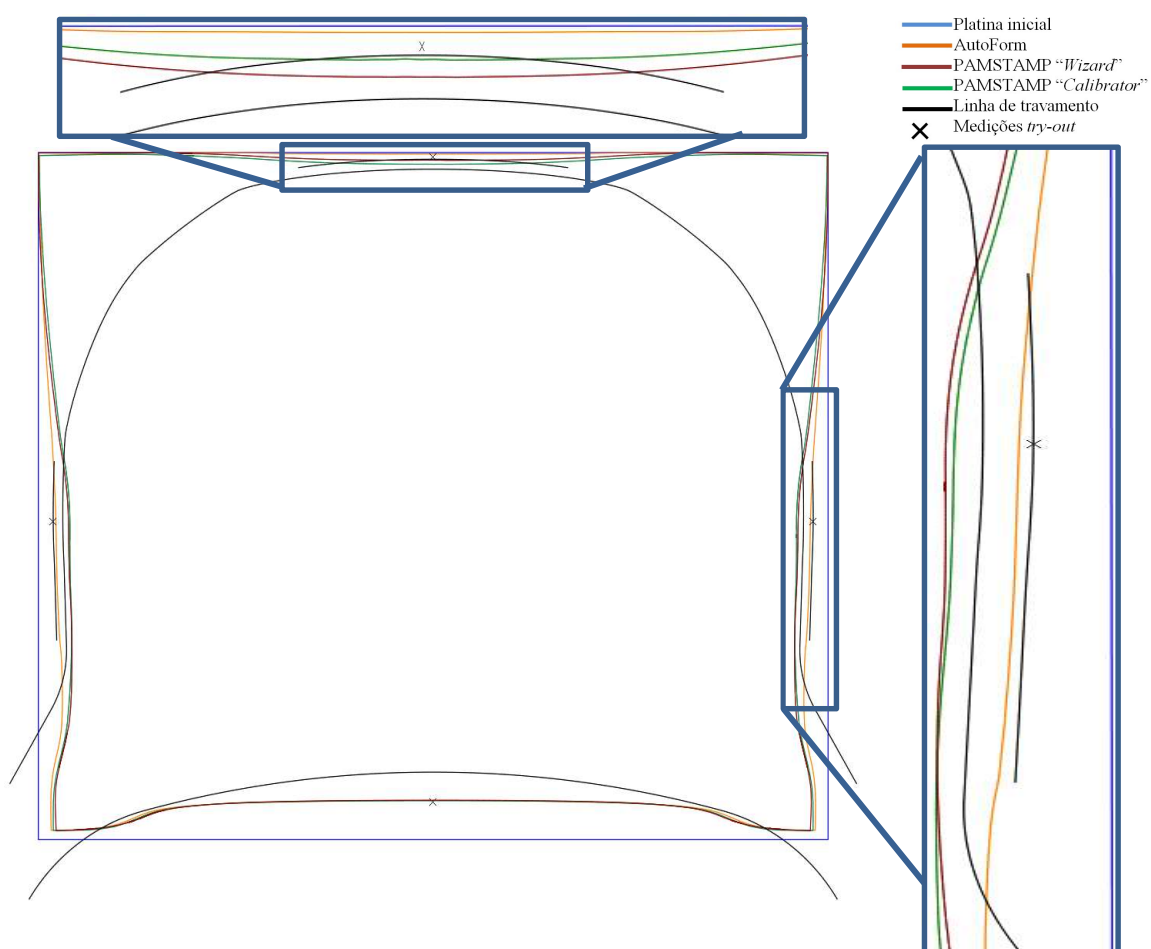


Figura 3.19. Comparação do *draw-in* previsto com as forças para o travamento linear fornecidas pelo "Drawbead Generator", "Drawbead Wizard" e "Drawbead Calibrator" com o resultado experimental obtido no *try-out* da peça B).

3.3.2. Operação de embutissagem

Tal como referido anteriormente, a operação de embutissagem foi realizada considerando travamentos lineares. No AutoForm® foram utilizadas as forças dadas pelo "Drawbead Generator". No PAMSTAMP® foram utilizadas as forças obtidas através de um procedimento iterativo, realizado com o objetivo de minimizar as diferenças entre o *draw-in* previsto e o experimental (ver Tabela 3.4).

A Figura 3.20 apresenta o *draw-in* obtido com o AutoForm®, o PAMSTAMP® e alguns pontos característicos medidos no *try-out* experimental. Na mesma figura é apresentada a distância entre os pontos medidos no *try-out* e o *draw-in* de cada um dos *softwares*. Neste caso, o *draw-in* previsto pelo PAMSTAMP® é globalmente mais próximo do experimental, mas importa realçar que envolveu o procedimento de correção das forças.

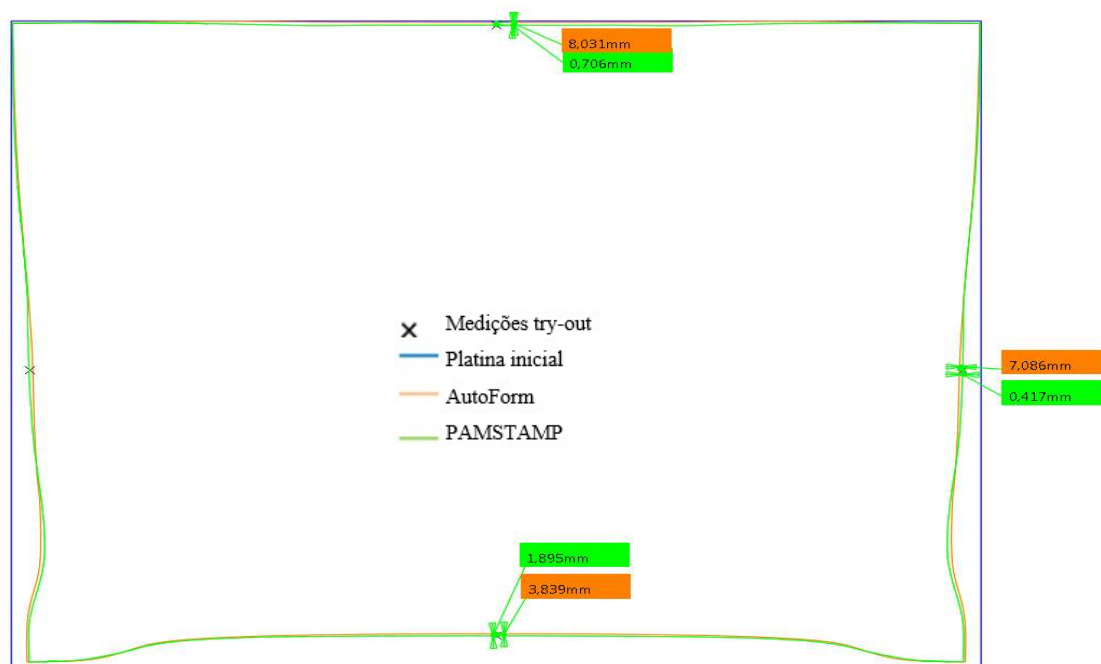


Figura 3.20. Comparação do *draw-in* entre: PAMSTAMP®, AutoForm® e *try-out*, para a operação de embutissagem da peça B).

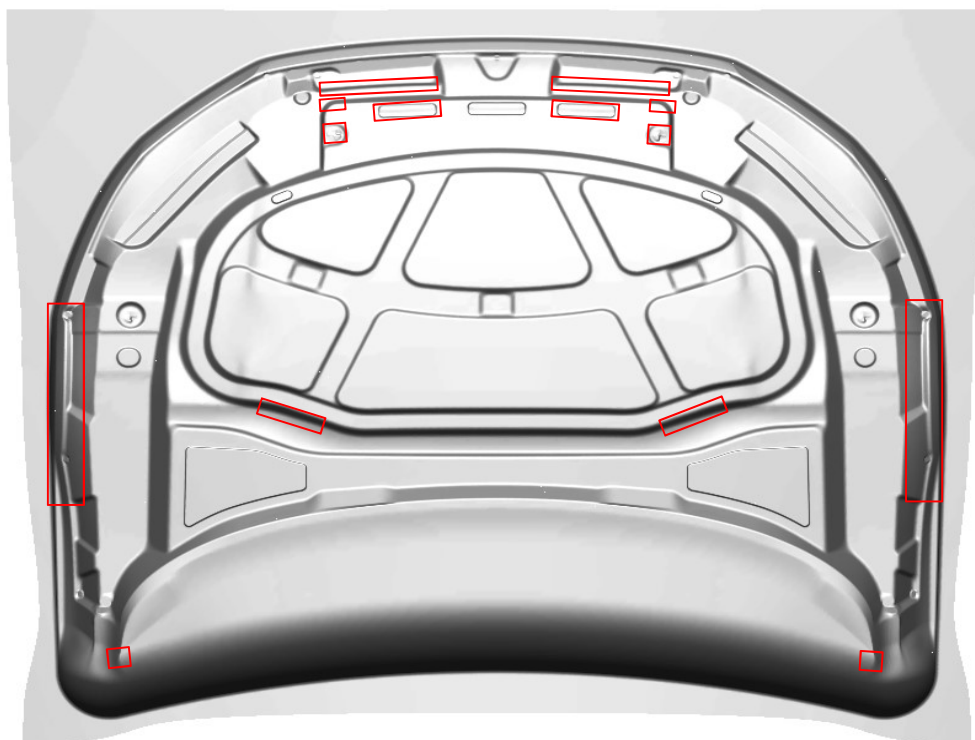


Figura 3.21. Zonas críticas de ocorrência de fissuras, detetadas no *try-out* da operação de embutissagem da peça B).

Tal como para o painel exterior, a sequência de operações para a peça B) foi definida com base nos resultados obtidos com o AutoForm®. No entanto, no *try-out* foram

detetadas algumas zonas críticas de rotura, cuja posição é assinalada no componente na Figura 3.21.

As simulações realizadas com os dois *softwares* para a operação de embutissagem, recorreram à mesma geometria das ferramentas, a mesma definição do comportamento mecânico do material e às forças de travamento que permitem um escoamento de material semelhante. Os parâmetros de discretização da chapa são os apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5. Parâmetros de discretização da chapa utilizados nas simulações da peça B).

	AutoForm®	PAMSTAMP®
Tamanho máximo inicial do elemento	20 mm	9 mm
Refinamento	Nível 6; Refina 6 vezes.	Nível 5; Refina 4 vezes.

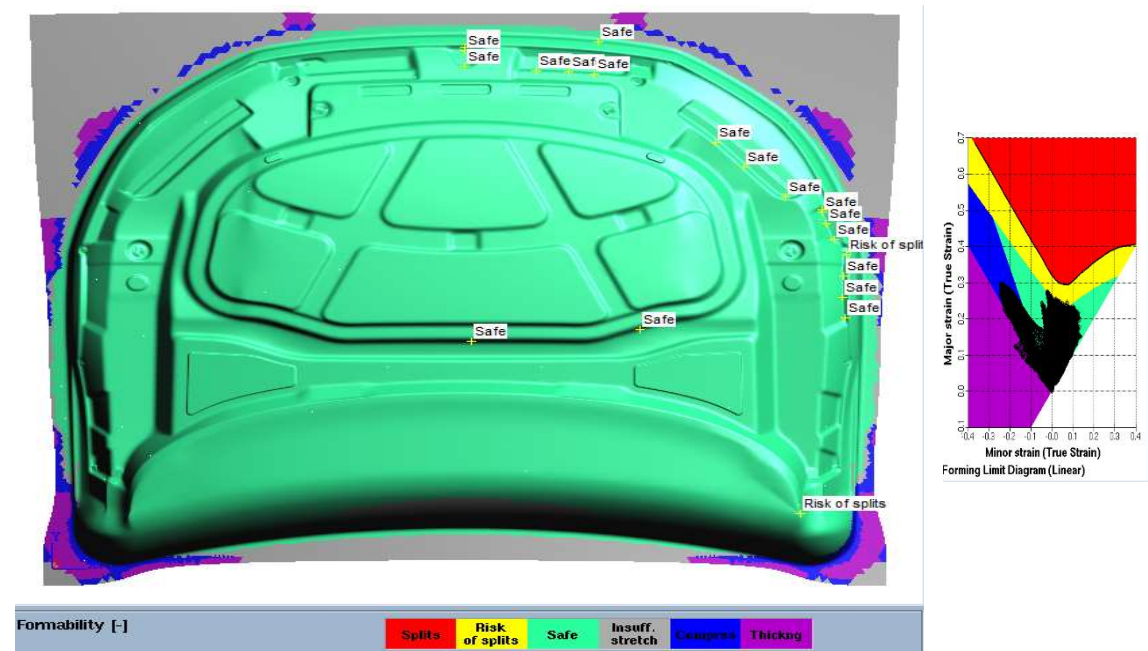


Figura 3.22. Resultado da simulação da operação de embutissagem da peça B) previsto pelo AutoForm®.

A Figura 3.22 apresenta o resultado obtido com o AutoForm®, sendo possível observar da análise de formabilidade a existência de algum risco de ocorrer rotura. À semelhança do caso de estudo anterior, esta simulação foi realizada utilizando os parâmetros recomendados (ver Tabela 2.1). Também neste caso foi realizada uma simulação com o nível de refinamento automático da malha sete. No entanto, ao contrário do observado para a peça A), não foram encontradas alterações significativas ao nível dos resultados de formabilidade,

o que pode ser relacionado com o facto de as ferramentas utilizadas neste componente apresentarem um raio mínimo de 3 mm (bastante superior a 0,1 mm).

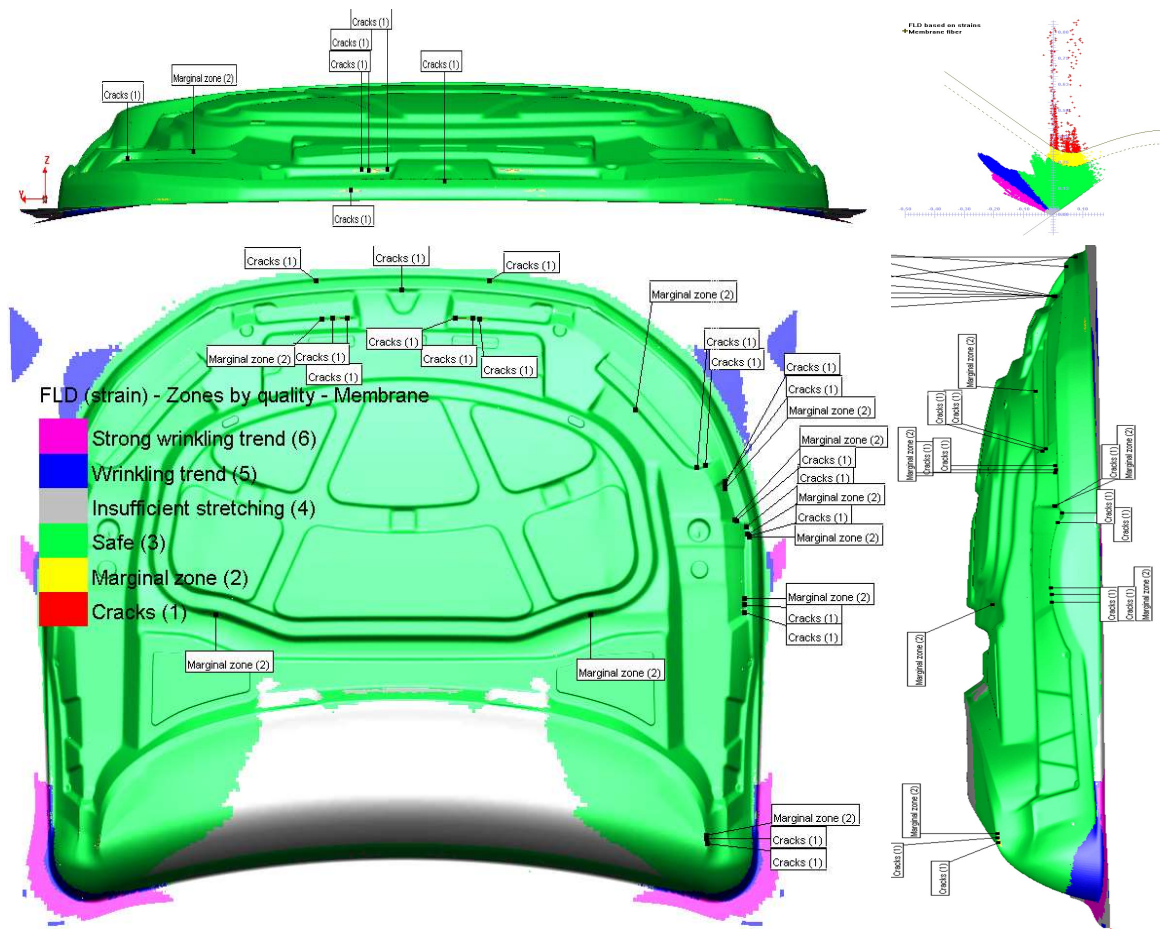


Figura 3.23. Resultado da simulação da operação de embutissagem da peça B) previsto pelo PAMSTAMP®.

A Figura 3.23 apresenta a análise de formabilidade obtida para a simulação realizada no PAMSTAMP®. Observa-se a existência de zonas onde existe rotura do material. Algumas destas zonas são coincidentes com zonas críticas identificadas no *try-out* experimental (ver Figura 3.21). Para este caso foi também avaliada a influência da utilização da opção *speed up*, do PAMSTAMP®, na análise de formabilidade. Os resultados são apresentados na Figura 3.24. A utilização da opção *speed up* diminui o tempo de simulação e ainda assim prevê zonas críticas idênticas. Observa-se que a simulação sem a opção de *speed up* ativa conduz a valores de deformação inferiores em algumas zonas. Assim, algumas zonas identificadas como tendo risco de rotura com a opção *speed up* ativa, correspondem a

pontos materiais localizados na zona segura, quando não é utilizada essa opção, i.e. na verdade podem apresentar ainda capacidade de se deformar.

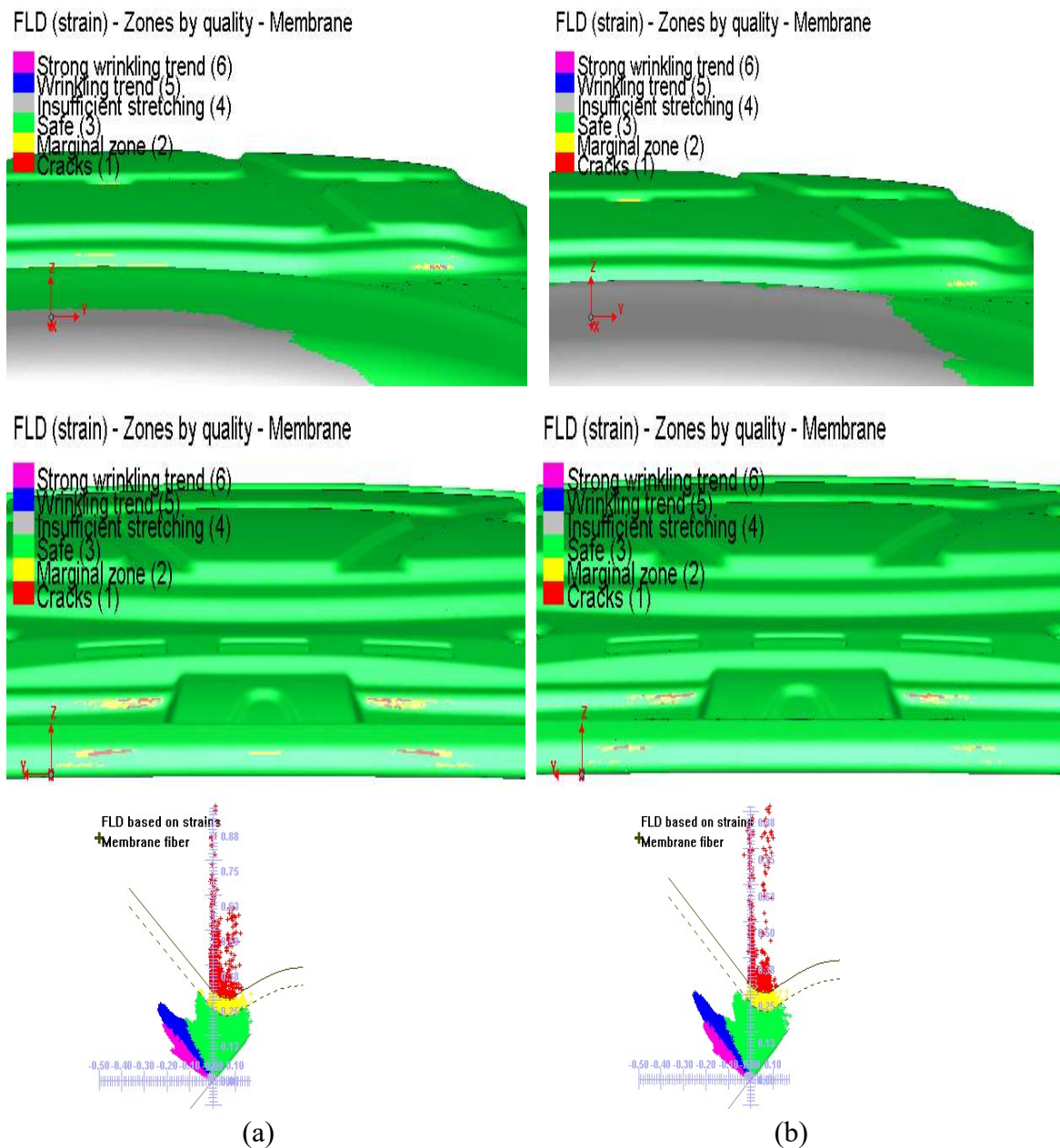


Figura 3.24. Análise de formabilidade da peça B com o PAMSTAMP®: (a) utilizando a opção de *speed up*; (b) sem utilizar a opção de *speed up*.

3.3.3. Retorno elástico

No final da simulação de todo o processo multi-etapa foi realizada a análise do retorno elástico. Para comparar a geometria final, após retorno elástico, foi feita a fixação da peça através de pinos e *clamps* em pontos de referência (*reference point system* (RPS)), tal

como no procedimento experimental. A fixação da peça no AutoForm® e no PAMSTAMP® é apresentada na Figura 3.25.

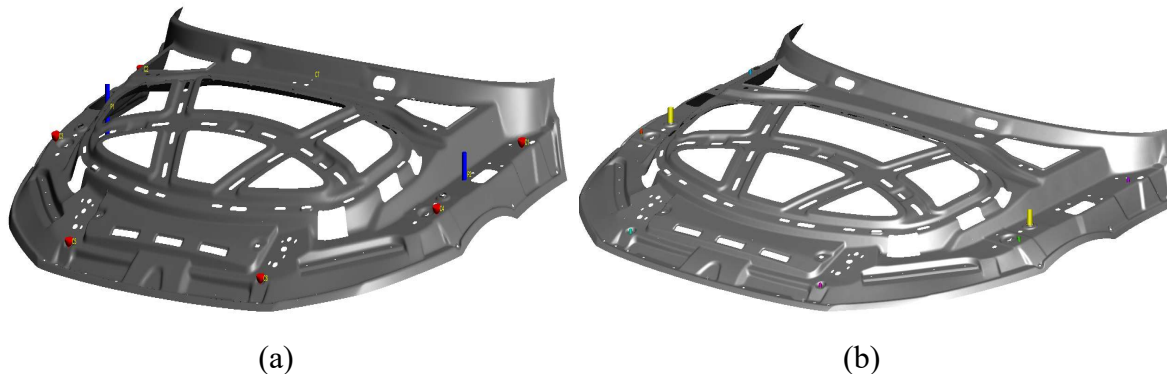


Figura 3.25. Medição da peça final com fixação nos pontos RPS, obtida no: (a) AutoForm®; (b) PAMSTAMP®.

No final de todo o processo de embutissagem e retorno elástico constrangido com *clamps*, as coordenadas dos nós da malha da chapa, obtidas pelo AutoForm® e pelo PAMSTAMP® foram transferidas para o *software* CATIA. Estas coordenadas definem a superfície de espessura média da chapa. Na Figura 3.26 e Figura 3.27 apresenta-se a sobreposição da malha da superfície média da peça obtida com o AutoForm® (cor-de-laranja) com a do PAMSTAMP® (verde). Na Figura 3.27 apresenta-se a quantificação do desvio, sendo possível observar a coincidência dos pontos RPS e que uma grande percentagem de pontos apresenta diferenças no intervalo $] - 0,5; 0,5[$ mm. No entanto, existem zonas em que os resultados das simulações diferem de 1,69 mm.

De forma a poder comparar a superfície superior da peça de referência com os resultados numéricos, fez-se um *offset* da malha de nós dos *softwares* com o valor correspondente a metade da espessura da chapa. Na Figura 3.28 a) mostra-se a sobreposição da malha com *offset*, obtida com o AutoForm®, com a superfície superior da peça referência. A Figura 3.29 a) apresenta a mesma comparação, mas com a malha da peça obtida pelo PAMSTAMP®. Na Figura 3.28 b) e Figura 3.29 b) é apresentada a distância entre a peça final e a peça referência, sendo que neste caso estes resultados são calculados pelo *software* utilizado na simulação numérica, pelo que têm em consideração a redução de espessura prevista.

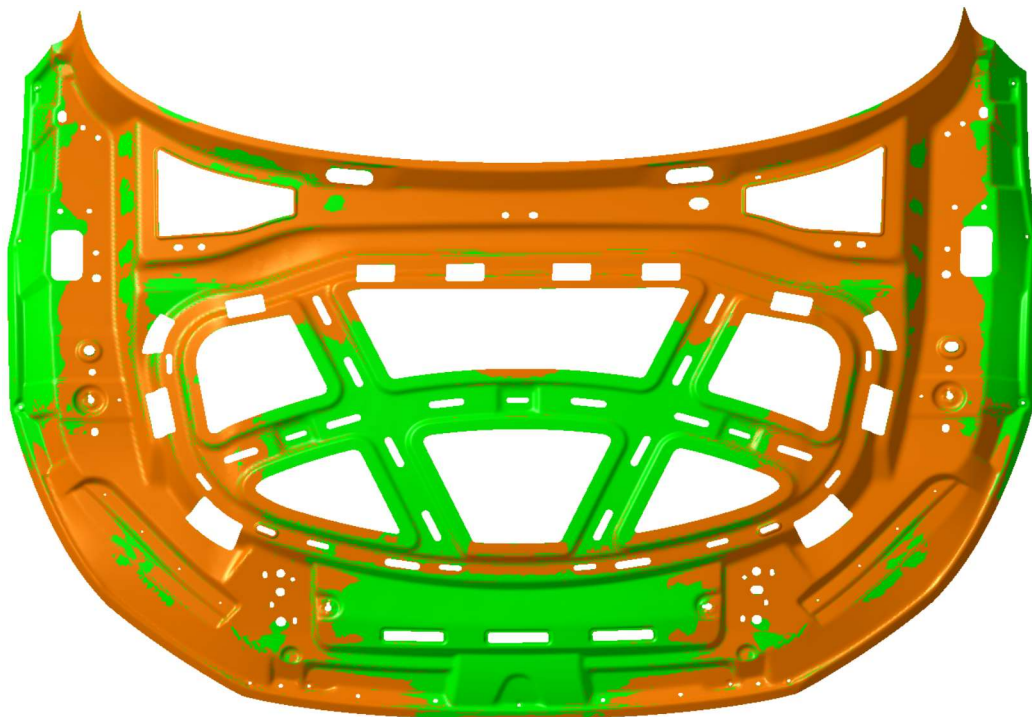


Figura 3.26. Comparação entre as superfícies de espessura média obtidas pelo AutoForm® (cor-de-laranja) e pelo PAMSTAMP® (verde) alinhadas por RPS.

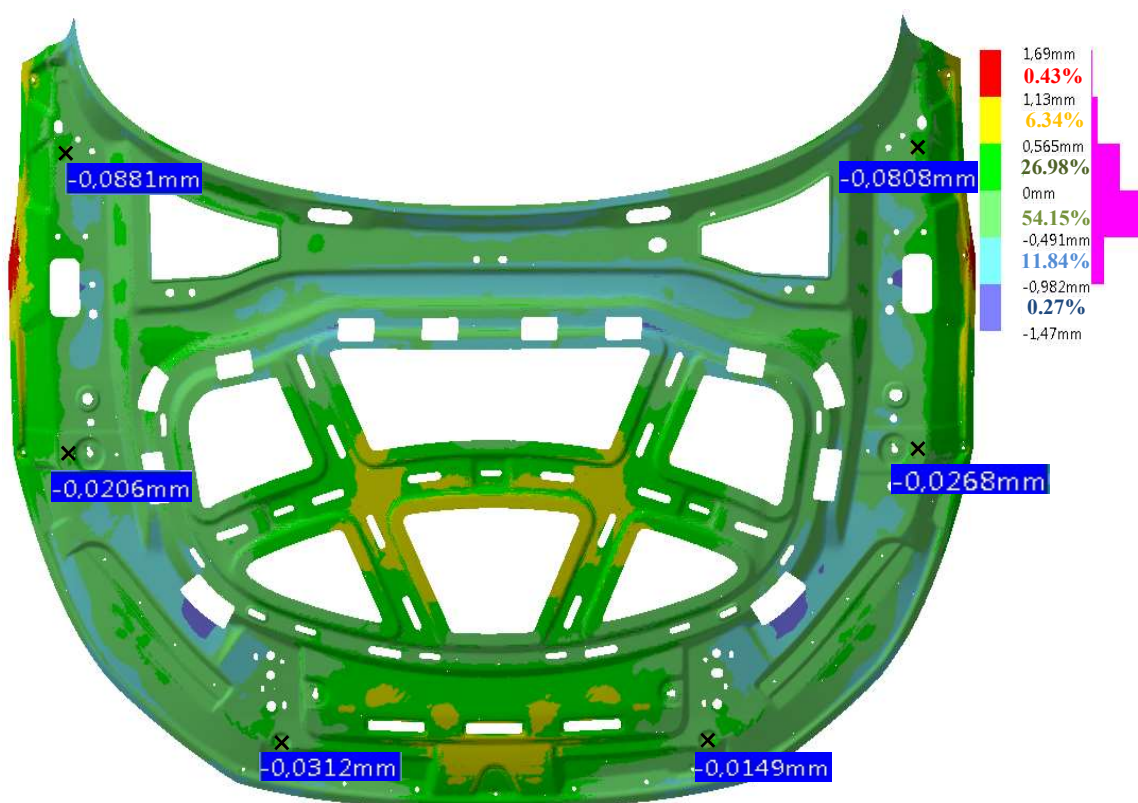


Figura 3.27. Análise do desvio entre as superfícies de espessura média obtidas com o AutoForm® e o PAMSTAMP®, alinhadas por RPS.

As diferenças entre os resultados obtidos com o AutoForm® e o PAMSTAMP® são inferiores a 2 mm (ver Figura 3.27). Por outro lado, a Figura 3.28 e a Figura 3.29 indicam que a tendência geral do retorno elástico do componente, quando comparado com a referência, é idêntica. De facto, ambos os *softwares* preveem que as extremidades da peça apresentam uma posição negativa em relação à peça objetivo.

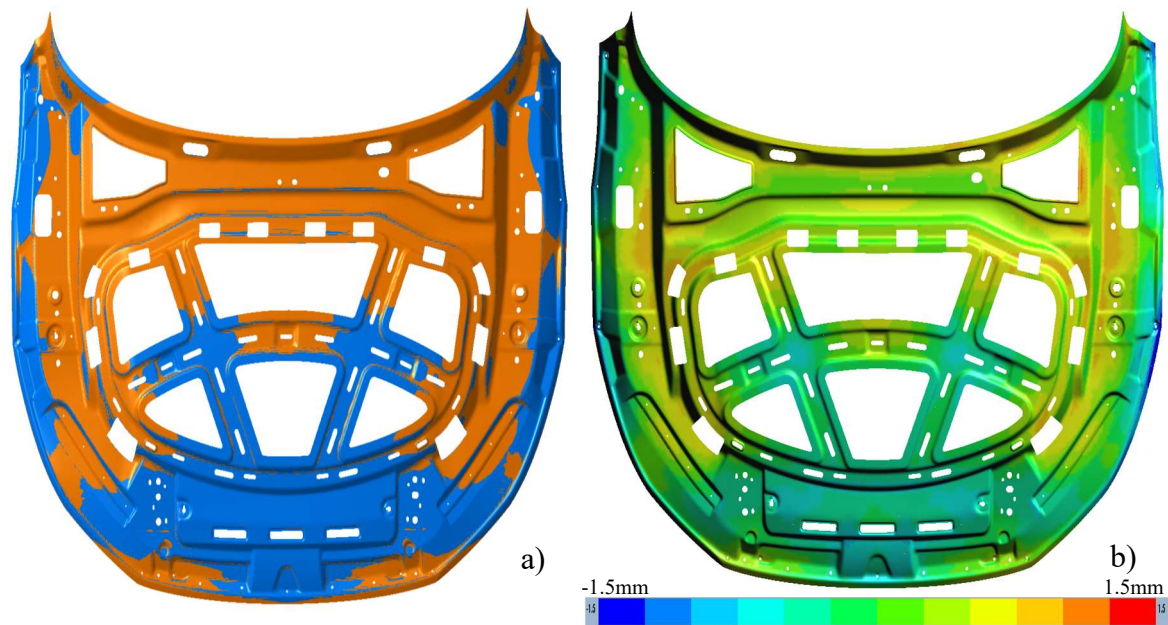


Figura 3.28. a) Comparação do resultado da simulação realizada com o AutoForm® (cor-de-laranja) com a peça referência (azul). b) análise do desvio entre as superfícies obtidas com o AutoForm® e a peça de referência, alinhadas por RPS.

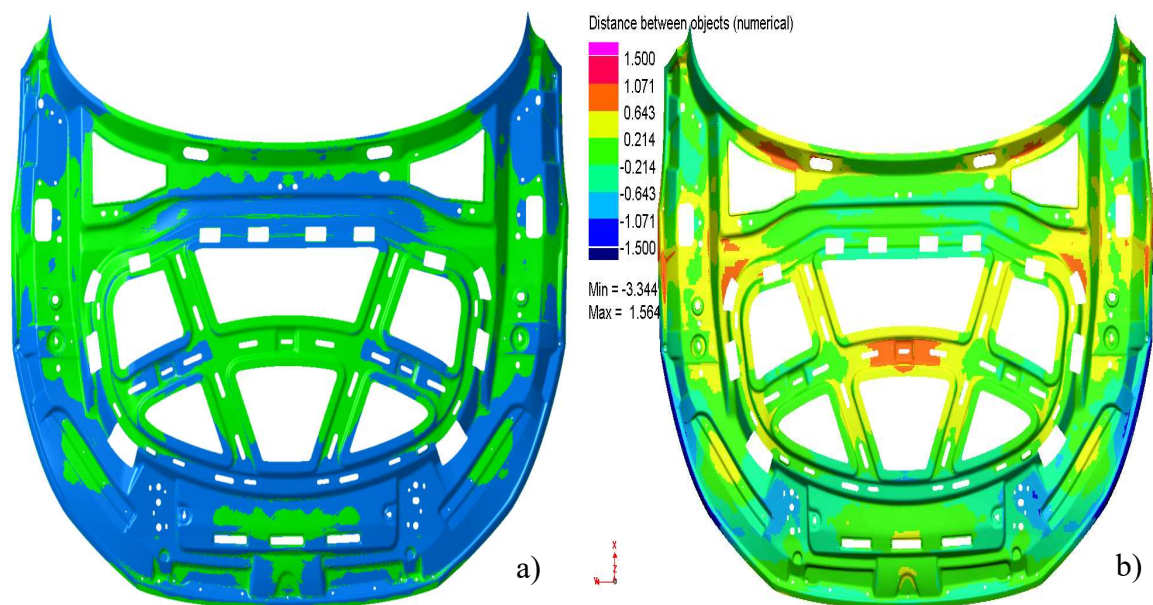


Figura 3.29. a) Comparação do resultado da simulação realizada com o PAMSTAMP® (verde) com a peça referência (azul). b) análise do desvio entre as superfícies obtidas com o PAMSTAMP® e a peça de referência, alinhadas por RPS.

De forma a comparar o resultado das simulações após retorno elástico constrangido, com o resultado experimental, foi realizada a medição da peça, obtida no AutoForm® e no PAMSTAMP®, de acordo com o procedimento utilizado experimentalmente. Esta medição é realizada por comparação da peça obtida com a peça de referência. Foi selecionado um conjunto de pontos nos quais é medida a distância entre a peça de referência e a que se pretende analisar, numa direção perpendicular a esta última. O resultado destas medições é apresentado no ANEXO A. Devido à simetria da peça optou-se por analisar apenas um dos lados. A Figura 3.30 apresenta o resumo das medições dos pontos característicos da peça.

Também foi realizada uma análise comparativa, com base na diferença entre o desvio dimensional da peça virtual e da peça experimental. Na Tabela 3.6 é apresentada a divisão da peça em zonas, sendo que para cada zona foi calculada a média da diferença (em valor absoluto) dos desvios dimensionais medidos na peça experimental e virtual. Nesta análise foram utilizados todos os desvios medidos nos pontos que são apresentados no ANEXO A. Para cada uma destas zonas, opta-se por representar os pontos onde a diferença entre a medição da peça experimental e o AutoForm® são máximos a cor de laranja na Figura 3.30. Já os pontos onde a diferença entre a medição da peça experimental e o PAMSTAMP® são máximos são representados a verde. Esta análise permite evidenciar que as diferenças máximas, previstas pelos *softwares*, ocorrem em pontos distintos para cada zona. No global, a diferença do desvio dimensional obtido por cada um dos *softwares* e o resultado experimental não é muito significativo. Tal não quer dizer que as geometrias previstas pelo AutoForm® e pelo PAMSTAMP® sejam idênticas à experimental, nem que a peça obtida pelo AutoForm é igual à obtida recorrendo ao PAMSTAMP. De facto, de acordo com a Figura 3.27, as geometrias previstas pelos dois *softwares* apresentam diferenças. Por outro lado, de acordo com os valores máximos apresentados na Tabela 3.6, existem diferenças superiores a 1 mm entre a geometria experimental e a prevista numericamente.

Importa salientar que nesta peça a simulação da operação de embutissagem, com o PAMSTAMP®, apresenta problemas de formabilidade em determinados elementos, i.e. tendência para que exista rotura. Ainda assim, optou-se por prosseguir para a simulação da sequência de operações, incluindo o retorno elástico, porque as zonas consideradas críticas são muito pequenas e localizadas.

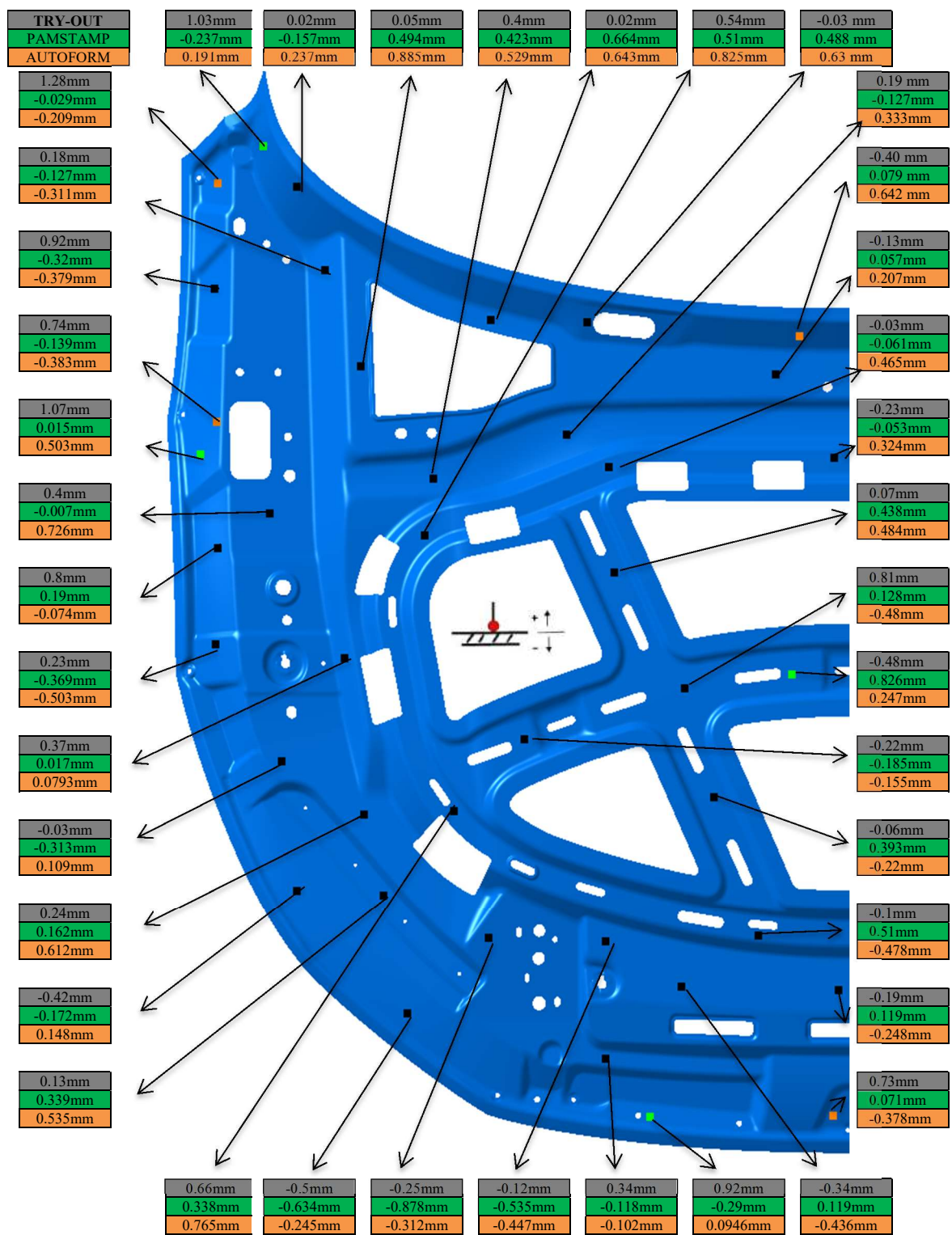
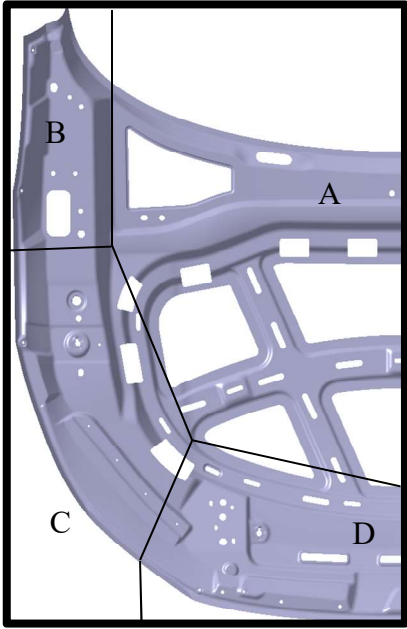


Figura 3.30. Comparação com a referência dos pontos de medição principais da peça obtida no AutoForm®, PAMSTAMP® e experimentalmente.

Tabela 3.6. Média e valor máximo da diferença entre os desvios dimensionais virtuais e experimentais.

		AutoForm®	PAMSTAMP®
	Zona A	Média=0.424mm Max=1.042mm	Média=0.321mm Max=1.306mm
	Zona B	Média=0.827mm Max=1.489mm	Média=0.849mm Max=1.267mm
	Zona C	Média=0.414mm Max=1.123mm	Média=0.376mm Max=1.055mm
	Zona D	Média=0.442mm Max=1.108mm	Média=0.46mm Max=1.21mm
	Zona A+B+C+D	Média=0.451mm	Média=0.422mm

4. CONCLUSÕES

A realização deste trabalho permitiu evidenciar a dificuldade em obter valores de *draw-in* idênticos com os dois *softwares*, em resultado das diferentes forças de retenção e abertura previstas pelos algoritmos implementados para os travamentos lineares. Assim, é difícil fazer uma comparação direta de resultados, uma vez que apesar de serem utilizadas as mesmas geometrias transversais dos travamentos lineares, o valor de *draw-in* é muito diferente entre os *softwares*, mas também do experimental. Assim, a estratégia adotada consistiu em procurar garantir valores de *draw-in* idênticos, de modo a obter níveis de estiramento e deformação plástica semelhantes. No entanto, importa realçar que tal não garante que a evolução das forças de contacto entre o pisador e a chapa ou a matriz e a chapa sejam idênticas para os dois programas utilizados. No global, verificou-se ser mais fácil obter valores de *draw-in* mais próximos do experimental com o AutoForm®.

Ambos os *softwares* conseguiram prever para o caso de estudo A) os problemas de formabilidade da chapa que ocorreram no *try-out* da ferramenta. No entanto, o recurso no AutoForm® ao nível de refinamento seis revelou-se insuficiente para que os elementos finitos sejam capazes de se adaptar à superfície em quina viva existente nas linhas *design*. De facto, foi necessário aumentar o nível de refinamento de seis para sete para obter uma dimensão do elemento finito com capacidade para descrever raios de menor dimensão, o que resulta numa melhor capacidade de previsão de rotura. Assim, apesar de o aumento do nível de refinamento máximo conduzir ao aumento do tempo de computação, tem a vantagem de aumentar a capacidade de previsão de rotura. No global, para níveis de *draw-in* idênticos para cada um dos *softwares*, os valores de deformação apresentados no PAMSTAMP® são superiores aos apresentados pelo AutoForm®, i.e. a previsão de formabilidade obtida pelo PAMSTAMP® apresenta uma melhor correlação com o resultado experimental. Importa referir que o PAMSTAMP® permite a descrição da superfície em quina viva existente nas linhas *design*.

Também para o caso de estudo B), verificou-se que o PAMSTAMP® apresenta uma boa capacidade de previsão de rotura, quando comparado com os problemas detetados no *try-out* experimental. Os resultados de retorno elástico deste componente evidenciaram ligeiras diferenças entre os dois *softwares*. No entanto, quando se analisa a diferença entre

os desvios dimensionais calculados pelos *softwares* e o experimental, verifica-se que não é fácil identificar claramente qual apresenta uma melhor capacidade de previsão, uma vez que em certas zonas um *software* é melhor/pior do que o outro *software* em outras zonas. Assim, no global a média da diferença dos desvios dimensionais acaba por ser idêntica para os dois programas analisados.

Importa salientar que a diferença entre os desvios dimensionais calculados com base nos resultados virtuais e experimentais foi no máximo de 1.5 mm numa peça que tem mais de 1.5m de largura. Esta diferença nos resultados pode ser justificada por fatores experimentais, numéricos e de modelação. Entre os fatores experimentais, contabilizam-se a precisão na maquinação das ferramentas e o erro associado à medição do componente estampado. Como fatores numéricos e de modelação destacam-se: (i) a modelação do material que não contempla o encruamento cinemático e, consequentemente, não tem em conta o efeito de Bauschinger; (ii) a não consideração da redução do módulo de Young com o aumento da deformação plástica; (iii) o recurso a elementos finitos do tipo casca para ferramentas que apresentam escoamento do material em zonas com raios de curvatura de pequenas dimensões; e (iv) a medição do desvio dimensional virtual que tem também um erro associado, uma vez que o ponto de medição considerado não corresponde exatamente ao ponto de medição real. Para a medição da distância entre a peça objetivo e virtual é utilizado o centro do elemento finito, que nem sempre coincide com o ponto de medição inicialmente previsto.

Existiu alguma dificuldade na análise das peças selecionadas como casos de estudo. Esta dificuldade fez-se sentir devido à complexidade e dimensão da peça e sobretudo ao tempo de cálculo associado a cada simulação. Não são apresentados tempos de computação porque as simulações não foram sempre feitas no mesmo computador. As simulações no AutoForm® foram realizadas apenas com um processador por imposição da licença. No PAMSATMP® foram utilizados até 12 processadores em simultâneo. No entanto, as simulações de ambos os casos de estudo demoram sempre mais tempo no PAMSTAMP® do que no AUTOFORM®. Importante de referir que 32GB de RAM foram insuficientes para a simulação do retorno elástico no PAMSTAMP®.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, J. L. (2003). *Simulação numérica do processo de estampagem de chapas metálicas- Modelação mecânica e métodos numéricos*. Universidade do Minho.

Alves, J. L., Oliveira, M. C., Menezes, L. F. (2006). *Numerical Evaluation Of The Influence Of The Elastic Properties Evolution In Springback Prediction*. International Deep Drawing Research Group 2006 Conference (p.161)

(AutoForm a)) Software solution for sheet metal forming-AutoForm [Online] Disponível em <http://www.autoform.com/en/products/autoform-stampingadviser-plus/>. Acedido em 09/05/16

Banabic, D. (2010). *Sheet Metal Forming Processes*. Springer.

Butuc, M. (2004). *Forming Limit Diagrams. Definition of Plastic Instability Criteria*. Universidade do Porto.

Duarte, J. M. F. (1997). *Conformação Plástica de Chapas Metálicas*. Universidade do Porto.

EN 10346 (2009). “*Continuously hot-dip coated steel flat products – Technical delivery conditions*”, European Committee for standardization.

(ESI a)) Springback - Kinematic Hardening Model [Online] Disponível em <https://www.esi-group.com/software-solutions/virtual-manufacturing/sheet-metal-forming/pam-stamp/springback-kinematic-hardening-model> em: 15/05/16

(ESI b)) Sheet Metal Forming Simulation Suite-PAMSTAMP 2G [Online] Disponível em <https://www.esi-group.com/software-solutions/virtual-manufacturing/sheet-metal-forming/stamping-solution-pam-stamp> . Acedido em 09/05/16

(ESI c)) Triple Speed Mode for Explicit Simulations [Online] Disponível em: <https://www.esi-group.com/software-solutions/virtual-manufacturing/sheet-metal-forming/pam-stamp/triple-speed-mode-explicit-simulations> em: 15/05/16

(ESI d)) Accurate Numerical Methods – Key for Accurate Virtual Prototyping [Online] Disponível em <https://www.esi-group.com/software-solutions/virtual-manufacturing/sheet-metal-forming/pam-stamp/accurate-numerical-methods> . Acedido em 10/05/16

- Ján, S., & Juncisin, M. (2012). Springback Prediction in Sheet Metal. *Journal for Technology of Plasticity*, 37(1).
- Lajarin, S. F. (2012). *Influência da variação do módulo de elasticidade na previsão computacional do retorno elástico em aços de alta resistência*. Universidade Federal do Paraná.
- Li, K. P., Carden, W. P., & Wagoner, R. H. (2002). Simulation of springback, 44, 103–122.
- Lingbeek, R. A. (2003). *Aspects of a Designtool for Springback Compensation*. University of Twente
- Oliveira, M. C. C. (2005). *Algoritmos e Estratégias de Gestão de Problema de Contacto com Atrito em Grandes Deformações Aplicação à Estampagem de Chapas Metálicas*. Universidade de Coimbra.
- Prates, P. (2014). *Inverse Methodologies For Identifying Constitutive Parameters of Metal Sheets*. Universidade de Coimbra.
- Safari, M., Hosseinipour, S. J., & Azodi, H. D. (2011). *Experimental and Numerical Analysis of Forming Limit Diagram (FLD) and Forming Limit Stress Diagram (FLSD)*, Materials Sciences and Applications, vol 2, p.497-503.
- Schäfer, M. (2006). *Computational Engineering – Introduction to Numerical Methods*. . Springer.
- Teixeira, P. (2005). “ Benchmarks ” Experimentais e Modelação Numérica por Elementos Finitos de Processos de Conformação Plástica. Universidade do Porto.
- (WMG) Forming Limit Curve Prediction [Online] Disponível em:
<http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/wmg/research/pvlt/simulation/bodystructure/flc/>
Acedido em 1/06/16

ANEXO A

Neste anexo são apresentados os valores de desvio dimensional em relação à peça referência. O desvio dimensional foi medido de igual forma e nos mesmos pontos no experimental e no numérico.

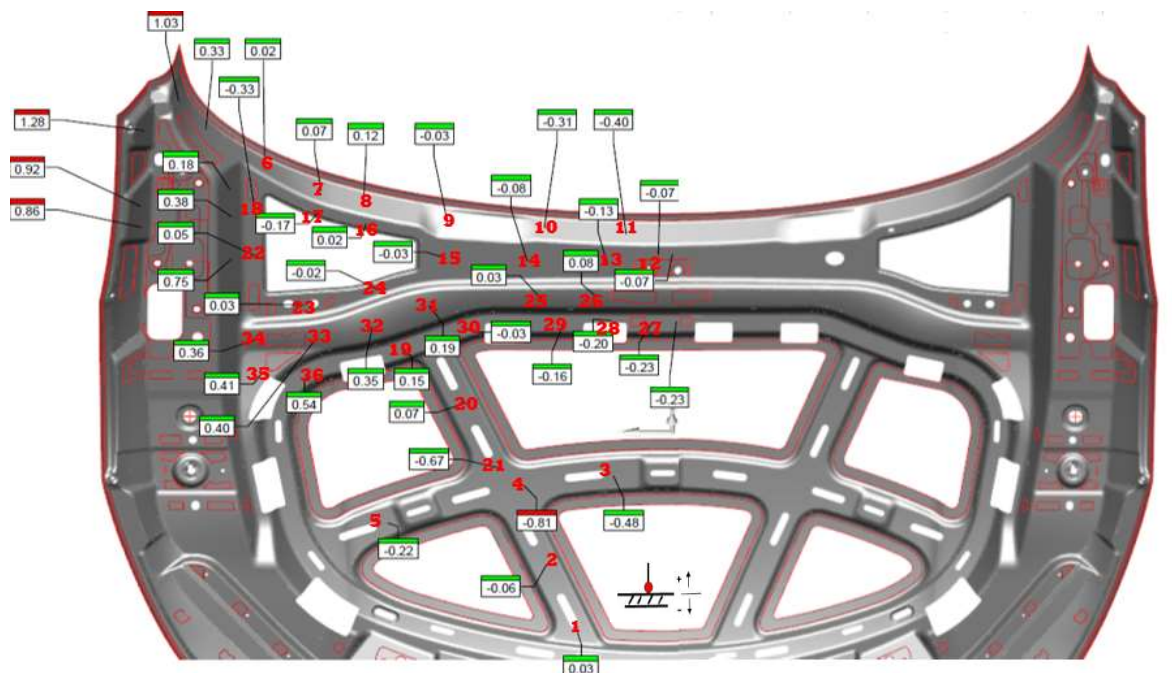


Figura A.1. Medição da peça de *try-out* experimental da Zona A e B.

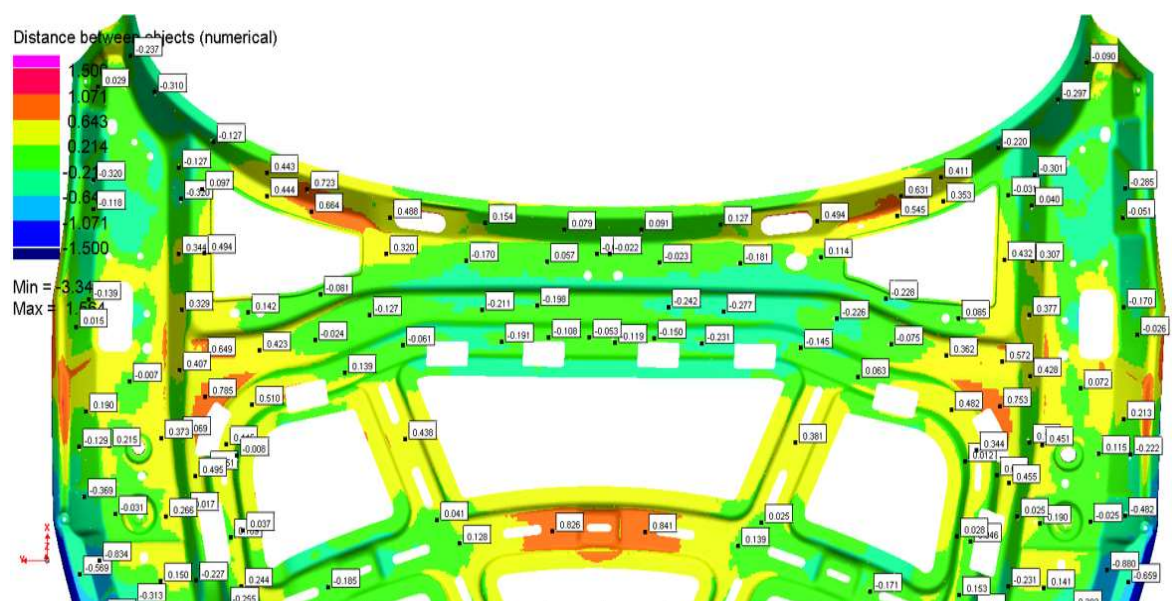


Figura A.2. Medição da peça no PAMSTAMP® da Zona A e B.

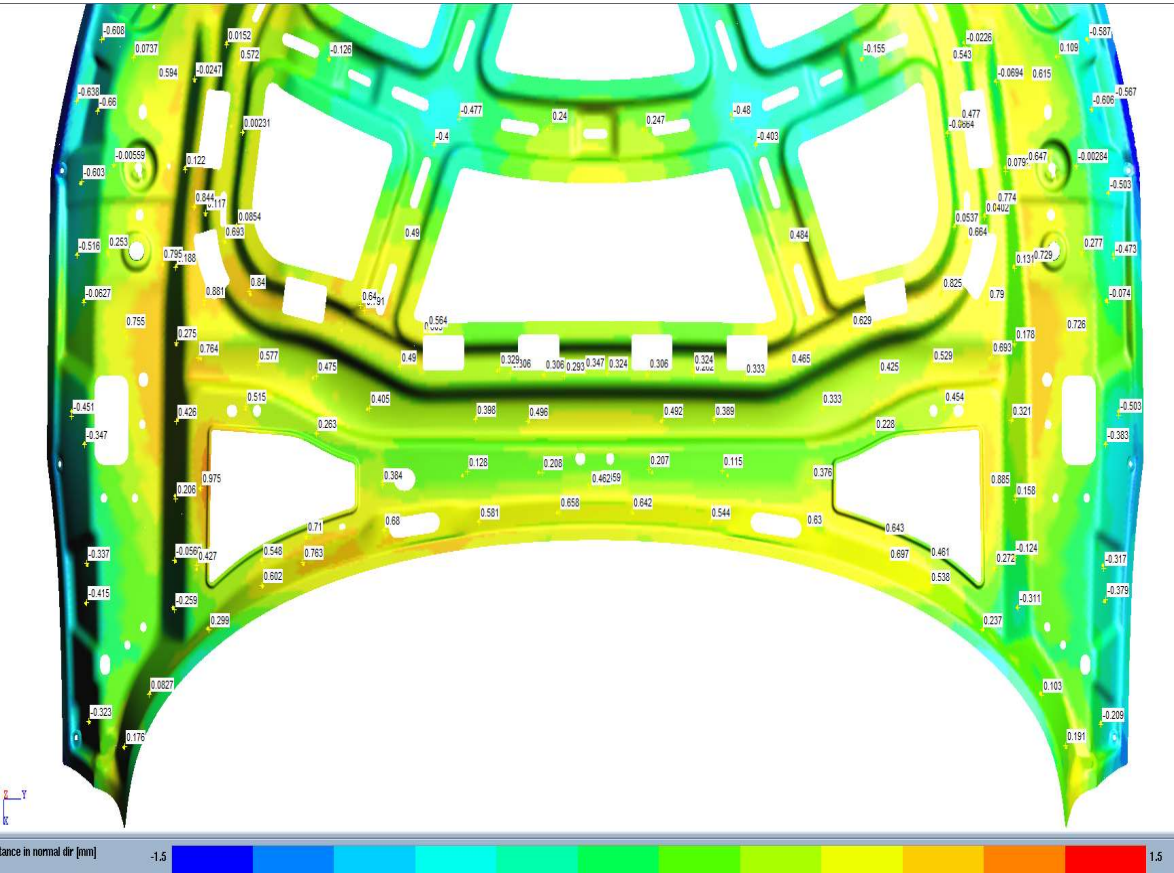


Figura A.3. Medição da peça no AutoForm® da Zona A e B.

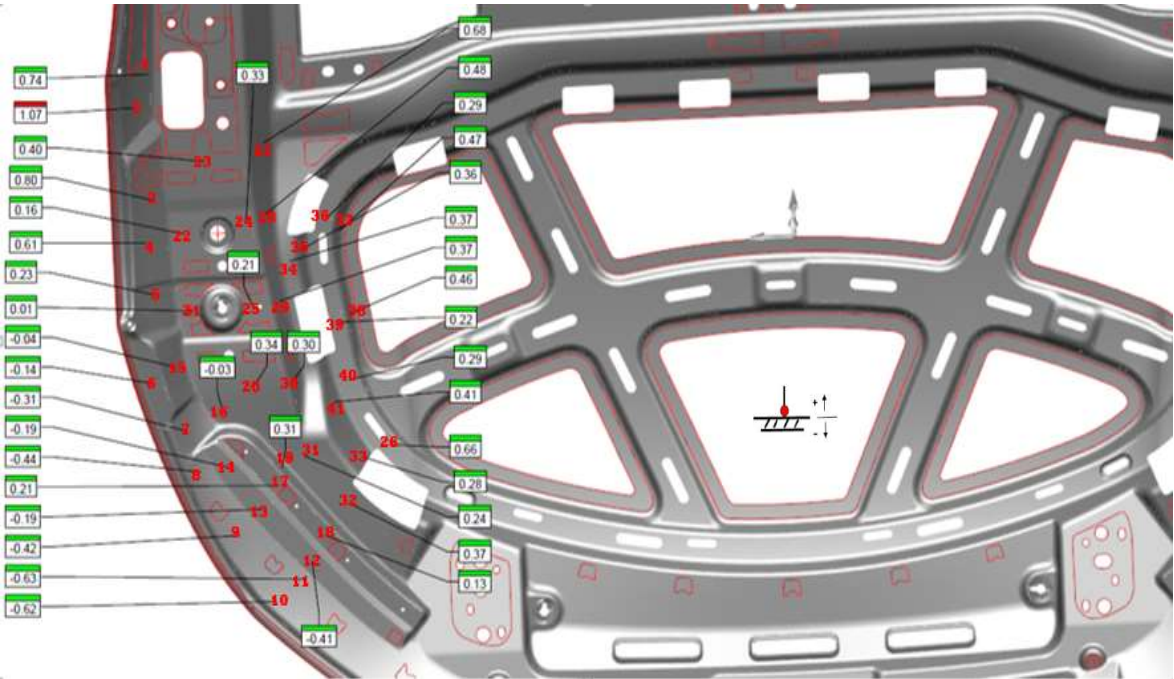


Figura A.4. Medição da peça de try-out experimental da Zona C.

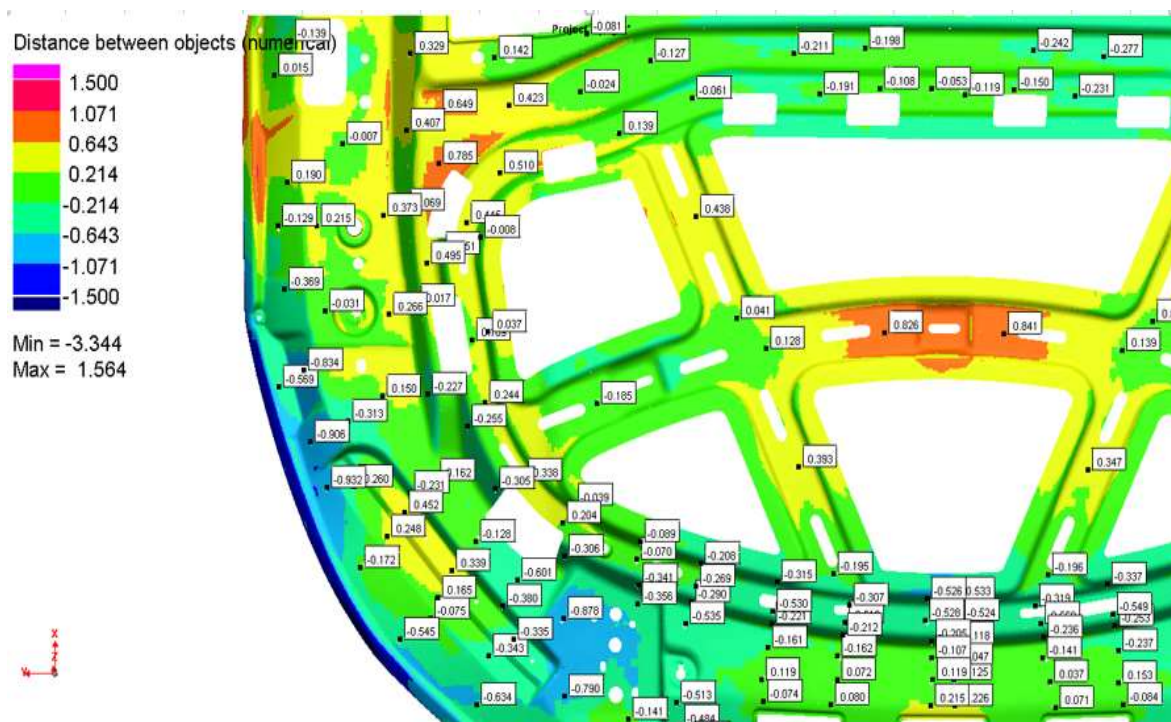


Figura A.5. Medição da peça no PAMSTAMP® da Zona C.

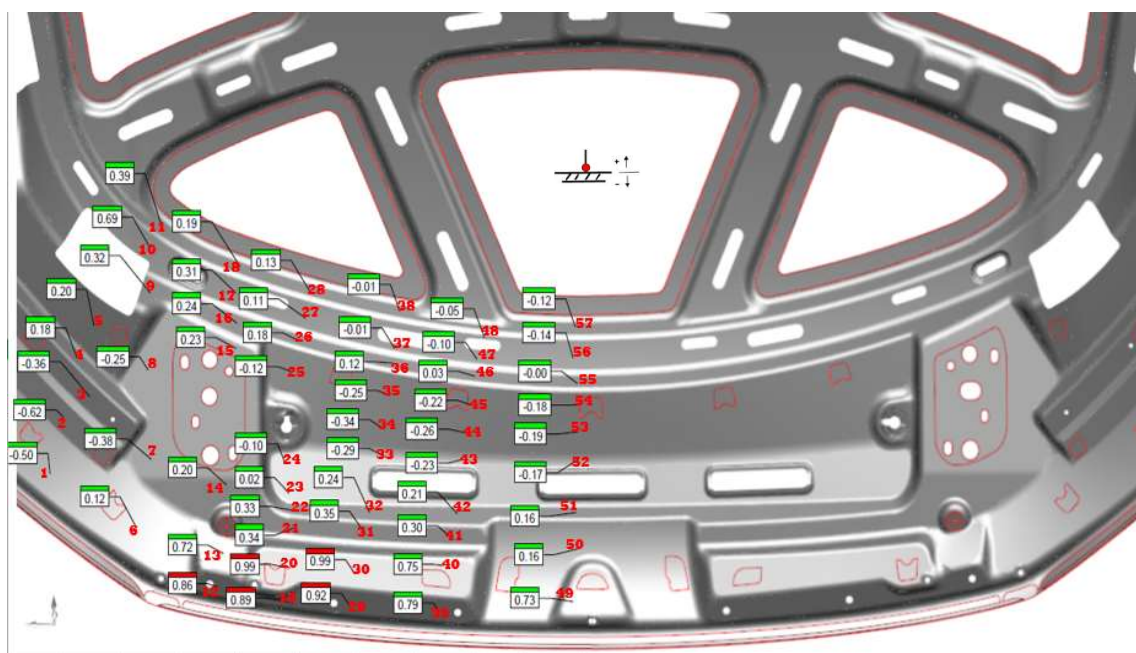


Figura A.6. Medição da peça de try-out experimental da Zona D.

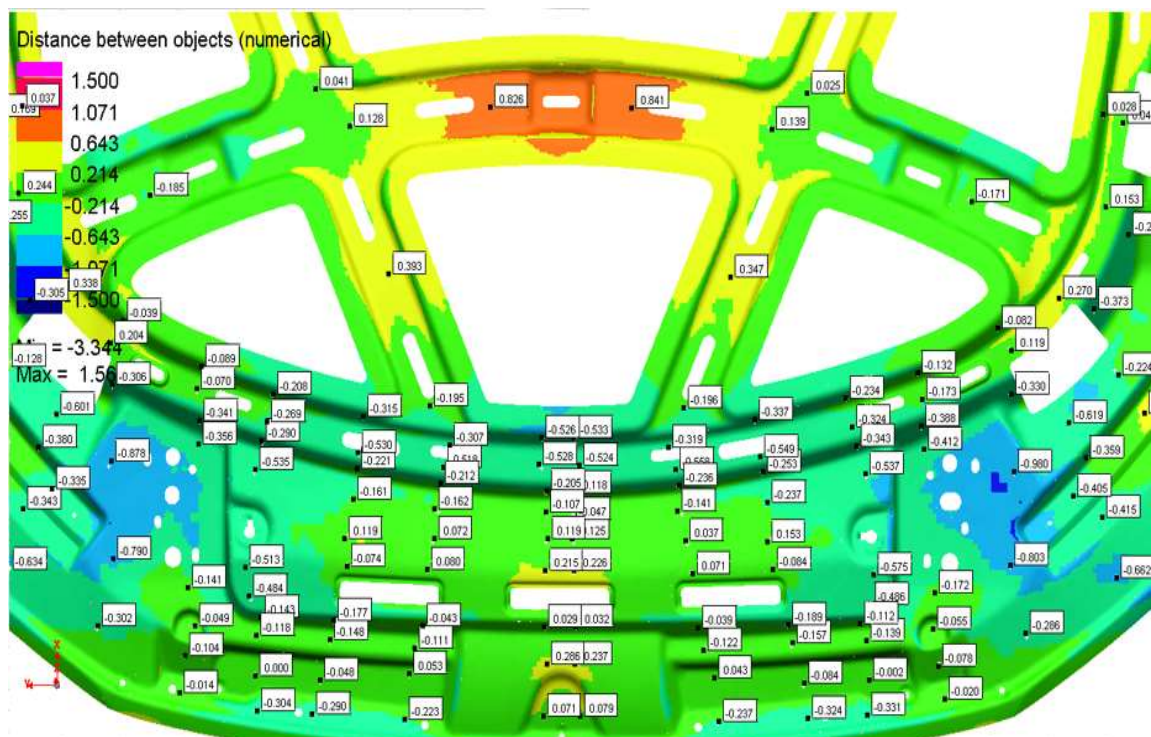


Figura A.7. Medição da peça no PAMSTAMP® da Zona D.

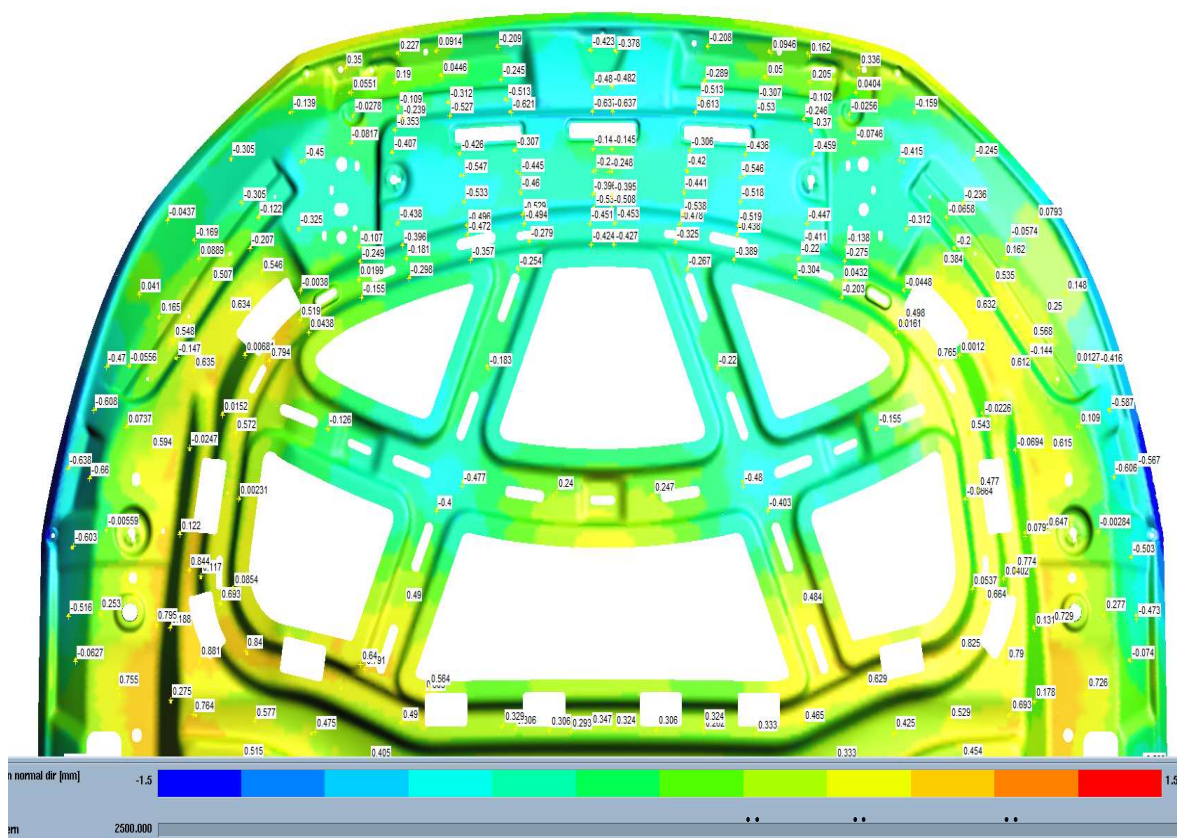


Figura A.8. Medição da peça no AutoForm® da Zona C e D.