



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Simulação Numérica do Retorno Elástico de um Componente Automóvel**

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

## **Springback Prediction of an Automotive Aluminium Panel**

Autor

**Tomás Ferreira Neves**

Orientadores

**Prof. Diogo Mariano Simões Neto**

**Eng. Pedro Daniel Pleno Rascão Barros**

Júri

Presidente	<b>Professora Doutora Maria Augusta Neto</b> <b>Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra</b>
Vogal	<b>Professora Doutora Marta Cristina Cardoso de Oliveira</b> <b>Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra</b>
Orientador	<b>Professor Doutor Diogo Mariano Simões Neto</b> <b>Professor Convidado da Universidade de Coimbra</b>

---

**Coimbra, Julho, 2016**



## Agradecimentos

Ao Professor Doutor Diogo Neto,  
*Por toda a ajuda, paciência e dedicação.*

Ao Engenheiro Pedro Barros,  
*Pela disponibilidade e auxílio prestado.*

À Professora Doutora Marta Oliveira,  
*Pela ajuda, paciência e confiança depositada.*

Ao Professor Doutor Luís Filipe Menezes,  
*Pelo incentivo e partilha de conhecimento.*

Ao Mestre João Martins,  
*Pela disponibilidade e dicas úteis.*

Ao Patrick Cunha e Pedro Carvalho,  
*Pelo companheirismo e ajuda.*

Aos meus pais, avós e irmão,  
*Pelo apoio incondicional prestado sem o qual todo este trabalho não teria sido possível.*

Aos meus amigos,  
*Por todo apoio, ajuda e encorajamento.*



## Resumo

O processo de conformação plástica de chapas metálicas é atualmente utilizado em diversas áreas da indústria produtiva, onde se destaca a indústria automóvel. A crescente complexidade dos produtos, a constante redução dos ciclos de desenvolvimento e a tendência para utilizar materiais cada vez mais leves e resistentes são os novos desafios deste processo. Para fazer face a estes desafios, tem vindo a ser feito um grande esforço no desenvolvimento de ferramentas de produção virtual, em particular na simulação numérica com o método dos elementos finitos. Atualmente, a simulação numérica é utilizada na indústria para prever a ocorrência de defeitos de estampagem, bem como para otimizar o valor dos parâmetros envolvidos no processo. No que toca ao retorno elástico, a sua correta previsão é essencial, na medida em que pode induzir fortes alterações geométricas no componente final. Assim, a sua previsão permite reduzir o ciclo de desenvolvimento das ferramentas de estampagem, permitindo fazer a compensação do retorno elástico sem recorrer a largos ciclos tentativa-erro, que são altamente dispendiosos quer em termos de tempo quer de dinheiro.

Este trabalho tem como objetivo estudar numericamente o processo de estampagem de um componente automóvel, sendo este um dos casos de estudo proposto na conferência Numisheet 2016. Após uma breve revisão dos programas de elementos finitos utilizados para simular processos de conformação plástica de chapas metálicas, é apresentado o programa de elementos finitos DD3IMP, utilizado no âmbito deste estudo. Relativamente ao modelo numérico utilizado, a chapa de alumínio apresenta um comportamento elasto-plástico (anisotropia e encruamento cinemático), enquanto as ferramentas são consideradas rígidas, sendo a sua superfície descrita por superfícies *Nagata*. Uma vez que o custo computacional é fortemente influenciado pelo número de elementos finitos utilizados na discretização da chapa, são comparados os resultados de duas discretizações. Para além do estudo do retorno elástico, são apresentados e discutidos os resultados relativos às forças nas ferramentas, deslizamento da aba, espessura final da chapa, deformação plástica, etc. Os resultados mostram que a discretização efetuada na

chapa tem uma influência significativa na previsão na maior parte dos parâmetros analisados.

**Palavras-chave:** Conformação de Chapas Metálicas; Método dos Elementos Finitos; Retorno Elástico; Numisheet; DD3IMP.

## Abstract

The sheet metal forming process is used in many fields of manufacturing, specially, the automotive industry. The increasing complexity of products, constant reduction of development cycles and trend to use lighter materials with high strength are the new challenges of this process. To face these challenges, an effort on the development of virtual production tools has been made. Nowadays, numerical simulation is used in the industry to predict defects and optimize the respective process parameters. Considering springback, its accurate prediction is essential, since this can induce strong geometrical changes in the final component. Thus, an accurate prediction of this phenomenon allows reducing tool design cycle, making springback compensation without taking large trial-and-error cycles, which are highly expensive in terms of time and money.

The main objective of this work is the numerical study of the sheet metal forming of an automotive aluminium panel. This is a benchmark proposed in the Numisheet 2016 international conference. After a brief review of the finite element software commonly used in sheet metal forming simulation, the finite element software used in this work, DD3IMP, is presented. Concerning the numerical model used, the aluminium blank shows an elasto-plastic behavior (anisotropy and kinematic hardening), whilst tools are considered rigid with their surfaces discretized with *Nagata* patches. Since the computational cost is highly influenced by the number of finite elements used on the blank, results from two different discretizations are compared. In addition to the study of springback, results related with tool forces, blank draw-in, sheet thickness and plastic deformation are presented and discussed. Results from both simulations show that the blank discretization has a strong influence on the prediction of almost all of the parameters in analysis.

**Keywords:** Sheet Metal Forming, Finite Element Method, Springback  
Numisheet, DD3IMP.



---

## Índice

Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas .....	xiii
Simbologia e Siglas .....	xv
Simbologia.....	xv
Siglas, Abreviaturas e Acrónimos .....	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Conformação Plástica de Chapas Metálicas .....	1
1.2. Simulação Numérica com o MEF .....	2
1.3. Objetivos do Trabalho e Guia de Leitura.....	4
2. FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO E PRODUÇÃO VIRTUAL.....	7
2.1. Programas de Elementos Finitos.....	7
2.2. Vantagens e Limitações da Simulação com o MEF .....	11
2.3. O Programa Académico DD3IMP .....	12
2.4. Série de Conferências do Numisheet .....	14
3. SIMULAÇÃO DA ESTAMPAGEM DE UM COMPONENTE AUTOMÓVEL.....	17
3.1. Comportamento Elasto-Plástico da Chapa .....	17
3.2. Modelação das Ferramentas de Conformação .....	26
3.3. Discretização Espacial da Chapa .....	31
3.4. Sequência de Estampagem.....	33
3.4.1. Etapa 1: Aperto do Cerra-Chapas.....	35
3.4.2. Etapa 2: Conformação .....	35
3.4.1. Etapa 3: Corte .....	36
3.4.2. Etapa 4: Retorno Elástico .....	38
3.5. Resultados e Discussão .....	39
3.5.1. Forças de Conformação .....	40
3.5.2. Deslizamento da Aba.....	42
3.5.3. Espessura Final da Chapa.....	46
3.5.4. Corte e Remapeamento.....	49
3.5.5. Retorno Elástico após Corte .....	50
3.5.6. Tempos de Computação .....	53
4. CONCLUSÕES.....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema de funcionamento de um programa de elementos finitos. Retirado de (Rusu, 2013).	7
Figura 2.2. Importância da inclusão do MEF num processo de fabrico.	11
Figura 2.3. Exemplos de casos de estudo propostos nas conferências Numisheet: (a) Ferramentas de estampagem de um guarda-lamas dianteiro, (Yang, D. Y., Oh, S. I., Huh, H., Kim, 2002); (b) Painel interior de uma porta de bagageira, (Smith, L. M., Pourboghrat, F., Yoon, J-W., Stoughton, 2005); (c) Componente estrutural de um automóvel, (Smith, L. M., Pourboghrat, F., Yoon, J-W., Stoughton, 2005); (d) Perfil S, (Hora et al., 2008); (e) Componente automóvel, (Huh, Chung, Han, & Chung, 2011); (f) Taça retangular, (Carsley et al., 2014).	16
Figura 3.1. Dimensões da chapa, em milímetros, com espessura uniforme em toda a chapa de 3mm.	18
Figura 3.2. Esquematização do efeito <i>Bauschinger</i> no comportamento mecânico de um material devido à inversão da trajetória de deformação (tração – compressão). Extraído de (Alves, 2003).	19
Figura 3.3. Representação esquemática dos encruamentos isotrópico e cinemático: (a) estado inicial e regime elástico; (b) após alguma deformação plástica; (c) após inversão da trajetória de deformação em regime elástico; (d) e (e) após mais alguma deformação plástica. Imagem extraída de Alves (2003).	19
Figura 3.4 Ensaio de corte experimentais para diferentes percentagens de pré-deformação (série de resultados 1).	21
Figura 3.5. Curvas da tensão de corte em função da deformação plástica equivalente dadas pelos resultados experimentais e pela lei de Voce com encruamento cinemático.	22
Figura 3.6. Valor do coeficiente de anisotropia em função do ângulo de laminagem no ensaio de tração uniaxial. Comparação entre resultados numéricos e experimentais.	24
Figura 3.7. Tensão limite de elasticidade em função do ângulo de laminagem no ensaio de tração uniaxial. Comparação entre resultados numéricos e experimentais.	24
Figura 3.8. Geometria das superfícies das ferramentas de conformação.	26
Figura 3.9. Geometria das ferramentas após o corte das extremidades.	27
Figura 3.10. Representação das fronteiras entre superfícies, sendo estas laranja quando existe continuidade e vermelhas na ausência dela. As duas setas assinalam dois exemplos de falta de continuidade.	27
Figura 3.11. Falta de coerência na orientação das normais às superfícies.	28

Figura 3.12. (a) Zona da malha gerada automaticamente que apresenta dois tipos de defeitos; (b) Detalhe I: Sobreposição de elementos; (c) Detalhe II: Elementos demasiado alongados. ....	29
Figura 3.13. Discretização final da superfície de cada ferramenta, compreendendo no seu total 132719 elementos finitos, onde: Matriz (verde) – 72837 elementos; Cerra-chapas (azul) – 2576 elementos; Punção (amarelo) – 57306 elementos.....	30
Figura 3.14. Discretização grosseira da chapa. ....	31
Figura 3.15. Discretização refinada da chapa. ....	32
Figura 3.16. Detalhes dos dois tipos de discretização efectuados: (a) detalhe I, correspondente à malha grosseira; (b) detalhe II, correspondente à malha refinada. ....	33
Figura 3.17. Posicionamento relativo das ferramentas e da chapa no início da simulação. Imagem extraída de (Allen et al., 2016).....	33
Figura 3.18. Aspeto da chapa no final da fase de aperto do cerra-chapas na simulação com malha refinada.....	35
Figura 3.19. Aspeto da chapa depois da etapa de conformação na simulação com malha refinada.....	36
Figura 3.20. Linha de corte sobre a chapa depois da conformação. Imagem extraída de (Allen et al., 2016). ....	36
Figura 3.21. Disposição dos pontos onde o movimento é restringido na etapa de retorno elástico e respetivas restrições. ....	39
Figura 3.22. Linhas definidas pela interceção dos planos que definem as secções I,II e III com a chapa no final da etapa de conformação. ....	39
Figura 3.23. Localização da origem dos três sistemas de coordenadas locais (após corte) correspondentes, respetivamente: (a) Secção I; (b) Secção III; (c) Secção II.....	40
Figura 3.24. Evolução das forças em todas as ferramentas (punção, matriz e cerra-chapas) em função do avanço da matriz para as duas discretizações da chapa. ....	41
Figura 3.25. Distribuição das forças de contacto durante a etapa de conformação para um avanço de 450 mm do punção: (a) malha grosseira da chapa; (b) malha refinada da chapa. ....	41
Figura 3.26. Ilustração do deslizamento da chapa durante a fase de conformação, indicando os seis pontos da aba selecionados para análise.....	42
Figura 3.27. Comparação do deslizamento dos pontos da aba, durante a fase de conformação, para as duas simulações. ....	43
Figura 3.28. Distribuição da deformação plástica equivalente no final da etapa de conformação para: (a) malha grosseira da chapa; (b) malha refinada da chapa. ..	44
Figura 3.29. Detalhe das zonas: (a) onde ocorreu maior deformação plástica equivalente na simulação com malha grosseira; (b) mesma zona, mas com discretização refinada. ....	44

---

Figura 3.30. Distribuição da tensão de escoamento no final da etapa de conformação para: (a) malha da chapa grosseira; (b) malha da chapa refinada. ....	45
Figura 3.31. Distribuição da deformação total em espessura no final da etapa de conformação para: (a) malha da chapa grosseira; (b) malha da chapa refinada....	47
Figura 3.32. Distribuição da espessura final da chapa ao longo da coordenada local $X_I$ na secção I. ....	48
Figura 3.33. Distribuição da espessura final da chapa ao longo da coordenada local $X_{II}$ na secção II. ....	48
Figura 3.34. Distribuição da espessura final da chapa ao longo da coordenada local $X_{III}$ na secção III. ....	49
Figura 3.35. (a) Vista geral da chapa com discretização refinada após corte; (b) Detalhe I; (c) Detalhe II. ....	50
Figura 3.36. Sobreposição da geometria do componente antes (vermelho) e depois (azul) do retorno elástico para: (a) malha grosseira da chapa; (b) malha refinada da chapa. ....	51
Figura 3.37. Comparação dos perfis do componente, antes e depois do retorno elástico na Secção I. ....	52
Figura 3.38. Comparação dos perfis do componente, antes e depois do retorno elástico na Secção II. ....	52
Figura 3.39. Comparação dos perfis do componente, antes e depois do retorno elástico na Secção III. ....	53



---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Exemplos de <i>solvers</i> de elementos finitos comerciais, <i>open-source</i> e acadêmicos. ....	10
Tabela 3.1. Propriedades elásticas da liga de alumínio AA6451-T4.....	18
Tabela 3.2. Parâmetros da lei de Voce isotrópica para um ângulo de 0° com a direção de laminagem. Retirado de (Allen, Dutton, Oliveira, & Hazra, 2016) .....	20
Tabela 3.3. Parâmetros da lei de Voce com encruamento cinemático. ....	22
Tabela 3.4. Comparação dos valores da tensão limite de elasticidade e do coeficiente de anisotropia biaxiais dados pelos diferentes critérios com os do ensaio experimental. ....	25
Tabela 3.5. Parâmetros para o critério de plasticidade Yld91 .....	25
Tabela 3.6. Características do computador utilizado para fazer as simulações numéricas. ....	54
Tabela 3.7. Tempos computacionais das simulações realizadas e respectivas etapas. ....	54



---

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$\varepsilon_3$  – Deformação total em espessura;

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

$\dot{\bar{\varepsilon}}^p$  – Taxa de variação da deformação plástica equivalente;

$\nu$  – Coeficiente de Poisson;

$\sigma_b$  – Tensão limite de elasticidade em tração biaxial;

$\bar{\sigma}$  – Tensão equivalente;

$\boldsymbol{\sigma}'$  – Tensor das tensões desviador;

$A, B, C$  – Parâmetros da lei de Voce (encruamento isotrópico);

$c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, m$  – Parâmetros de anisotropia do critério de Yld91;

$C_X$  – Velocidade de aproximação ao valor de saturação;

$E$  – Módulo de Young;

$F, G, H, L, M, N$  - Parâmetros de anisotropia do critério de Hill48;

$r$  – Coeficiente de anisotropia;

$r_b$  – Coeficiente de anisotropia em tração biaxial;

$t$  – Espessura final da chapa;

$t_0$  – Espessura inicial da chapa;

$\mathbf{X}$  – Tensor das tensões inversas;

$\dot{\mathbf{X}}$  – Taxa de variação do tensor das tensões inversas;

$X_{Sat}$  – Valor de saturação da norma do tensor das tensões inversas;

$Y$  – Tensão limite de elasticidade;

$Y_{sat}, C_Y, Y_0$  – Parâmetros da lei de Voce (encruamento isotrópico).

## **Siglas, Abreviaturas e Acrónimos**

- BUT – “Bending-Under-Tension”;
- CAD – “Computed-Aided Design”;
- CEMUC – Centro de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra;
- DD3IMP – “Deep Drawing 3D IMPLICIT element code”;
- DD3MAT – “Deep Drawing 3D MATERIAL parameters identification”;
- DD3TRIM – “Deep Drawing 3D TRIMming”;
- Hill48 – Critério de plasticidade de (Hill, 1948);
- IGES – “Initial Graphics Exchange Specification”;
- MEF – Método dos Elementos Finitos;
- NURBS – “Non-Uniform Rational Basis Spline”;
- OSS – “One Step Springback”;
- Yld91 – Critério de plasticidade de (Barlat, Lege, & Brem, 1991).

## 1. INTRODUÇÃO

Nos dias que correm, na indústria metalomecânica, tornou-se indispensável o recurso a ferramentas de auxílio tanto na conceção como no processo de fabrico dos seus produtos. Isto, permite diminuir tempos e custos de fabrico, bem como aumentar a qualidade dos componentes produzidos, mantendo assim a empresa competitiva. Uma das ferramentas que tem vindo a ter uma utilização crescente desde a segunda metade do século XX é a simulação numérica, mais propriamente o Método dos Elementos Finitos (MEF).

Na indústria de conformação plástica, o recurso ao MEF tornou-se de carácter obrigatório. Por sua vez, a conformação plástica de chapas metálicas é um processo tecnológico altamente influenciado pela experiência dos projetistas e envolve ciclos de tentativa-erro durante a fase de desenvolvimento. O objetivo principal do MEF, é a redução destes ciclos. Neste processo tecnológico, a simulação numérica permite fazer a validação virtual da geometria das ferramentas de estampagem, bem como, otimizar os parâmetros envolvidos no processo, como por exemplo, as forças de aperto do cerra-chapas e a geometria inicial do esboço. Além disso, a simulação numérica é frequentemente utilizada para prever o aparecimento de defeitos.

### 1.1. Conformação Plástica de Chapas Metálicas

A conformação plástica de chapas metálicas é um processo tecnológico utilizado em grande escala na indústria, podendo salientar-se a automóvel e a aeroespacial. A necessidade de redução do peso dos automóveis levou não só à utilização de materiais cada vez mais leves, como a um desenvolvimento do processo em questão. Este, tem vindo a crescer em paralelo com a indústria respondendo às suas necessidades de maneiras cada vez mais eficientes em termos não só económicos mas também de qualidade.

O processo de conformação plástica apresenta-se como um procedimento complexo que recorre à aplicação de forças externas, por parte de prensas equipadas com ferramentas, de modo a que uma chapa inicialmente plana que, após sofrer deformação plástica, adquira uma geometria não-planificável. O processo pode ser composto por um ou

mais estágios que podem envolver diferentes tipos de operações, das quais se podem salientar a conformação (atribuição de uma determinada forma à chapa metálica por deformação plástica), o corte e a dobragem. O projeto das ferramentas é um dos aspetos mais críticos de todo o processo, uma vez que envolve elevados custos e tempo. Apesar da experiência dos projetistas e do crescente uso de programas de simulação numérica, continuam, ainda assim, a existir ciclos de tentativa-erro, que por sua vez, podem dar origem a enormes perdas a nível económico. É portanto, imperativo reduzir estes custos e é neste aspeto que o método dos elementos finitos tem um papel fundamental.

O processo de estampagem demonstra-se altamente rentável na produção em série de componentes. A indústria automóvel, por exemplo, retira inúmeras vantagens deste tipo de processo, que, ao demonstrar elevada cadência, permite o abate célere dos elevados custos que envolvem o planeamento do processo e produção das ferramentas. De facto, atualmente, um carro de produção em série, conta com cerca de 500 componentes produzidos pelo processo anteriormente referido.

## **1.2. Simulação Numérica com o MEF**

*“A simulação é um processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender o seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação.”* (Pegden, 1990)

A nível industrial, o MEF é o método mais utilizado na resolução de problemas complexos, o que faz dele uma ferramenta indispensável, uma vez que permite a otimização dos parâmetros que ditam o sucesso de diferentes processos tecnológicos. Esta ferramenta, apesar de ter mais aplicações, como por exemplo em mecânica estrutural, tornou-se de carácter obrigatório no processo de estampagem de chapas metálicas.

A análise estrutural consiste na aplicação de um conjunto de procedimentos analíticos com base em princípios de engenharia. Contudo, existem diferentes tipos de problema, sendo uns mais complexos que outros. Um problema designa-se linear quando é possível relacionar a solicitação (carregamento) e a resposta através de uma relação linear. Por outro lado, um problema é não-linear quando apresenta um ou mais tipos de não-linearidades. Estas não-linearidades podem ser do tipo material, geométrico ou devido às

condições de fronteira. Neste caso, o uso de expressões analíticas simples não se revela suficiente, sendo necessário recorrer a métodos numéricos para a resolução do problema em questão.

A simulação numérica do processo de estampagem de chapas metálicas através do método dos elementos finitos é um procedimento complexo que inclui não-linearidades. Assim, os algoritmos de resolução destes problemas tendem a ser bastante robustos. Para a análise deste tipo de problemas, existe um vasto número de opções relativamente ao tipo de abordagem a efetuar, como por exemplo, no que toca ao tipo de elementos finitos a utilizar, de formulação mecânica das equações de movimento, de esquema de integração temporal, ao tratamento do contacto envolvendo atrito ou o algoritmo de resolução dos sistemas de equações.

Relativamente à discretização a efetuar no corpo deformável, podem ser usados elementos do tipo sólido (tridimensionais), como é o caso dos elementos hexaédricos e tetraédricos, ou elementos do tipo bidimensional, como é o caso das membranas ou das cascas.

No que toca ao tipo de formulação mecânica, um processo de estampagem de chapas metálicas, tanto pode ser considerado *quasi*-estático como dinâmico. O facto de poder ser considerado *quasi*-estático deve-se ao facto de ser um processo que, apesar de ser efetuado com alguma velocidade, não se compara, por exemplo, com uma situação de impacto. Deste modo, ao se considerar este como sendo *quasi*-estático, estão a desprezarem-se as forças de inércia, ao passo que numa formulação dinâmica, o trabalho destas é levado em conta.

Quanto ao tipo de integração temporal, as formulações podem ser do tipo implícito ou explícito. Um método explícito calcula o estado do sistema num incremento de tempo, considerando apenas o estado do sistema no incremento anterior. Este, não depende do estado atual, enquanto que, num método implícito a solução para um dado instante é calculada tendo em conta o estado anterior e o atual do sistema. Deste modo, um método implícito apresenta-se como sendo de implementação mais complexa. Um esquema explícito é condicionalmente estável, admitindo apenas incrementos de tempo muito pequenos, o que pode levar a um grande número de incrementos, aumentando assim o tempo de computação. Já um esquema implícito não apresenta, geralmente, problemas de

estabilidade numérica, admitindo incrementos de tempo maiores. No entanto, é necessário resolver um sistema de equações não lineares em cada incremento.

### **1.3. Objetivos do Trabalho e Guia de Leitura**

O principal objetivo deste trabalho é estudar numericamente com o MEF o processo de estampagem de uma chapa em alumínio na produção de um componente automóvel de grandes dimensões. Este caso de estudo foi proposto na conferência Numisheet 2016, tendo como título original “Springback of a Jaguar Land Rover Aluminium Panel”. Deste modo, pretende-se fazer uma correta previsão do retorno elástico após conformação e corte, bem como avaliar as forças de conformação envolvidas no processo e a espessura final do componente. A influência de vários parâmetros numéricos no resultado da simulação é avaliada neste trabalho, nomeadamente a discretização da chapa e das ferramentas. Este estudo numérico foi realizado com o programa de elementos finitos DD3IMP (Menezes & Teodosiu, 2000), o qual tem vindo a ser continuamente desenvolvido no CEMUC com o intuito de simular processos de estampagem de chapas metálica, especificamente componentes de pequena e média dimensão.

De modo a facilitar a leitura e consulta desta dissertação, esta secção faz uma apresentação da estrutura do trabalho, bem como uma breve descrição dos temas abordados em cada capítulo.

**Capítulo 1, *Introdução*** – Neste primeiro capítulo foi feito um breve enquadramento relativamente ao estado atual de simulação numérica com o método dos elementos finitos, estabelecendo-se uma relação com o processo de conformação plástica de chapas metálicas.

**Capítulo 2, *Ferramentas de Simulação e Produção Virtual*** – Aqui foi realizado um enquadramento acerca dos programas de simulação numérica existentes atualmente, com especial destaque para o programa académico (DD3IMP) utilizado neste estudo. Por fim, faz-se uma revisão geral dos casos de estudo que têm vindo a ser propostos na conferência internacional Numisheet.

**Capítulo 3, *Simulação da Estampagem de um Componente Automóvel*** – Neste capítulo é abordado o processo de estampagem de um componente automóvel. Aqui, é apresentada a informação relativa às diferentes etapas da simulação, a caracterização

mecânica do material da chapa, a modelação das ferramentas e discretização da chapa. São também apresentados e discutidos resultados relativamente a diferentes parâmetros analisados.

**Capítulo 4, *Conclusões*** – Para finalizar, no último capítulo são tecidas algumas conclusões finais acerca do trabalho efetuado.

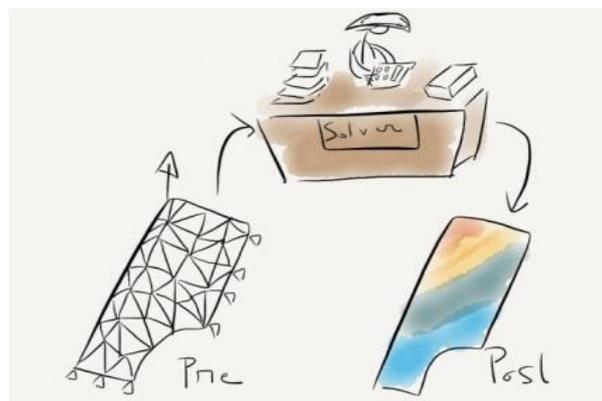


## 2. FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO E PRODUÇÃO VIRTUAL

O processo de conformação de chapas metálicas é um dos processos tecnológicos para os quais a concepção virtual através do MEF adquiriu uma importância relevante nos últimos anos, conduzindo também a desenvolvimentos tecnológicos. A determinação da janela de processo envolve a análise de diversos parâmetros tais como a geometria das ferramentas, parâmetros de materiais, etc. Os métodos de produção virtual reduzem o tempo e custo de concepção e fabrico das ferramentas de estampagem. Por este motivo, a indústria de estampagem de chapas metálicas apoia-se no MEF para realizar o processo de concepção e fabrico de ferramentas, em particular, no caso de processos complexos envolvendo multi-etapas.

### 2.1. Programas de Elementos Finitos

De um modo geral, os programas de simulação numérica com o método dos elementos finitos podem ser divididos em três componentes: o *solver*, o pré e o pós-processador.



**Figura 2.1.** Esquema de funcionamento de um programa de elementos finitos. Retirado de (Rusu, 2013).

**Pré-processador:** Programa que serve de suporte à fase inicial de uma simulação numérica. Aqui, o objeto de estudo da simulação é desenhado (ou importado de

um programa CAD) e discretizado, ou seja, é gerada uma malha de elementos finitos sobre o sólido. No caso de processos de conformação, é também aqui que se desenham e discretizam as ferramentas, cujas superfícies vão interagir e deformar o objeto em estudo. É no pré-processamento que são gerados os ficheiros de entrada para o *solver*, respeitantes à discretização dos objetos envolvidos na simulação, bem como contendo todos os valores dos parâmetros necessários à simulação.

**Solver:** Algoritmo que realiza os cálculos da simulação após a leitura dos ficheiros provenientes do pré-processamento e da definição de um elevado número de parâmetros essenciais a esta, tais como, o tipo de integração, as condições de fronteira, os carregamentos, o tamanho do incremento de deslocamento/força das ferramentas (no caso de processos de conformação) ao longo das várias etapas da simulação.

**Pós-processador:** Ferramenta que traduz graficamente o resultado proveniente do *solver*. Fornece informação respeitante ao estado do objeto em estudo nas várias etapas da simulação. É esta ferramenta que permite fazer a análise de diversas variáveis tanto no final como ao longo da simulação, como por exemplo, o deslocamento, as deformações, a distribuição de tensões, entre outras.

Alguns programas de elementos finitos incluem as três ferramentas em simultâneo, enquanto que outros, satisfazem apenas alguma(s) das etapas anteriormente referidas. Existe ainda a possibilidade de as empresas criadoras deste tipo de programas poderem fornecer os três tipos de ferramentas, no entanto, subdivididos em programas isolados.

Os tipos de programas anteriormente referidos podem ser de diferentes naturezas, nomeadamente, comercial, *open-source* ou académica.

**Comercial:** Estes programas são os mais comumente utilizados a nível industrial. Estão devidamente creditados e são geralmente criados por grandes equipas que contribuem ativamente para a melhoria dos seus programas que vão surgindo no mercado em versões cada vez mais atualizadas e melhoradas. São habitualmente acompanhados de cursos de formação para uma correta utilização das suas ferramentas.

**Open-source:** Este tipo de programas possui geralmente uma licença e têm a vantagem de, para além de serem de livre acesso, darem permissão aos seus utilizadores de adaptarem o código às suas necessidades ao permitirem o acesso ao código fonte. Conta

ainda com o desenvolvimento ativo do código por parte da comunidade utilizadora e também com o suporte aos utilizadores através de fóruns de discussão.

**Académica:** Programa criado no seio de instituições de ensino, utilizado geralmente para uso interno das instituições colaboradoras. A maioria dos algoritmos desenvolvidos é inicialmente implementada neste tipo de programas, onde é feita a sua validação, sendo posteriormente implementados em programas comerciais.

No que diz respeito a *solvers* de elementos finitos, existe um vasto leque de opções no que toca a programas comerciais e *open-source*. Contudo, estes últimos, são na sua grande maioria, dedicados a análise estrutural, enquanto que as opções a nível de programas comerciais abrangem um maior número de aplicações, nomeadamente, análise estrutural, processos de conformação material, análise térmica, de fluídos, eletromagnética, etc. Existe ainda, em algumas situações, como é o caso do ADINA e do LISA, a possibilidade de obter uma licença grátis do programa, contudo, tratam-se de versões limitadas em termos de número de nós e de funcionalidades.

No que toca à conformação de chapas metálicas, podem-se salientar o AutoForm, o LS-DYNA e o Pam-Stamp, como sendo os programas mais utilizados a nível industrial. Não descurando, no entanto, a eficácia dos programas académicos, que ao contarem com o apoio de grandes instituições de ensino, têm-se tornado cada vez mais eficientes e dado provas do seu valor em conferências internacionais sobre o tema, como é o caso do DD3IMP.

De entre os programas enunciados na Tabela 2.1, alguns, para além do *solver*, incluem também ferramentas dedicadas ao pré e pós-processamento. No entanto, este não é um aspeto comum a todos. Deste modo, torna-se fundamental encontrar alternativas para a realização destas etapas. Mais uma vez, podem-se encontrar programas de naturezas distintas. O programa GiD apresenta-se como a solução mais completa, tendo uma interface acessível e um vasto conjunto de ferramentas, sendo no entanto, de carácter comercial. Alternativamente, é possível encontrar programas tais como o Gmsh ou o Salomé que, embora menos completos, são de livre utilização.

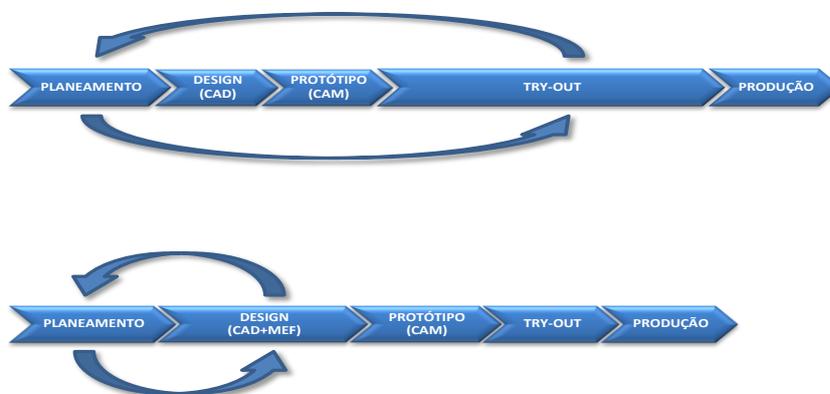
**Tabela 2.1.** Exemplos de *solvers* de elementos finitos comerciais, *open-source* e académicos.

	<b>Nome</b>	<b>Criador</b>	<b>Aplicações</b>
<b>Comerciais</b>	AutoForm-Solver	AutoForm	Estrutural (estampagem)
	MSC Nastran	MSC Software	Estrutural; estática; dinâmica; térmica
	Pam-Stamp	ESI Group	Estrutural (estampagem)
	ADINA	ADINA R&D, Inc	Estrutural; térmica; fluidos
	LISA	Sonnenhof Holdings	Estrutural; estática; dinâmica; fluidos; transf. calor; eletromagnetismo
	Stampak	Quantech ATZ	Estrutural (estampagem)
	ANSYS	ANSYS, Inc.	Estrutural; fluidos; eletrónica; semicondutores
	Abaqus	Dassault Systemes	Estrutural; estática; dinâmica; térmica; acústica; impacto; vibrações
	LS-DYNA	LSTC	Estrutural (estampagem); térmica; fluidos; eletromagnetismo; acústica
	Hyperform	Altair	Estrutural (estampagem)
<b>Open-source</b>	OpenFOAM	OpenCFD Ltd (ESI Group)	Fluidos; térmica; estrutural
	Code-Aster	EDF	Estrutural; estática; dinâmica; térmica
<b>Académicos</b>	DD3IMP	Universidade de Coimbra	Estrutural (estampagem)
	LAGAMINE	Universidade de Liège	Processos de conformação plástica
	Stamp3D	Energy Science and Technology, Kyoto University	Processos de conformação plástica

## 2.2. Vantagens e Limitações da Simulação com o MEF

Este tipo de ferramenta tem-se tornando cada vez mais fundamental no seio da indústria. Com a sua evolução, os seus utilizadores têm-se tornado cada vez mais exigentes no que diz respeito ao que podem esperar do programa de elementos finitos. Deste modo, embora exista uma tentativa constante de tornar os programas de elementos finitos mais fáceis de utilizar, a sua complexidade “interna” também vai aumentando com a introdução de novos parâmetros e estratégias numéricas. Apesar da sua complexidade, é uma ferramenta que traz consigo um enorme número de vantagens, contudo, sempre acompanhadas de algumas limitações.

Na indústria de conformação de chapa metálica, onde é fundamental a existência do MEF, esta ferramenta permite fazer a otimização de parâmetros do processo tais como, a força de aperto do cerra-chapas ou mesmo a geometria inicial da chapa. A simulação numérica de determinado processo de estampagem permite ainda fazer a identificação dos requisitos em termos de equipamento ou material necessário. O MEF é uma ferramenta que permite fazer a verificação do processo analisando cada uma das diferentes etapas, verificando a resposta do material a cada uma delas. Deste modo, permite identificar o surgimento de defeitos, tais como rugas, estrição ou retorno elástico. Deste modo, o MEF permite reduzir o número de ciclos tentativa-erro, o que por sua vez, reduz o custo de conceção das ferramentas. Tudo isto vai culminar numa redução de custos tanto em termos de material como em termos de tempo, como se ilustra no esquema da Figura 2.2.



**Figura 2.2.** Importância da inclusão do MEF num processo de fabrico.

Apesar da evolução que tem ocorrido nesta área, existem ainda algumas limitações associadas ao uso desta ferramenta que se prendem essencialmente com o facto de serem requeridos certos recursos para a sua correta utilização, nomeadamente, a nível de equipamento e de recursos humanos. É portanto, exigida uma boa capacidade em termos de *hardware*, bem como, de pessoal devidamente especializado no MEF.

A própria natureza da simulação, traz consigo um erro associado. As limitações no MEF traduzem-se, geralmente, em erros, que podem ser de diferentes tipos. Devido ao facto de este lidar com um largo número de parâmetros e de poder ser abordado de diferentes maneiras, esta pode tornar-se numa ferramenta de perigosa utilização, podendo dar origem a resultados muito distintos da realidade. Segundo (Tekkaya & Paulo A.F. Martins, 2009), é possível dividir as diferentes fontes de erro que podem comprometer uma simulação utilizando o MEF, em três classes essenciais: erros de modelação, numéricos e outros tipos de erro. Cabe ao seu utilizador, o engenheiro de processo, saber minimizar o erro através da afinação de diversos parâmetros. Relacionado com os erros de modelação estão, por exemplo, a seleção do modelo e características materiais, as dimensões do fenómeno físico, a discretização das ferramentas (bem como a sua aproximação a corpos rígidos) e a modelação do atrito. Os erros de natureza numérica estão relacionados com o tipo de análise adotada, tipo de elementos utilizado, o critério de convergência, incremento de tempo/deslocamento e o parâmetro de penalidade. Por fim, a última classe integra fontes de erro que não se enquadram nas classes anteriores, tais como, a má utilização do programa de elementos finitos (devido à falta de experiência ou informação por parte do utilizador) que pode levar a resultados muito díspares da realidade.

### **2.3. O Programa Académico DD3IMP**

O DD3IMP é um programa de elementos finitos de natureza académica, direccionado especificamente para a estampagem de chapas metálicas (Menezes & Teodosiu, 2000), que se encontra num processo ativo de desenvolvimento e otimização. Este conta ainda com uma plataforma, o DD3LT (Helena, 2012), que tem vindo a ser desenvolvida com o intuito de auxiliar a aprendizagem de métodos de produção virtual no âmbito de conformação de chapas metálicas. Esta plataforma inclui algumas ferramentas de pré e pós-processamento, bem como uma base de dados que inclui um vasto conjunto de modelos previamente criados.

Ao tratar-se da simulação de um processo de conformação plástica, o modelo mecânico tem de ser capaz de lidar corretamente com as grandes deformações e rotações elasto-plásticas da chapa. Deste modo, a componente elástica do material é tratada como sendo isotrópica, enquanto o seu comportamento plástico é descrito através de modelos constitutivos fenomenológicos baseados na definição de um critério de plasticidade e uma lei de encruamento associada. Existem vários critérios de plasticidade que podem ser utilizados e cujo campo de aplicação consegue abranger situações de isotropia e anisotropia (von Mises, Hill 1948, Drucker, Bartlat et al., 1991; Karafilis e Boyce, 1993; Cazacu e Barlat, 2001). O encruamento isotrópico pode ser descrito através das leis de Swift (1947) ou de Voce (1948), que podem ser combinadas com a lei de encruamento cinemático de Armstrong–Frederick.

Apesar de o processo de estampagem se apresentar como um processo dinâmico, as velocidades envolvidas, nomeadamente o deslocamento das ferramentas, são relativamente baixas em comparação com problemas de impacto. Assim, o DD3IMP utiliza uma formulação *quasi*-estática, ou seja, não considera o efeito da velocidade/tempo, admitindo assim que as forças são aplicadas de forma estática. Além disso, o DD3IMP utiliza um algoritmo de integração temporal implícito associado a uma metodologia de previsão-correção. No início de cada incremento é utilizada uma abordagem explícita com o objetivo de obter uma solução inicial aproximada (deslocamentos nodais, estado de tensão e forças de contacto), que posteriormente é corrigida com o auxílio da estratégia  $r_{min}$  (impõe restrições ao tamanho do incremento) para melhorar a convergência do processo iterativo (Oliveira & Menezes, 2004). A solução aproximada obtida é corrigida iterativamente utilizando um algoritmo Newton-Raphson, recorrendo a um único ciclo iterativo para a resolução das não-linearidades associadas ao comportamento elasto-plástico do material e ao contacto com atrito.

Tratando-se da simulação de um processo de conformação de chapas metálicas, as condições de fronteiras são ditadas pelo contacto entre a chapa e a superfície das ferramentas. Deste modo, é fundamental definir corretamente a superfície das ferramentas, bem como, o tipo de contacto existente entre estas e cada ponto da chapa. Assim, o DD3IMP utiliza um algoritmo de deteção de contacto do tipo *master-slave*, (Hallquist, Goudreau & Benson, 1985), onde se consideram as ferramentas como sendo corpos rígidos. O atrito entre a chapa e a superfície das ferramentas é modelado com a lei de

Coulomb, sendo a gestão deste contacto com atrito feita com o método do Lagrangiano aumentado, (Alart & Curnier, 1991). As superfícies das ferramentas são modeladas usando superfícies paramétricas *Nagata* (Neto, Oliveira, Menezes, & Alves, 2014).

No que respeita à discretização da chapa, o DD3IMP apenas permite o uso de elementos finitos sólidos, que se mostram bastante eficientes tanto na modelação da evolução da espessura, como dos gradientes de tensão da mesma (Teodosiu, Daniel, Cao, & Duval, 1995). Estes elementos podem ser aplicados com integração completa, reduzida ou com integração reduzida seletiva. A biblioteca de elementos finitos disponíveis contempla elementos hexaédricos (trilineares, de 8 nós e triquadráticos de 27 nós), elementos *serendipity* com 20 nós e elementos tetraedros (lineares de 4 nós e quadráticos de 10 nós), (Alves, 2003).

No que toca ao retorno elástico, a estratégia mais utilizada com o DD3IMP é o OSS – *One Step Springback*, onde, no final da etapa de conformação, as ferramentas são todas removidas num único incremento, desaparecendo assim todas as restrições impostas por estas, (Alves, 2003). Contudo, existem outras duas estratégias. Uma delas, consiste na remoção das ferramentas, uma a uma, utilizando um incremento temporal para a remoção de cada uma delas. Por fim, existe ainda a alternativa de fazer a remoção das ferramentas de forma progressiva, simplesmente, continuando a simulação, mas agora, invertendo o sentido de movimento das ferramentas. Apesar de esta ser a estratégia que mais se aproxima do que acontece na realidade, demonstra-se muito dispendiosa a nível computacional, sendo portanto, preferível qualquer uma das outras.

## 2.4. Série de Conferências do Numisheet

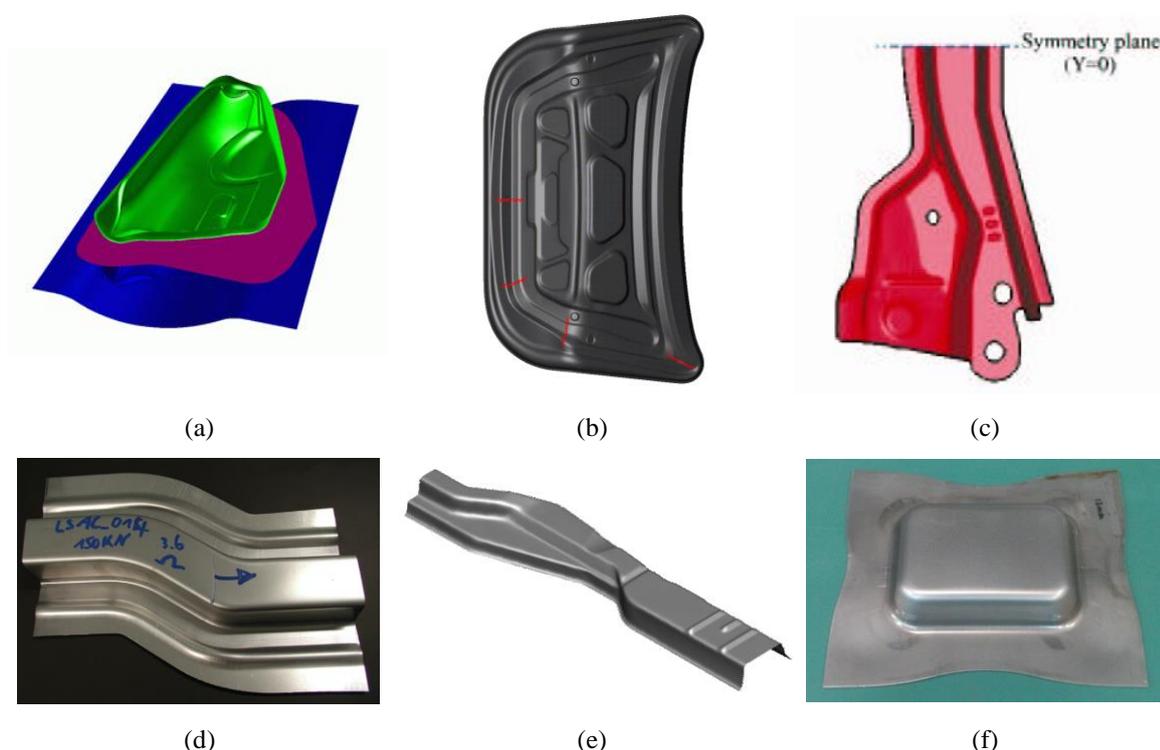
As três conferências internacionais mais importantes na área da simulação numérica de processos de conformação de chapas metálicas são: Numisheet (trianual), Numiform (trianual) e Esaform (anual). Estas conferências juntam um grande número de especialistas na área e têm como objetivo a troca de ideias e debate sobre as tecnologias emergentes no âmbito do tema anteriormente referido. No caso da conferência Numisheet, são propostos alguns casos de estudo (*benchmarks*), cujo objetivo principal é avaliar a precisão dos programas de simulação, nomeadamente na previsão de defeitos que ocorrem no processo de estampagem de chapas metálicas (estrição, fratura, retorno elástico, rugas,

etc.). Durante a conferência os resultados de todos os participantes são apresentados e comparados com os resultados experimentais (confidenciais até ao momento), permitindo avaliar o estado atual da simulação numérica e as estratégias adotadas pelos participantes.

Geralmente a conferência Numisheet conta com a participação da indústria automóvel (Ford, GM, Chrysler, Audi, BMW, Hyundai, Jaguar-Land Rover, etc.), as maiores produtoras mundiais de chapas metálicas (Alcoa, Arcelor Mittal, Thyssen-Krupp, Posco, etc.), as empresas que desenvolvem os programas de elementos finitos comerciais (AutoForm, ESI Group, Dassault Systemes, Altair, MSC Software, etc.) e as universidades e centros de investigação.

Uma vez que o objetivo deste trabalho é estudar numericamente o retorno elástico de um componente automóvel após conformação e corte, de seguida apresentam-se os casos de estudo relacionados com o retorno elástico, propostos nos últimos 20 anos de Numisheet. Um dos casos de estudo proposto na conferência Numisheet 1996 (Michigan, Estados Unidos da América) tinha como objetivo avaliar a ocorrência de rugas e retorno elástico na conformação de um perfil S. De facto, esta geometria continua a ser utilizada atualmente em meio académico para estudar o retorno elástico em novos materiais. O primeiro caso de estudo envolvendo um componente automóvel foi proposto na conferência Numisheet 1999 (Besançon, França). O objetivo deste caso de estudo consistia na simulação numérica do processo de estampagem de um painel exterior de uma porta de um automóvel, sendo que o processo de estampagem incluía as etapas de conformação, corte, *flanging* e retorno elástico. No âmbito da conferência Numisheet 2002 (Jeju, Coreia do Sul) foi proposto pela Hyundai Motor Company o estudo do processo de estampagem de um guarda-lamas dianteiro (ver Figura 2.3 (a)). À semelhança do caso de estudo apresentado anteriormente, o objetivo consistia na simulação numérica do processo de estampagem envolvendo as operações de conformação, corte, *flanging* e retorno elástico. Uma vez que a conferência Numisheet 2005 decorreu em Detroit (Estados Unidos da América), foram propostos dois casos de estudo diretamente relacionados com a indústria automóvel. Assim, o primeiro caso de estudo foi proposto pela General Motors Corporation, tendo como objetivo a previsão do retorno elástico do painel interior de uma porta de bagageira (ver Figura 2.3 (b)). O segundo caso de estudo foi proposto pela Daimler Chrysler Corporation, onde se pretendia avaliar a capacidade dos programas de simulação para prever o retorno elástico num componente (estrutural) automóvel (Figura

2.3 (c)). Ambos os casos de estudo requerem operações de conformação, corte e retorno elástico. Os casos de estudo propostos na conferência Numisheet 2008 (Interlake, Suíça) mostraram ter um caráter mais acadêmico. O estudo da influência dos freios de retenção no retorno elástico após a conformação de um perfil S (Figura 2.3 (d)) foi proposto pela Daimler AG com o intuito de avaliar a capacidade dos programas de simulação para lidar com a modelação dos freios. No âmbito da conferência Numisheet 2011 (Seul, Coreia do Sul) foi proposto um caso de estudo que consistia na otimização do processo de estampagem de um componente automóvel utilizando aço de alta resistência (Figura 2.3 (e)). O principal objetivo passava por otimizar o processo de estampagem, tentando eliminar problemas relacionados com o aparecimento de rugas, fratura ou retorno elástico. Um dos casos de estudo proposto pela Ford Motor Company no âmbito da conferência Numisheet 2014 (Melbourne, Austrália) tinha como objetivo a previsão do retorno elástico e da variação da espessura de uma taça retangular após corte (Figura 2.3 (f)). O processo de estampagem podia incluir mais que uma etapa.



**Figura 2.3.** Exemplos de casos de estudo propostos nas conferências Numisheet: (a) Ferramentas de estampagem de um guarda-lamas dianteiro, (Yang, D. Y., Oh, S. I., Huh, H., Kim, 2002); (b) Painel interior de uma porta de bagageira, (Smith, L. M., Pourboghrat, F., Yoon, J-W., Stoughton, 2005); (c) Componente estrutural de um automóvel, (Smith, L. M., Pourboghrat, F., Yoon, J-W., Stoughton, 2005); (d) Perfil S, (Hora et al., 2008); (e) Componente automóvel, (Huh, Chung, Han, & Chung, 2011); (f) Taça retangular, (Carsley et al., 2014).

### **3. SIMULAÇÃO DA ESTAMPAGEM DE UM COMPONENTE AUTOMÓVEL**

Esta secção apresenta a descrição do caso de estudo proposto na conferência Numisheet 2016, tendo como título original “Springback of a Jaguar Land Rover Aluminium Panel”. Deste modo, o processo de estampagem é apresentado em detalhe, em particular o modelo de elementos finitos utilizado na simulação numérica e as diversas etapas envolvidas no processo. De seguida, os resultados da simulação são apresentados e discutidos, tendo como principal foco a previsão do retorno elástico após as etapas de conformação e corte.

O caso de estudo selecionado corresponde à estampagem de uma chapa de alumínio (3 mm de espessura) para produzir um componente automóvel de grandes dimensões. O processo é dividido em quatro etapas sequenciais: (i) aperto do cerra-chapas; (ii) conformação plástica; (iii) corte do material em excesso e (iv) retorno elástico. A geometria das ferramentas de conformação, bem como da chapa de alumínio são fornecidas pelo comité na forma de modelos CAD (ficheiros IGES). Além disso, são fornecidos os dados experimentais que permitem fazer uma caracterização mecânica da liga de alumínio (AA6451-T4) que constitui a chapa.

#### **3.1. Comportamento Elasto-Plástico da Chapa**

Tratando-se da simulação numérica de um processo de estampagem, o corpo deformável consiste numa chapa metálica. O material utilizado para a chapa deste exemplo é uma liga de alumínio AA6451-T4 com uma espessura inicial de 3 mm. A geometria inicial do esboço é apresentada na Figura 3.1, incluindo as principais dimensões. Importa referir que, de entre os metais mais comumente utilizados na indústria, o alumínio é dos que apresenta um maior retorno elástico. Isto deve-se essencialmente ao facto de apresentar uma elevada relação entre a tensão limite de elasticidade e o módulo de Young. As propriedades elásticas desta liga de alumínio são indicadas na Tabela 3.1.

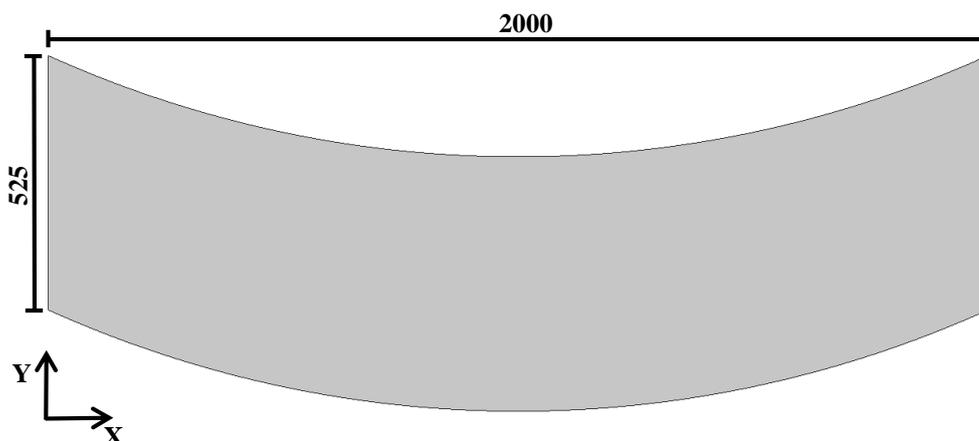


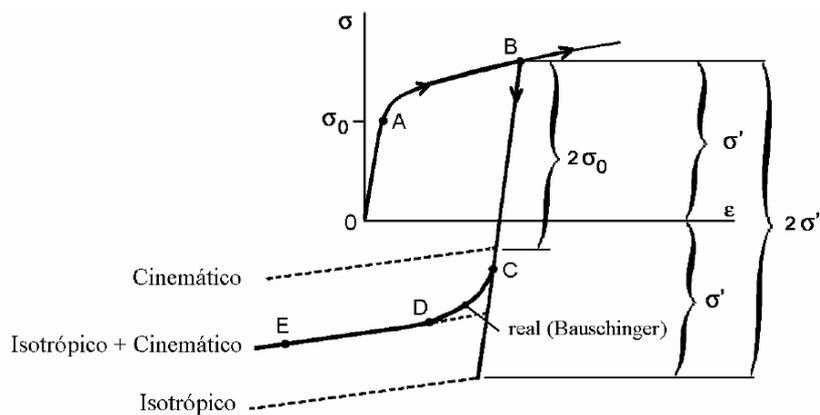
Figura 3.1. Dimensões da chapa, em milímetros, com espessura uniforme em toda a chapa de 3mm.

Tabela 3.1. Propriedades elásticas da liga de alumínio AA6451-T4.

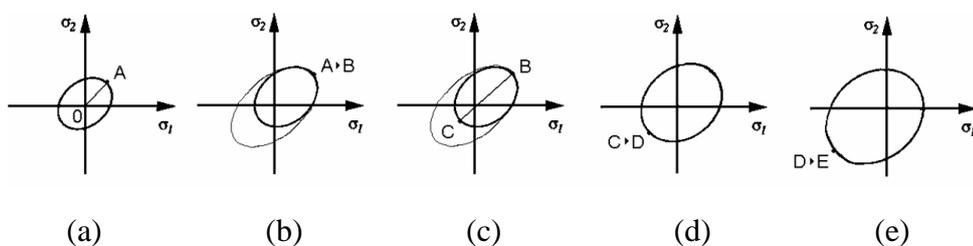
Material	Módulo de Young, $E$	Coefficiente de Poisson, $\nu$
AA6451-T4	70 GPa	0.3

O comportamento plástico desta liga será modelado por uma lei de encruamento e um critério de plasticidade. A lei de encruamento rege o modo como uma superfície de plasticidade evolui com o decorrer da deformação plástica. No entanto, a superfície de plasticidade pode expandir, contrair, sofrer translação ou distorcer. Se uma superfície de plasticidade se expande uniformemente partindo da sua forma inicial, esta evolução é simplesmente descrita utilizando uma lei de encruamento isotrópica. No entanto, este tipo de leis apresentam algumas limitações, nomeadamente quando é necessário descrever efeitos como o de *Bauschinger*, sendo que, nas leis de encruamento isotrópico, o centro das superfícies de plasticidade permanece inalterado com o aumento da deformação plástica. O efeito de *Bauschinger* surge quando, a superfície de plasticidade sofre alguma alteração na sua forma para além da expansão isotrópica. Este efeito pode surgir, por exemplo, quando se deixa de ter uma situação onde o carregamento é monotónico, havendo alterações no valor da tensão limite de elasticidade quando ocorre inversão de trajetória. Caso este efeito esteja presente, uma lei de encruamento isotrópico não será suficiente, sendo deste modo necessário recorrer a leis de encruamento

cinemático. Numa lei de encruamento cinemático assume-se que, durante a deformação plástica, a superfície de plasticidade se desloca no espaço das tensões, através da alteração da posição do seu centro, mantendo a sua forma e dimensão (ver Figura 3.2). A Figura 3.3 demonstra as diferentes etapas de evolução de uma superfície quando se leva em consideração a combinação das componentes isotrópica e cinemática.



**Figura 3.2.** Esquemática do efeito *Bauschinger* no comportamento mecânico de um material devido à inversão da trajetória de deformação (tração – compressão). Extraído de (Alves, 2003).



**Figura 3.3.** Representação esquemática dos encruamentos isotrópico e cinemático: (a) estado inicial e regime elástico; (b) após alguma deformação plástica; (c) após inversão da trajetória de deformação em regime elástico; (d) e (e) após mais alguma deformação plástica. Imagem extraída de Alves (2003).

Tratando-se de uma liga de alumínio, a lei de encruamento que melhor se adapta a esta situação é a lei de Voce (encruamento isotrópico com saturação). Para além de ser a lei de encruamento sugerida na informação deste caso de estudo, esta é também a mais apropriada para ligas de alumínio tendo em conta a comparação com ensaios experimentais realizados, nomeadamente em Alves (2003). Esta lei é dada por:

$$\bar{\sigma} = A - B \times \exp(-C\bar{\epsilon}^p) \quad (3.1)$$

onde  $\bar{\sigma}$  corresponde à tensão equivalente,  $\bar{\epsilon}_p$  a deformação plástica equivalente e os parâmetros  $A$ ,  $B$  e  $C$  são parâmetros materiais dados na Tabela 3.2. Contudo, a lei de Voce implementada no DD3IMP é dada por:

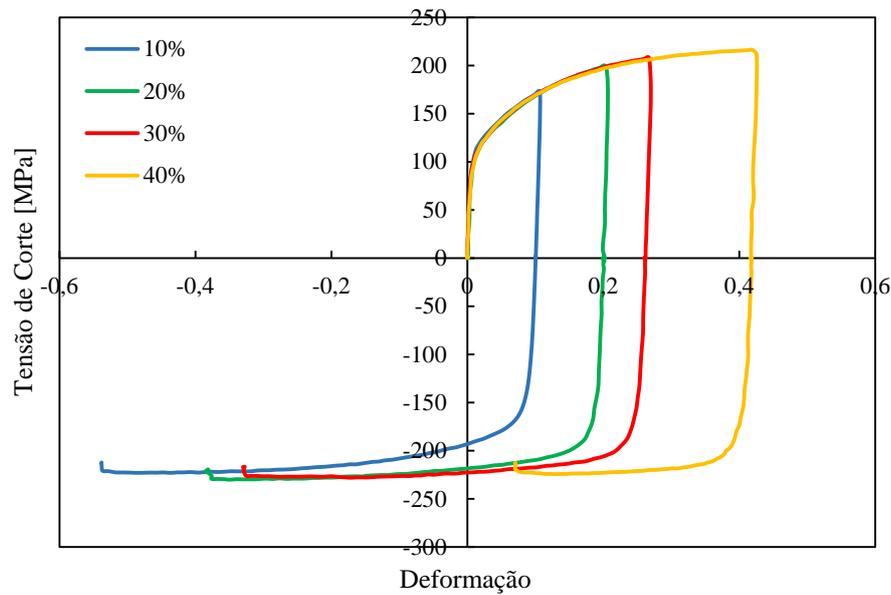
$$Y = Y_0 + (Y_{sat} - Y_0) \cdot [1 - \exp(-C_Y\bar{\epsilon}^p)] \quad (3.2)$$

sendo que  $Y$  é a tensão equivalente,  $Y_0$  é a tensão limite de elasticidade (que corresponde à subtração do parâmetro  $B$  ao  $A$  da Tabela 3.2),  $Y_{sat}$  (correspondente ao parâmetro  $A$ ) e  $C_Y$  (correspondente ao parâmetro  $C$ ) são constantes do material e  $\bar{\epsilon}_p$  é a deformação plástica equivalente.

**Tabela 3.2.** Parâmetros da lei de Voce isotrópica para um ângulo de 0° com a direção de laminagem.  
Retirado de (Allen, Dutton, Oliveira, & Hazra, 2016)

<b>A (MPa)</b>	<b>B (MPa)</b>	<b>C</b>
359.093260	196.310139	9.374256

Uma vez que surgem mudanças nas trajetórias de deformação ao longo do processo de conformação, é importante apurar o efeito de *Bauschinger*. Este efeito pode ser identificado através de ensaios de corte com inversão de trajetória. Para este caso de estudo, são fornecidos resultados experimentais de ensaios de corte efetuados ao material da chapa para diferentes níveis de pré-deformação. A Figura 3.4 apresenta os resultados dos ensaios de corte para a liga de alumínio AA6451-T4. De facto, para este material o efeito de *Bauschinger* é pouco pronunciado. No entanto, a introdução da componente cinemática na lei de encruamento permite uma melhor descrição do comportamento mecânico desta liga de alumínio.

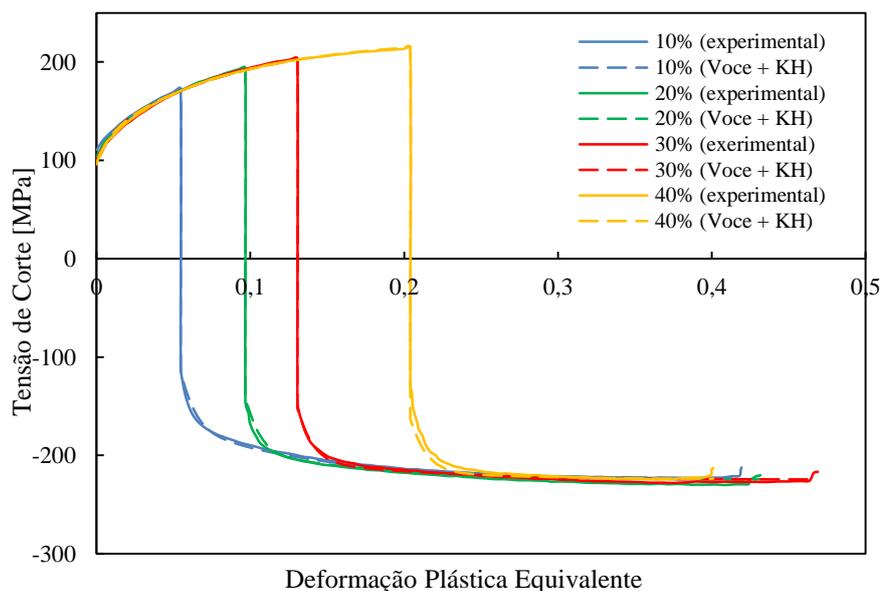


**Figura 3.4** Ensaios de corte experimentais para diferentes percentagens de pré-deformação (série de resultados 1).

A lei de encruamento cinemático disponível no programa DD3IMP é a lei proposta por Armstrong–Frederick, dada pela Equação (3.3), que dá a taxa de variação do tensor das tensões inversas,  $\dot{\mathbf{X}}$ , onde  $C_X$  é a velocidade de aproximação ao valor de saturação,  $X_{Sat}$  é o valor de saturação da norma do tensor das tensões inversas,  $\bar{\sigma}$  é a tensão equivalente,  $\boldsymbol{\sigma}'$  o tensor das tensões desviador,  $\mathbf{X}$  é o tensor das tensões inversas e  $\dot{\epsilon}^p$  é a taxa de variação da deformação plástica equivalente.

$$\dot{\mathbf{X}} = C_X \left[ \frac{X_{Sat}}{\bar{\sigma}} (\boldsymbol{\sigma}' - \mathbf{X}) - \mathbf{X} \right] \dot{\epsilon}^p ; \dot{\mathbf{X}}(0) = 0 \quad (3.3)$$

Os valores dos diferentes parâmetros da lei de encruamento (isotrópico e cinemático) foram obtidas através da minimização da diferença entre resultados experimentais e numéricos. Este procedimento de otimização foi implementado no *Microsoft Excel*, recorrendo aos resultados dos 4 ensaios de corte (provetes cortados na direção de laminagem) fornecidos pelo comité do *benchmark*. A comparação entre resultados experimentais e da lei de encruamento ajustada (Voce com encruamento cinemático Armstrong–Frederick) é apresentada na Figura 3.5.



**Figura 3.5.** Curvas da tensão de corte em função da deformação plástica equivalente dadas pelos resultados experimentais e pela lei de Voce com encruamento cinemático.

Deste modo, os parâmetros obtidos são apresentados na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3.** Parâmetros da lei de Voce com encruamento cinemático.

<b><i>A</i> (MPa)</b>	340.80690
<b><i>B</i> (MPa)</b>	174.11156
<b><i>C</i></b>	11.49612
<b><i>C<sub>x</sub></i></b>	93.89139
<b><i>X<sub>Sat</sub></i> (MPa)</b>	48.19355

De modo a identificar os parâmetros para o critério de plasticidade utilizado para descrever o comportamento anisotrópico desta liga de alumínio, são fornecidos dados relativos aos coeficientes de anisotropia e tensões limite de elasticidade para três ensaios uniaxiais e um biaxial. No que respeita aos ensaios de tração uniaxial, são fornecidos valores para ângulos de 0°, 45° e 90°, relativamente à direção de laminagem. Assim, procedeu-se à seleção de um critério de plasticidade e obtenção dos respetivos parâmetros que melhor se ajustassem ao material em questão. Para tal, foi utilizado o código

DD3MAT em conjunto com uma ferramenta, implementada em *Microsoft Excel*. Como dados de entrada, foram usados os valores relativos aos ensaios uniaxiais e biaxial documentados.

Devido ao facto de apenas serem apresentados três ensaios uniaxiais e um biaxial, apenas dois critérios de plasticidade foram considerados, nomeadamente o critério de Hill48 (Hill, 1948) e o critério Yld91 (Barlat et al., 1991).

O critério de Hill48 é dado por:

$$Y^2 = F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2L\sigma_{yz}^2 + 2M\sigma_{xz}^2 + 2N\sigma_{xy}^2 \quad (3.4)$$

onde  $Y$  corresponde à tensão equivalente,  $F$ ,  $G$ ,  $H$ ,  $L$ ,  $M$  e  $N$  são parâmetros de anisotropia e  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$ ,  $\sigma_{xy}$ ,  $\sigma_{yz}$  e  $\sigma_{xz}$  são as componentes do tensor das tensões de Cauchy ( $\sigma$ ).

O critério de plasticidade Yld91 é dado por:

$$Y = \left\{ \frac{1}{2} [ |s_1 - s_2|^m + |s_2 - s_3|^m + |s_1 - s_3|^m ] \right\}^{\frac{1}{m}} \quad (3.5)$$

onde  $m$  é um parâmetro do critério e as componentes  $s_1$ ,  $s_2$  e  $s_3$  são os tensões principais do tensor  $\mathbf{s}$  dado por:

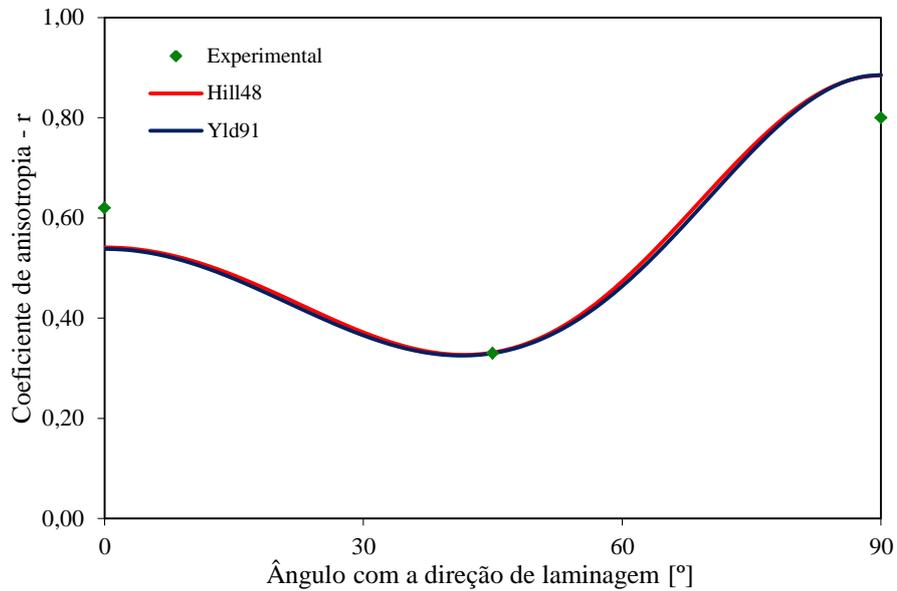
$$\mathbf{s} = \mathbf{L}\sigma' \quad (3.6)$$

sendo  $\mathbf{L}$  a matriz dos parâmetros de anisotropia dada por:

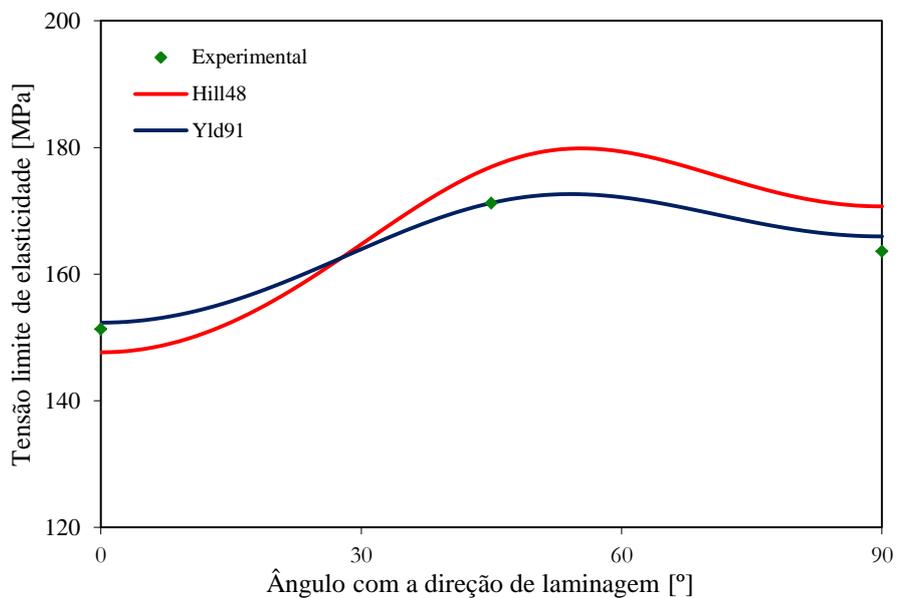
$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} (c_2 + c_3)/3 & -c_3/3 & -c_2/3 & 0 & 0 & 0 \\ -c_3/3 & (c_3 + c_1)/3 & -c_1/3 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2/3 & -c_1/3 & (c_1 + c_2)/3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_6 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

com  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$  e  $c_6$  os parâmetros de anisotropia e  $\sigma'$  a componente desviadora das tensões de Cauchy.

A Figura 3.6 mostra a comparação dos dois critérios considerados em relação ao experimental, do coeficiente de anisotropia em função do ângulo com a direção de laminagem.



**Figura 3.6.** Valor do coeficiente de anisotropia em função do ângulo de laminagem no ensaio de tração uniaxial. Comparação entre resultados numéricos e experimentais.



**Figura 3.7.** Tensão limite de elasticidade em função do ângulo de laminagem no ensaio de tração uniaxial. Comparação entre resultados numéricos e experimentais.

A Figura 3.7 mostra a comparação dos dois critérios considerados em relação ao experimental, da tensão limite de elasticidade em função do ângulo com a direção de laminagem.

**Tabela 3.4.** Comparação dos valores da tensão limite de elasticidade e do coeficiente de anisotropia biaxiais dados pelos diferentes critérios com os do ensaio experimental.

	$\sigma_b$ [MPa]	$r_b$
<b>Experimental</b>	153.6	0.55
<b>Hill48</b>	144.376	0.6119
<b>Yld91</b>	150.179	0.6084

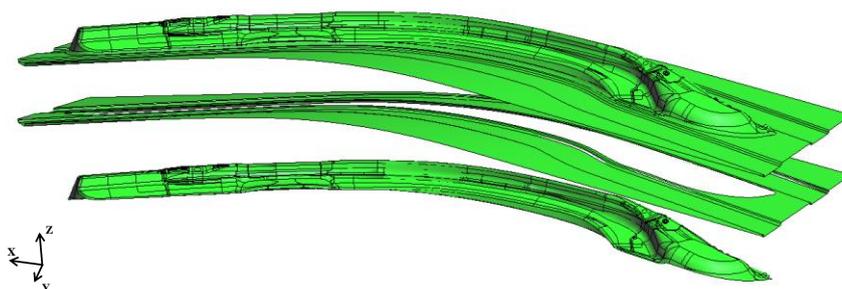
Como se pode verificar na Figura 3.6, não existe uma diferença significativa entre os critérios de plasticidade de Hill48 e Yld91 no que concerne à aproximação da curva dos valores dos coeficientes de anisotropia dos critérios aos obtidos experimentalmente. Analisando agora a Figura 3.7, relativa ao ensaio de tração uniaxial, pode-se concluir que, entre os critérios de Hill48 e Yld91, este último apresenta uma evolução que melhor se ajusta aos valores experimentais. A mesma conclusão pode ser retirada da análise da Tabela 3.4, que compara os valores do ensaio biaxial, nomeadamente no que diz respeito ao coeficiente de anisotropia biaxial e ao valor da tensão limite de elasticidade, o que direciona para a adoção do critério Yld91 com os parâmetros apresentados na Tabela 3.5.

**Tabela 3.5.** Parâmetros para o critério de plasticidade Yld91.

<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>	<b>C6</b>	<b>m</b>
1.021178	1.193592	0.987573	1.000000	1.000000	0.917822	8

### 3.2. Modelação das Ferramentas de Conformação

Geralmente, a geometria das ferramentas de conformação envolvida nos processos de estampagem industriais é bastante complexa, como é exemplo o caso apresentado (ver Figura 3.8). Deste modo, a geometria das ferramentas é fornecida em modelos CAD através de ficheiros IGES.

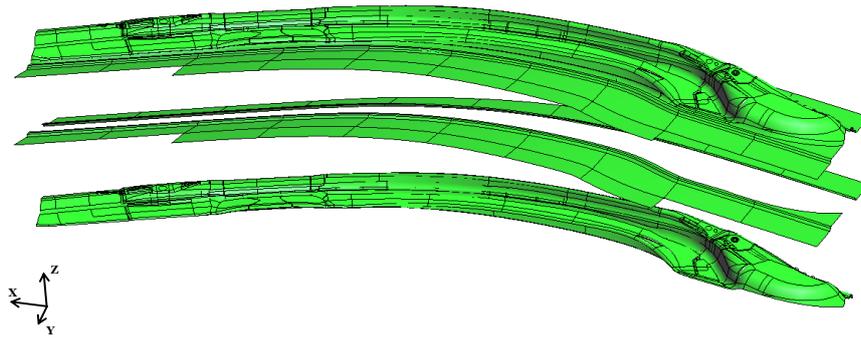


**Figura 3.8.** Geometria das superfícies das ferramentas de conformação.

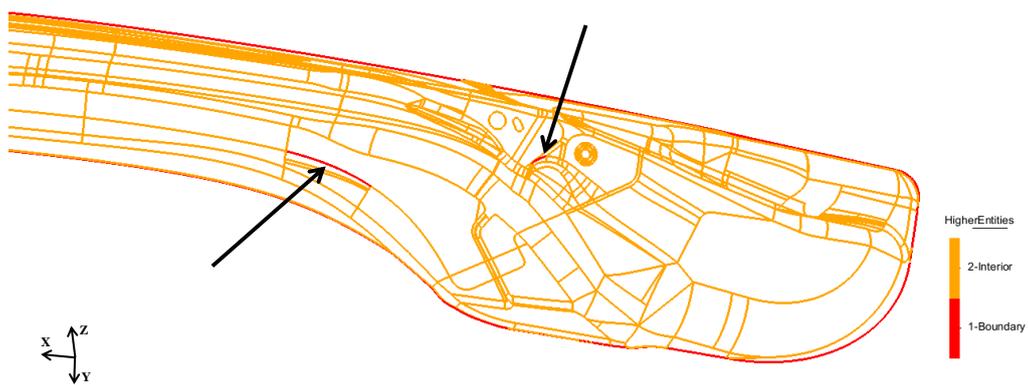
Começando por analisar as dimensões das ferramentas fornecidas, bem como as da chapa, utilizando para isso o programa de pré-processamento GiD, foi possível concluir que a chapa nunca estaria em contacto com algumas zonas das ferramentas, nomeadamente as suas extremidades. Assim, surge a oportunidade de reduzir o número de elementos a utilizar na discretização das ferramentas, e portanto, de otimizar os recursos computacionais. A solução adotada consistiu em cortar parte das extremidades das ferramentas, como se pode observar na Figura 3.9, eliminando também as superfícies laterais e respetivos freios secundários, que não entrariam em contacto com a chapa. No entanto, como forma de precaução, foi realizado um prolongamento de uma das abas, tanto na matriz como no cerra-chapas, para o caso de no início da simulação a chapa ultrapassar a extremidade da aba mais exterior da ferramenta inicial, que não foi eliminada.

O passo seguinte consistiu na correção das ferramentas, nomeadamente ao nível de falhas, tais como, falta de continuidade entre superfícies adjacentes (ver Figura 3.10), sobreposição de superfícies e normais das superfícies não coerentes (ver Figura 3.11). As normais às superfícies têm de estar orientadas no sentido do corpo deformável. Este tipo de problemas deve-se essencialmente ao facto de os ficheiros originais que contêm a geometria das ferramentas terem sido criados num formato nativo do programa

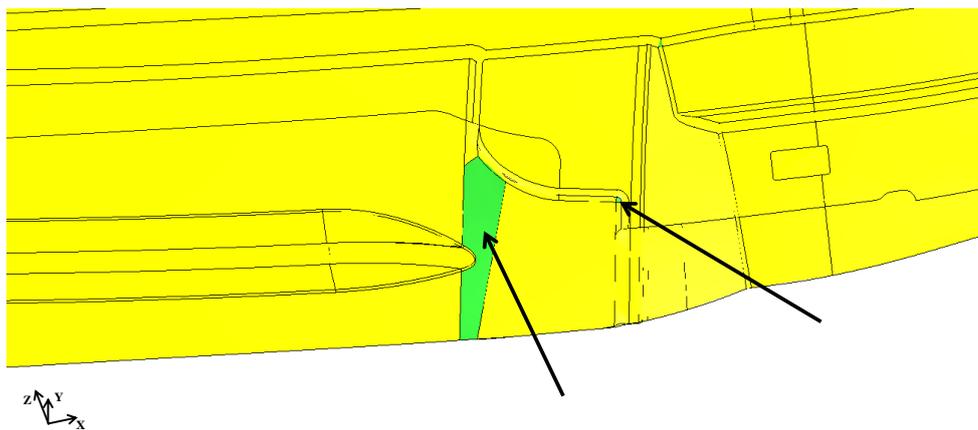
CAD (CATIA) onde foram desenhadas e que ao serem convertidos para um formato universal (IGES) podem sofrer algumas perdas ou alterações de informação.



**Figura 3.9.** Geometria das ferramentas após o corte das extremidades.



**Figura 3.10.** Representação das fronteiras entre superfícies, sendo estas laranja quando existe continuidade e vermelhas na ausência dela. As duas setas assinalam dois exemplos de falta de continuidade.



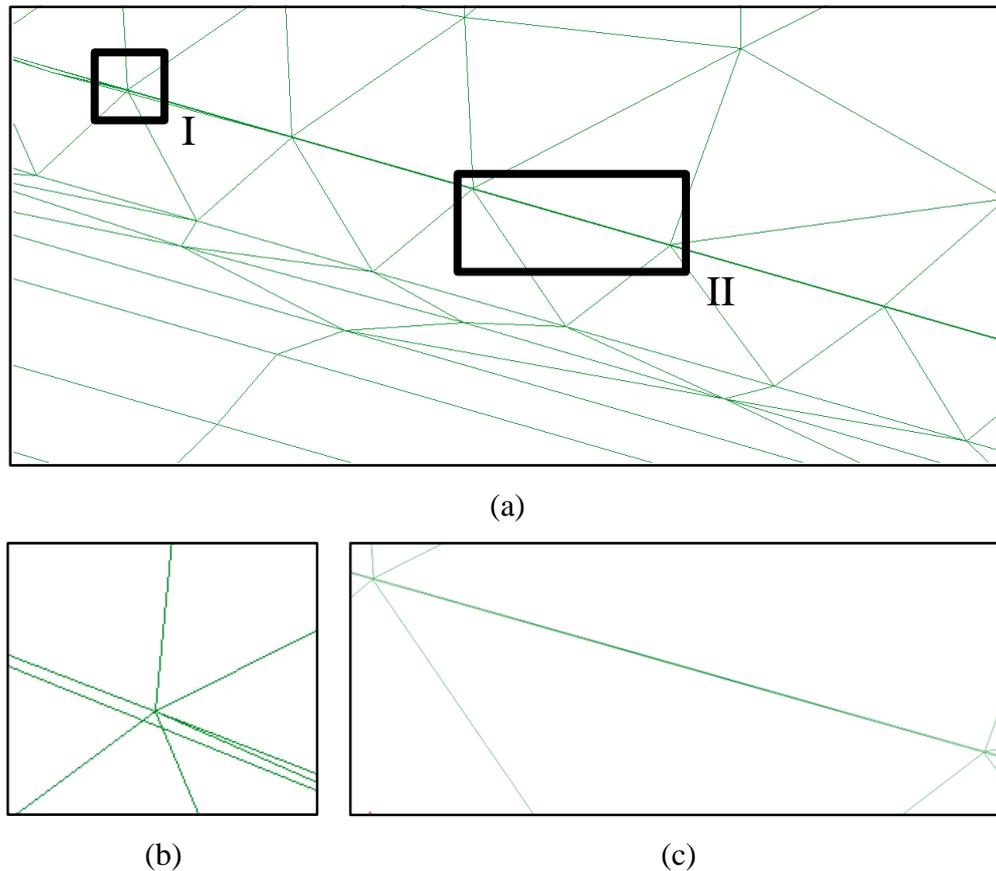
**Figura 3.11.** Falta de coerência na orientação das normais às superfícies.

Este foi um dos passos que mais tempo consumiu, devido ao facto de requerer a revisão minuciosa de todas as ferramentas, sendo que estas inicialmente eram definidas por cerca de 2200 superfícies NURBS. Após a correção de todas estas incongruências, procedeu-se então à discretização das ferramentas, utilizando para isso a ferramenta de geração automática de malha do GiD. Deste modo, começou-se por efetuar uma discretização usando uma malha não-estruturada com elementos finitos triangulares nas zonas mais complexas das ferramentas (punção na sua íntegra e a matriz, na sua zona central mais complexa). As abas, tanto do cerra-chapas como da matriz, foram discretizadas utilizando elementos finitos quadrangulares (malha estruturada na extensão da aba e não-estruturada na restante área).

Durante a geração da malha de elementos finitos sobre a superfície das ferramentas, voltaram a surgir problemas tais como a sobreposição de elementos (ver Figura 3.12 (b)), ou a geração de elementos demasiado alongados (ver Figura 3.12 (c)).

A solução adotada para a resolução deste problema passou por dividir as superfícies originais e voltar a gerar a malha automática até que os elementos ficassem todos com uma posição e geometria coerente.

Partindo agora para a fase inicial da simulação, a primeira etapa consiste na leitura das ferramentas, nomeadamente os ficheiros IGES correspondentes às superfícies e os ficheiros que contêm a malha que sobre elas foi gerada. Aqui, o DD3IMP começa por utilizar um método de suavização das ferramentas recorrendo a superfícies *Nagata* (Nagata, 2005). Estas, definem uma superfície através de uma interpolação quadrática utilizando apenas a posição e orientação dos vetores normais nos nós de cada elemento.

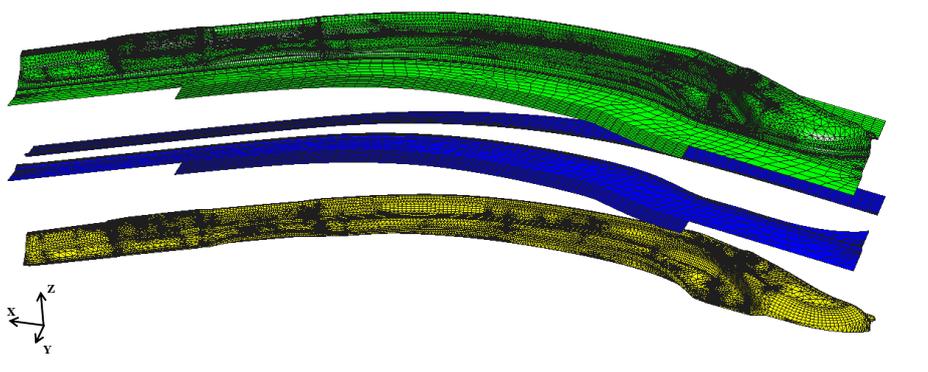


**Figura 3.12.** (a) Zona da malha gerada automaticamente que apresenta dois tipos de defeitos; (b) Detalhe I: Sobreposição de elementos; (c) Detalhe II: Elementos demasiado alongados.

Estudos efetuados no âmbito da implementação das superfícies *Nagata* para a suavização da superfície das ferramentas, nomeadamente em (Neto, 2014), demonstram que na discretização das mesmas, o uso de elementos quadrangulares se mostra mais satisfatório do que triangulares, nomeadamente ao nível do erro radial. No entanto, este tipo de diferenças só é evidente em superfícies que não sejam planas. Assim, quando se trata de uma superfície plana, ou muito próxima disso, a diferença entre os dois tipos de elementos torna-se insignificante, ou mesmo nula.

A complexidade de algumas superfícies, nas zonas das ferramentas anteriormente referidas, obrigou à geração automática de malha com elementos triangulares. Contudo, esta estratégia mostrou-se pouco eficaz na medida em que, em certas situações, existiam raios de curvatura com amplitudes próximas de  $90^\circ$  que ficaram descritos com apenas um elemento finito. Nestas situações é conveniente que os arcos de

curvatura fiquem descritos por pelo menos dois elementos finitos, para que a suavização com superfícies *Nagata* conduza a um erro geométrico aceitável (inferior a 1%). Deste modo, a solução adotada para este problema passou pela atribuição (sempre que possível) de uma malha estruturada com elementos quadrangulares nas superfícies que compreendiam os raios de curvatura das ferramentas. Quando se mostrou impossível o uso de uma malha estruturada, a alternativa foi o refinamento da malha ou a divisão dessa superfície de maneira a compreender um maior número de elementos no arco de curvatura. A discretização de cada uma das ferramentas envolvidas no processo de estampagem é apresentada na Figura 3.13. Dada a complexidade da geometria das ferramentas, foram necessários 132719 elementos finitos para fazer uma correta descrição geométrica.



**Figura 3.13.** Discretização final da superfície de cada ferramenta, compreendendo no seu total 132719 elementos finitos, onde: Matriz (verde) – 72837 elementos; Cerra-chapas (azul) – 2576 elementos; Punção (amarelo) – 57306 elementos.

Outro dos problemas que surgiram foi o facto de existirem nós na malha das ferramentas cuja normal não tinha sido calculada, a qual é necessária para o processo de suavização. Isto deve-se ao facto de terem surgido problemas durante a projeção dos nós da malha nas superfícies NURBS. De facto, alguns nós não tinham ponto de projeção porque o algoritmo de busca global, responsável pela identificação da superfície NURBS associada a cada nó das ferramentas, é muito sensível à dispersão de dimensões entre as várias superfícies NURBS. Isto significa que podem surgir problemas quando existem, na mesma ferramenta, superfícies com uma área pequena e outras com áreas muito grandes, como se pode ver na Figura 3.8. Assim, a solução adotada passou, mais uma vez, pela

divisão das superfícies grandes, de modo a que os nós da malha ficassem mais próximos dos vértices da superfície NURBS.

### 3.3. Discretização Espacial da Chapa

Um dos fatores mais influentes nos resultados das simulações numéricas, utilizando o método dos elementos finitos, está relacionado com a discretização espacial efetuada no corpo deformável. No âmbito deste trabalho, foram utilizados elementos 3D sólidos hexaédricos lineares de 8 nós.

Numa primeira fase, foi efetuada uma discretização estruturada grosseira da chapa, como se demonstra na Figura 3.14, tendo esta ficado com 250 elementos na direção do seu comprimento, 125 elementos na direção da largura e 2 elementos na espessura. Deste modo, a chapa ficou por 62500 elementos finitos. A dimensão média de cada elemento é cerca de 8 mm de comprimento, 4.2 mm de largura e 1.5 mm de altura.

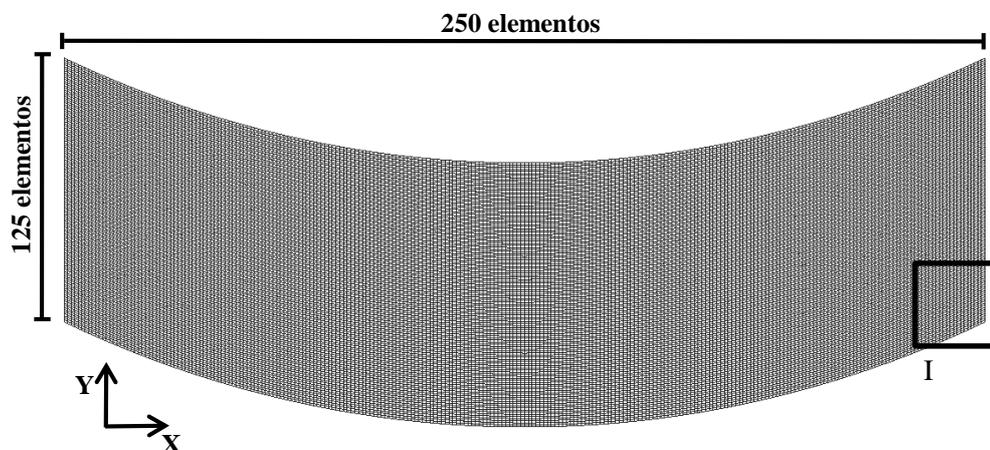
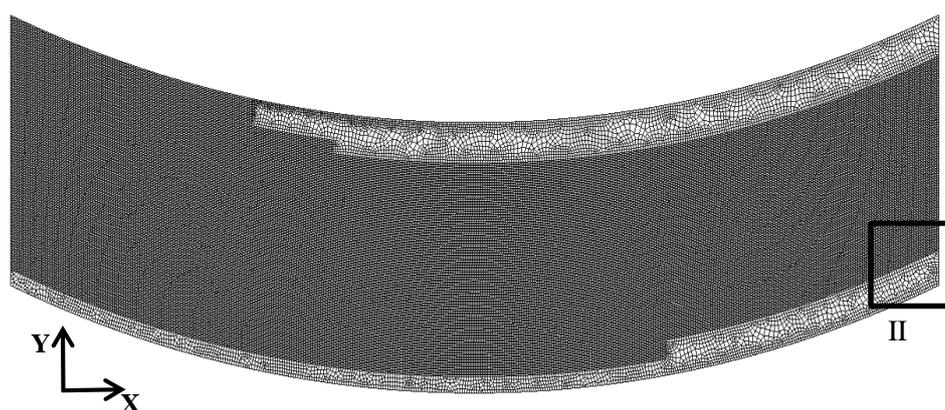


Figura 3.14. Discretização grosseira da chapa.

No entanto, como a razão entre o tamanho dos elementos finitos e os raios de curvatura dos freios é demasiado elevada, tendo o arco do freio com menor raio (5 mm) um comprimento de 7.85 mm, o que dá uma razão inferior a 2 elementos por cada 90 °, procedeu-se à realização de uma discretização mais fina da chapa. Após a análise da simulação com a malha grosseira, foi também possível definir estratégias no que toca à realização de uma discretização com a malha mais refinada. Foi utilizada uma

discretização estruturada como base, utilizando uma malha semi-estruturada em algumas zonas da aba, como é demonstrado da Figura 3.15. Esta discretização mais grosseira e semi-estruturada foi utilizada em zonas da aba que, pela análise da primeira simulação, se verificou que não escoam pelos freios. Assim, a chapa foi discretizada com 141476 elementos finitos, sendo que os elementos da zona estruturada ficaram com dimensões de aproximadamente 5 mm de comprimento, 2.63 mm de largura e 1.5 mm de altura.

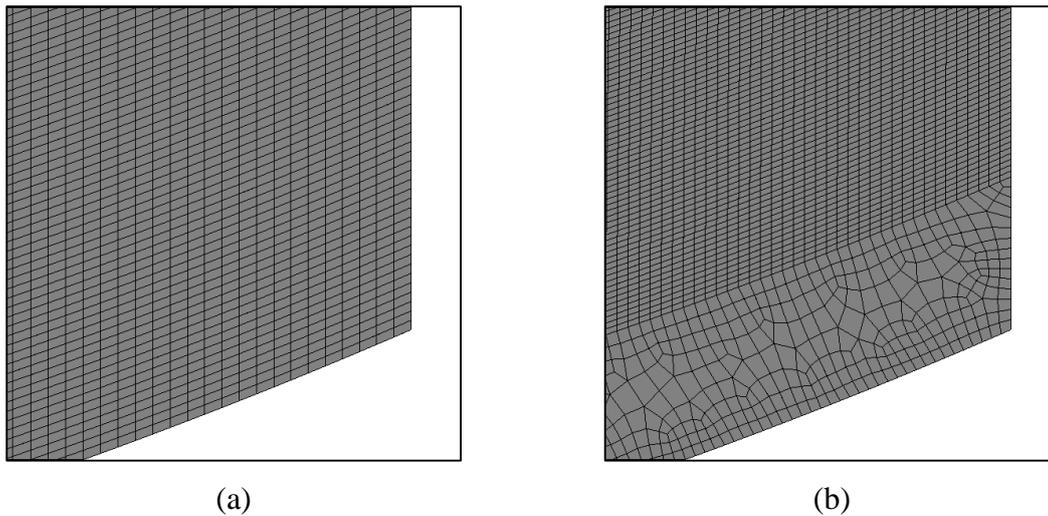
Outra alternativa ao método utilizado para fazer a discretização espacial da chapa, apesar de não estar implementado no DD3IMP, é o recurso a algoritmos de remalhagem, onde a malha inicialmente grosseira é refinada à medida que a simulação decorre de modo a corresponder à necessidade da chapa apresentar mais, ou menos elementos numa dada zona (como por exemplo nos raios de curvatura), fazendo deste modo uma otimização dos recursos computacionais.



**Figura 3.15.** Discretização refinada da chapa.

Na Figura 3.16, podem ser observadas mais em pormenor os dois tipos de discretizações efetuadas na chapa.

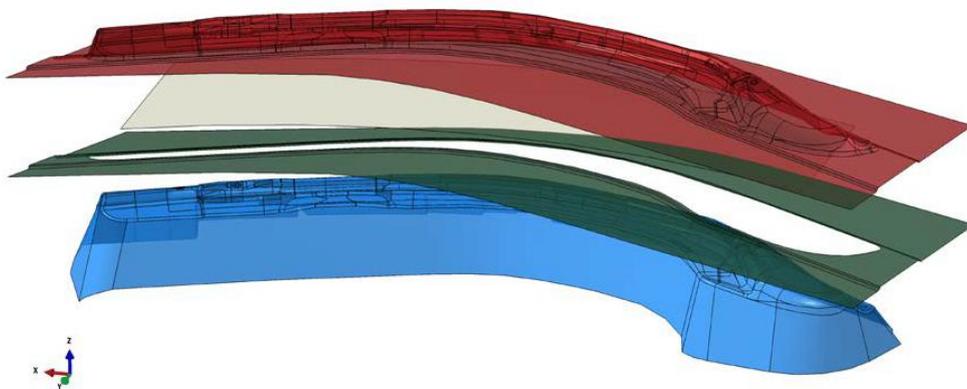
Em todas as simulações realizadas neste estudo, o valor do coeficiente de atrito entre a chapa e as ferramentas de conformação foi o sugerido no caso de estudo para os programas de elementos finitos Pam-Stamp e LS-DYNA, sendo o seu valor de 0.08.



**Figura 3.16.** Detalhes dos dois tipos de discretização efectuados: (a) detalhe I, correspondente à malha grosseira; (b) detalhe II, correspondente à malha refinada.

### 3.4. Sequência de Estampagem

A simulação numérica do processo de estampagem do componente automóvel envolve quatro etapas: (i) aperto do cerra-chapas; (ii) conformação plástica; (iii) corte do material em excesso e (iv) retorno elástico. Durante as primeiras duas etapas estão ativas as três ferramentas: matriz, punção e cerra chapas. O posicionamento relativo inicial destas ferramentas e da chapa metálica a deformar é ilustrado na Figura 3.17, sendo que a ferramenta superior é a matriz, a inferior o punção, e a intermédia o cerra-chapas



**Figura 3.17.** Posicionamento relativo das ferramentas e da chapa no início da simulação. Imagem extraída de (Allen et al., 2016).

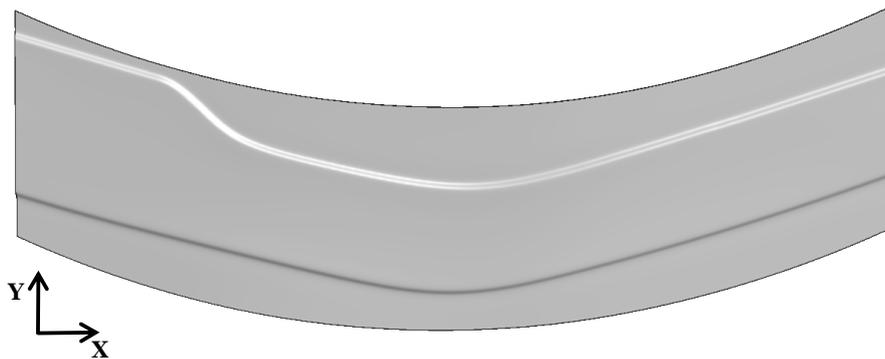
A informação fornecida neste caso de estudo define com rigor os deslocamentos e as forças impostas pelas ferramentas em cada uma das etapas. O punção permanece fixo durante todo o processo, enquanto durante o aperto do cerra-chapas a matriz tem um deslocamento de 300 mm no sentido negativo do eixo Z. A segunda fase diz respeito à conformação e consiste num deslocamento de 200 mm, em simultâneo, da matriz e do cerra-chapas no sentido negativo do eixo Z, ao mesmo tempo que o cerra-chapas impõe uma força de aperto na chapa de 1900 kN. De seguida surge a etapa de corte, e por fim, a etapa de retorno elástico.

Contudo, foram efetuadas algumas alterações ao processo anteriormente descrito, nomeadamente, no que diz respeito ao modo como as ferramentas se deslocam na primeira e segunda etapa. Isto deveu-se ao facto de, na segunda etapa serem duas ferramentas a deslocarem-se em simultâneo, ao mesmo tempo que é imposta uma força constante entre elas. Deste modo, foi definido que a matriz ficaria imóvel durante todo o processo. Assim, durante a primeira etapa (aperto do cerra-chapas) é imposto ao cerra-chapas um deslocamento de 300 mm no sentido positivo do eixo Z, enquanto a matriz e o punção permanecem fixos. Uma vez que o objetivo é aplicar uma força de aperto do cerra-chapas correspondente a 1900 kN, o deslocamento imposto pode não ser exatamente 300 mm. De facto, verificou-se que a força de aperto atingida, aquando do deslocamento imposto, ultrapassou a força de aperto pretendida para a segunda etapa em ambas as simulações. Deste modo, a solução adotada passou por diminuir ligeiramente o deslocamento total do cerra-chapas, de modo a obter um valor de força de aperto mais próxima do valor pretendido para a segunda etapa.

Na segunda etapa (conformação da chapa), apenas a matriz permanece fixa, enquanto o punção se desloca 500 mm no sentido positivo do eixo Z, e o cerra-chapas mantém constante a sua força de aperto (1900 kN). O cerra-chapas ajusta a sua posição de modo a manter uma força de aperto constante durante toda a etapa de conformação. Assim, a folga entre o cerra-chapas e a matriz não é constante, podendo aumentar ou diminuir. O deslocamento de 500 mm imposto ao punção garante que no final do processo de conformação a folga entre o punção e a matriz é de 3 mm, correspondente à espessura inicial da chapa.

### 3.4.1. Etapa 1: Aperto do Cerra-Chapas

Esta primeira etapa revelou ser a mais trabalhosa. Isto porque, todos os graus de liberdade da chapa estão ativos devido ao facto das superfícies da matriz e do cerra-chapas não serem planas, como se mostra na Figura 3.17. Deste modo, foi necessário restringir o movimento de alguns nós da chapa. Estes foram seleccionados cuidadosamente, de modo a que a chapa ficasse fixa no espaço mas livre para deformar com o avanço das ferramentas. Esses nós com graus de liberdade prescritos foram sendo alterados até a chapa possuir um número de nós em contacto com as ferramentas suficientemente elevado, permitindo assim a libertação de todas as restrições impostas. A geometria da chapa após esta etapa de aperto do cerra-chapas é apresentada na Figura 3.18, onde são visíveis as zonas dos freios de retenção.



**Figura 3.18.** Aspecto da chapa no final da fase de aperto do cerra-chapas na simulação com malha refinada.

### 3.4.2. Etapa 2: Conformação

A segunda etapa, correspondente à deformação da chapa imposta pelo avanço do punção, não necessitou de tanta atenção como a primeira. Aqui, a principal dificuldade consistiu em estabelecer um tamanho de incremento adequado. Isto porque, o incremento de deslocamento do punção deve ser suficientemente pequeno de modo a que não surjam problemas de convergência, não devendo no entanto, ser demasiado pequeno de forma a desperdiçar tempo computacional. Deste modo, deve ser encontrado um compromisso entre estes dois parâmetros. Terminada a etapa de conformação, a chapa ficou com o aspeto apresentado na Figura 3.19.

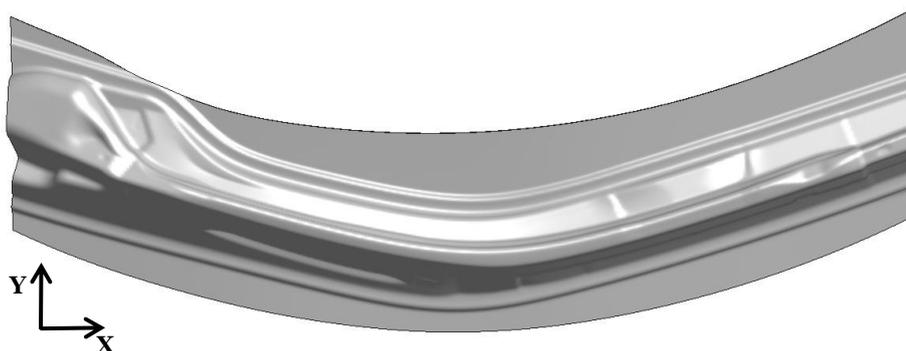


Figura 3.19. Aspeto da chapa depois da etapa de conformação na simulação com malha refinada.

### 3.4.1. Etapa 3: Corte

A terceira etapa diz respeito ao corte do material em excesso. Esta operação é feita logo após a conformação, não havendo lugar a uma etapa de retorno elástico. Assim, todas as ferramentas permanecem imóveis enquanto os cortes são efetuados. Na informação do caso de estudo apenas é fornecida uma linha de corte, a qual é definida sobre a superfície da chapa após a conformação, como se demonstra na Figura 3.20. Uma vez que a etapa de corte foi realizada com o programa DD3TRIM, a linha de corte tem de ser transformada numa superfície de corte (superfície NURBS). Este programa, pertence à família DD3 e foi desenvolvido com o objetivo de cortar malhas de elementos finitos hexaédricos de oito nós, bem como fazer o remapeamento de variáveis entre malhas diferentes. O funcionamento deste programa é descrito com maior detalhe em Baptista (2006).

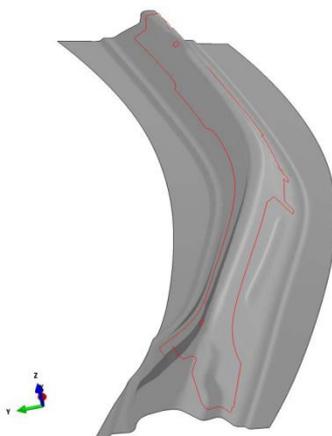


Figura 3.20. Linha de corte sobre a chapa depois da conformação. Imagem extraída de (Allen et al., 2016).

Na realização do corte no DD3TRIM, são exigidos alguns cuidados especiais. Isto porque, devem-se minimizar as alterações bruscas tanto na forma, como na dimensão dos elementos. Por outro lado, as superfícies de corte não podem ter um desvio muito elevado relativamente à direção ortogonal aos elementos a cortar. Deste modo, não bastou realizar apenas a extrusão da linha de corte na direção Z, ficando-se assim com uma superfície única fechada. Foi necessário dividir a linha em troços, de modo a que, ao fazer a extrusão dessa linha numa dada direção, a superfície criada intersectasse a malha de elementos finitos numa direção aproximadamente perpendicular ao plano da chapa deformada. Este procedimento tem como objetivo evitar que as arestas dos elementos correspondentes à direção da espessura sejam intersectadas pela superfície de corte.

O uso do DD3TRIM para a realização do corte compreende três etapas fundamentais: o corte da malha de elementos finitos pela superfície que a intersecta, a correção da geometria dos elementos que foram intersectados pela superfície de corte e o remapeamento das variáveis de estado.

Para a realização da primeira etapa (corte geométrico), o DD3TRIM começa por fazer a projeção de cada nó da chapa na superfície de corte. Deste modo, para cada nó, começa por calcular a distância mínima à superfície de corte, tendo em conta uma grelha de pontos gerada sobre a superfície NURBS. De seguida, é calculada a projeção ortogonal de cada nó sobre a superfície de corte, recorrendo ao método de Newton-Raphson para resolver o sistema de equações não-lineares, usando como solução inicial o ponto da grelha mais próximo obtido inicialmente. Calculada a projeção ortogonal de cada nó na superfície de corte, é-lhes atribuído um estatuto consoante esteja do lado da superfície a eliminar ou a conservar.

Tendo em conta o elevado número de elementos da chapa (94878 nós na discretização grosseira e 214080 na refinada), o processo de convergência durante a projeção ortogonal revelou-se demasiado moroso. Isto deveu-se ao facto de a tolerância imposta para a convergência ser demasiado apertada e também porque o ponto de projeção ortogonal poderia estar demasiado afastado do nó em alguns casos. A versão inicial do algoritmo de projeção impunha que o produto interno entre o vetor que une o nó ao ponto da superfície e os vetores tangentes à superfície fosse suficientemente próximo de zero (dentro das tolerâncias impostas). No entanto, só é necessário conhecer com rigor a projeção dos nós pertencentes aos elementos intersectados pela superfície de corte, sendo

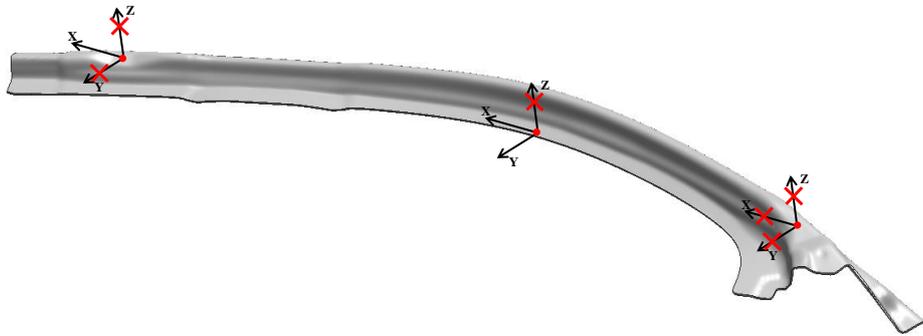
que para os restantes nós basta conhecer de que lado da superfície se encontram. Assim, procedeu-se à realização de alterações no algoritmo de projeção. Definiu-se que os nós próximos da superfície de corte (até 15 mm de distância) mantinham a tolerância apertada para a projeção ortogonal, enquanto os nós com uma distância superior eram projetados com uma tolerância maior, passando esta a ser regulada pelos valores dos ângulos formados entre cada um dos vetores da primeira derivada à superfície no ponto de projeção e o vetor que une o nó ao ponto de projeção.

### **3.4.2. Etapa 4: Retorno Elástico**

Por fim, surge a etapa correspondente ao retorno elástico. Quando um material é conformado sofre deformação em ambos os domínios, elástico e plástico. O retorno elástico surge quando, após conformação da chapa, são removidas as ferramentas, e se dá a recuperação elástica, ficando o material apenas com a componente da deformação plástica. Este é um fenómeno que pode levar a grandes variações de geometria após a conformação, o que pode ser corrigido fazendo a compensação na geometria das ferramentas. O retorno elástico é influenciado por um largo número de parâmetros tais como o material da chapa, o atrito, a geometria dos freios, a força do cerra-chapas, a relação entre o raio de curvatura e a espessura, etc. No que toca à discretização espacial da chapa, estudos efetuados, nomeadamente em (Li, Carden, & Wagoner, 2002), revelam que para uma correta previsão do retorno elástico, tendo em conta um determinado arco de curvatura da ferramenta, é necessário no mínimo 1 elemento por comprimento do arco correspondente a um ângulo de 5°. O uso de 2 elementos em espessura também não terá sido o ideal, sendo que seria importante considerar pelo menos um terceiro elemento para uma melhor previsão. No entanto, levar em consideração estas regras tornou-se impraticável dada a complexa geometria do componente e o elevado número de elementos finitos necessários para a discretização da chapa. Quanto à razão entre o raio de curvatura e a espessura da chapa, estudos numéricos com elementos finitos sólidos revelaram que para razões próximas de 2 o retorno elástico tende a desaparecer, no exemplo do ensaio BUT (*Bending-Under-Tension*), (Chalal, Racz, & Balan, 2012).

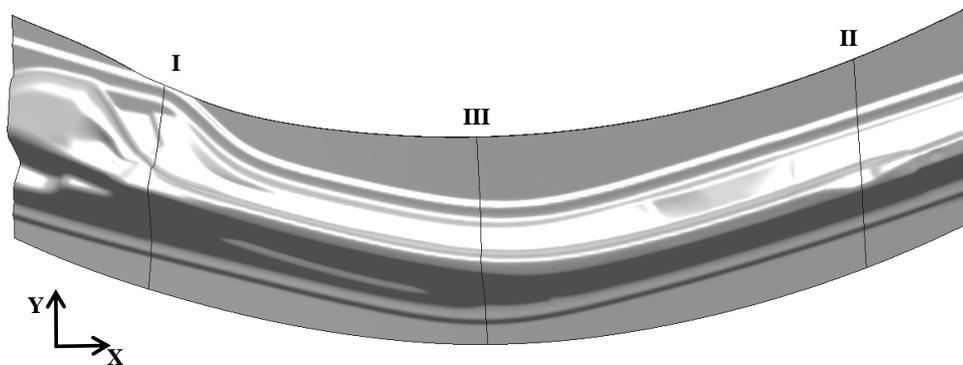
Nesta última etapa, o componente cortado é apoiado em três pontos diferentes, como se representa na Figura 3.21. Em seguida, todas as ferramentas são removidas ao

mesmo tempo para avaliar a configuração final do componente após o retorno elástico (*One Step Springback*).



**Figura 3.21.** Disposição dos pontos onde o movimento é restringido na etapa de retorno elástico e respectivas restrições.

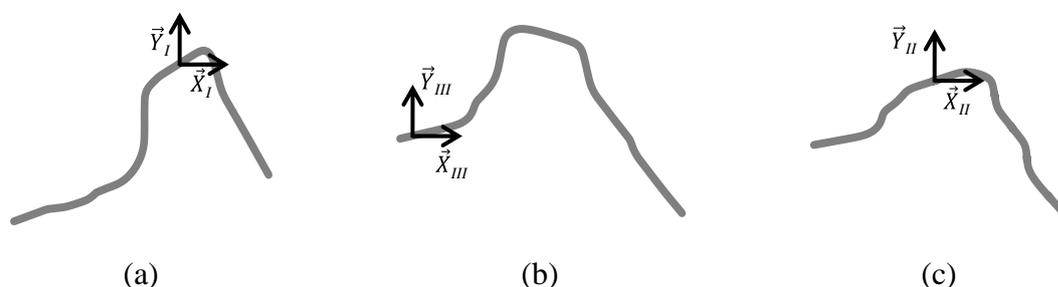
### 3.5. Resultados e Discussão



**Figura 3.22.** Linhas definidas pela intersecção dos planos que definem as secções I,II e III com a chapa no final da etapa de conformação.

Esta secção apresenta os principais resultados das simulações numéricas do processo de estampagem. A evolução das forças de conformação é apresentada para ambas as malhas de elementos finitos adotadas para a chapa. Além disso, o deslizamento da chapa durante a etapa de conformação é avaliado em 6 pontos. Os resultados relativos à espessura final da chapa e a geometria do componente antes e após retorno elástico foram avaliados em 3 secções, cuja localização se mostra na Figura 3.22. Foi ainda definido em cada uma

delas um sistema de coordenadas locais (Figura 3.23), cuja origem coincide com os pontos restringidos aquando da etapa do retorno elástico.



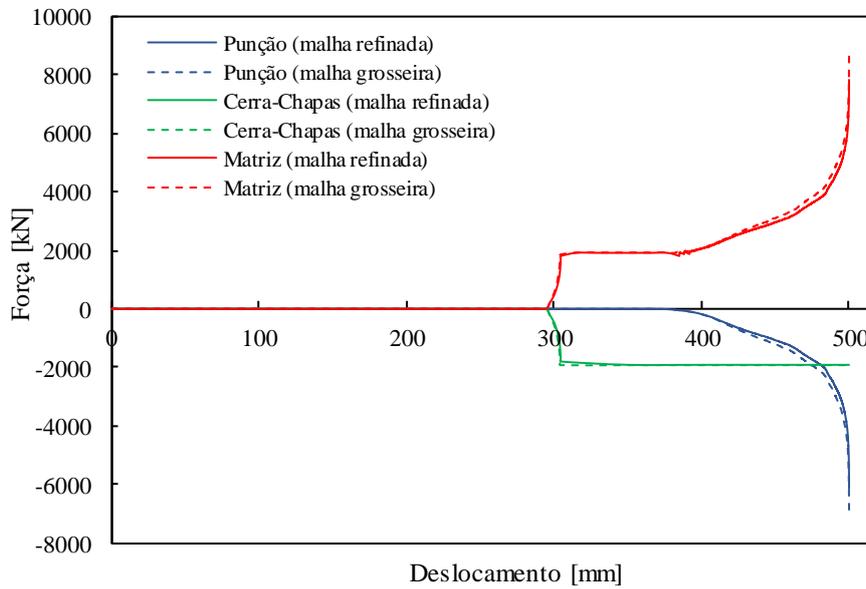
**Figura 3.23.** Localização da origem dos três sistemas de coordenadas locais (após corte) correspondentes, respetivamente: (a) Secção I; (b) Secção III; (c) Secção II.

### 3.5.1. Forças de Conformação

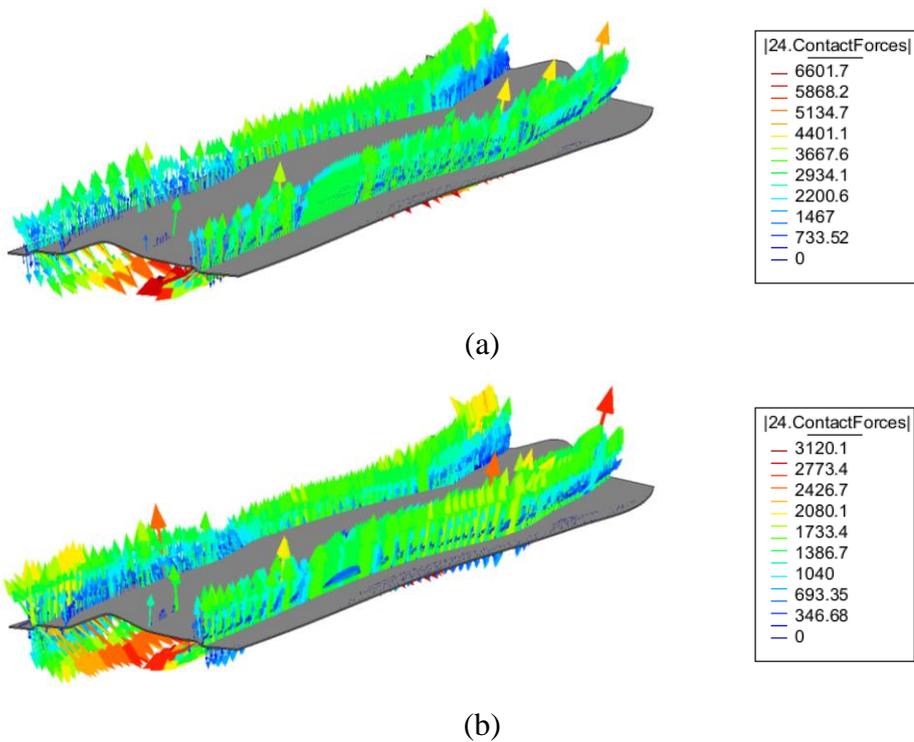
Como se pode observar na Figura 3.24, no decorrer das etapas de aperto do cerra-chapas e de conformação, verificou-se que os valores da força em cada uma das ferramentas evoluiu de forma semelhante nas duas simulações realizadas. A maior diferença observou-se na fase final da conformação, onde se verificou um valor da força no punção superior em 13% na malha grosseira, relativamente à malha refinada. O valor da força do cerra-chapas permaneceu igual em ambas as simulações, pois este era imposto durante a etapa de conformação, ao passo que a força na matriz, estando dependente da força do punção também apresentou um valor 10% superior na discretização grosseira.

O facto de os elementos finitos apresentarem menor dimensão na malha refinada dá origem a que a chapa deslize mais facilmente pelos raios de curvatura dos freios de retenção. Isto resulta numa diminuição da força de retenção e consequentemente nas forças de conformação, como se mostra na Figura 3.24.

Relativamente à distribuição das forças de contacto durante a etapa de conformação, é importante referir que estas se concentraram essencialmente nas zonas dos freios de retenção, como se pode confirmar na Figura 3.25. Os freios de retenção são responsáveis por controlar o escoamento da chapa. De facto, a chapa sofre um processo de dobragem nesta zona, resultante da deformação imposta pelos freios. A adoção de freios de retenção permite baixar consideravelmente o valor de força de aperto do cerra-chapas, mantendo as forças de retenção com valor elevado.



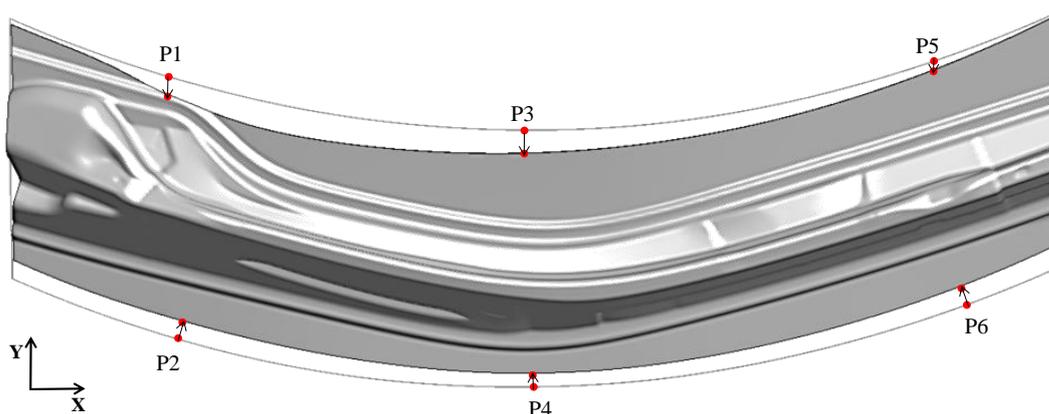
**Figura 3.24.** Evolução das forças em todas as ferramentas (punção, matriz e cerra-chapas) em função do avanço da matriz para as duas discretizações da chapa.



**Figura 3.25.** Distribuição das forças de contacto durante a etapa de conformação para um avanço de 450 mm do punção: (a) malha grosseira da chapa; (b) malha refinada da chapa.

### 3.5.2. Deslizamento da Aba

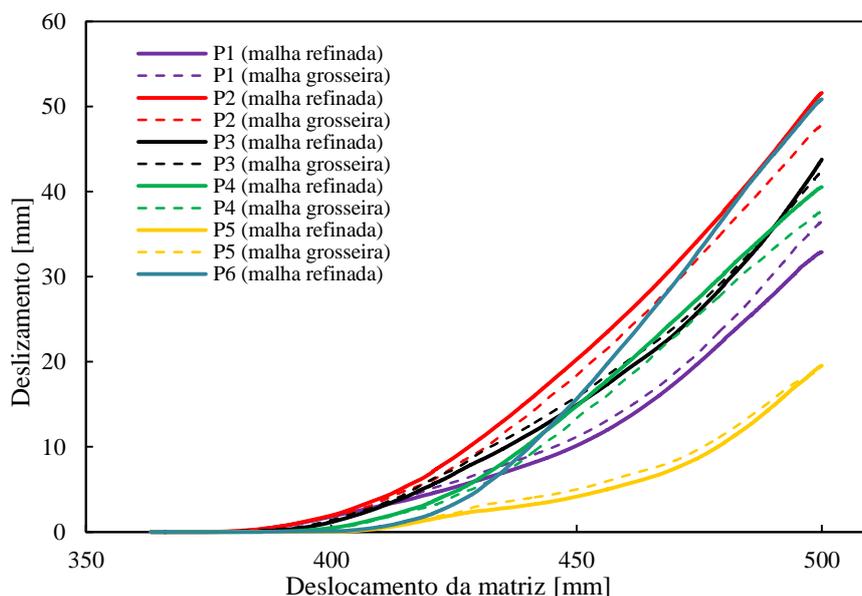
Para analisar o deslizamento da aba durante a fase de conformação foram seleccionados 6 pontos (P1, P2, P3, P4, P5 e P6), como se ilustra na Figura 3.26. Estes pontos pertencem às abas da chapa, tendo sido definidos no final da fase de aperto do cerra-chapas, correspondendo a nós diferentes em cada uma das discretizações mas com coordenadas aproximadas.



**Figura 3.26.** Ilustração do deslizamento da chapa durante a fase de conformação, indicando os seis pontos da aba seleccionados para análise.

A Figura 3.27 apresenta a evolução do deslizamento da chapa nos 6 pontos previamente definidos, comparando as duas discretizações da chapa. Os nós correspondentes à aba inferior da Figura 3.26 sofreram um maior deslizamento, comparativamente aos da aba superior. Relativamente às duas discretizações da chapa, observou-se que, de um modo geral, os valores do deslizamento são semelhantes. Contudo, existe uma tendência para que os pontos correspondentes à malha refinada sofram um maior deslizamento. Isto pode ser devido ao facto de os elementos da malha grosseira terem uma maior dimensão, o que faz com que exista uma maior força de retenção, o que se traduz num menor deslizamento.

Na Figura 3.27 verifica-se que o deslizamento da aba tende a ser maior para a discretização refinada. Isto significa que, para uma mesma geometria imposta pelas ferramentas nas duas simulações, à partida existirá uma maior deformação plástica da chapa na simulação com malha grosseira, visto que os elementos finitos vão ter que deformar mais para assumir a mesma geometria comparativamente à discretização refinada.



**Figura 3.27.** Comparação do deslocamento dos pontos da aba, durante a fase de conformação, para as duas simulações.

Após a etapa de conformação e da análise do escoamento da aba, outras duas variáveis que podem ser interessantes de avaliar são a deformação plástica equivalente e a tensão de escoamento. A distribuição da deformação plástica equivalente no final da etapa de conformação é apresentada na Figura 3.28. O valor máximo de deformação plástica equivalente atingido ocorreu na simulação com a malha grosseira, tendo este atingido o valor máximo de 0.69 nos arcos de curvatura que definem a geometria da chapa que apresentam um raio pequeno (como pode ser visível no lado direito da chapa da Figura 3.28 (a) e mais em detalhe na Figura 3.29).

O facto de terem surgido valores consideravelmente elevados de deformação plástica equivalente na simulação com malha grosseira, aliada ao facto de, na zona mais crítica, a malha de elementos finitos apresentar alguma distorção dos seus elementos, foi um dos fatores que levou à necessidade de planejar uma segunda simulação com a malha mais refinada. Nesta simulação, os valores máximos de deformação plástica equivalente terão ocorrido em zonas próximas dos freios de retenção, tendo no entanto atingido um valor máximo de apenas 0.60. Apesar disso, os valores de deformação plástica equivalente junto aos freios de retenção são claramente superiores aquando da utilização da malha grosseira, como se mostra na Figura 3.28.

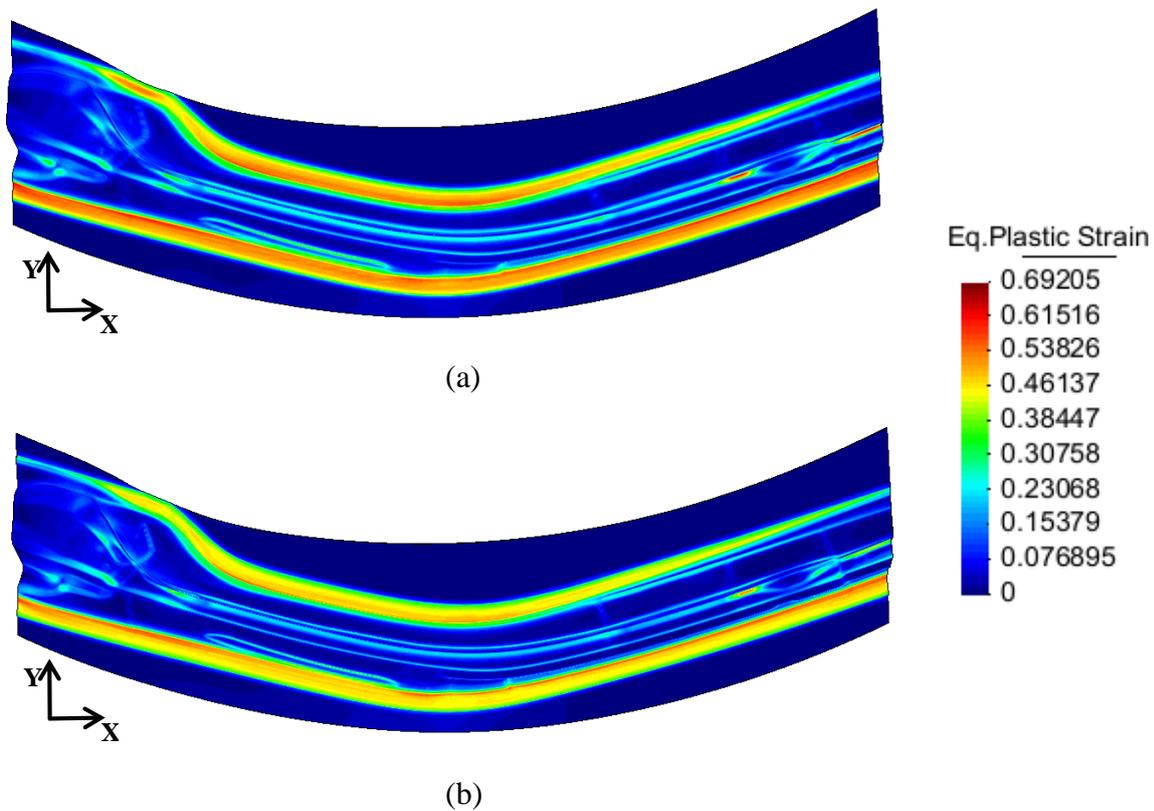


Figura 3.28. Distribuição da deformação plástica equivalente no final da etapa de conformação para: (a) malha grosseira da chapa; (b) malha refinada da chapa.

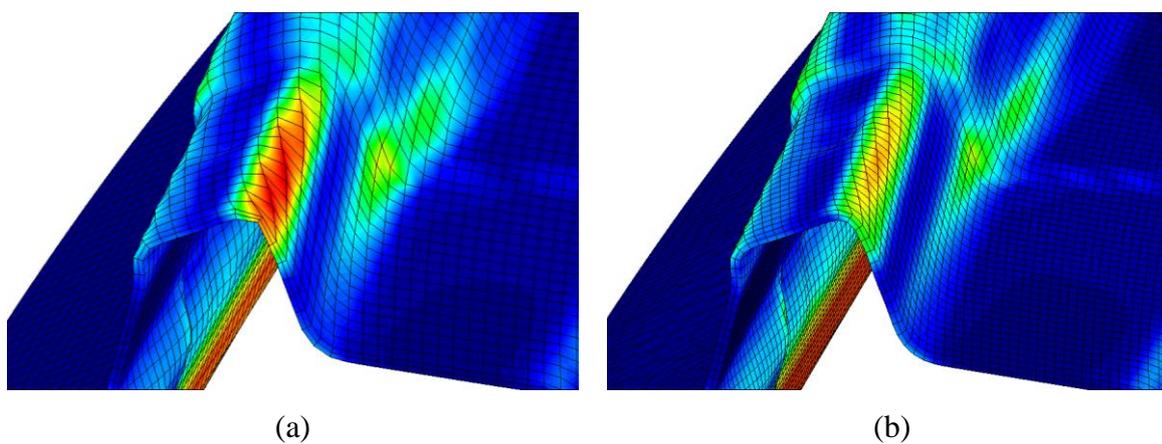
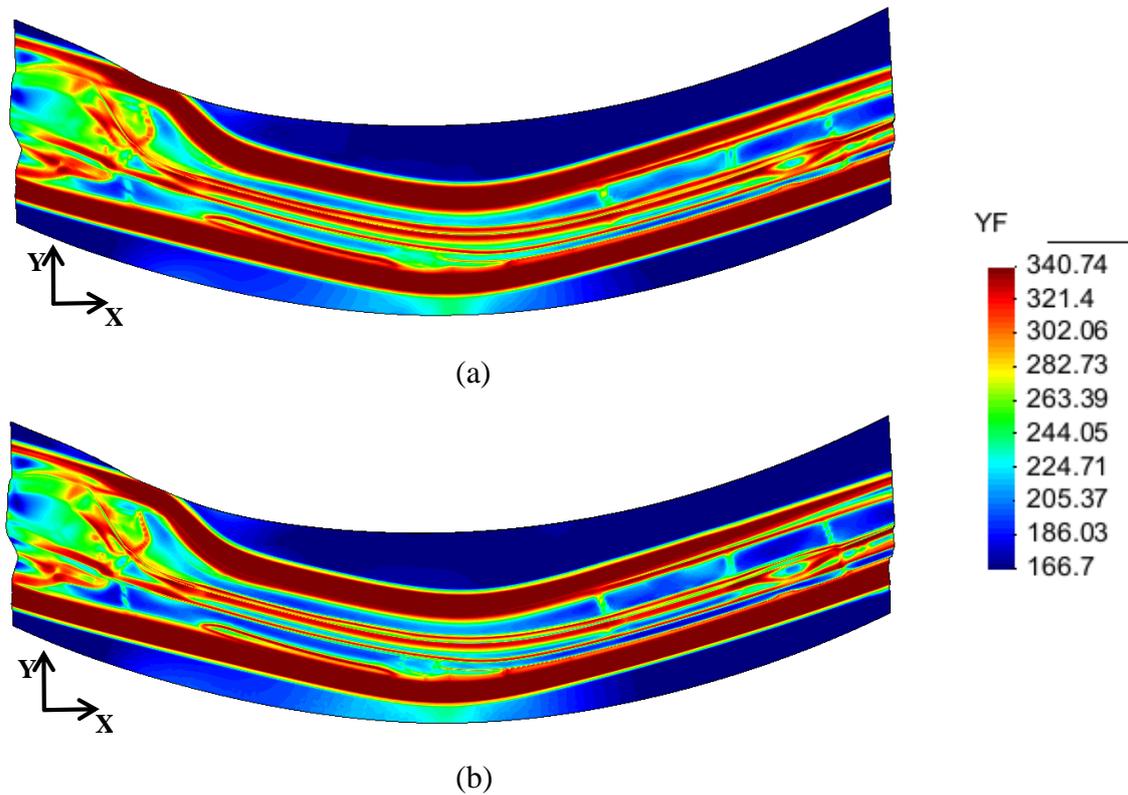


Figura 3.29. Detalhe das zonas: (a) onde ocorreu maior deformação plástica equivalente na simulação com malha grosseira; (b) mesma zona, mas com discretização refinada.

Pode-se também concluir que a zona crítica (demonstrada na Figura 3.29 (a)), na simulação com malha refinada (Figura 3.29 (b)) já não apresentou grande distorção dos seus elementos.



**Figura 3.30.** Distribuição da tensão de escoamento no final da etapa de conformação para: (a) malha da chapa grosseira; (b) malha da chapa refinada.

No que toca à distribuição da tensão de escoamento, esta é apresentada na Figura 3.30 para as duas discretizações. Verificou-se que a diferença entre as duas simulações realizadas é pouco pronunciada. De facto, o valor máximo alcançado ocorreu na simulação com malha grosseira (340.74 MPa), sendo que, o valor máximo atingido na simulação com malha refinada foi de 340.64 MPa, sendo esta diferença pouco relevante. Isto deve-se ao facto de se ter utilizado uma lei de Voce (com saturação) para descrever o encruamento da liga de alumínio (ver Secção 3.1).

Como seria de esperar, as zonas da chapa que apresentam um valor da tensão de escoamento mais elevado correspondem às que apresentam uma maior deformação plástica equivalente (ver Figura 3.28). Efetivamente, a zona da chapa que sofreu

deformação induzida pela passagem nos freios de retenção regista valores elevados de tensão de escoamento, como se verifica na Figura 3.30.

### 3.5.3. Espessura Final da Chapa

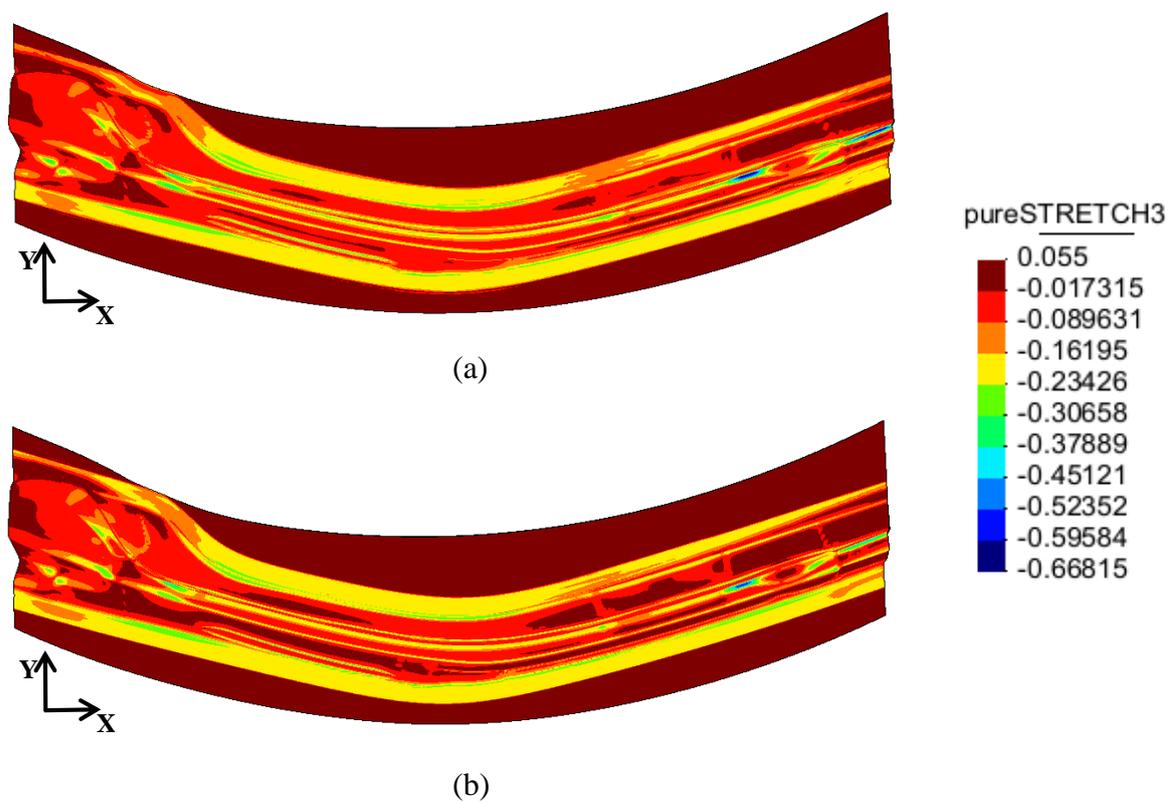
Uma forma de avaliar a espessura da chapa no final do processo de conformação é calcular a deformação total na direção da espessura no final da segunda etapa. Deste modo, a espessura final da chapa é dada por:

$$t = t_0 \times e^{\varepsilon_3} \text{ [mm]} \quad (3.8)$$

onde  $t_0$  representa a espessura inicial e  $\varepsilon_3$  a componente da deformação total na direção da espessura. A distribuição da componente da deformação total na direção da espessura, no final da segunda etapa, é apresentada na Figura 3.31. As zonas da chapa correspondentes ao material que escoou pelos freios apresenta uma grande deformação (negativa) em espessura. Por outro lado, as abas da chapa que não chegaram a passar pelos freios apresentam uma reduzida deformação na direção da espessura. Isto significa que a espessura final da chapa nestas zonas é muito próxima de 3 mm. Existem duas zonas nos raios de curvatura mais pequenos do lado direito da chapa (ver Figura 3.31), onde a deformação total na direção da espessura atinge o seu valor máximo (negativo) de aproximadamente -0.67.

Para avaliar mais facilmente a espessura da chapa no final da etapa de conformação, foram utilizadas as três secções representadas na Figura 3.22, e os sistemas de coordenadas locais representados na Figura 3.23. A distribuição da espessura final da chapa ao longo da coordenada local X é apresentada na Figura 3.32, Figura 3.33 e Figura 3.34 correspondente à secção I, II e III, respetivamente. Em todas as secções analisadas, as zonas da chapa onde ocorreu uma maior redução de espessura foram as que escoaram pelos freios. Este resultado está de acordo com a distribuição da deformação total em espessura no final da etapa de conformação, apresentada na Figura 3.31. Por outro lado, as abas apresentam uma ligeiro aumento de espessura, nomeadamente a secção III, como se mostra na Figura 3.34. Isto pode dever-se ao facto de, durante a fase de conformação, a chapa escoar numa direção afunilada, o que dá origem a alguma compressão na zona das abas,

aumentando deste modo a espessura. Relativamente à influência da discretização utilizada para a chapa, verifica-se que, de um modo global, existe tendência para que a espessura prevista seja mais baixa quando se utiliza a malha grosseira.



**Figura 3.31.** Distribuição da deformação total em espessura no final da etapa de conformação para: (a) malha da chapa grosseira; (b) malha da chapa refinada.

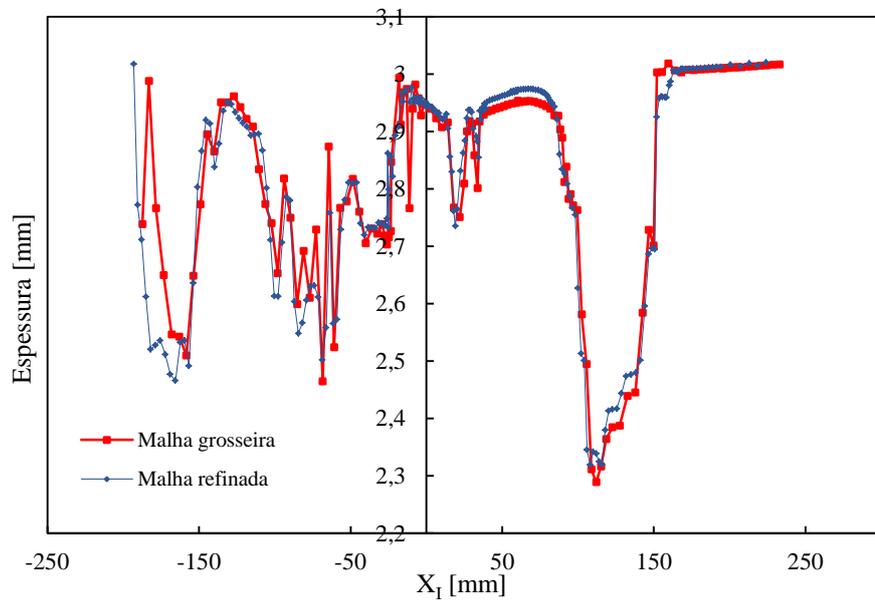


Figura 3.32. Distribuição da espessura final da chapa ao longo da coordenada local  $X_I$  na secção I.

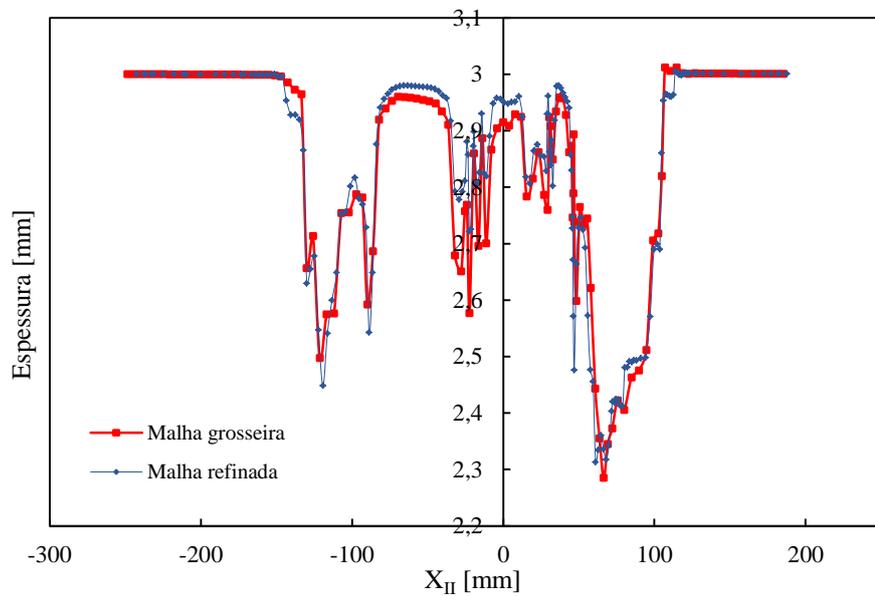


Figura 3.33. Distribuição da espessura final da chapa ao longo da coordenada local  $X_{II}$  na secção II.

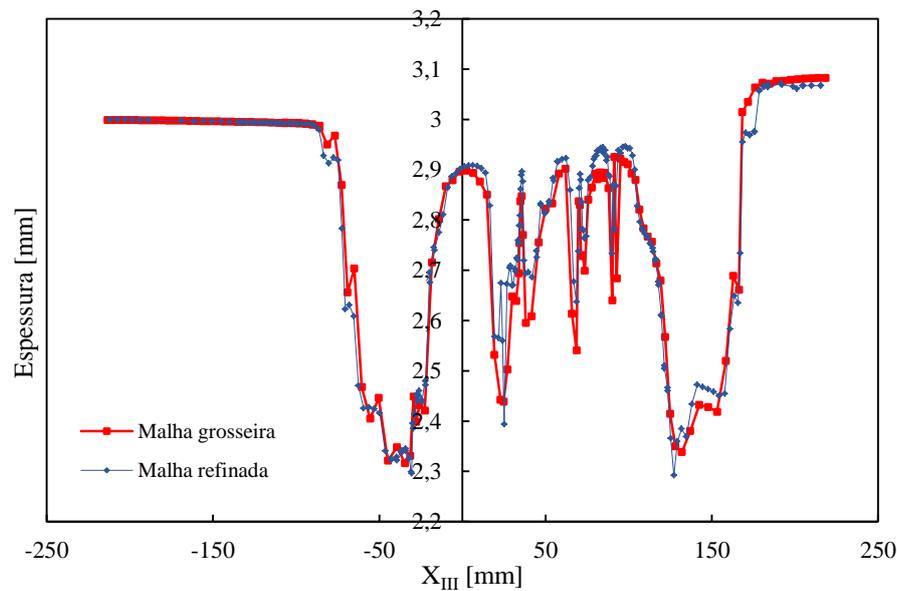


Figura 3.34. Distribuição da espessura final da chapa ao longo da coordenada local  $X_{III}$  na secção III.

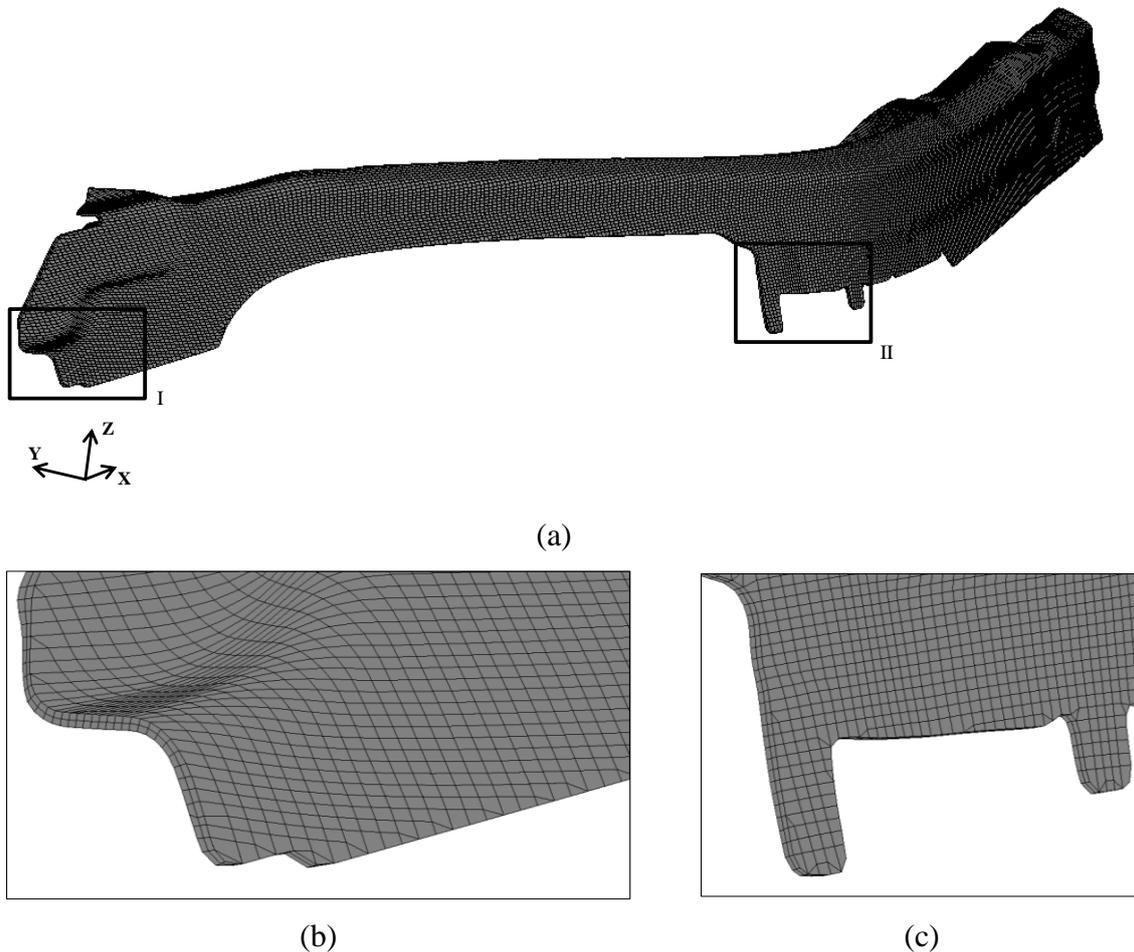
### 3.5.4. Corte e Remapeamento

Após a etapa de conformação, segue-se a etapa de corte geométrico e remapeamento. Deste modo, esta etapa é efetuada utilizando a linha de corte (ver Figura 3.20) previamente seccionada e transformada em múltiplas superfícies de corte. O corte da chapa é simulado utilizando estas superfícies que vão cortar a chapa admitindo que esta mantém a geometria adquirida no final da etapa de conformação. Isto é uma simplificação frequentemente adotada, visto que isto na prática significaria que corte era efetuado com a chapa ainda dentro das ferramentas de conformação. Na realidade, não é assim que se processa a etapa de corte. A chapa deformada tem que ser extraída das ferramentas e só depois é novamente fixa e cortada, dando assim lugar a que posteriormente ocorra mais algum retorno elástico.

Associada à etapa de corte está também o remapeamento de variáveis associadas aos elementos finitos que foram corrigidos. Aqui, o algoritmo de remapeamento recalcula as variáveis para os pontos de Gauss dos elementos que foram corrigidos durante o corte.

Para as duas discretizações adotadas, o número de elementos finitos após a etapa de corte foi de 21562 e 55980 para a malha grosseira e refinada, respetivamente.

Tomando como exemplo a discretização refinada da chapa, esta ficou com o aspeto demonstrado na Figura 3.35.

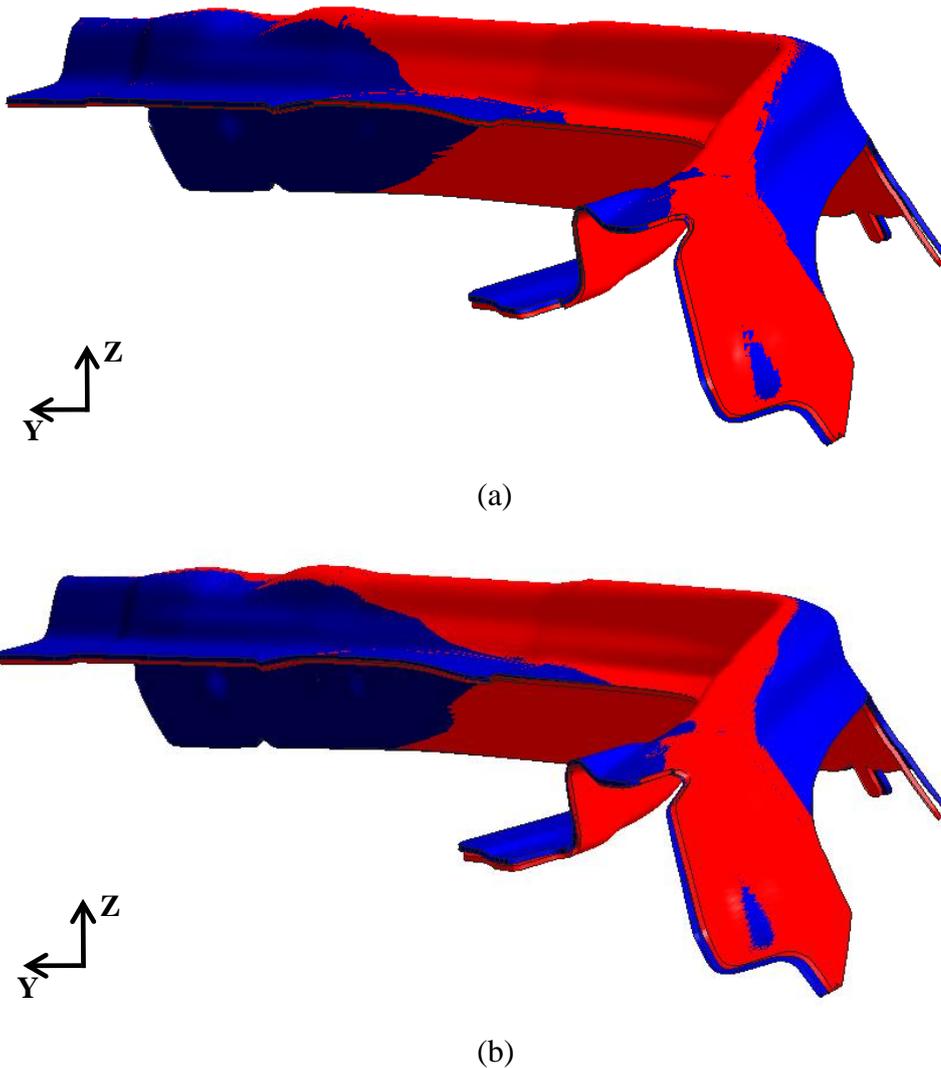


**Figura 3.35.** (a) Vista geral da chapa com discretização refinada após corte; (b) Detalhe I; (c) Detalhe II.

### 3.5.5. Retorno Elástico após Corte

Para a avaliação dos perfis da chapa, antes e depois da remoção das ferramentas, foram definidas no *benchmark* três secções e definidos três sistemas de coordenadas locais, respetivamente. A origem de cada sistema de coordenadas locais coincide com cada um dos pontos aos quais foram impostas restrições aquando da etapa de retorno elástico.

Como se pode observar na Figura 3.36, após o retorno elástico, as zonas que se sobrepuseram à superfície da chapa no estado inicial são semelhantes nas duas simulações realizadas, parecendo também, pela análise da imagem, que a simulação com a malha refinada apresenta um retorno elástico ligeiramente superior.



**Figura 3.36.** Sobreposição da geometria do componente antes (vermelho) e depois (azul) do retorno elástico para: (a) malha grosseira da chapa; (b) malha refinada da chapa.

Após a conversão em coordenadas locais dos pontos pertencentes a cada uma das secções, obtiveram-se as curvas apresentadas na Figura 3.37, Figura 3.38 e Figura 3.39 correspondentes à geometria da superfície interior da chapa antes e após retorno elástico para as duas discretizações.

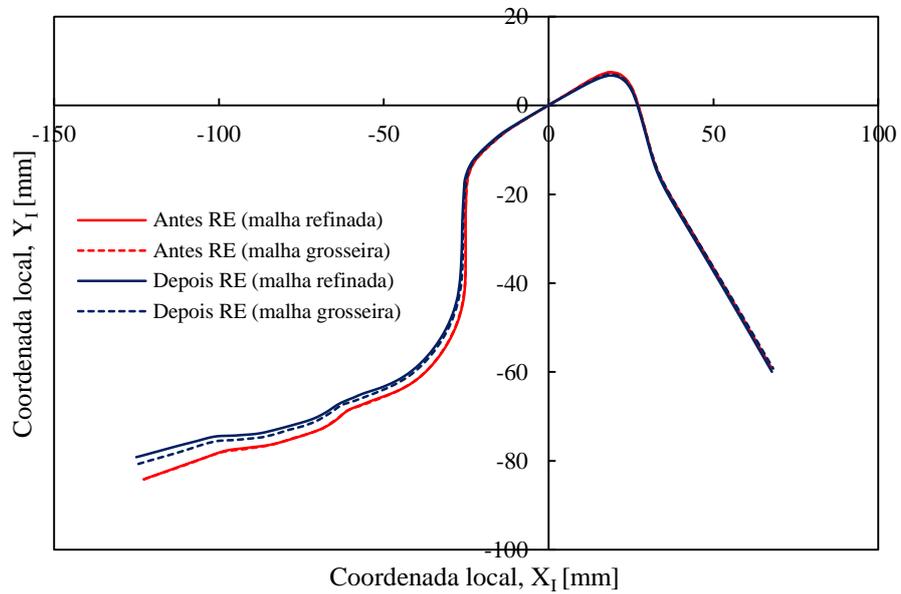


Figura 3.37. Comparação dos perfis do componente, antes e depois do retorno elástico na Secção I.

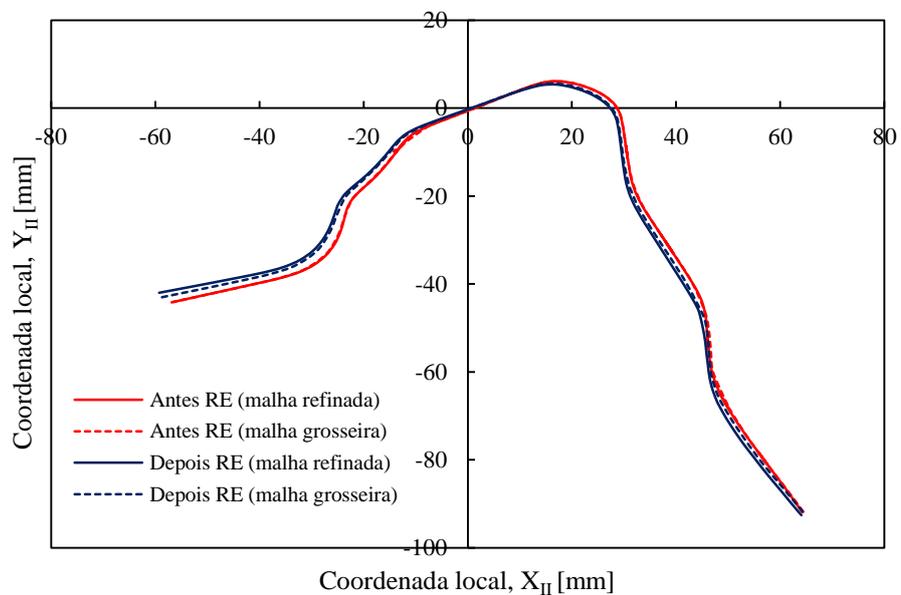
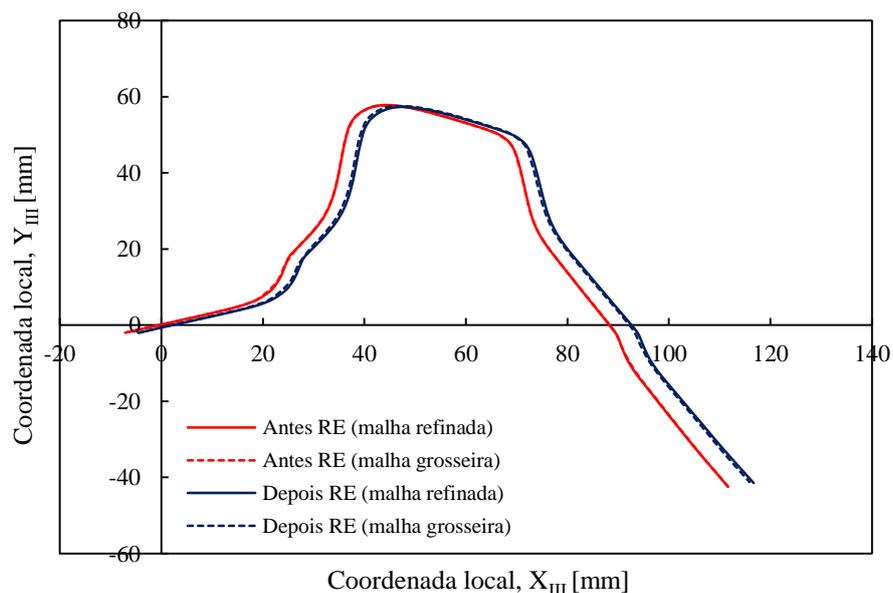


Figura 3.38. Comparação dos perfis do componente, antes e depois do retorno elástico na Secção II.



**Figura 3.39.** Comparação dos perfis do componente, antes e depois do retorno elástico na Secção III.

É importante referir que existe uma sobreposição quase perfeita entre as linhas dos perfis anteriores ao retorno elástico para as duas simulações, o que já seria de esperar visto que nesta fase, a chapa está, para ambas as simulações, confinada entre as ferramentas. Após a análise da Figura 3.37, Figura 3.38 e Figura 3.39 é possível confirmar que, de facto, surgiu um maior retorno elástico na simulação com a malha refinada. Contudo, apesar de haver algumas diferenças visíveis entre os resultados das duas simulações, estas demonstraram ser pouco pronunciadas, sendo que a maior diferença registou-se para a secção I, onde a extremidade esquerda apresenta uma diferença de aproximadamente 1.66 mm. De um modo geral, pode-se também concluir que as secções onde o retorno elástico é mais evidente são a I e a III, ao passo que a secção II apresenta pouca diferença entre ambas as etapas.

### 3.5.6. Tempos de Computação

As simulações feitas no âmbito deste caso de estudo foram realizadas numa máquina com as características apresentadas na Tabela 3.6. De facto, o tempo de simulação é dependente do programa de elementos finitos utilizado, bem como do computador onde são feitas as simulações. Os tempos de computação relativos a cada uma das simulações

realizadas são apresentados na Tabela 3.7. Como seria de esperar, o refinamento da malha de elementos finitos faz aumentar o custo computacional.

**Tabela 3.6.** Características do computador utilizado para fazer as simulações numéricas.

<b>Processador</b>	Intel(R) Core(TM) i7-5930K (6 núcleos) CPU @ 3.50GHz
<b>Memória RAM</b>	64.0 GB

**Tabela 3.7.** Tempos computacionais das simulações realizadas e respetivas etapas.

	<b>Aperto do Cerra-Chapas</b>		<b>Conformação + Corte</b>	
	<b>Nº Incrementos</b>	<b>Tempo [h]</b>	<b>Nº Incrementos</b>	<b>Tempo [h]</b>
<b>Malha grosseira</b>	2341	27	2010	107 + 2
<b>Malha refinada</b>	1422	51	2996	233 + 11

Relativamente à etapa de conformação, o tamanho médio de incremento diminui com o aumento do número de elementos finitos utilizado para discretizar a chapa (ver Tabela 3.7). No entanto, o mesmo não se verifica na etapa de aperto do cerra-chapas. Esta, como se trata de uma etapa onde há muita instabilidade, o processo de convergência para a posição de equilíbrio em cada incremento está fortemente relacionado com a distribuição dos nós restringidos. Assim, ao estarem sempre a altrar-se estes nós, cada simulação é um caso particular. Deste modo, no que toca à malha grosseira, o tamanho médio de incremento nas etapas de aperto do cerra-chapas e conformação foram respetivamente de 0.0875 mm e de 0.0687 mm. Relativamente à discretização refinada, o tamanho médio de incremento foi de 0.1444 mm na fase de aperto do cerra-chapas e de 0.0461 mm na etapa de conformação. Importante referir que tanto no aperto do cerra-chapas como durante a conformação só entrou para a estatística a fase em que a chapa entra de facto em contacto com as ferramentas.

## 4. CONCLUSÕES

O interesse atual revelado pela indústria automóvel na utilização das ferramentas numéricas de simulação é muito elevado, nomeadamente o recurso ao método dos elementos finitos. O principal objetivo destas ferramentas é prever, com precisão, a ocorrência de eventuais defeitos no componente conformado durante a fase de projeto do mesmo. De facto, o método dos elementos finitos tem tido uma enorme evolução no sentido de melhorar os modelos numéricos utilizados, nomeadamente através da inclusão de novos modelos constitutivos, ao mesmo tempo que tenta fornecer resultados num espaço de tempo mais curto. A correta previsão do retorno elástico têm sido alvo de intensa investigação, tentando responder aos requisitos colocados pela indústria.

O presente trabalho representa um marco na história do programa de elementos finitos DD3IMP (desenvolvido no Centro de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra), o qual tem vindo a ser utilizado na simulação de processos de conformação envolvendo geometrias relativamente simples. Pela primeira vez, foi possível fazer a simulação de todo o processo de estampagem de um componente automóvel de geometria bastante complexa. Apesar do elevado tempo de computação, o programa DD3IMP respondeu de forma positiva a este desafio, realizando toda a fase de conformação sem problemas de convergência. O caso de estudo realizado neste trabalho foi proposto na conferência Numisheet 2016 (Bristol, Inglaterra), tendo como título “Springback of a Jaguar Land Rover Aluminium Panel”.

A construção do modelo para a simulação numérica do processo de estampagem de um componente com geometria complexa envolve dificuldades adicionais, nomeadamente na definição de geometria das ferramentas. Esta fase requer a revisão minuciosa de todas as superfícies NURBS que compõem a superfície das ferramentas, de modo a corrigir problemas de falta de continuidade entre superfícies adjacentes e sobreposição de superfícies. Além disso a fase seguinte de discretização deve ser feita com um número de elementos finitos adequado à correta descrição da superfície, sendo usual adotar uma malha não-estruturada, composta tanto por elementos finitos triangulares como quadrangulares.

Uma vez que a discretização efetuada na chapa é um dos principais factores que influênciam o tempo de simulação, neste estudo são utilizadas duas discretizações diferentes, uma grosseira com cerca de 63000 elementos e uma refinada com cerca de 142000 elementos. Após a análise dos resultados de ambas as simulações, é perceptível que a discretização da chapa tem influência nos resultados obtidos. A maior diferença surge na deformação plástica equivalente, tendo estas diferenças na ordem dos 15%. Por outro lado, os parâmetros como a força de conformação, o deslizamento da aba, o retorno elástico e a espessura final não apresentam variações tão significativas. No entanto, o tempo de simulação é completamente diferente para as duas discretizações consideradas. A simulação completa (aperto do cerra-chapas, conformação, corte e retorno elástico) utilizando a malha grosseira requer aproximadamente 6 dias de cálculo, ao passo que a malha refinada necessita de um tempo de computação superior a 12 dias.

Como proposta de trabalho futuro, seria interessante abordar este mesmo problema utilizando um algoritmo de remalhagem para a discretização da chapa. Dada a dimensão e complexidade geométrica do componente, cada zona da chapa deve ter um número adequado de elementos para que possam ser otimizados os recursos computacionais, acelerando deste modo a simulação. Além disso, geralmente uma correcta previsão do retorno elástico requer pelo menos 3 camadas de elementos finitos em espessura. Outra proposta tem como objetivo a aproximação da simulação à realidade do processo. Assim, antes da etapa de corte deverá ser criada uma etapa intermédia de retorno elástico no final da etapa de conformação. A comparação da geometria final do componente obtido com esta estratégia e a geometria obtida neste trabalho permitirá quantificar o impacto da inclusão de uma etapa intermédia de retorno elástico. Além de tudo isto, será importante fazer a validação dos resultados numéricos apresentados com resultados experimentais.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alart, P., & Curnier, A. (1991). A mixed formulation for frictional contact problems prone to Newton like solution methods. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 92(3), 353–375. [http://doi.org/10.1016/0045-7825\(91\)90022-X](http://doi.org/10.1016/0045-7825(91)90022-X)
- Allen, M., Dutton, T., Oliveira, M., & Hazra, S. (2016). Benchmark 2 – Springback of a Jaguar Land Rover Aluminium Panel.
- Alves, L. (2003). *Simulação Numérica do Processo de Estampagem de Chapas Metálicas*. Universidade do Minho.
- Baptista, A. (2006). *Modelação Mecânica e Simulação Numérica do Processo de Estampagem Multi-Etapas*. Universidade de Coimbra.
- Barlat, F., Lege, D. J., & Brem, J. C. (1991). A six-component yield function for anisotropic materials. *International Journal of Plasticity*. [http://doi.org/10.1016/0749-6419\(91\)90052-Z](http://doi.org/10.1016/0749-6419(91)90052-Z)
- Carsley, J., Xia, C., Yang, L., Xu, S., Stoughton, T., Hartfield-Wunsch, S., Chem, Z. (2014). Benchmark 2 - Numisheet 2014.
- Chalal, H., Racz, S. G., & Balan, T. (2012). Springback of thick sheet AHSS subject to bending under tension. *International Journal of Mechanical Sciences*, 59(1), 104–114. <http://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2012.03.011>
- Hallquist, J. O., Goudreau, G. L., & Benson, D. J. (1985). Sliding interfaces with contact-impact in large-scale Lagrangian computations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 51(1-3), 107–137. [http://doi.org/10.1016/0045-7825\(85\)90030-1](http://doi.org/10.1016/0045-7825(85)90030-1)
- Heleno, R. (2012). *Desenvolvimento de uma plataforma interactiva para a utilização do DD3IMP*. Universidade de Coimbra.
- Hill, R. (1948). A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 193(1033), 281–297. <http://doi.org/10.1098/rspa.1948.0045>
- Hora, P., Volk, W., Roll, K., Griesbach, B., Kessler, L., & Hotz, W. (2008). Benchmark 2 -

- Numisheet 2008.
- Huh, H., Chung, K., Han, S., & Chung, W. (2011). Benchmark 3 - Numisheet 2011.
- Li, K. P., Carden, W. P., & Wagoner, R. H. (2002). Simulation of springback. *International Journal of Mechanical Sciences*, 44(1). [http://doi.org/10.1016/S0020-7403\(01\)00083-2](http://doi.org/10.1016/S0020-7403(01)00083-2)
- Menezes, L. F., & Teodosiu, C. (2000). Three-dimensional numerical simulation of the deep-drawing process using solid finite elements. *Journal of Materials Processing Technology*, 97, 100–106. [http://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00345-3](http://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00345-3)
- Nagata, T. (2005). Simple local interpolation of surfaces using normal vectors. *Computer Aided Geometric Design*, 22(4), 327–347. <http://doi.org/10.1016/j.cagd.2005.01.004>
- Neto, D. M. (2014). *Numerical simulation of frictional contact problems using Nagata patches in surface smoothing*. Universidade de Coimbra.
- Neto, D. M., Oliveira, M. C., Menezes, L. F., & Alves, J. L. (2014). Applying Nagata patches to smooth discretized surfaces used in 3D frictional contact problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 271, 296–320. <http://doi.org/10.1016/j.cma.2013.12.008>
- Oliveira, M., & Menezes, L. F. (2004). Automatic correction of the time step in implicit simulations of the stamping process.
- Pegden, D. (1990). *Introduction to Simulation Using SIMAN*.
- Rusu, C. (2013). <http://feaforall.com/category/fea-solver/>.
- Smith, L. M., Pourboghraat, F., Yoon, J-W., Stoughton, T. B. (2005). Benchmark 2 - Numisheet 2005.
- Tekkaya, A. E., & Paulo A.F. Martins. (2009). Accuracy, reliability and validity of finite element analysis in metal forming: A user's perspective. *Engineering Computations*, 26(8), 1026–1055. <http://doi.org/10.1108/02644400910996880>
- Teodosiu, C., Daniel, D., Cao, H.-L., & Duval, J.-L. (1995). Modelling and simulation of the can-making process using solid finite elements. *Journal of Materials Processing Technology*, 50(1-4), 133–143. [http://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)01375-B](http://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01375-B)
- Yang, D. Y., Oh, S. I., Huh, H., Kim, Y. H. (2002). Benchmark 3 - Numisheet 2002.