



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Bárbara Sofia Afonso Curralo

**ESTUDO DE MALHAS DE ELEMENTOS FINITOS
NÃO CONFORMES NA SIMULAÇÃO DE
PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO PLÁSTICA DE
CHAPAS METÁLICAS**

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, na especialidade de Produção e Projeto orientada pela Professora Doutora Marta Cristina Cardoso de Oliveira e pelo Professor Doutor Diogo Mariano Simões Neto e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Julho de 2021

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Estudo de malhas de elementos finitos não conformes na simulação de processos de conformação plástica de chapas metálicas

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

Numerical analysis of sheet metal forming processes using non-conforming finite element meshes

Autor

Bárbara Sofia Afonso Curralo

Orientadores

Marta Cristina Cardoso de Oliveira

Diogo Mariano Simões Neto

Júri

Presidente	Professor Doutor Vasco Manuel Neto Simões Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Coimbra Professora Doutora Marta Cristina Cardoso de Oliveira
Orientador	Professora Associada da Universidade de Coimbra Professor Doutor Diogo Mariano Simões Neto Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogal	Professor Doutor Luís Filipe Martins Menezes Professor Catedrático da Universidade de Coimbra

Coimbra, julho, 2021

A todos os meus pilares.

Agradecimentos

À Professora Doutora Marta Cristina Cardoso de Oliveira,
*pelo carinho e dedicação constantes, pela motivação e apoio incondicional, e
pela genuinidade do seu ser.*

Ao Professor Doutor Diogo Mariano Simões Neto,
*pela dedicação, paciência e confiança constantes, e por me incentivar sempre
a dar o melhor de mim.*

Aos meus orientadores,
por me ensinarem que um professor é, também, um amigo.

À Cátia,
*por me acompanhar incansavelmente em todas as etapas da minha vida. Pela
amizade mais bela, pura e duradoura. Porque nenhum momento sabe tão bem sem a sua
presença. Sem ela, esta dissertação não seria possível.*

Aos meus pais,
*pelo amor puro e incondicional, pela confiança, dedicação e apoio. Por
acreditarem em mim e por me incentivarem sempre a seguir os meus sonhos. Sem vocês
não existiriam.*

À Ana,
*pelo teu amor e dedicação, e por me mostrares que posso ser tudo o que eu
quiser. Sonho ser, um dia, como tu.*

À Matilde,
por me ensinar uma nova forma de amor e por me mostrar que a felicidade reside nas pequenas coisas da vida.

Aos meus colegas de casa,
pelo companheirismo e amizade, pelos momentos que recordarei com o maior carinho. Convosco Coimbra tem outro encanto.

Aos meus amigos,
pelo apoio, ajuda e dedicação. Pela alegria dos momentos e por tornarem a vida mais doce.

A todos,
o meu mais sincero obrigado.

Esta dissertação foi realizada no âmbito dos projetos “IfDamagElse: Modelling and numerical simulation of damage in metallic sheets: anisotropic behaviour and tension-compression asymmetry coupled approach for formability prediction” (PTDC/EME-EME/30592/2017) e “Computational Methods for Optimizing the SLM Additive Manufacturing Process” (PTDC/EME-EME/31657/2017), cofinanciados pela Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia (FCT) e pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI-01-0145-FEDER-030592, CENTRO-01-0145-FEDER-031657 e UIDB/00285/2020).



Resumo

A discretização espacial dos corpos deformáveis tem-se tornado um parâmetro cada vez mais importante no contexto da simulação numérica com recurso ao método dos elementos finitos. A precisão dos resultados depende da dimensão adotada para os elementos finitos, que devem também apresentar boa qualidade de forma, o que nem sempre é possível, em particular quando se recorre a malhas conformes. Por outro lado, o recurso a malhas conformes que cumpram os requisitos necessários pode conduzir a tempos de cálculo incomportáveis. Estas adversidades podem ser ultrapassadas com recurso a malhas não conformes, mas é necessário avaliar o seu impacto na precisão dos resultados. Este estudo avalia a performance de malhas não conformes, constituídas por elementos finitos hexaédricos trilineares, quando aplicadas à simulação numérica de processos de conformação de chapas metálicas. São estudados quatro casos de estudo: ensaio de tração e três processos de conformação de diferentes complexidades. Para cada exemplo, são analisados os resultados obtidos com malhas não conformes e conformes, com diferentes níveis de refinamento. Nas malhas não conformes, as zonas críticas, que sofrem maior deformação plástica ou apresentam gradientes na distribuição de variáveis locais, são sujeitas a um maior nível de refinamento. Uma vez identificadas estas zonas, foram refinadas com recurso a um algoritmo de refinamento seletivo. As zonas que sofrem pouca ou quase nenhuma deformação são zonas constituídas por tamanhos de elementos que correspondem ao menor grau de refinamento. Os parâmetros de comparação para análise da precisão dos resultados incluem a evolução de variáveis globais, como a força exercida pelas ferramentas, bem como de variáveis locais, como a distribuição da espessura ou o perfil do componente após retorno elástico. A análise da performance computacional é realizada com base no tempo de simulação, o número de incrementos executado, a média de iterações por incremento e o número de elementos.

O estudo analisou a influência do refinamento no plano e em espessura, adotado para as zonas críticas e de transição, nas malhas não conformes. O algoritmo implementado não permite recuperar a definição geométrica, mas apenas refinar as zonas lineares definidas malha conforme utilizada como inicial. O refinamento no plano deve permitir a descrição

dos gradiente de tensão, induzidos pelos processos de flexão, de modo a permitir uma correta previsão do retorno elástico. O refinamento na direção da espessura permite aumentar o número de pontos de integração, necessários para a correta descrição do gradiente de tensões ao longo da espessura. Cumpridos estes requisitos, os resultados obtidos com malhas não conformes apresentam um erro relativo, determinado comparativamente com a malha conforme mais refinada, muito reduzido na força máxima de conformação (<15%) e na variação da espessura (<5%). No pior dos casos, o recurso a uma malha não conforme permitiu uma redução do tempo de cálculo de 10%.

Palavras-chave: Conformação plástica, Simulação numérica, Elementos finitos, Malhas não conformes, Algoritmo de refinamento local, Retorno elástico, DD3IMP.

Abstract

The spatial discretization of deformable bodies has become an increasingly important parameter in the context of the numerical simulation with the finite element method. The precision of the results depends on the size of the finite elements adopted that should also present good shape quality, which is not always possible, particularly when using conformal meshes. On the other hand, the use of conformal meshes that fulfil the mention requirements can lead to unaffordable computational times. These adversities can be overcome with the use of nonconforming meshes, but it is necessary to evaluate their impact on the results accuracy. This study evaluates the performance of nonconforming meshes, composed of hexahedral trilinear finite elements, when applied to the numerical simulation of sheet metal forming processes. Four case studies are studied: the uniaxial tensile testing and three forming processes of different complexity. For each example, the results are analysed for nonconforming and conforming meshes, with different levels of refinement. In the nonconforming meshes, the critical zones, which suffer greater plastic deformation or present gradients in the distribution of local variables, are the areas subject to greater levels of refinement. Once these zones were identified, they were refined using a selective refinement algorithm. The zones that suffer little or almost no deformation are zones consisting of element sizes corresponding to the lowest degree of refinement. The comparison parameters, for analysing the accuracy of the results, include the evolution of global variables, such as the force applied by the tools, as well as local variables, such as the thickness distribution or the profile of the component after springback. The computational performance analysis is performed based on the simulation time, the number of increments executed, the average number of iterations per increment, and the number of elements.

The study analysed the influence of the in-plane and through-thickness refinement, adopted for the critical and transition zones, in nonconforming meshes. The implemented algorithm does not allow to recover the geometric definition, but only to refine the linear zones defined in the mesh used as initial. The in-plane refinement should allow the description of the stress gradients, induced by the bending processes, in order to allow a correct prediction of the springback. The refinement in the thickness direction allows

increasing the number of integration points, necessary for the correct description of the stress gradient through the thickness. Once these requirements are fulfilled, the results obtained with non-conforming meshes show a relative error, determined compared to the more refined conforming mesh, very small in the maximum forming force (<15%) and in the thickness variation (<5%). In the worst case, the use of a non-conformal mesh allowed a 10% reduction in computational time.

Keywords Plastic deformation, Numerical simulation, Finite element, Non-conforming meshes, Local refinement algorithm, Springback, DD3IMP

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xv
1. Introdução.....	1
2. Processos de fabrico	3
2.1. Processos de conformação plástica de chapas metálicas	3
2.1.1. Defeitos associados à conformação plástica.....	4
2.2. Simulação numérica de processos de conformação plástica.....	5
3. Método dos elementos finitos.....	7
3.1. Tipos de elemento	9
3.2. Malhas estruturadas e não estruturadas.....	10
3.3. Malhas conformes e não conformes	11
3.4. Refinamento de malhas.....	12
3.5. Algoritmo de refinamento local	14
3.6. DD3IMP.....	17
4. Casos de estudo e análise de resultados.....	19
4.1. Ensaio de tração uniaxial	19
4.2. Processo de conformação do U-rail	24
4.2.1. Simulação 2D	25
4.2.2. Simulação 3D	33
4.3. Processo de conformação de uma taça quadrada.....	42
4.4. Processo de conformação de um componente automóvel	52
4.4.1. Refinamento no plano.....	55
4.4.2. Refinamento na espessura	59
5. Conclusões.....	63
Referências bibliográficas	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Representação esquemática de um processo de conformação plástica de uma taça quadrada [10].	4
Figura 3.1. Representação de uma geometria curvilínea de um corpo com uma malha de elementos finitos com: (a) 2 elementos; (b) 4 elementos [12].	9
Figura 3.2. Representação esquemática do tipos de elementos: (a) membrana; (b) casca; (c) sólido [15].	10
Figura 3.3. Representação esquemática de um malha de elementos finitos: (a) estruturada; (b) não estruturada [17].	11
Figura 3.4. Representação esquemática de uma malha de elementos finitos: (a) conforme; (b) não conforme [3].	12
Figura 3.5. Representação das três classes de refinamento do tipo refinamento-h: (a) original; (b) após subdivisão do elemento; (c) após re-refinamento; (d) após refinamento-r [18].	13
Figura 3.6. Representação do refinamento do tipo refinamento-p e os nós livres resultantes [19].	14
Figura 3.7. Malha não conforme de elementos finitos 2D com um nó livre [20].	14
Figura 3.8. Representação dos diferentes níveis de refinamento gerados pelo algoritmo de refinamento local [22].	15
Figura 4.1. Ensaio de tração usando um provete paralelepípedo: (a) malha GP; (b) malha RP; (c) malha NCP.	21
Figura 4.2. Ensaio de tração usando um provete cilíndrico: (a) malha GC; (b) malha RC; (c) malha NCC.	21
Figura 4.3. Evolução da força de tração em função do deslocamento da amarra no ensaio de tração: (a) provete paralelepípedo (b) provete cilíndrico.	22
Figura 4.4. Comparação entre tempo de simulação e número de elementos finitos na simulação do ensaio de tração: (a) provete paralelepípedo; (b) provete cilíndrico.	23
Figura 4.5. Geometria das ferramentas e do esboço utilizados na simulação da conformação U-rail [26].	25
Figura 4.6. Malhas utilizadas no processo de conformação U-rail em 2D: (a) malha C200; (b) malha C400; (c) malha C800; (d) malha NC.	27
Figura 4.7. Conformação de uma geometria U-rail em 2D: (a) evolução da força do punção em função do seu deslocamento; (b) evolução do erro relativo da força do punção em função do seu deslocamento.	28

Figura 4.8. Conformação de uma geometria U-rail em 2D: (a) evolução da força do cerra-chapas em função do deslocamento do punção; (b) evolução do erro relativo da força do cerra-chapas em função do deslocamento do punção.	29
Figura 4.9. Conformação de uma geometria U-rail em 2D: (a) espessura final em função da distância entre dois nós consecutivos; (b) evolução do erro relativo da espessura final em função da distância entre dois nós consecutivos.	30
Figura 4.10. Análise do estado de tensão antes do retorno elástico da geometria U-rail em 2D: (a) distribuição das tensões na direção Ox em função da distância entre dois nós consecutivos; (b) perfil de tensão local na direção Ox na parede vertical ao longo da espessura.	31
Figura 4.11. Conformação de uma geometria U-rail em 2D: (a) perfil após o retorno elástico; (b) comparação entre o tempo de simulação (TS) e o número de elementos (NE).	31
Figura 4.12. Conformação de uma geometria U-rail em 2D (a) número de incrementos (NI) executados; (b) quantidade média de iterações por incremento (MI).	32
Figura 4.13. Conformação de uma geometria U-rail em 3D. Análise do gradiente em espessura e largura, na zona da parede vertical, da deformação plástica equivalente para: (a) a malha C200; (b) a malha C400.	34
Figura 4.14. Conformação de uma geometria U-rail Análise do gradiente em espessura e largura, na zona da parede vertical, da tensão equivalente para: (a) a malha C200; (b) a malha C400.	35
Figura 4.15. Malhas utilizadas no processo de conformação U-rail em 3D: (a) malha C200; (b) malha C400; (c) malha C800; (d) malha NC.	36
Figura 4.16. Conformação de uma geometria U-rail em 3D: (a) evolução da força do punção em função do seu deslocamento; (b) evolução do erro relativo da força do punção em função do seu deslocamento.	37
Figura 4.17. Conformação de uma geometria U-rail em 3D: (a) evolução da força do cerra-chapas em função do deslocamento do punção; (b) evolução do erro relativo da força do cerra-chapas em função do deslocamento do punção.	38
Figura 4.18. Conformação de uma geometria U-rail em 3D: (a) espessura final em função da distância entre dois nós consecutivos; (b) evolução do erro relativo da espessura final em função da distância entre dois nós consecutivos.	39
Figura 4.19. Análise do estado de tensão antes do retorno elástico da geometria U-rail em 3D: (a) distribuição das tensões na direção Ox em função da distância entre dois nós consecutivos; (b) perfil de tensão local na direção Ox na parede vertical ao longo da espessura para $y=17,5$	40
Figura 4.20. Conformação de uma geometria U-rail em 3D: (a) perfil após o retorno elástico; (b) comparação entre o tempo de simulação (TS) e o número de elementos (NE).	41

Figura 4.21. Conformação de uma geometria U-rail de uma simulação 3D (a) número de incrementos (NI) executados; (b) quantidade média de iterações por incremento (MI).	42
Figura 4.22. Geometria das ferramentas e do esboço utilizados na simulação da conformação de uma taça quadrada [26].	43
Figura 4.23. Comparação do refinamento no plano e na espessura das malhas não conformes utilizadas na conformação de uma taça quadrada: (a) malha NC1; (b) malha NC2.	45
Figura 4.24. Conformação de uma taça quadrada: (a) evolução da força do punção em função do seu deslocamento; (b) evolução do erro relativo da força do punção em função do seu deslocamento.	46
Figura 4.25. Conformação de uma taça quadrada: (a) evolução da força do cerra-chapas em função do deslocamento do punção; (b) evolução da força da matriz em função do deslocamento do punção.	48
Figura 4.26. Conformação de uma taça quadrada. Geometria prevista no final do processo de conformação, evidenciando a ocorrência de rugas, nas malhas: (a) C38; (b) C76; (c) 152; (d) NC1; (e) NC2.	48
Figura 4.27. Conformação de uma taça quadrada: (a) espessura final na direção Ox em função da distância entre dois nós consecutivos; (b) espessura final na direção Ox=Oy em função da distância entre dois nós consecutivos.	49
Figura 4.28. Conformação de uma taça quadrada: (a) evolução do erro relativo da espessura final na direção Ox em função da distância entre dois nós consecutivos.; (b) evolução do erro relativo da espessura final na direção Ox=Oy em função da distância entre dois nós consecutivos.	49
Figura 4.29. Conformação de uma taça quadrada: (a) comparação entre o tempo de simulação (TS) e o número de elementos (NE); (b) número de incrementos (NI) executados.	51
Figura 4.30. Conformação de uma taça quadrada: quantidade média de iterações (MI) por incremento.	51
Figura 4.31. Malhas utilizadas no processo de conformação de um componente automóvel: (a) malha G2; (b) malha I2; (c) malha R2; (d) malha NC; (e) malha MCU.	54
Figura 4.32. Representação: (a) das condições de fronteira para a simulação do retorno elástico [29]; (b) das secções de corte para análise do retorno elástico.	55
Figura 4.33. Conformação de um componente automóvel com refinamento no plano: (a) evolução da força do punção em função do seu deslocamento; (b) evolução do erro relativo da força do punção em função do seu deslocamento.	56
Figura 4.34. Conformação de um componente automóvel com refinamento no plano: (a) perfil após o retorno elástico para a Secção A; (b) perfil após o retorno elástico para a Secção B.	57
Figura 4.35. Conformação de um componente automóvel com refinamento no plano: (a) comparação entre o tempo de simulação (TS) e o número de elementos (NE); (b) número de incrementos (NI) executados.	58

Figura 4.36. Conformação de um componente automóvel com refinamento no plano: quantidade média de iterações (MI) por incremento.	58
Figura 4.37. Conformação de um componente automóvel com refinamento na espessura: (a) evolução da força do punção em função do seu deslocamento; (b) evolução do erro relativo da força do punção em função do seu deslocamento.	60
Figura 4.38. Conformação de um componente automóvel com refinamento na espessura: (a) perfil após o retorno elástico para a Secção A; (b) perfil após o retorno elástico para a Secção B.	60
Figura 4.39. Conformação de um componente automóvel com refinamento na espessura: (a) comparação entre o tempo de simulação (TS) e o número de elementos (NE); (b) número de incrementos (NI) executados.	61
Figura 4.40. Conformação de um componente automóvel com refinamento na espessura: quantidade média de iterações por incremento em função do número de elementos.	61
Figura 5.1. Comparação entre o tempo de simulação (TS) e o número de elementos (NE), para os diferentes exemplos estudados no âmbito deste trabalho. Os símbolos com maior diâmetro correspondem às malhas não conformes.	65

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Métodos de aplicação do MEF [12].....	8
Tabela 3.2. Categorias de erro do MEF e parâmetros de origem [9].	9
Tabela 4.1. Propriedades mecânicas do aço SAE 1045.....	20
Tabela 4.2. Características das malhas utilizadas na simulação numérica de um ensaio de tração para o provete paralelepípedo.	21
Tabela 4.3. Características das malhas utilizadas na simulação numérica de um ensaio de tração para o provete cilíndrico.	21
Tabela 4.4. Propriedades mecânicas do aço macio utilizado na simulação do processo de conformação de uma geometria U-rail.	25
Tabela 4.5. Características das malhas utilizadas na simulação numérica (2D) da conformação do U-rail.....	27
Tabela 4.6. Características das malhas utilizadas na simulação numérica (análise do bordo livre) da conformação do U-rail.	34
Tabela 4.7. Características das malhas utilizadas na simulação numérica (3D) da conformação do U-rail.....	36
Tabela 4.8. Propriedades mecânicas do aço macio utilizado na simulação numérica de conformação de uma taça quadrada.	43
Tabela 4.9. Características das malhas utilizadas na simulação numérica da conformação de uma taça quadrada.	44
Tabela 4.10. Propriedades mecânicas do aço macio utilizado na simulação do processo de conformação de um componente automóvel.	52
Tabela 4.11. Características das malhas utilizadas na simulação numérica da conformação de um componente automóvel para os diferentes casos de refinamento, no plano e na espessura.	54

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

ε_0 – Parâmetro do material, associado à lei de Swift

σ_0 – Tensão limite de elasticidade inicial

$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ – Tensões principais

μ – Coeficiente de atrito

ν – Coeficiente de Poisson

ε – Deformação

σ – Tensão de escoamento

E – Módulo de Elasticidade

F, G, H, L, M, N – Parâmetros do critério de plasticidade Hill'48

FE – Tamanho do elemento finito

K – Parâmetro do material, associado à lei de Swift

n – Coeficiente de encruamento do material, associado à lei de Swift

r_{matriz} – Raio de curvatura da matriz

Siglas

ASTM – American Society for Testing and Materials

DD3IMP – Deep-Drawing 3D Implicit code

MEF – Método dos Elementos Finitos

MI – Média de iterações por incremento

NE – Número de elementos

NI – Número de incrementos

OSS – One Step Springback

RE – Retorno elástico

SAE – Society of Automotive Engineers

TS – Tempo de simulação

1. INTRODUÇÃO

Com o grande desenvolvimento da mecânica computacional e em particular do método dos elementos finitos, a discretização espacial dos corpos a modelar tornou-se um parâmetro cada vez mais importante. De facto, nem sempre é fácil construir malhas de elementos finitos que cumpram todos os requisitos necessários para garantir a precisão da solução, em particular em geometrias complexas, pelo que é comum surgirem alguns conflitos. A utilização de malhas não conformes permite ultrapassar alguns destes conflitos, o que é uma das vantagens sobre as malhas conformes, que continuam a ser comumente utilizadas [1]. A outra grande vantagem surge ao nível do tempo computacional, uma vez que a aplicação de malhas não conformes permite uma redução do número de graus de liberdade do problema e, conseqüentemente, do tempo de simulação [2]. No entanto, as malhas não conformes podem originar resultados menos precisos, quando comparados com os obtidos com malhas conformes, devido ao possível aparecimento de zonas de transição que carecem de um tratamento especial [3].

O objetivo deste estudo é avaliar a performance das malhas não conformes em simulações numéricas de processos de conformação plástica de chapas metálicas. Para tal, são estudados quatro casos de estudo: ensaio de tração e processos de conformação plástica, nomeadamente, um U-rail, uma taça quadrada e uma geometria complexa. De facto, o estudo considera primeiro uma solicitação monótona, com o ensaio de tração, para introduzir as noções mais relevantes associadas a malhas não conformes, e posteriormente estudam-se casos de conformação plástica de grau de complexidade crescente. A avaliação da performance das malhas não conformes é efetuada por comparação de resultados com malhas conformes. Deste modo, e de acordo com os objetivos da presente dissertação, são estudados dois tipos de malhas, malhas conformes e malhas não conformes, com diferentes níveis de refinamento. As malhas conformes são geradas com o auxílio do software de pré-processamento, GiD [4]. As malhas não conformes são geradas a partir de malhas conformes, às quais é aplicado um algoritmo de refinamento local. A comparação entre resultados, quer de malhas conformes, quer de malhas não conformes, tem como referência, para cada caso de estudo, a malha conforme com maior grau de refinamento. Os critérios de comparação dos resultados são:

- O número total de elementos finitos;
- O tempo de simulação;
- O número total de incrementos;
- O número médio de iterações por incremento;
- A previsão de variáveis globais, como a força necessária para deformar o material, e locais, como a deformação em espessura.

A presente dissertação encontra-se dividida em sete capítulos, que estão organizados conforme se descreve em seguida.

O Capítulo 2 é constituído por uma breve introdução aos processos de fabrico, aprofundando os processos de conformação plástica de chapas metálicas, bem como o tipo de defeitos mais comuns e a aplicação da simulação numérica nesta área.

O Capítulo 3 aborda o Método dos Elementos Finitos, a definição de malhas estruturadas e não estruturadas, malhas conformes e não conformes, o tipo de elementos finitos existentes e as estratégias mais utilizadas para proceder ao refinamento de malha. Apresenta, também, o software utilizado para a geração de malhas não conformes e o programa de elementos finitos utilizado para realizar as simulações numéricas dos casos de estudo.

O Capítulo 4 apresenta os casos de estudo analisados no âmbito deste trabalho, nomeadamente o ensaio de tração e os processos de conformação, incluindo as características do esboço e das ferramentas, bem como os restantes parâmetros dos modelos numéricos. Para cada caso de estudo, são analisados os resultados mais relevantes e a respetiva comparações entre discretizações conformes e não conformes.

O Capítulo 5 apresenta a síntese dos resultados obtidos e as conclusões finais.

2. PROCESSOS DE FABRICO

Num processo de fabrico, uma quantidade de um dado material é transformada num componente de geometria complexa e bem definida em diversos parâmetros, como forma, tamanho, precisão e tolerância, aparência e propriedades. No geral, o material pode não ter uma forma inicial, como um metal na forma líquida dentro de um molde, ou tem uma geometria simples, tal como uma chapa metálica. Cada um dos processos de fabrico apresenta vantagens, desvantagens e limitações em atingir alguns dos parâmetros descritos acima [5].

2.1. Processos de conformação plástica de chapas metálicas

A conformação plástica de chapas metálicas é um processo que consiste na sua manipulação, deformando-as, de forma a obter componentes com a geometria desejada, não planificável, com recurso a ferramentas com as características da geometria do componente a produzir. A classificação do processo de conformação depende das condições em que é realizado, como o tipo de esforço predominante, a temperatura de operação, a zona de deformação e o tipo de componente obtida [6]. O controlo deste tipo de processo envolve a definição de diversos parâmetros, tais como os equipamentos utilizados, a geometria e as dimensões das ferramentas utilizadas, a dimensão e as propriedades da chapa inicial, e as condições de lubrificação. Os parâmetros indicados têm influência nos estados de tensão e de deformação que surgem ao longo do processo que, por conseguinte, influenciam diretamente alguns dos parâmetros associados à qualidade do componente final [7]. Existem três ferramentas fundamentais no processo de conformação plástica de chapas metálicas: o punção, o cerra-chapas e a matriz, como apresentado de forma esquemática na Figura 2.1.

A conformação plástica de chapas metálicas contempla vários passos, com início na fixação da chapa metálica, cortada com uma geometria pré-definida, designada por esboço, entre o cerra-chapas e a matriz. O cerra-chapas tem como função controlar o escoamento do esboço, de forma a que se possa proceder à etapa seguinte do processo, i.e., induz o estiramento do esboço e previne a formação de rugas [8]. Posteriormente, faz-se

mover o punção para a cavidade da matriz, forçando a chapa metálica a escoar contra as paredes desta, tomando a sua forma. Esta fase é designada por fase de conformação e, assim que é concluída, promove-se a subida do punção, solta-se o cerra-chapas e retira-se o componente. Em certos casos, pode ser necessário proceder ao corte de algumas zonas, de modo a obter o componente final [7]. As condições de lubrificação são importantes, na medida em que o atrito que surge entre as superfícies em contacto durante o processo pode prejudicar a qualidade do componente conformada. O atrito está diretamente relacionado com as propriedades mecânicas e a rugosidade dos materiais que compõem as superfícies em contacto, bem como com a geometria das ferramentas utilizadas, o tipo de lubrificante e as pressões e velocidades de contacto que ocorrem durante o processo [9].

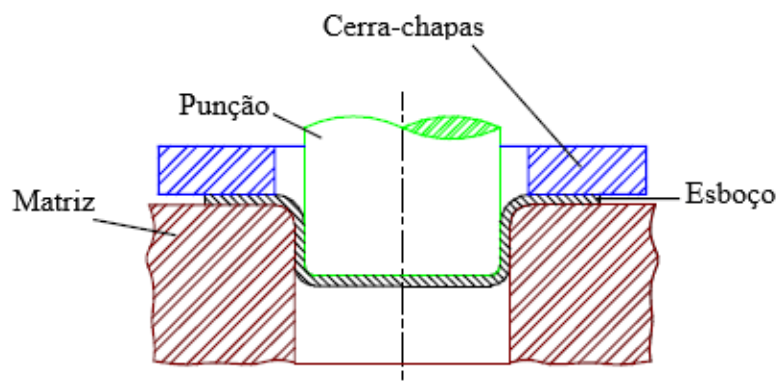


Figura 2.1. Representação esquemática de um processo de conformação plástica de uma taça quadrada [10].

2.1.1. Defeitos associados à conformação plástica

No âmbito dos processos de conformação plástica de chapas metálicas, o êxito do processo e a qualidade do componente final dependem dos diversos parâmetros associados ao processo. Assim, é necessário o conhecimento de diversos fatores de modo a prevenir a ocorrência de defeitos, o que reduz a quantidade de componentes defeituosos e minimiza os custos de produção.

A conceção dos processos de conformação plástica é, em geral, suportada por conhecimento empírico. Assim, uma das principais causas do aparecimento de defeitos é a ambição de produzir componentes de materiais cujo comportamento não é suficientemente conhecido, como por exemplo alguns aços de alta resistência ou novas ligas de alumínio, com o objetivo de produzir componentes mais leves. No entanto, mesmo na produção de

componentes com recurso a aços macios também podem surgir defeitos, apesar destes serem comumente utilizados há muito tempo e, por isso, existir um conhecimento mais vasto acerca das suas propriedades mecânicas. Os defeitos podem resultar de defeitos estruturais presentes no esboço, em falhas na conceção do projeto, desgaste e problemas na manutenção das ferramentas e dos equipamentos utilizados. Os tipos de defeitos mais recorrentes são o retorno elástico, o aparecimento de rugas, a formação de orelhas, o estiramento excessivo do material do esboço, ou até mesmo a rotura [7]. A inúmera quantidade de defeitos que podem ocorrer nos processos de conformação são categorizados em três tipos [10]:

- Defeitos de forma e/ou dimensionais;
- Defeitos na geometria ou superfície do componente final;
- Propriedades mecânicas do produto final insatisfatórias ou indesejadas.

O retorno elástico (RE) é o fenómeno de recuperação elástica das chapas metálicas após retiradas as solicitações efetuadas durante a conformação, e é um dos defeitos mais difíceis de controlar e também de prever, com recurso à simulação numérica. Assim, o RE tem sido alvo de estudos, quer através de simulações numéricas, quer de ensaios experimentais, que recaem sobre a influência de diversos parâmetros de processo, do material e numéricos. São exemplo de parâmetros de processo a velocidade do punção, a força do cerra-chapas, o coeficiente de atrito e a folga da matriz. Nos parâmetros de material inclui-se o módulo de elasticidade e o modelo elastoplástico. Finalmente, os parâmetros numéricos contemplam o tipo e o tamanho do elemento finito e a dimensão do incremento de tempo [11].

2.2. Simulação numérica de processos de conformação plástica

A simulação numérica aplicada à conformação plástica de chapas metálicas, apesar de vantajosa na otimização dos processos, apresenta uma elevada complexidade devido às várias não linearidades envolvidas, nomeadamente a não linearidade material, geométrica e das condições de fronteira, incluindo o contacto com atrito. Contudo, é possível obter, através da simulação numérica, uma série de informações acerca do processo, tais como:

- A possibilidade produzir o componente com a geometria pretendida;

- A quantidade de etapas necessárias à produção;
- A possibilidade de aparecimentos de defeitos durante o processo ou no componente final;
- A distribuição de tensões e de deformações no componente;
- A previsão da geometria final do componente.

No recurso à simulação numérica do processo é crucial realizar comparações entre resultados experimentais e numéricos de modo a verificar a precisão dos resultados numéricos. Para tal, são empregues *Benchmarks* que se baseiam na comparação de: (i) resultados experimentais efetuados em condições idênticas; (ii) de resultados experimentais e numéricos; e (iii) de resultados numéricos, de modo a aferir as estratégias numéricas que contribuem para a correta previsão dos resultados experimentais [12].

3. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método de cálculo numérico utilizado para obter a solução de um sistema contínuo, o mais aproximada possível, quando a suas resoluções com métodos exatos e analíticos se revela demasiado complexa, ou é até mesmo impossível. O MEF foi inicialmente adotado na resolução de problemas nos quais era importante determinar o estado de tensão e de deformação em elementos sujeitos a variados tipos de solicitações mecânicas, em regime linear elástico. A evolução e inovação das áreas tecnológicas permitiu um desenvolvimento e extensão do método que possibilitou a implementação do MEF no estudo de problemas mais complexos. Esta implementação tem um particular interesse em situações que apresentam um considerável número de variáveis e características não lineares, como é o caso dos processos de conformação plástica.

No caso da simulação de processos de conformação plástica de chapas metálicas, existem dois métodos de integração temporal comumente utilizados na aplicação do MEF: o implícito e o explícito. Estes métodos distinguem-se pela estratégia adotada na resolução do problema de equilíbrio. O método implícito é normalmente acoplado a uma formulação *quasi*-estática obriga à resolução de um sistema de equações não linear em cada incremento de tempo, com recurso a um método iterativo. O método explícito é normalmente acoplado a uma formulação dinâmica o que permite evitar a necessidade de resolver um sistema de equações não lineares, sendo a solução obtida com recurso a métodos de álgebra linear. O método explícito é condicionalmente estável, mas o seu acoplamento a uma formulação *quasi*-estática permite aumentar a dimensão do incremento de tempo. A Tabela 3.1 apresenta um resumo das principais características destes dois métodos. A escolha do método a adotar deve respeitar duas condições: a estabilidade numérica, e a convergência para um valor dentro do intervalo de tolerância admissível [13].

A discretização espacial dos corpos deformáveis apresenta desvantagens, nomeadamente em termos dos desvios entre a geometria do corpo e a obtida por aproximação (malha de elementos finitos). A Figura 3.1 apresenta um exemplo destes desvios em geometrias 2D, discretizadas com elementos finitos lineares. A discretização com elementos finitos induz erros na definição da rigidez do corpo e do contacto, bem como na definição dos eixos locais no ponto de contacto [12]. É possível verificar que, para um maior número

de elementos e, portanto, um menor tamanho do elemento finito, menor é o desvio. Assim, sabe-se que a discretização espacial adotada é um dos fatores que contribui para que a solução obtida pelo MEF seja apenas uma aproximação à solução do problema. No entanto, existem outras fontes de erro na resolução de problemas recorrendo ao MEF. Na Tabela 3.2 estão descritas as três categorias de erro e os possíveis parâmetros de origem [9]. A discretização espacial do corpo deformável é apenas um dos parâmetros que contribuem para os erros de modelação, sendo que na análise de processos de conformação também é essencial descrever corretamente a geometria das ferramentas. Os erros numéricos estão associados aos algoritmos selecionados para a formulação do problema, sendo que a qualidade da solução obtida é função das opções tomadas, como se mostra na Tabela 3.1. Os outros tipos de erros resultam muitas vezes numa incorreta interpretação do problema físico, e.g. simplificações abusivas das condições de fronteira.

Tabela 3.1. Métodos de aplicação do MEF [12].

	Implícita	Explícita estática	Explícita dinâmica
Equação de equilíbrio	<i>Quasi</i> -estático		Dinâmico
Estrutura	Matriz de rigidez		Matriz de massa diagonal
Estabilidade da solução	Problemas de convergência	Estável	Estável
Dimensão do incremento	Grande	Pequeno	Muito pequeno
Tempo de CPU por incremento	Longo	Médio	Curto
Nº total de incrementos	Centenas	Milhares	Dezenas de milhar
Precisão da distribuição das tensões	Elevada	Média	Baixa

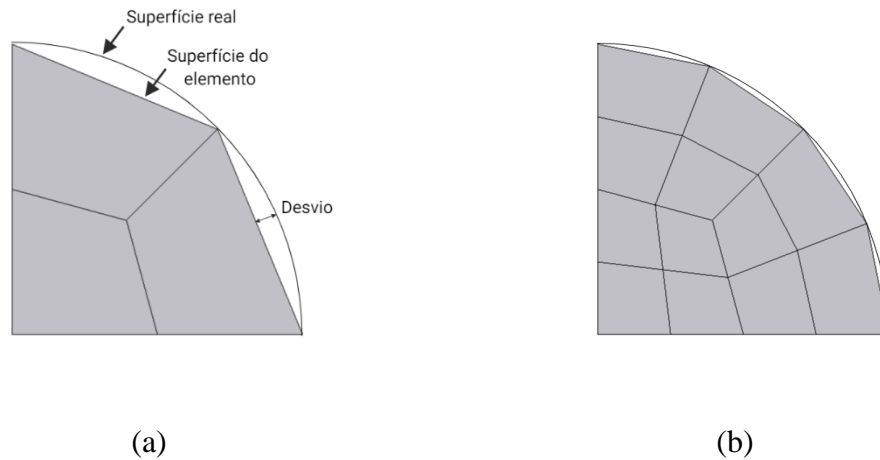


Figura 3.1. Representação de uma geometria curvilínea de um corpo com uma malha de elementos finitos com: (a) 2 elementos; (b) 4 elementos [12].

Tabela 3.2. Categorias de erro do MEF e parâmetros de origem [9].

Categoria do erro	Parâmetro de origem
Erros de modelação	Seleção do modelo; Características materiais; Dimensões do fenómeno físico; Discretização das ferramentas; Modelação do atrito.
Erros numéricos	Tipo de análise adotada; Tipo de elemento utilizado; Critério de convergência; Incremento de tempo/deslocamento; Parâmetro de penalidade.
Outro tipo de erros	Outros parâmetros que não se enquadrem nas categorias acima descritas.

3.1. Tipos de elemento

Uma malha de elementos finitos é composta por elementos e pontos nodais, também designados por nós. Existem três tipos de elementos que podem ser utilizados na simulação numérica pelo MEF: membrana, casca ou sólido, como se mostra na Figura 3.2. Os elementos do tipo membrana são os mais simples dos três e apresentam uma boa performance quando utilizados em problemas nos quais as deformações são sobretudo de extensão. Porém, não são apropriados para problemas que envolvam efeitos de flexão consideráveis. No caso de processos de conformação plástica, a utilização deste tipo de elementos não é benéfica uma vez que existe a dobragem do esboço sobre a curvatura da matriz e do punção e, portanto, deve recorrer-se a elementos do tipo casca ou sólido. Os elementos do tipo casca permitem obter bons resultados de distribuição das tensões e das

deformações e uma boa previsão do aparecimento de rugas. Contudo, este tipo de elemento apresenta uma deficiência na distinção entre a superfície superior e inferior do esboço, o que dificulta a resolução dos problemas de duplo contacto entre o esboço e as ferramentas [12]. Os elementos do tipo sólido, apesar de mais desvantajosos a nível de tempos de simulação do que os elementos casca, apresentam melhores resultados na simulação da interface esboço-ferramentas, permitindo distinguir as superfícies superior e inferior do esboço. Contrariamente aos elementos do tipo membrana e casca, o sólido integra as tensões segundo a direção da espessura causadas pelo aperto entre o cerra-chapas e a matriz, o que permite analisar situações nas quais ambas as superfícies do esboço contactam com ferramentas, em simultâneo. Em suma, o tipo e a dimensão do elemento selecionado para análise segundo o MEF define o tempo de simulação e a precisão da solução [14].

Os elementos finitos utilizados neste estudo são do tipo sólido, nomeadamente elementos hexaédricos lineares, os quais apresentam 8 nós (nos seus vértices), designados de elementos tri-lineares ou de primeira ordem devido à interpolação linear em cada direção. A aplicação deste tipo de elementos a problemas que envolvem grandes deformação plásticas resulta em problemas de rigidez excessiva, quando combinados com uma estratégia de integração completa, e de modos próprios de deformação, quando se adota a integração reduzida. De modo a minimizar este tipo de problemas, neste estudo opta-se por recorrer à integração reduzida seletiva.

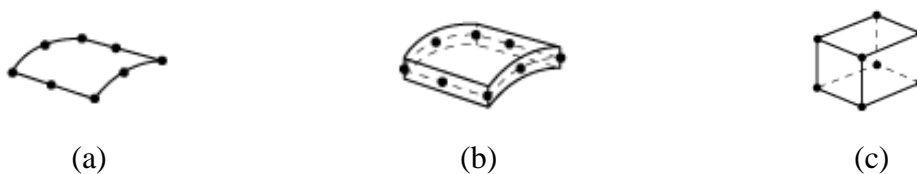


Figura 3.2. Representação esquemática dos tipos de elementos: (a) membrana; (b) casca; (c) sólido [15].

3.2. Malhas estruturadas e não estruturadas

Nas simulações numéricas existem dois tipos de malhas que podem ser utilizadas no estudo de corpos deformáveis, a estruturada e a não estruturada. A malha estruturada caracteriza-se por todos os elementos terem a mesma quantidade de elementos vizinhos e é

bastante utilizada em estudos de geometrias de domínio simples. As malhas não estruturadas não apresentam, necessariamente, o mesmo número de elementos vizinhos para cada elemento. Contrariamente às malhas estruturadas, as não estruturadas são mais utilizadas em geometrias complexas devido à sua flexibilidade em descrever contornos irregulares. Porém, apresentam a desvantagem de necessitar de mais meios computacionais, comparativamente com as malhas estruturadas, nomeadamente algoritmos de geração significativamente mais complexos [16]. O facto de o número de elementos vizinhos ser diferente também altera a estrutura da matriz de rigidez do problema. No entanto, a principal desvantagem prende-se com a possibilidade de serem gerados elementos com ângulos internos muito pequenos (ou grandes), que contribuem para reduzir a precisão da solução, ou mesmo para a introdução de uma anisotropia artificial nos resultados obtidos para as variáveis locais.

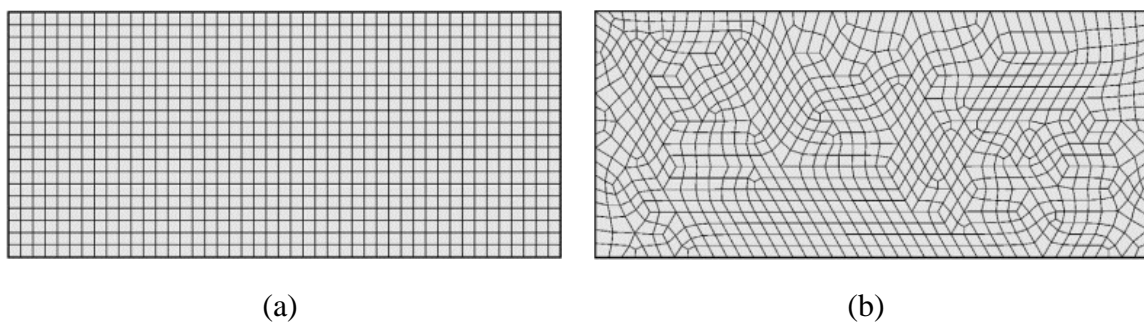


Figura 3.3. Representação esquemática de uma malha de elementos finitos: (a) estruturada; (b) não estruturada [17].

3.3. Malhas conformes e não conformes

É sabido que a precisão dos resultados é tanto maior quanto maior for o grau de refinamento da malha de elementos finitos. Porém, quanto maior o grau de refinamento, maior é a necessidade de meios computacionais e mais longo é o tempo de computação. Uma solução para evitar esta desvantagem é recorrer ao refinamento local das zonas críticas e permitir que as restantes zonas permaneçam grosseiras, de forma a diminuir o número total de elementos constituintes da malha. Contudo, esta solução apresenta a desvantagem da possibilidade do aparecimento de elementos distorcidos nos limiares de transição entre os graus de refinamento, como se observa na Figura 3.4 (a), o que afeta diretamente a qualidade dos resultados. Esta interferência nos resultados finais pode ser evitada com uma discretização dos subdomínios de modo independente, por aplicação de uma estratégia de acoplamento de malhas não conformes, conforme se mostra na Figura 3.4 (b) [3].

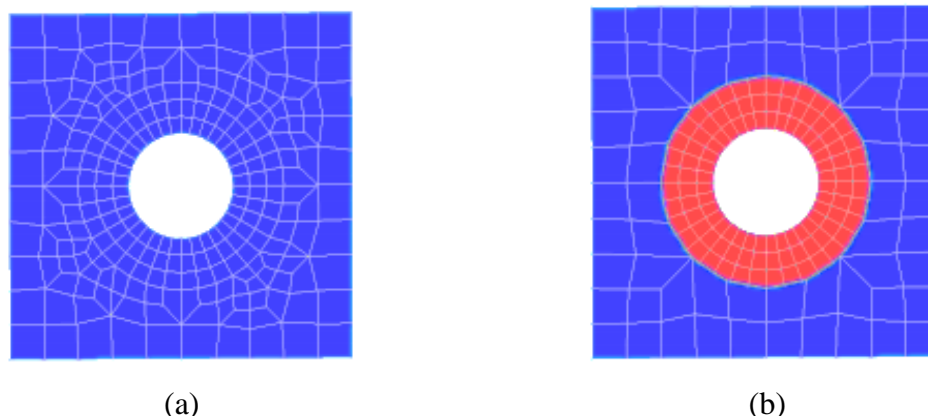


Figura 3.4. Representação esquemática de uma malha de elementos finitos: (a) conforme; (b) não conforme [3].

As malhas não-conformes apresentam elementos finitos cujos nós podem não pertencer a todos os elementos circundantes, como se mostra na Figura 3.4 (b). Assim, este tipo de malhas apresenta como característica a descontinuidade nos deslocamentos dada pelas funções de forma dos elementos finitos. Estes nós livres, requerem um tratamento específico de modo a garantir a continuidade do campo de deslocamentos. A imposição de continuidade nos pontos nodais permite garantir a continuidade entre elementos nas zonas limite do refinamento, garantindo a representação dos estados de tensão e a convergência.

3.4. Refinamento de malhas

O refinamento de uma malha é o efeito de dividir os elementos constituintes de uma discretização em mais elementos, em toda a geometria ou em zonas particulares, aumentando o número total de elementos. A solução para o refinamento adaptativo de malhas de elementos finitos pode ser uma de duas categorias [18]:

- Refinamento-h: utiliza sempre a mesmo tipo de elemento, porém sofrem alterações em tamanho nas zonas onde é objetivo refinar;
- Refinamento-p: utiliza sempre o mesmo tamanho de elemento e apenas aumenta, geralmente, de forma hierárquica, a ordem do polinómio utilizado na sua definição, nas zonas onde é objetivo refinar.

O refinamento do tipo h pode ser dividido em 3 subclasses, ilustradas na Figura 3.5:

- Subdivisão do elemento (Figura 3.5b)): caso os elementos existentes na malha apresentem erros elevados, são divididos em elementos mais pequenos, deixando as condições fronteira intactas;
- Re-refinamento ou geração de malha (Figura 3.5c)): o tamanho do elemento é atualizado para todos os domínios e é gerada uma malha completamente nova;
- Refinamento-r (Figura 3.5c)): mantém o número total de nós e elementos constantes e apenas ajusta as suas posições para otimizar a aproximação.

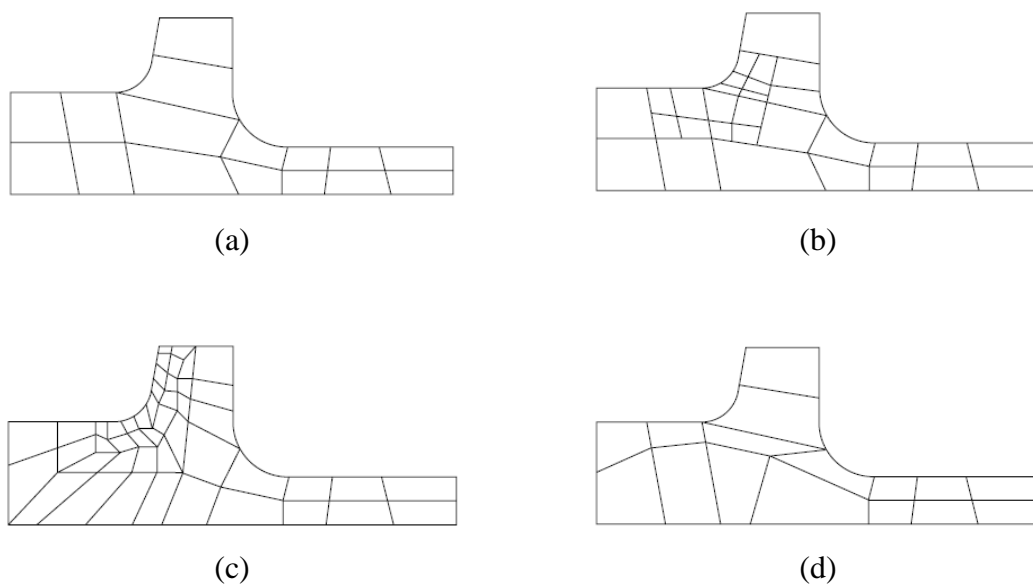


Figura 3.5. Representação das três classes de refinamento do tipo refinamento-h: (a) original; (b) após subdivisão do elemento; (c) após re-refinamento; (d) após refinamento-r [18].

O refinamento do tipo p é dividido em duas subclasses:

- A ordem do polinómio é aumentada de forma uniforme em todo o seu domínio;
- A ordem do polinómio é aumentada localmente, utilizando refinamento hierárquico.

O refinamento-p também pode resultar na geração de nós livres ao refinar apenas alguns elementos, como representado na Figura 3.6. Estes nós não pertencem a todos os elementos que lhes são adjacentes e a compatibilidade é assegurada impondo restrições aos deslocamentos desses nós [19].

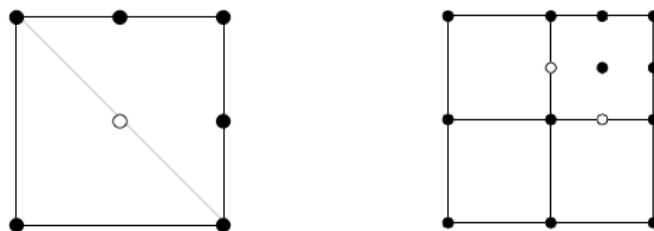


Figura 3.6. Representação do refinamento do tipo refinamento-p e os nós livres resultantes [19].

3.5. Algoritmo de refinamento local

O programa utilizado no âmbito deste trabalho para gerar as malhas não conformes contempla um algoritmo para realizar o refinamento do tipo refinamento-h. A malha original a partir da qual se define a malha não conforme deve ser uma malha conforme, composta exclusivamente por elementos finitos hexaédricos lineares. O algoritmo de refinamento-h adotado impõe um balanceamento nos nós da malha, de modo a garantir que a diferença entre níveis de refinamento nunca é superior a 1. Assim, no caso de elementos tri-lineares, os nós livres surgem sempre a meio das arestas e no centro das faces dos elementos, o que permite fazer transições mais suaves na variação do tamanho do elemento entre uma zona grosseira e uma zona refinada.

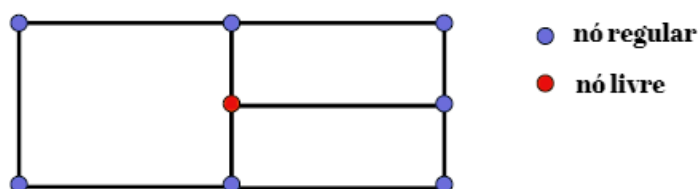


Figura 3.7. Malha não conforme de elementos finitos 2D com um nó livre [20].

O programa permite seleccionar as direcções de refinamento de forma independente, ou seja, um elemento finito pode dar origem a 8 elementos (3 direcções de refinamento); 4 elementos (2 direcções de refinamento) ou 2 elementos (1 direcção de refinamento). A Figura 3.8 mostra um exemplo de refinamento 3D, sendo feita a subdivisão sucessiva dos elementos em todas as direcções ou seja, um elemento gera um total de 8 elementos [21]. Assim, é necessário especificar a lista de elementos finitos a refinar, que pode ser obtida com o auxílio do GiD [4].

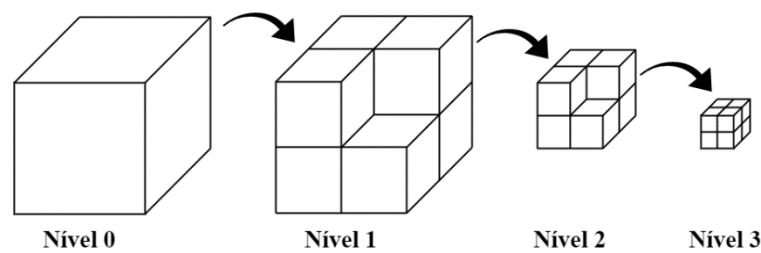


Figura 3.8. Representação dos diferentes níveis de refinamento gerados pelo algoritmo de refinamento local [22].

O refinamento local é conseguido através de um aumento sucessivo do nível de refinamento, como se exemplifica na Figura 3.8, para o canto superior direito. Dessa forma, o algoritmo de geração das malhas funciona de uma forma incremental, ou seja, o nível de refinamento dos elementos pode aumentar uma unidade em cada passo. Em cada passo de refinamento são produzidos três ficheiros de *output*:

- Um ficheiro com a informação da malha não conforme e o nível de refinamento associado a cada elemento finito, sendo esta última informação utilizada para guiar a seleção dos elementos, caso se pretenda incrementar o nível de refinamento;
- Um ficheiro que contém as informações de conectividade dos nós livres, i.e., a ligação entre cada nó livre e os nós do elemento adjacente. Esta informação é necessária como dado de entrada para a simulação numérica;
- Um ficheiro com a identificação das faces externas da malha de elementos finitos, que pode ser necessário para auxiliar na imposição de condições de fronteira aplicadas a uma superfície.

O processo de refinamento consiste no seguinte conjunto de passos:

1. Identificar as direções a refinar, que são idênticas para todos os elementos;
2. Identificar os elementos finitos a refinar;
3. Executar o programa, que começa por ler a malha conforme original, de modo a gerar o primeiro nível de refinamento-h local;

4. Sem fechar a janela de comandos, atualizar o ficheiro de *input* com a nova lista de elementos a refinar, utilizado a numeração da malha gerada no passo 3;
5. Repetir o passo 4 até atingir o nível de refinamento-h desejado em cada uma das zonas de refinamento.

Quando se utilizam malhas conformes de elementos finitos, a continuidade nas funções de forma entre elementos finitos é automaticamente assegurada através da conectividade da malha. No entanto, quando se recorrem a malhas não conformes de elementos finitos, estas contêm nós livres, sendo necessário recorrer a constrangimentos adicionais associados a esses mesmos nós para garantir a continuidade do campo de deslocamentos.

Por norma, o tratamento dos nós livres é efetuado com recurso a um processo constituído por dois passos:

1. Os nós livres são tratados como nós regulares e são utilizados os algoritmos usuais para construir a matriz de rigidez global;
2. São introduzidos constrangimentos para cada grau de liberdade associado a cada um dos nós livres.

No algoritmo adotado no âmbito deste trabalho, a introdução dos constrangimentos é assegurada recorrendo ao método dos multiplicadores de Lagrange. Este método permite garantir que a posição do nó livre permanece sempre sobre a aresta ou face dos elementos adjacentes. Para uma malha 2D com a condição de balanceamento 2:1 (ver Figura 3.7), cada um dos graus de liberdade de deslocamento é definido através da média dos graus de liberdade dos nós nos vértices vizinhos [20]. Esta abordagem tem as seguintes propriedades [23]:

- Os nós livres não possuem graus de liberdade independentes;
- O suporte de um determinado nó regular é dado pela união dos elementos que o partilham;
- Os elementos que possuem nós livres são tratados como elementos *standard*.

Estas propriedades são mantidas para as malhas 3D, com elementos finitos tri-lineares. A performance deste algoritmo foi testada na simulação numérica do processo de

fabrico aditivo de fusão seletiva por laser. Os resultados mostram que as malhas não conformes apresentam uma precisão de resultados bastante satisfatória na análise da deformação plástica equivalente e na distribuição de tensões, comparativamente com os valores obtidos em malhas conformes [20]. No entanto, este processo de fabrico não envolve grandes deformações, pelo que é premente avaliar a performance nessas condições.

3.6. DD3IMP

O programa de elementos finitos DD3IMP é utilizado em ambiente académico para fazer a simulação numérica de processos de conformação plásticas de chapas metálicas. Uma vez que é dedicado à estampagem de chapas metálicas, é necessário que o modelo mecânico contemple o comportamento elastoplástico do material, nomeadamente as grandes deformações e rotações a que as chapas metálicas estão sujeitas. O comportamento elástico é assumido isotrópico enquanto o comportamento plástico pode ser anisotrópico, recorrendo a diversos critérios de plasticidade e leis de encruamento. O programa DD3IMP considera que o processo de deformação é *quasi*-estático, i.e., são desprezados os efeitos das forças de inércia, combinado com um algoritmo de integração temporal implícito (ver Tabela 3.1). Apesar de ter sido um tópico de grande discussão, atualmente é relativamente consensual que a velocidade dos processos de conformação plástica permite a adoção desta simplificação desprezando, desta forma, os efeitos das forças de inércia.

A nível do tipo de elementos utilizados, o DD3IMP apenas permite discretizar a chapa com elementos finitos sólidos, sendo necessário recorrer a pelo menos duas camadas de elementos em espessura para permitindo uma correta descrição dos gradientes de tensão nesta direção. As superfícies das ferramentas são modeladas com superfícies paramétricas *Nagata* e são assumidas como rígidas. O retorno elástico é obtido através da estratégia de remoção das ferramentas *One Step Springback* (OSS), que consiste na remoção das ferramentas em apenas um, e último, incremento. De facto, o DD3IMP permite também simular o retorno elástico por inversão do deslocamento das ferramentas, estratégia que apresenta mais semelhanças com a realidade de um processo de conformação plástica. No entanto, é menos vantajosa em termos de recursos computacionais [9], uma vez que o número de incrementos de tempo é consideravelmente maior.

4. CASOS DE ESTUDO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Esta secção apresenta quatro casos de estudo com o objetivo de avaliar as vantagens e limitações de utilizar uma malha não conforme na simulação numérica de processos de conformação plástica de chapas metálicas. O primeiro caso é o ensaio de tração uniaxial, para o qual são consideradas duas geometrias de provete. O segundo caso é a conformação de uma geometria U-rail, que é analisado em condições de deformação plana e como uma geometria 3D. De seguida são analisadas duas geometrias mais complexas: uma taça quadrada e um componente automóvel.

Geralmente, a conformação de chapas metálicas é efetuada considerando a força do cerra-chapas constante (folga variável). No entanto, neste trabalho é considerada folga constante entre o cerra-chapas e a matriz, ou seja, a força do cerra-chapas pode variar sem controlo, durante o processo de conformação. Na modelação dos casos de estudo selecionados são utilizadas malhas conformes e não conformes para posterior comparação de resultados. As malhas não conformes são criadas com refinamento nas zonas críticas e de maior interesse, nomeadamente as zonas sujeitas a dobragem e com deformações plásticas mais elevadas. No entanto, trata-se de um refinamento estático, não adaptativo, ou seja, a zona de refinamento não se altera face à zona identificada como crítica durante todo o processo de conformação com a malha conforme, utilizada como referência.

4.1. Ensaio de tração uniaxial

No caso do ensaio de tração uniaxial as dimensões dos provetes e as condições do processo seguem as normas ASTM. São utilizadas duas geometrias de provete distintas: um provete cilíndrico e um provete paralelepípedo (proveniente de uma chapa metálica). É imposto um deslocamento de 13,6 mm para os provetes cilíndricos, e de 12 mm para os provetes paralelepípedos [24]. Para ambos os casos, o material é o aço SAE 1045, cujas propriedades mecânicas estão presentes na Tabela 4.1 [25]. No modelo de elementos finitos é assumido que o comportamento elástico é isotrópico e segue a lei de Hooke, pelo que apenas é necessário definir o módulo de elasticidade E e o coeficiente de Poisson ν . Relativamente ao comportamento plástico, este é assumido isotrópico e definido pelo critério

de plasticidade de von Mises e o encruamento isotrópico é descrito pela lei de Swift, descrita por:

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n \quad (4.1)$$

onde σ corresponde à tensão de escoamento, ε_p corresponde à deformação plástica. K , n e ε_0 são parâmetros do material. Nestas condições, a tensão limite de elasticidade inicial é $\sigma_0 = K(\varepsilon_0)^n$. A Tabela 4.1 apresenta o resumo dos parâmetros utilizados para o aço SAE 1045.

Tabela 4.1. Propriedades mecânicas do aço SAE 1045.

E [GPa]	222	K [MPa]	1047,7
ν	0,3	n	0,1206
σ_0 [MPa]	450		

É considerada apenas 1/8 da geometria do provete devido a condições de simetria de geometria, de fronteira, de carregamento e de comportamento do material. A discretização dos provetes foi realizada de modo a obter elementos com uma geometria aproximadamente cúbica. Para o provete paralelepípedo foram criadas duas malhas conformes, uma grosseira (GP) e uma refinada (RP), ambas ilustradas na Figura 4.1. Um procedimento idêntico foi realizado para o provete cilíndrico, i.e., uma malha grosseira (GC) e uma refinada (RC), ambas ilustradas na Figura 4.2. A malha não conforme é composta por elementos finitos de diferentes tamanhos, sendo que o maior tamanho de elementos é idêntico ao da malha grosseira e o menor tamanho de elemento é idêntico ao existente na malha refinada. Para ambas as geometrias de provete, o refinamento da malha é feito na zona central do provete porque é nessa zona que vai existir localização da deformação. Importa mencionar que o comprimento desta zona foi determinado com base na análise prévia dos resultados obtidos com as malhas conformes. As principais características das malhas estão especificadas na Tabela 4.2 e na Tabela 4.3 para os provetes paralelepípedos e para os provetes cilíndricos, respetivamente.

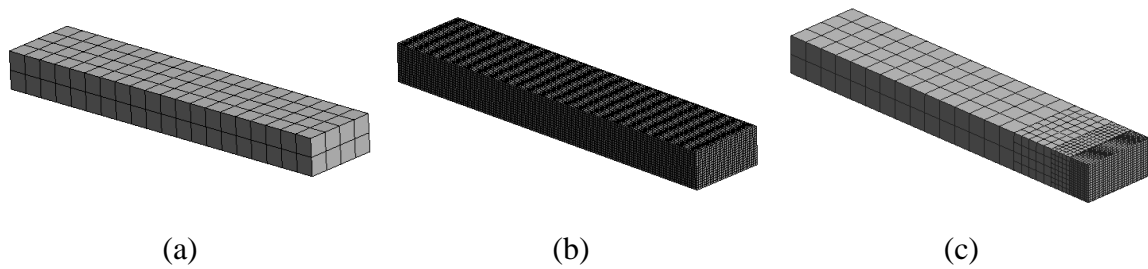


Figura 4.1. Ensaio de tração usando um provete paralelepípedo: (a) malha GP; (b) malha RP; (c) malha NCP.

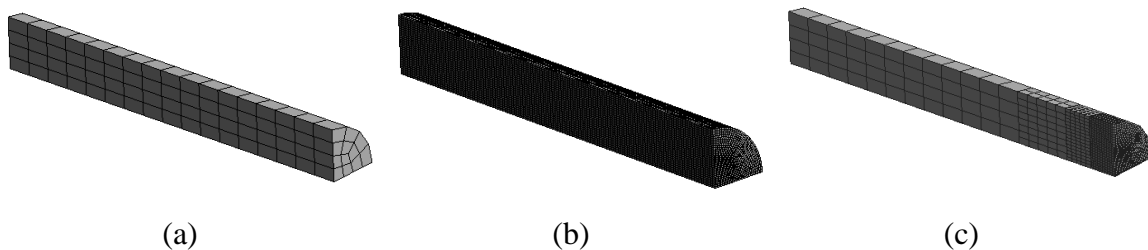


Figura 4.2. Ensaio de tração usando um provete cilíndrico: (a) malha GC; (b) malha RC; (c) malha NCC.

Tabela 4.2. Características das malhas utilizadas na simulação numérica de um ensaio de tração para o provete paralelepípedo.

Nome da malha	Número de elementos em x	Número de elementos em y	Número de elementos em z	Total de elementos
GP	20	2	4	160
RP	160	16	32	81920
NCP	-	-	-	6040

Tabela 4.3. Características das malhas utilizadas na simulação numérica de um ensaio de tração para o provete cilíndrico.

Nome da malha	Número de elementos em x	Número de elementos na direção radial	Número de elementos na direção circunferencial	Total de elementos
GC	17	4	4	204
RC	400	16	32	104448
NCC	-	-	-	9024

A Figura 4.3 apresenta a evolução da força de tração em função do deslocamento da amarra, comparando as previsões obtidas por cada uma das malhas, para ambas as geometrias de provete. Independentemente da geometria do provete, existe um aumento da

força de tração até ao ponto de carga máxima (aproximadamente 7 mm e 8 mm de deslocamento da amarra no provete paralelepipedico e cilindrico, respetivamente), seguido de um decréscimo fortemente acentuado. Esta inversão na evolução da força resulta da localização da deformação no centro do provete. A discretização usada nas malhas não conformes assegura que, nas zonas sujeitas a maiores deformações plásticas, existem elementos de menor dimensão (ver Figura 4.1 e Figura 4.2).

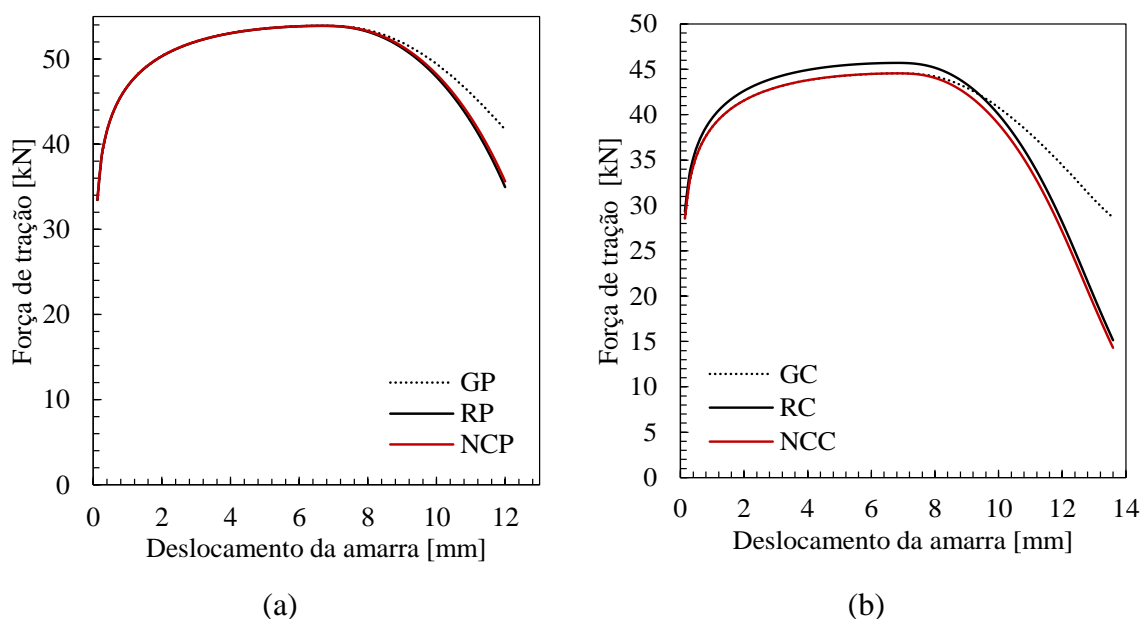


Figura 4.3. Evolução da força de tração em função do deslocamento da amarra no ensaio de tração: (a) provete paralelepipedico (b) provete cilindrico.

No caso do provete paralelepipedico, a força prevista por cada uma das malhas é idêntica até ao ponto de força máxima, como se observa Figura 4.3(a). No entanto, após o instante de carga máxima, a queda da força é menos acentuada na malha GP, uma vez que a dimensão dos elementos finitos não permite uma correta descrição geométrica da zona onde ocorre a estrição. Por outro lado, a evolução da força prevista com a malha NCP é idêntica à evolução prevista com a malha RP, uma vez que a dimensão dos elementos finitos adotada nessa zona é idêntica.

Relativamente ao provete cilindrico, durante a fase de deformação uniforme, a força prevista com a malha grosseira é inferior à força prevista com a malha refinada (ver Figura 4.3 (b)). Esta diferença na força resulta da descrição geométrica da secção transversal do provete quando se utiliza uma malha grosseira, como se mostra na Figura 4.2. Como a malha não conforme é construída a partir da malha grosseira, não é possível alterar a

descrição da secção transversal do provete, pelo que a força prevista até ao instante de carga máxima é idêntica para estas duas malhas. No entanto, a queda da força prevista numericamente com a malha não conforme é mais próxima da obtida com a malha refinada, como se mostra na Figura 4.3 (b), uma vez que a dimensão dos elementos finitos na direção de carga é semelhante. Para um deslocamento inferior a 10 mm, a diferença na força é de aproximadamente 1,9%, a qual corresponde ao erro cometido com a discretização grosseira da secção transversal do provete, ou seja, a definir o perímetro da circunferência com apenas 16 elementos finitos lineares.

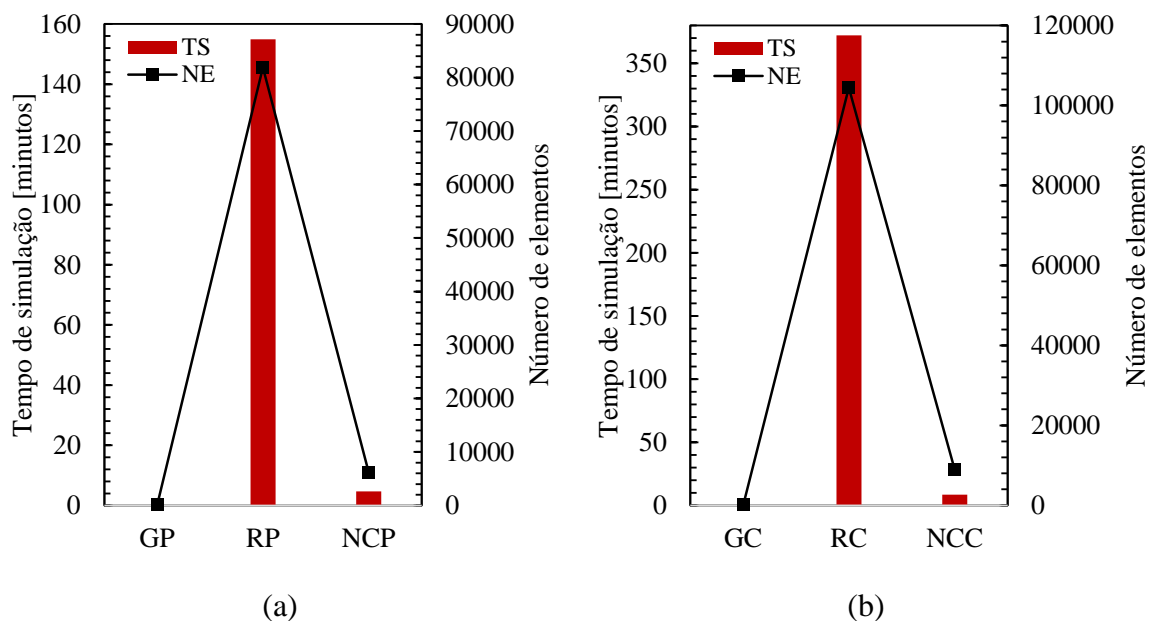


Figura 4.4. Comparação entre tempo de simulação e número de elementos finitos na simulação do ensaio de tração: (a) provete paralelepédico; (b) provete cilíndrico.

A Figura 4.4 apresenta a comparação entre o tempo de simulação e o número total de elementos finitos de cada malha. Globalmente, o tempo de simulação aumenta com o aumento do número de elementos finitos da malha. Assim, para o caso do provete paralelepédico existe uma grande diferença do tempo de simulação entre as malhas conformes, onde a malha GP não atinge 1 minuto de duração e a RP está muito próxima dos 160 minutos. A malha NCP apresenta uma redução do tempo de simulação de aproximadamente 97% em comparação com o tempo da malha RP. O mesmo padrão de resultados é observado na Figura 4.4 (b) para o provete cilíndrico, onde se verificam as mesmas diferenças entre as malhas conformes. A malha NCC apresenta uma redução de 97% em comparação com o tempo da malha RC. Neste contexto, importa mencionar que o

número de incrementos utilizado para impor o deslocamento total da amarra é de aproximadamente 100 em todas as simulações. A quantidade média de iterações feitas para atingir a convergência de resultados é de 5 em todas as malhas. De facto, este processo não envolve problemas de contacto, o que simplifica o processo de cálculo e contribui para o reduzido número reduzido de iterações por incremento.

A utilização de malhas não conformes em simulações numéricas permite obter soluções satisfatórias, com menos elementos finitos e consequentemente reduzir os tempos de computação, mesmo para problemas que envolvem grandes deformações plásticas. A redução do número total de elementos é conseguida através de uma distribuição eficiente dos elementos, i.e., utilizar elementos de maior tamanho nas regiões onde a deformação plástica é muito reduzida ou inexistente, e elementos de tamanho reduzido apenas nas zonas críticas, i.e., que apresentam valores de deformação plástica elevados e alterações de geometria. Em resumo, as malhas não conformes permitem refinar zonas de interesse, obtendo um número total de elementos inferior ao das malhas refinadas, bem como uma forte redução no tempo de computação, enquanto mantêm elevados níveis de precisão.

4.2. Processo de conformação do U-rail

Esta secção apresenta a conformação de uma geometria U-rail, tipicamente utilizada para avaliar o retorno elástico após a operação de conformação. A Figura 4.5 apresenta a geometria das ferramentas e do esboço utilizados na simulação de conformação do tipo U-rail, bem como as respetivas dimensões. O esboço tem 350 mm de comprimento e 35 mm de largura, com uma espessura de 0,78 mm [26]. O esboço é proveniente de uma chapa metálica de um aço macio, cujas propriedades mecânicas são apresentadas na Tabela 4.4 [27]. O comportamento elástico é considerado isotrópico e descrito pela lei de Hooke. O comportamento plástico é definido pelo critério de plasticidade de von Mises e pela lei de Swift para o encruamento. Os parâmetros da lei de Swift estão indicados na Tabela 4.4 para este aço macio. Devido às condições de simetria, o modelo considera apenas $\frac{1}{4}$ da geometria do esboço. A folga entre o cerra-chapas e a matriz é de 0,78 mm, sendo o deslocamento imposto ao punção de 70 mm. O atrito entre a chapa e as ferramentas é modelado pela lei de Coulomb, com um coeficiente de atrito constante de $\mu=0,144$.

a utilizar na direção Ox, estudos anteriores mostram que o tamanho do elemento finito na direção do comprimento necessário para uma boa previsão da força do punção deve obedecer à condição

$$FE = \frac{\pi}{180} \times 10^\circ \times r_{matriz} \quad (4.2)$$

em que FE é o tamanho do elemento finito na direção Ox e r_{matriz} é o menor raio de curvatura onde ocorre escoamento do material. Neste caso, o raio da matriz é de 5 mm (ver Figura 4.5), pelo que $FE = 0,873$ mm, o que corresponde a aproximadamente 200 elementos na direção Ox. Os mesmos estudos mostram que para garantir uma boa previsão do retorno elástico, é necessário reduzir ainda mais a dimensão do elemento finito no plano, de modo a obedecer à condição

$$FE = \frac{\pi}{180} \times 5^\circ \times r_{matriz} \quad (4.3)$$

Nestas circunstâncias, $FE = 0,436$ mm, o que corresponde a aproximadamente 400 elementos na direção Ox. No entanto, outro estudo [28] mostra que, quando se utilizam elementos finitos hexaédricos, também é necessário controlar a razão do tamanho do elemento, definida como o quociente entre a dimensão do elemento na direção do comprimento e na direção da espessura, de modo a garantir a precisão na previsão do retorno elástico. De acordo com este estudo, deve ser garantida uma razão do tamanho de elemento $FE_R = 1,0$. A razão entre os elementos é um parâmetro com mais importância na qualidade dos resultados, comparativamente com a número de pontos de integração (NIP) [28]. Assim, o número de elementos a utilizar na direção Ox de cada malha foi calculada segundo estes três critérios:

- Boa previsão da força;
- Boa previsão do retorno elástico;
- Razão de dimensões do elemento finito;

tendo em conta a espessura da chapa e um número par de camadas na direção da espessura, de modo a possibilitar a construção de malhas não conformes. São utilizadas três malhas conformes e uma malha não conforme, como se mostra na Figura 4.6. A malha não conforme contém elementos com os três tamanhos de elemento constituintes das malhas conformes. A zona com maior nível de refinamento na malha não conforme corresponde a toda a zona entre o contacto com o punção e o raio de curvatura da matriz, por ser a região que apresenta

maior deformação plástica. Deste modo, a malha não conforme possui 11 elementos iguais aos da malha C200 na zona em contacto com a base do punção e 2 elementos iguais aos da malha C400 nos raios de curvatura do punção e da matriz. Na zona sujeita a maior deformação plástica, ao longo da parede vertical, tem 1619 elementos iguais aos da malha C800, e a restante zona que não sofre deformação é constituída por 86 elementos iguais à malha C200. As características principais das malhas utilizadas encontram-se na Tabela 4.5.

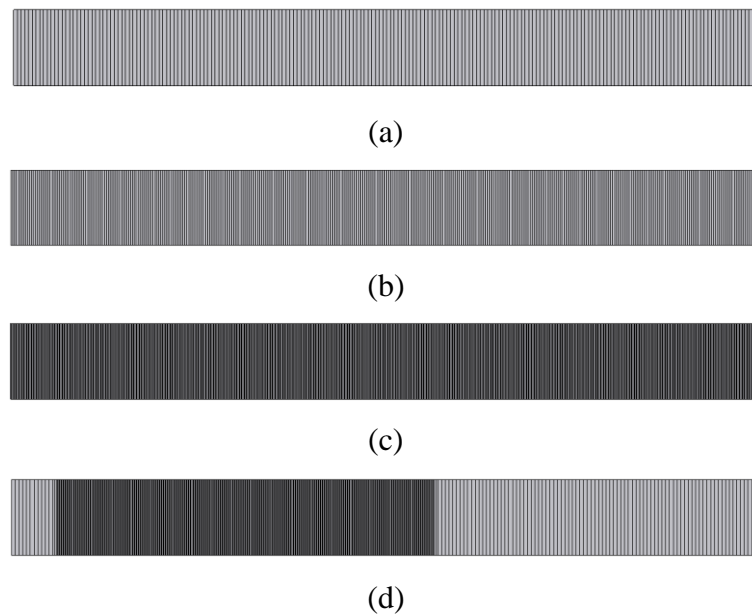


Figura 4.6. Malhas utilizadas no processo de conformação U-rail em 2D: (a) malha C200; (b) malha C400; (c) malha C800; (d) malha NC.

Tabela 4.5. Características das malhas utilizadas na simulação numérica (2D) da conformação do U-rail.

Nome da malha	Número de elementos em x	Número de elementos em y	Número de elementos em z	Razão	Total de elementos
C200	200	1	1	$\approx 1,12$	200
C400	400	1	2	$\approx 1,12$	800
C800	800	1	4	$\approx 1,12$	3200
NC	-	1	1 a 4	-	1721

A Figura 4.7 (a) apresenta a evolução da força do punção em função do seu deslocamento, comparando as várias malhas utilizadas. Observam-se oscilações na força do punção, sendo a amplitude das oscilações maior nas malhas com menor número de

elementos na direção Ox. As oscilações resultam da discretização do esboço ao longo do comprimento da chapa, o que indicia que estão associadas ao problema de contacto com as ferramentas. A malha C200 apresenta as maiores oscilações enquanto a malha C800 apresenta as menores oscilações. A evolução da força prevista pela malha NC é muito próxima da evolução obtida com a malha conforme mais refinada (C800).

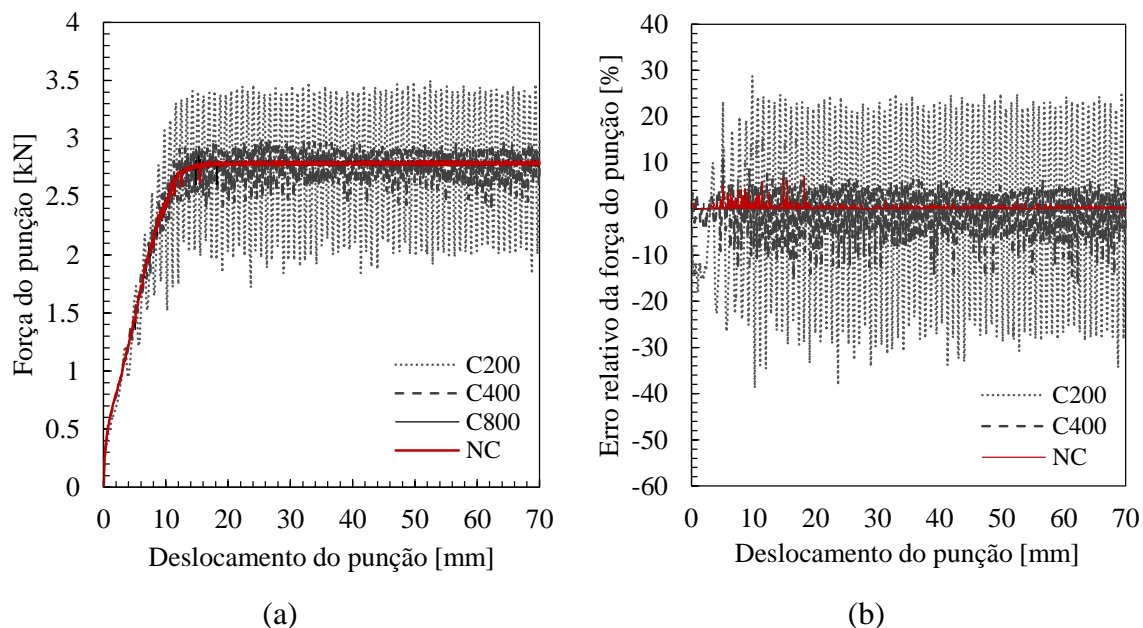


Figura 4.7. Conformação de uma geometria U-rail em 2D: (a) evolução da força do punção em função do seu deslocamento; (b) evolução do erro relativo da força do punção em função do seu deslocamento.

De forma a quantificar as diferenças entre malhas, foi avaliado o erro relativo para diferentes variáveis, com base na seguinte expressão:

$$\text{Erro relativo [\%]} = \frac{\text{malha de referência} - \text{malha}}{\text{malha de referência}} \times 100. \quad (4.4)$$

onde a malha de referência é a malha conforme mais refinada. Esta expressão foi aplicada para avaliar a evolução do erro da força do punção, que é apresentada na Figura 4.7 (b). O erro atinge valores máximos de 28,8%, 11,2% e 7,1% para as malhas C200, C400 e NC, respetivamente

A Figura 4.8 (a) apresenta a evolução da força do cerra-chapas em função do deslocamento do punção. As oscilações na força devem-se à variação associada à rotação de cada elemento, para descrever o raio de curvatura da matriz. As oscilações são tanto maiores quanto maior for o tamanho do elemento na direção Ox, daí serem superiores na malha C200 e menores na malha NC devido ao modelo de discretização da malha, mais refinada nas

zonas críticas (onde sofre dobragem). A evolução do erro da força do cerra-chapas, é apresentado na Figura 4.8 (b), o qual atinge valores máximos de 81,0%, 34,3% e 27,4%, para as malhas C200, C400 e NC, respetivamente.

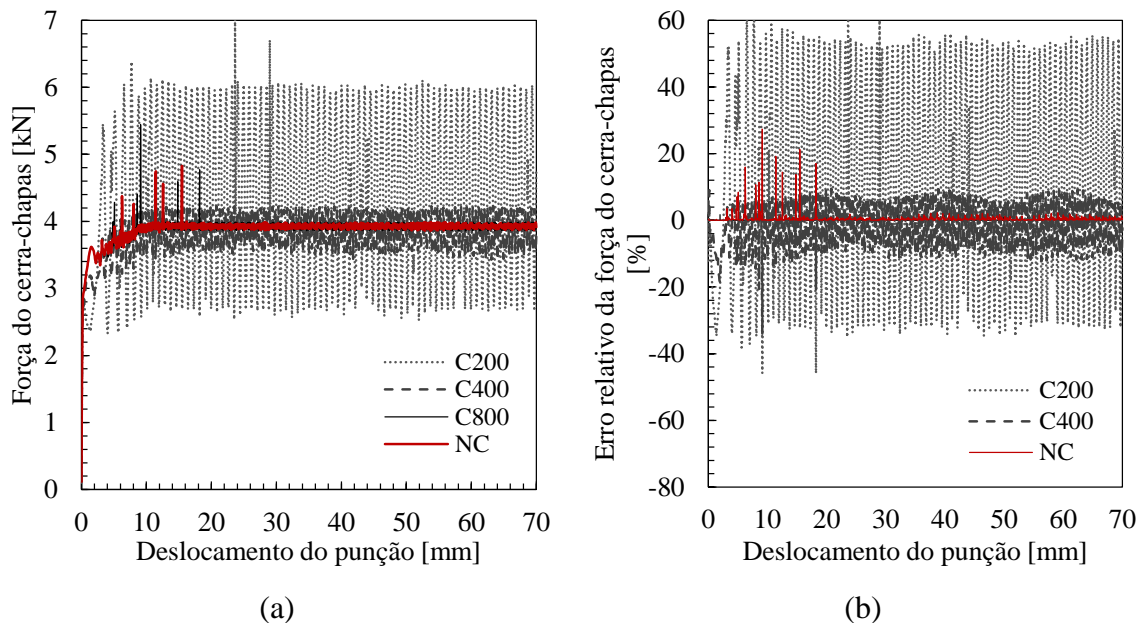


Figura 4.8. Conformação de uma geometria U-rail em 2D: (a) evolução da força do cerra-chapas em função do deslocamento do punção; (b) evolução do erro relativo da força do cerra-chapas em função do deslocamento do punção.

A Figura 4.9 (a) apresenta a espessura final da chapa em função da distância entre dois pontos consecutivos ao longo do comprimento do componente. A espessura final é aproximadamente uniforme na zona correspondente à parede vertical do U-rail, o que está de acordo com as condições de regime estacionário também observadas na força. A malha NC possui uma distribuição da espessura semelhante à malha de referência, C800. A evolução do erro da espessura final em função da distância entre dois pontos consecutivos é apresentada na Figura 4.9 (b). O erro é negativo (a espessura é sobrestimada) na malha conforme C200 e positivo (a espessura é subestimada) na malha conforme C400. Na zona da parede vertical do U-rail os valores do erro relativo são 0,98%, 1,14% e 0,02%, para as malhas C200, C400 e NC, respetivamente.

A Figura 4.10 (a) apresenta o componente do tensor das tensões na direção O_x ao longo do comprimento do perfil, avaliadas para o plano $z=0$ (superfície da chapa em contacto com a matriz) imediatamente antes do retorno elástico. A tensão mínima de tração ocorre na zona correspondente ao fundo (zona de contacto com o punção). A tensão permanece constante na zona da parede vertical, observando-se uma forte transição na região

do raio de curvatura da matriz atingindo valores máximos de compressão, sofrendo uma nova forte transição para tensões quase nulas na zona da flange. Globalmente, as discretizações C200 e C400 subestimam o valor de tensão, em particular na zona da parede vertical. A Figura 4.10 (b) mostra a distribuição em espessura do componente do tensor das tensões na direção O_x , para um ponto localizado a meio da parede vertical, imediatamente antes do retorno elástico. Para a malha C200, com apenas um elemento na espessura, a variação da tensão é linear, sendo de tração na superfície exterior ($z=0$) e de compressão na superfície interior ($z=0,78$). A malha C400, com dois elementos na espessura e três nós, apresenta também um gradiente de tensões com uma variação aproximadamente linear, mas os valores máximos e mínimos aproximam-se dos obtidos com a malha de referência. As malhas que oferecem gradientes de tensão mais significativos são a C800, com quatro elementos na espessura, e a NC, que também contém quatro elementos na direção da espessura nesta zona. A diferença entre elas é impercetível.

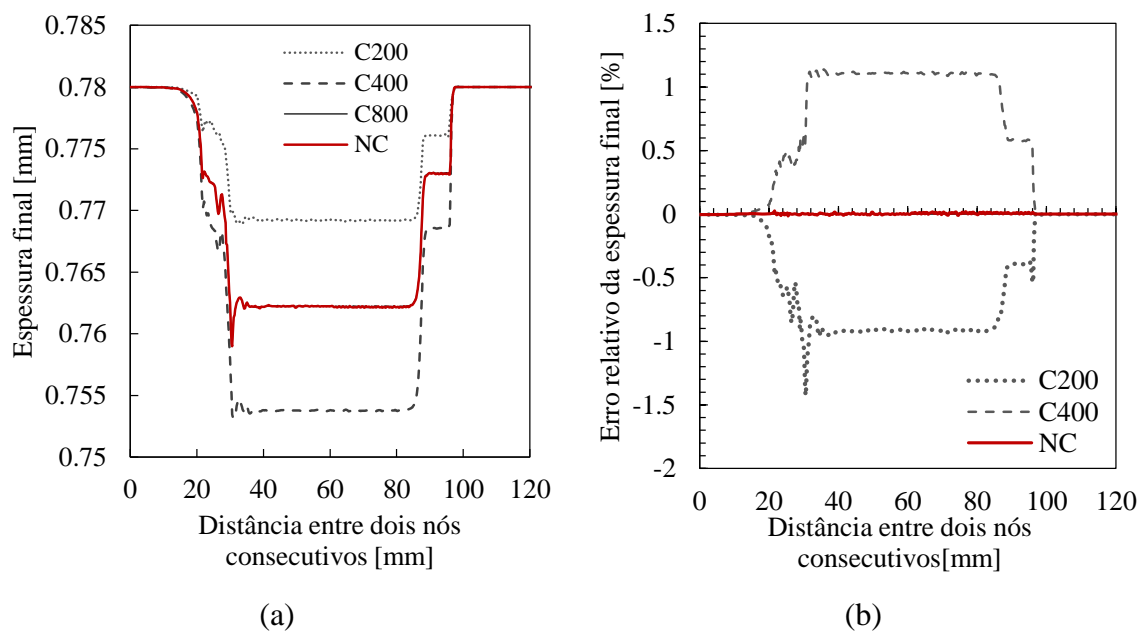


Figura 4.9. Conformação de uma geometria U-rail em 2D: (a) espessura final em função da distância entre dois nós consecutivos; (b) evolução do erro relativo da espessura final em função da distância entre dois nós consecutivos.

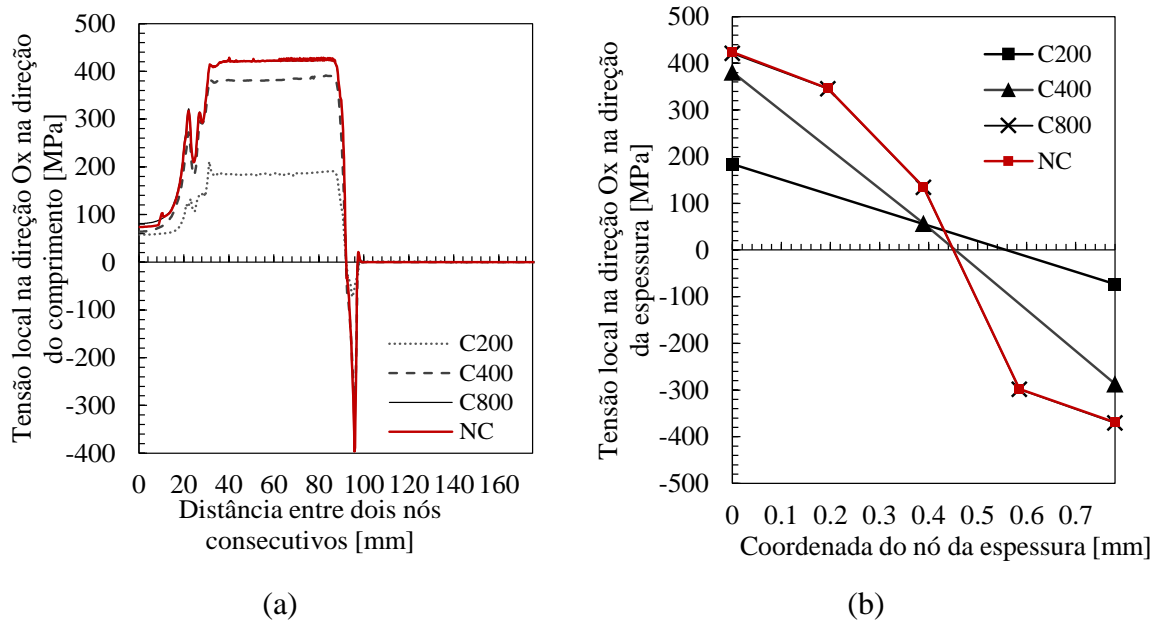


Figura 4.10. Análise do estado de tensão antes do retorno elástico da geometria U-rail em 2D: (a) distribuição das tensões na direção Ox em função da distância entre dois nós consecutivos; (b) perfil de tensão local na direção Ox na parede vertical ao longo da espessura.

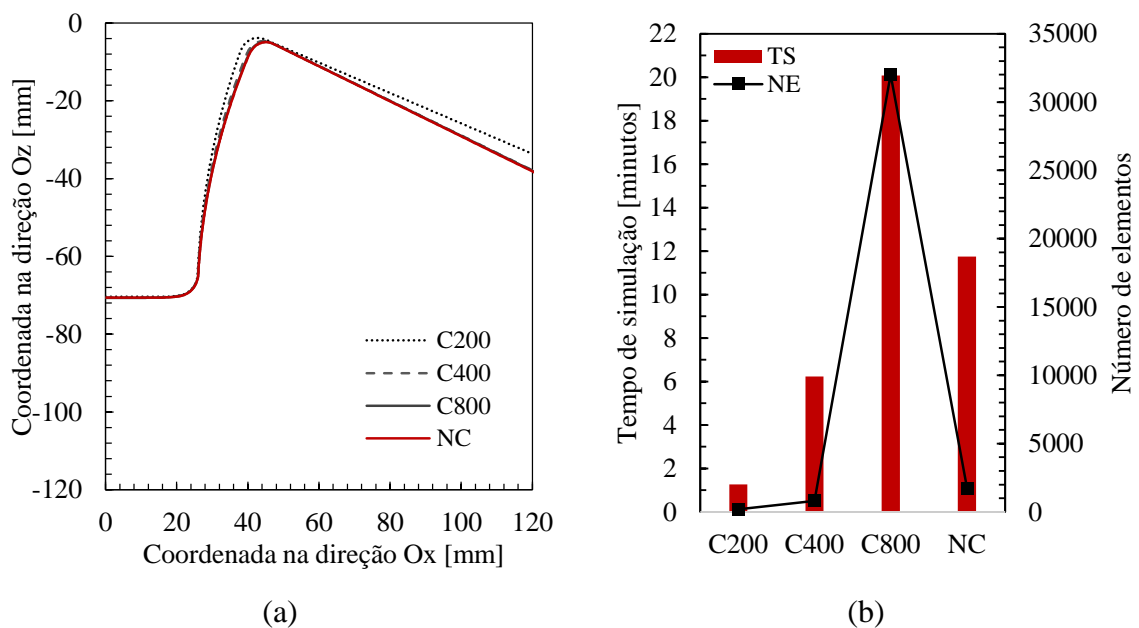


Figura 4.11. Conformação de uma geometria U-rail em 2D: (a) perfil após o retorno elástico; (b) comparação entre o tempo de simulação (TS) e o número de elementos (NE).

O perfil de tensões representado na Figura 4.10 (b) dita o perfil da chapa após o retorno elástico, representado na Figura 4.11 (a). De facto, observa-se que o refinamento na direção da espessura favorece um maior gradiente de tensões na direção da espessura, provocando maior retorno elástico. O perfil após o retorno elástico é marcado pela diferença

do perfil da malha C200 relativamente às restantes. De facto, verifica-se uma coincidência de perfis das malhas C400, C800 e NC. Portanto, neste exemplo, a utilização de duas camadas de elementos é suficiente para uma adequada previsão do retorno elástico. No entanto, importa realçar o cuidado na utilização de razões do tamanho de elemento próximas de 1,0. A Figura 4.11 (b) relaciona o tempo de simulação (TS) com o número de elementos (NE). A malha C400 apresenta uma diferença significativa no tempo de simulação relativamente à malha C200, um aumento de 80%. A malha C800 é a que apresenta maior número de elementos e um maior tempo de simulação. A malha NC tem um tempo de simulação ligeiramente superior à C400 (47%), mas também apresenta um número total de elementos superior (53%).

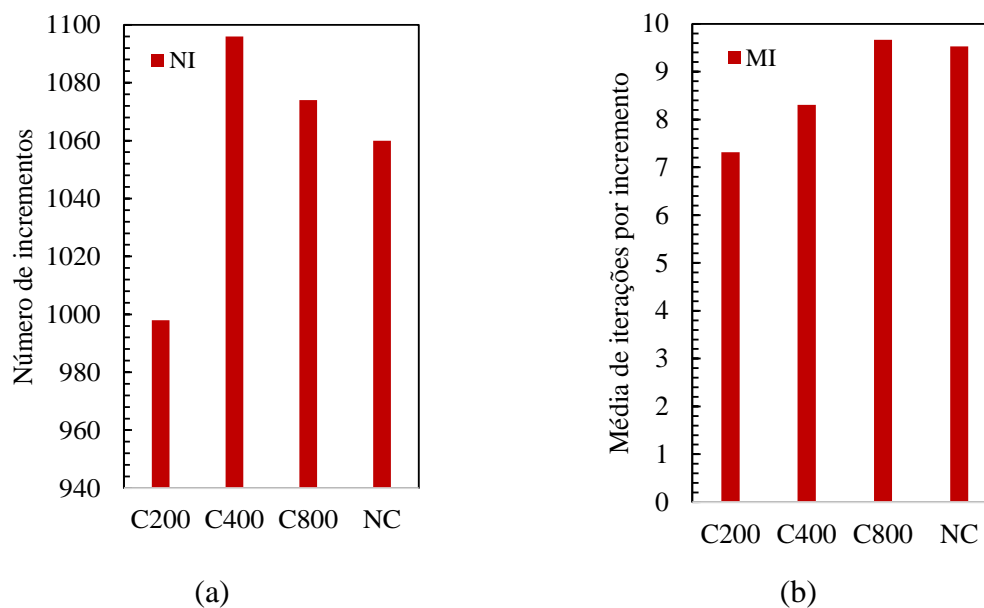


Figura 4.12. Conformação de uma geometria U-rail em 2D (a) número de incrementos (NI) executados; (b) quantidade média de iterações por incremento (MI).

A Figura 4.12 (a) apresenta o número de incrementos (NI) necessários em cada uma das malhas para impor o deslocamento total do punção. A Figura 4.12 (b) apresenta o número médio de iterações (MI) por incremento utilizadas para atingir a convergência. A média de iterações por incremento apresenta uma evolução crescente entre as malhas conformes, da C200 à C800. A malha NC é a que requer uma média de iterações mais próxima da C800, com uma forte diferença entre o número de elementos, muito superior nesta última. Este facto pode estar relacionado com a estabilização do número de nós em contacto com as ferramentas, que é maior para a malha C800 e idêntico para a NC. Este facto

pode também justificar o facto de a malha C800 ser a malha conforme que requer um menor número de incrementos, no entanto requer em média mais iterações por incremento. As malhas C200 e C400 têm uma diferença significativa de incrementos efetuados, muito superior na C400, apesar de um número de elementos muito próximo. Em contraste com a C800, a malha NC possui um elevado número de incrementos, apesar da reduzida quantidade de elementos.

A malha NC é a que apresenta menor erro comparativamente com as malhas C200 e C400, e uma forte coincidência de resultados relativamente à malha C800. A relação entre a qualidade de resultados, número de elementos e tempo de simulação é mais vantajosa na malha NC, comparativamente com a C400.

4.2.2. Simulação 3D

A existência do efeito de bordo deve-se à ausência de constrangimentos nas extremidades da largura da chapa e, portanto, à possibilidade de ocorrer deformação livre. Assim, antes de proceder à análise da simulação numérica do perfil sem condições de deformação plana é necessário avaliar a influência da quantidade de elementos na direção da largura da chapa na dimensão prevista para a zona influenciada pelo efeito de bordo livre.

4.2.2.1. Análise do bordo livre

Para a análise do bordo livre foram utilizadas duas malhas conformes. A quantidade de elementos a utilizar ao longo do comprimento de cada malha foi calculada seguindo a mesma estratégia da simulação 2D. O tamanho do elemento na direção da largura (O_y) é aproximadamente o tamanho do elemento no comprimento (O_x), de modo a obter um elemento cúbico também no plano (O_{xy}). É utilizada uma malha mais grosseira com apenas um elemento na espessura (C200) e uma intermédia com dois elementos na espessura (C400). A malha mais refinada com quatro elementos na espessura resulta num número total de 256000 elementos, pelo que se optou por não proceder à sua análise, devido ao elevado tempo de computação associado. Importa referir que o objetivo desta análise é apenas verificar a existência do efeito de bordo livre, i.e., uma zona com gradiente na distribuição das variáveis locais, de modo a avaliar a sua dimensão. As principais características das malhas conformes utilizadas são apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Características das malhas utilizadas na simulação numérica (análise do bordo livre) da conformação do U-rail.

Nome da malha	Número de elementos em x	Número de elementos em y	Número de elementos em z	Razão	Total de elementos
C200	200	20	1	$\approx 1,12$	4000
C400	400	40	2	$\approx 1,12$	32000

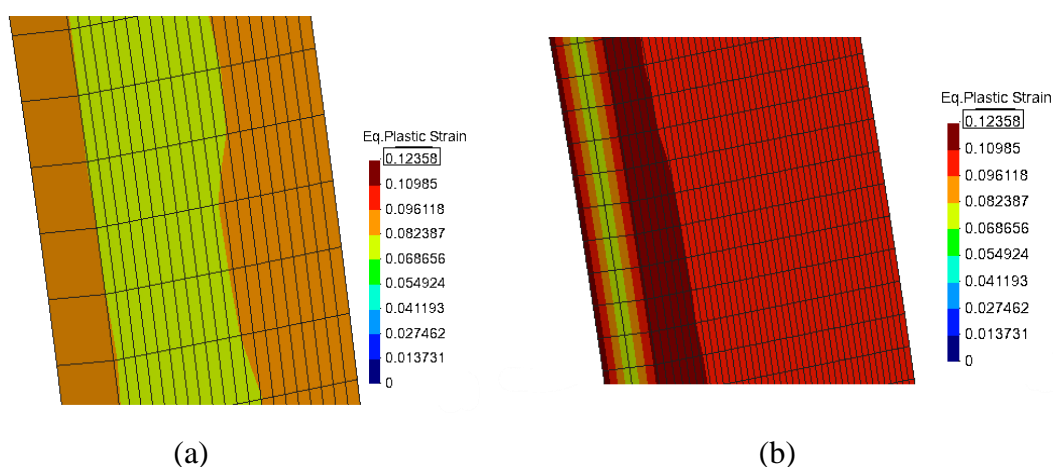


Figura 4.13. Conformação de uma geometria U-rail em 3D. Análise do gradiente em espessura e largura, na zona da parede vertical, da deformação plástica equivalente para: (a) a malha C200; (b) a malha C400.

A Figura 4.13 apresenta a distribuição da deformação plástica equivalente no final da etapa de avanço do punção, na zona da parede vertical, para as malhas C200 e C400. Esta figura evidencia que a utilização de um elemento em espessura não permite avaliar corretamente o gradiente em espessura desta variável, o que também influencia a distribuição desta variável na direção da largura. De facto, na malha C400 existe um gradiente de deformação plástica equivalente ao longo da espessura, com valores máximos superiores aos obtidos com a malha C200. Estes refletem-se no aumento local desta variável numa zona próxima do bordo livre. A Figura 4.14 apresenta a distribuição da tensão equivalente, para o mesmo instante, para as malhas C200 e C400. O facto desta variável apresentar uma gama de valores mais elevada do que a deformação plástica equivalente, permite evidenciar que a zona que apresenta um gradiente na distribuição das variáveis locais na direção da largura, devido ao efeito de bordo livre. No entanto, a utilização de um tamanho de elemento menor nesta direção conduz a um aumento da largura da zona afetada por este efeito.

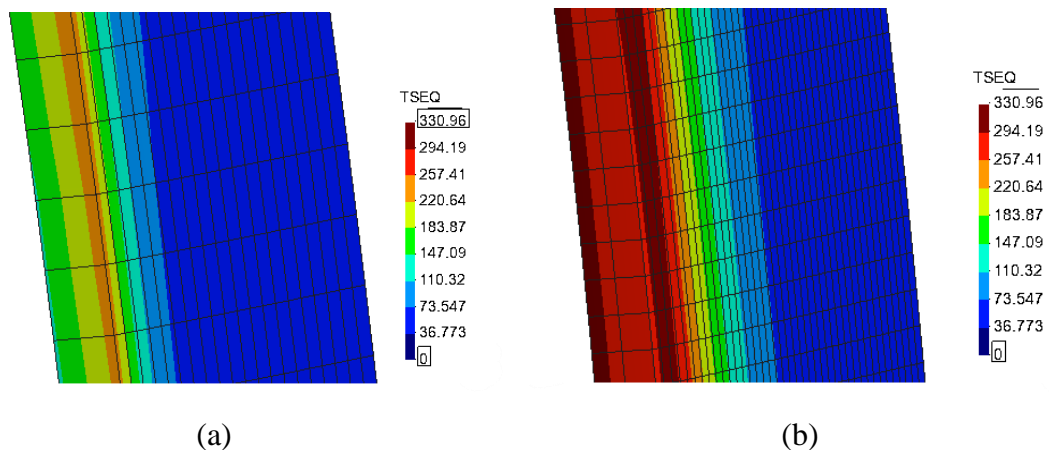


Figura 4.14. Conformação de uma geometria U-rail. Análise do gradiente em espessura e largura, na zona da parede vertical, da tensão equivalente para: (a) a malha C200; (b) a malha C400.

A análise realizada evidencia a necessidade de utilizar pelo menos dois elementos em espessura para garantir correta previsão do gradiente de deformação plástica não linear, para o material que estabelece contacto com o punção e escoia através da matriz. Ou seja, esta análise corrobora os resultados obtidos para a simulação com condições de deformação plana. Em relação ao efeito de bordo livre, observa-se que a zona que apresenta um gradiente das variáveis locais corresponde a aproximadamente 10% da largura. A sua dimensão é sensível à dimensão do elemento finito na direção O_y , sendo recomendável o recurso a um tamanho de elemento mais reduzido nesta zona. A análise da distribuição das variáveis locais também mostra que as zonas da chapa em contacto com os raios de curvatura das ferramentas apresentam dimensões afetadas pelo efeito de bordo livre ligeiramente maiores (aproximadamente 3 vezes maior na zona de contacto com o punção e 2 vezes maior na zona de contacto com a matriz).

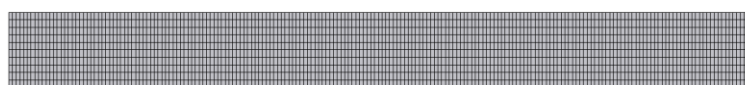
4.2.2.2. Análise global

Para esta secção são utilizadas três malhas conformes e uma malha não conforme. As três malhas conformes têm o mesmo número de elementos ao longo do comprimento que as malhas da análise do efeito de bordo. No entanto, diferem das malhas do estudo anterior no número de elementos utilizados na largura, que corresponde a metade, i.e., estas discretizações não apresentam elementos cúbicos no plano (Oxy). É utilizada uma malha mais grosseira com 10 elementos na largura (C200), outra com 20 elementos (C400) e uma mais refinada com 40 elementos (C800). A malha não conforme é composta por elementos com tamanhos que correspondem aos diferentes níveis de refinamento das malhas

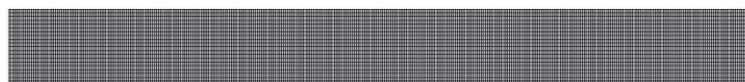
conformes. A malha não conforme apresenta um nível de refinamento mais elevado na zona do bordo livre, com tamanho de elemento igual ao da malha mais refinada. A restante zona crítica tem elementos com tamanho igual ao da malha intermédia e a restante região, com valores de deformação plástica próximos de zero, tem elementos iguais aos da malha grosseira. As características principais das malhas utilizadas encontram-se na Tabela 4.7. As diferentes discretizações encontram-se representadas esquematicamente na Figura 4.15.

Tabela 4.7. Características das malhas utilizadas na simulação numérica (3D) da conformação do U-rail.

Nome da malha	Número de elementos em x	Número de elementos em y	Número de elementos em z	Razão	Total de elementos
C200	200	10	1	$\approx 1,12$	2000
C400	400	20	2	$\approx 1,12$	16000
C800	800	40	4	$\approx 1,12$	128000
NC	-	-	1 a 4	-	14866



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.15. Malhas utilizadas no processo de conformação U-rail em 3D: (a) malha C200; (b) malha C400; (c) malha C800; (d) malha NC.

A Figura 4.16 (a) apresenta a evolução da força do punção em função do seu deslocamento, para todas as malhas utilizadas nesta secção. Observam-se, novamente, oscilações na força do punção com maiores amplitudes na malha conforme grosseira (C200).

Neste caso, as oscilações da força do punção das malhas C400 e NC são muito próximas, o que corrobora a influência do número de elementos finitos utilizados na direção Ox nesta variável. Como a malha NC apresenta uma dimensão dos elementos finitos nesta direção mais próxima da malha C400 do que da malha C800, a força prevista é também mais próxima. Assim, contrariamente ao gráfico da simulação 2D, a malha NC não permite obter uma previsão mais próxima da malha C800. A Figura 4.16 (b) apresenta a evolução do erro da força do punção em função do seu deslocamento. Observa-se que as malhas C200, C400 e NC atingem valores máximos de 40,89%, 20,85% e 22,89%, respetivamente. A evolução da força do cerra-chapas é apresentada na Figura 4.17 (a) e, tal como na força do punção, existem oscilações na força do cerra-chapas. A evolução do erro da força do cerra-chapas atinge valores máximos de 129,10%, 27,20% e 26,40%, para as malhas C200, C400 e NC, respetivamente, como se mostra na Figura 4.17 (b). A comparação destes valores de erro com os obtidos na análise 2D, mostra que as condições de deformação plana ajudam a estabilizar a variação da força do cerra-chapas, quando este é controlado por folga constante.

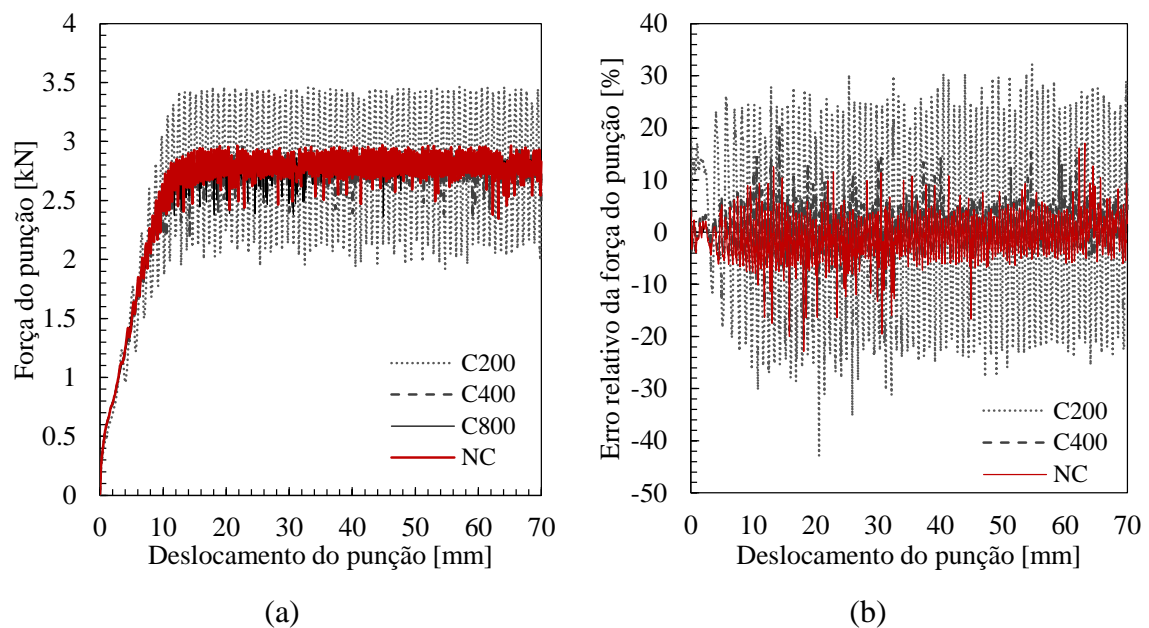


Figura 4.16. Conformação de uma geometria U-rail em 3D: (a) evolução da força do punção em função do seu deslocamento; (b) evolução do erro relativo da força do punção em função do seu deslocamento.

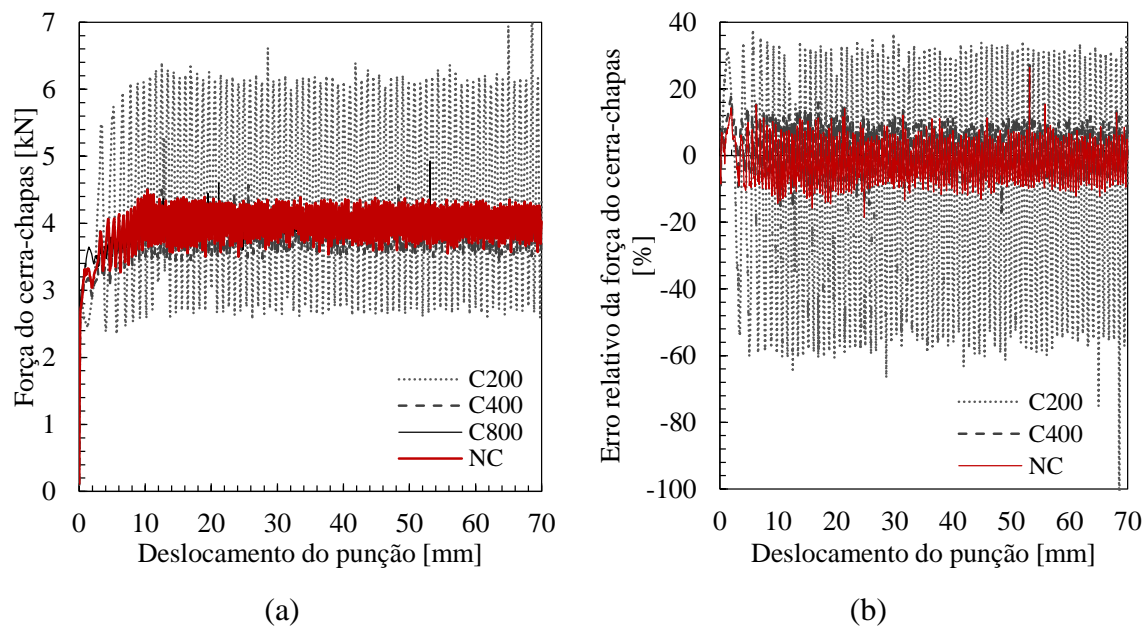


Figura 4.17. Conformação de uma geometria U-rail em 3D: (a) evolução da força do cerra-chapas em função do deslocamento do punção; (b) evolução do erro relativo da força do cerra-chapas em função do deslocamento do punção.

A espessura final da chapa em função da distância está apresentada na Figura 4.18 (a). Importa mencionar que esta análise foi realizada para o plano de simetria, i.e., $y=0$. Assim, observa-se a semelhança na espessura final prevista pelas malhas C400 e NC, sendo que nenhuma é coincidente com a de referência. Este facto corrobora a influência da dimensão dos elementos na direção Ox verificada na simulação 2D, na previsão desta variável. A Figura 4.18 (b) apresenta a evolução do erro relativo da espessura final. Os valores máximos de erro atingidos na zona da parede vertical são de 0,97%, 1,18% e 1,14% para as malhas C200, C400 e NC, respetivamente. A comparação destes valores de erro com os obtidos na simulação 2D confirma a importância da dimensão dos elementos na direção Ox na previsão desta variável. Em resumo, verifica-se uma maior proximidade dos resultados entre as malhas C400 e NC, quer na força do punção e do cerra-chapas, quer na distribuição da espessura.

A Figura 4.19 (a) apresenta a evolução ao longo do comprimento da chapa do componente do tensor das tensões na direção Ox , para o plano $z=0$, imediatamente antes do retorno elástico. Importa mencionar que esta análise também foi realizada para o plano de simetria, i.e., $y=0$. A evolução desta variável é idêntica à observada na simulação 2D, com valores inferiores na zona correspondente ao fundo (zona de contacto com o punção). A

tensão permanece constante na zona da parede vertical, observando-se uma forte transição na região do raio de curvatura da matriz atingindo valores máximos de compressão, sofrendo uma nova forte transição para tensões quase nulas na zona da flange. A Figura 4.19 (b) mostra a distribuição em espessura do componente do tensor das tensões na direção O_x , para um ponto localizado a meio da parede vertical, imediatamente antes do retorno elástico. Neste caso, esta análise foi realizada para o bordo livre, i.e., para $y=17,5$ mm. A análise da Figura 4.19 (b) permite concluir que o recurso ao refinamento da zona do bordo livre conduz a um perfil para a distribuição das tensões em espessura mais próximo entre a malha C800 e NC do que entre a malha C400 e NC. No entanto, o valor máximo ($z=0$) e mínimo ($z=0,78$ mm) são mais próximos para as malhas C400 e NC. Assim, a posição da linha neutra prevista com a malha NC é intermédia entre a prevista com a malha C800 e C400. Em resumo, verifica-se, não uma coincidência como na simulação 2D, mas uma proximidade na distribuição da tensão da malha NC em relação à C800.

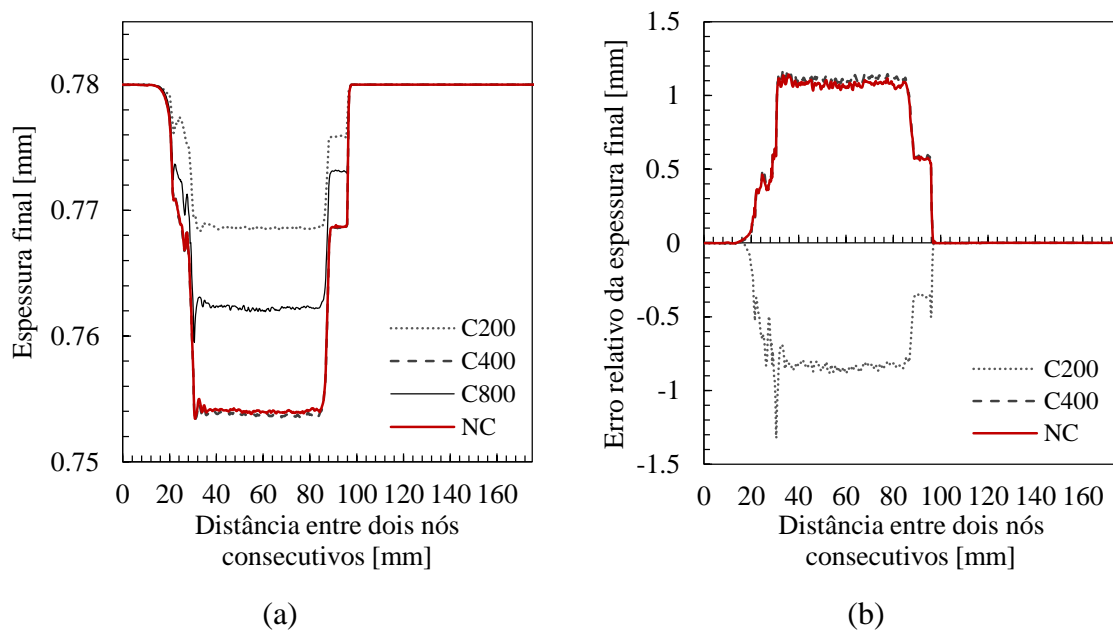


Figura 4.18. Conformação de uma geometria U-rail em 3D: (a) espessura final em função da distância entre dois nós consecutivos; (b) evolução do erro relativo da espessura final em função da distância entre dois nós consecutivos.

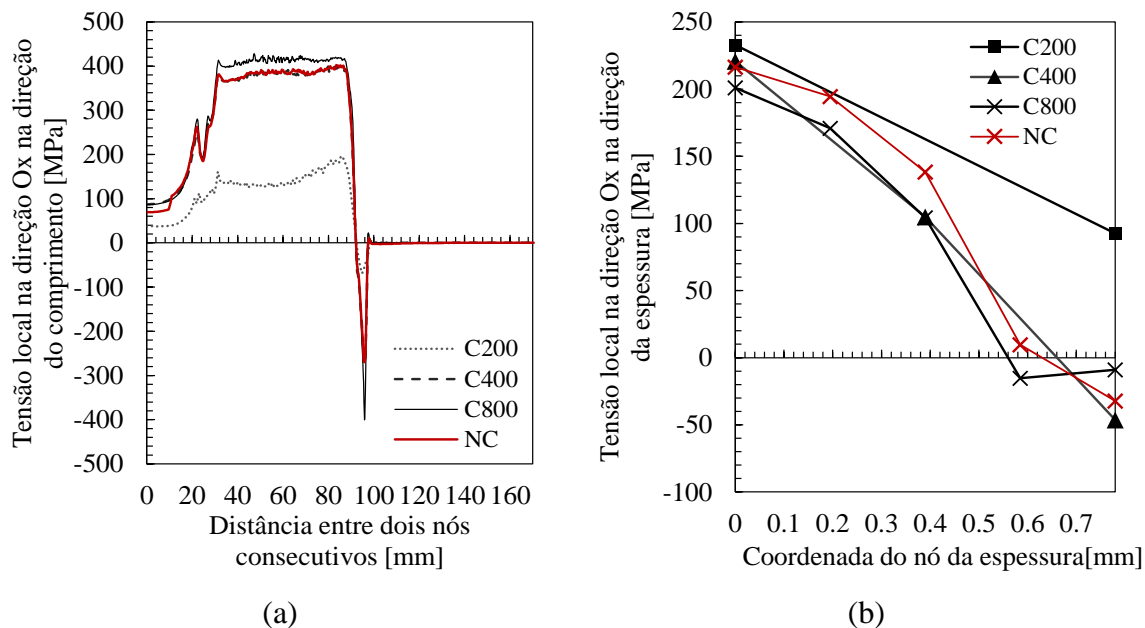


Figura 4.19. Análise do estado de tensão antes do retorno elástico da geometria U-rail em 3D: (a) distribuição das tensões na direção Ox em função da distância entre dois nós consecutivos; (b) perfil de tensão local na direção Ox na parede vertical ao longo da espessura para $y=17,5$.

O perfil da chapa após o retorno elástico está apresentado na Figura 4.20 (a). As malhas conformes apresentam todas um perfil distinto, ao contrário do que acontece na simulação 2D (ver Figura 4.11 (a)). De uma forma simplista, este resultado pode estar associado ao facto de na simulação 2D serem prevista posições para a linha neutra idênticas para as simulações C400, C800 e NC (ver Figura 4.10 (b)), ao contrário do que acontece na simulação 3D (Figura 4.19 (b)). No caso da simulação 3D, a malha C800 conduz a um melhor ângulo de retorno elástico da aba, quando comparado com as malhas C400 e a NC, que apresentam retorno elástico semelhantes.

Globalmente, a introdução do efeito de bordo livre conduz a uma pequena redução do retorno elástico previsto para este componente, sendo que este componente não apresenta efeito de curvatura anticlástica na direção Oy. A redução do retorno elástico pode ser justificada pela diminuição dos valores globais do componente da tensão na direção Ox, associado à deformação livre do bordo (comparar a Figura 4.11 (a) com a Figura 4.19 (b)).

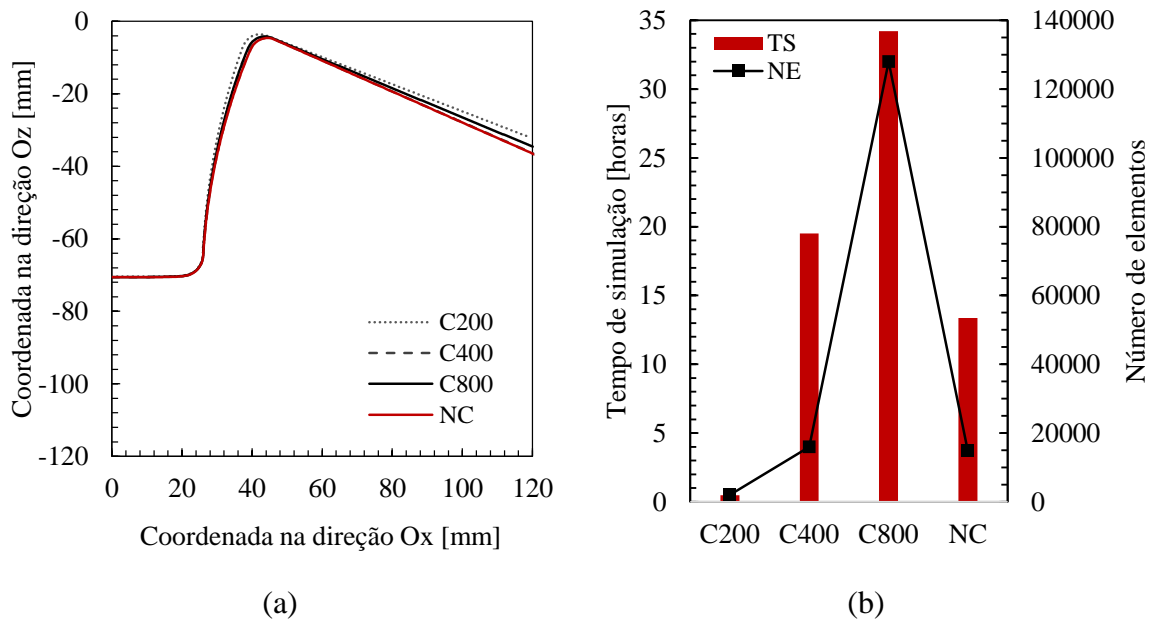


Figura 4.20. Conformação de uma geometria U-rail em 3D: (a) perfil após o retorno elástico; (b) comparação entre o tempo de simulação (TS) e o número de elementos (NE).

A Figura 4.20 (b) relaciona o tempo de simulação com o número total de elementos. A Figura 4.21 (a) apresenta o número de incrementos necessários em cada uma das malhas para impor o deslocamento do punção, sendo que a quantidade média de iterações por incremento utilizados para atingir a convergência é apresentada na Figura 4.21 (b). Para um número de elementos relativamente superior, a malha C400 apresenta uma diferença muito elevada no tempo de simulação em comparação com a C200. A malha C800 apresenta uma maior duração da simulação, acompanhada por um maior número de elementos. A malha NC demora aproximadamente menos 25% do tempo de simulação da C400, para um número de elementos aproximadamente 8% menor. A malha C800 é a malha conforme que necessita de um maior número de incrementos, com uma evolução crescente entre a C200, C400 e C800. A malha NC apresenta um número de incrementos idêntico à C400, o que parece confirmar a influência do tamanho do elemento na direção Oy na estabilização das forças de contacto. De facto, a comparação com os resultados obtidos na simulação 2D evidencia o aumento global do número de incrementos e da média de iterações (ver Figura 4.12). A média de iterações por incremento é superior na C400 comparativamente com as restantes malhas conformes. A malha C800 é a que contém mais elementos, mas é a que tem uma média de iterações menor, o que pode resultar da menor oscilação da força de contacto.

A malha NC tem uma média de iterações mais próxima da C400, para uma quantidade de elementos muito próxima.

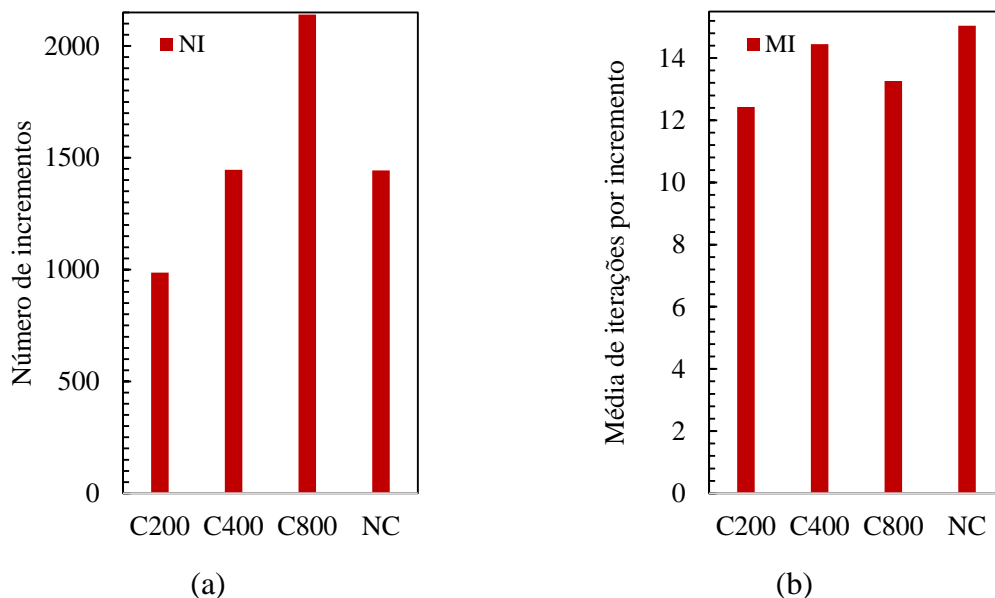


Figura 4.21. Conformação de uma geometria U-rail de uma simulação 3D (a) número de incrementos (NI) executados; (b) quantidade média de iterações por incremento (MI).

Contrariamente aos resultados analisados na simulação 2D, verifica-se uma proximidade de resultados entre a malha C400 e NC, justificada pela discretização seleccionada para a malha não conforme (ver Figura 4.15). A malha NC é discretizada com o maior nível de refinamento, que corresponde a um tamanho de elemento igual ao da malha C800, apenas na zona do bordo livre. As restantes zonas críticas encontram-se discretizadas com o primeiro nível de refinamento, que corresponde à malha C400. Uma vez que o bordo livre corresponde apenas a uma pequena porção do bordo da chapa, a área crítica da malha NC que contém um tamanho de elemento igual ao da C400 é muito grande e, portanto, justifica a forte proximidade de resultados entre as malhas NC e C400.

4.3. Processo de conformação de uma taça quadrada

Esta secção apresenta a conformação de uma taça quadrada. A Figura 4.22 apresenta a geometria das ferramentas e do esboço utilizados na simulação de conformação de uma taça quadrada, bem como as respetivas dimensões. O esboço é quadrado e tem 150 mm de lado, com uma espessura de 0,78 mm [26]. O esboço é proveniente de uma chapa

Para este estudo são utilizadas quatro malhas conformes e duas malhas não conformes. As malhas conformes correspondem a diferentes níveis de refinamento, do mais grosseiro ao mais refinado, C19, C38, C76 e C152, respetivamente. Nestas designações, os dígitos correspondem ao número total de elementos na direção Ox e Oy. Importa referir que o raio de curvatura da matriz é também de 5 mm, pelo que as equações (4.2) e (4.3) correspondem a dimensões do elemento no plano idênticas às determinadas para o exemplo do U-rail. No entanto, como este exemplo é fechado, apresenta um retorno elástico reduzido, pelo que se opta por estudar uma maior amplitude de variação do tamanho do elemento no plano, em detrimento da razão do elemento finito.

Tabela 4.9. Características das malhas utilizadas na simulação numérica da conformação de uma taça quadrada.

Nome da malha	Número de elementos em x e y	Número de elementos em z	Tamanho do elemento [mm]	Total de elementos
C19	19	1	≈ 4	361
C38	38	1	≈ 2	1444
C76	76	1	≈ 1	5776
C152	152	4	≈ 0,5	92416
NC1	-	1 a 8	-	30748
NC2	-	2	-	11558

As malhas não conformes têm diferentes refinamentos no plano, com elementos com dimensões correspondentes às diferentes malhas conformes. As diferentes zonas de refinamento no plano têm diferentes tamanhos de elementos, que correspondem aos tamanhos dos elementos das malhas conformes. O nível de refinamento nas zonas do plano é feito de acordo com a deformação plástica a que está sujeita, em função dos resultados obtidos com a malha conforme de referência. As zonas que apresentam maior deformação plástica são as zonas que apresentam elementos com tamanho mais pequeno (maior nível de refinamento). As zonas do bordo livre da taça nas direções Ox e Oy também apresentam elementos de menor tamanho, seguidas da zona da parede vertical, com um nível de refinamento abaixo. A malha NC1 é obtida com base na malha C19, com 1 elemento em espessura, conduzindo a um refinamento no plano e na espessura. A malha NC2 é obtida a partir de uma malha com discretização no plano igual à malha C19, mas com 2 elementos

em espessura, sujeita apenas a refinamento no plano. As principais características das malhas utilizadas encontram-se na Tabela 4.9. A Figura 4.23 apresenta a comparação do refinamento no plano e na espessura entre as malhas NC1 e NC2. O objetivo é analisar a influência do número de elementos na direção da espessura das malhas não conformes na qualidade dos resultados.

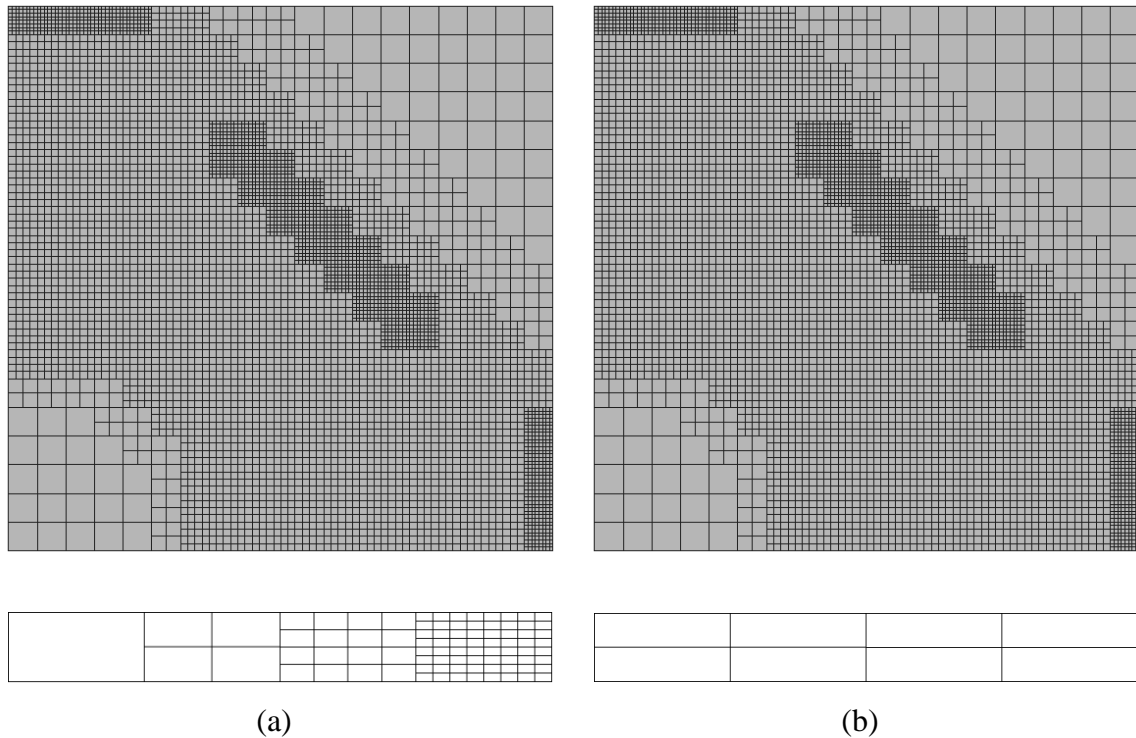


Figura 4.23. Comparação do refinamento no plano e na espessura das malhas não conformes utilizadas na conformação de uma taça quadrada: (a) malha NC1; (b) malha NC2.

A Figura 4.24 (a) apresenta a evolução da força do punção em função do seu deslocamento. Observa-se que, entre as malhas conformes, a C19 e a C38 são as que mais se destacam, uma vez que sobrestimam o valor da força. Este resultado corrobora os resultados obtidos com a equação (4.2), uma vez que a dimensão no plano destas malhas é superior à recomendada. Para a C19 e C38, com tamanhos de elemento de 4 mm e 2 mm, a capacidade de descrever a curva do raio da matriz de 5 mm é muito reduzida e, portanto, muito menos precisa. Já as malhas C76 e C152 apresentam uma previsão semelhante para a evolução da força do punção. As malhas NC1 e NC2 descrevem uma curva de evolução da força do punção semelhante às malhas C76 e C152. A Figura 4.24 (b) apresenta o erro relativo da evolução da força do punção, excluindo as malhas C19 e C38. Observa-se que

nos primeiros 10 mm de deslocamento do punção a malha C76 apresenta um erro relativo bastante elevado, uma vez que a força é subestimada. Este resultado parece contradizer o esperado, uma vez que as malhas não conformes apresentam a mesma discretização no plano que a C76, incluindo para a região que estabelece contacto com a zona de dupla curvatura da matriz (ver Figura 4.23). No entanto, dos 10 mm aos 15 mm de deslocamento do punção, as malhas não conformes apresentam um erro idêntico ao obtido com a malha C76. Por outro lado, dos 30 mm aos 40 mm o erro da malha conforme C76 decresce de forma abrupta, enquanto as malhas não conformes apresentam um erro maior e mais constante. No global, as malhas C76, NC1 e NC2 atingem valores máximos de erro de 68,3%, 49,5% e 48,43%, respetivamente.

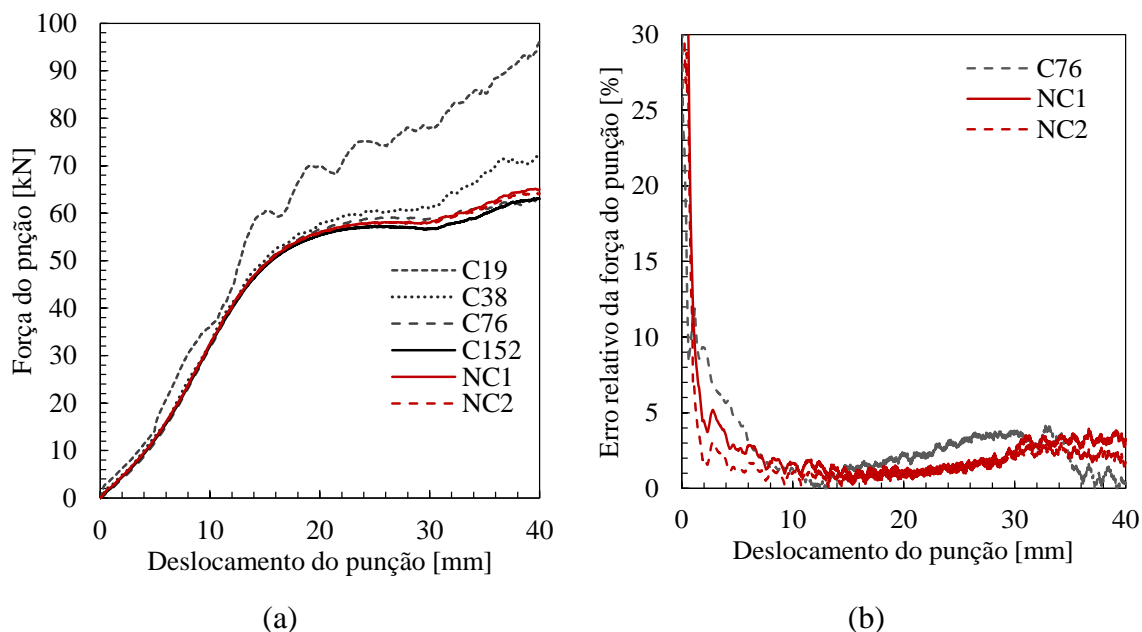


Figura 4.24. Conformação de uma taça quadrada: (a) evolução da força do punção em função do seu deslocamento; (b) evolução do erro relativo da força do punção em função do seu deslocamento.

Para tentar compreender a evolução do erro da força do punção, incluindo a evolução crescente entre os 30 e os 40 mm de deslocamento, é necessário analisar a evolução da força do cerra-chapas. Importa realçar que a folga entre o cerra-chapas e a matriz é constante durante todo o processo e igual a 0,95 mm. Assim, o aumento da força do cerra-chapas só pode ocorrer se: (i) o aumento da espessura do material localizado na zona da flange, devido aos esforços de compressão a que esta zona está sujeita, resultar num valor superior ao da folga; (ii) surgirem rugas com uma amplitude superior ao valor da folga, também em consequência dos esforços de compressão. A previsão da amplitude e frequência

das rugas é muito sensível à discretização no plano. A Figura 4.25 (a) apresenta a evolução da força do cerra-chapas em função do deslocamento do punção. Observa-se que, no início do processo de conformação a força exercida pelo cerra-chapas é ligeiramente inferior para a discretização C76. No entanto, para um deslocamento próximo de 10 mm, esta discretização apresenta um valor de força superior à malha C152. Por outro lado, as discretizações não conformes apresentam uma evolução da força do cerra-chapas mais próxima da malha C152, exceto no final do processo, o que justifica a evolução do erro na força do punção (ver Figura 4.24 (b)). A análise das simulações permite observar a formação de rugas no início do processo, uma vez que a força exercida pelo cerra-chapas não é suficiente para evitar a sua formação. No entanto, a amplitude e frequência das rugas é mais distinta entre as malhas C76 e C125, do que entre a C125 e as malhas não conformes. O mesmo efeito pode ser observado no final do processo de conformação, na Figura 4.26. Por último importa mencionar que o forte aumento da força do cerra-chapas não é compensado pelo aumento da força do punção, mas sim da matriz, como se observa na Figura 4.25 (b), uma vez que está relacionado com o controlo da zona da flange. Também neste caso, a evolução da força do cerra-chapas é claramente distinta para a malha C76 e C152, onde a primeira apresenta valores de força superiores devido à maior frequência das rugas, exceto no final do processo.

A Figura 4.27 apresenta a espessura final da chapa em duas direções: ao longo da direção Ox e ao longo da diagonal (direção $Ox=Oy$), em função da distância entre dois nós consecutivos. Uma vez que a malha C19 apresenta uma forte disparidade nos resultados das variáveis globais, é também excluída desta análise. A evolução do erro relativo da espessura encontra-se apresentada na Figura 4.28. O erro na espessura final ao longo da direção Ox atinge valores máximos de 2%, 2,55% e 2,57%, para as malhas C76, NC1 e NC2, e ao longo da diagonal de 2,43%, 1,28% e 1,20%, respetivamente. Assim, em termos globais os erros parecem ser idênticos. No entanto, a análise da Figura 4.27 mostra que a malha C76 sobrestima a espessura, em particular na secção Ox , na zona em contacto com o raio de curvatura do punção. A previsão da espessura nesta zona é fortemente influenciada pelo escoamento da aba, que apresenta uma geometria não linear. Assim, a utilização do refinamento local parece ser uma boa solução para acomodar esta não linearidade geométrica, bem como a associada à formação de rugas. O efeito do número de camadas em espessura também é mais evidente para esta direção.

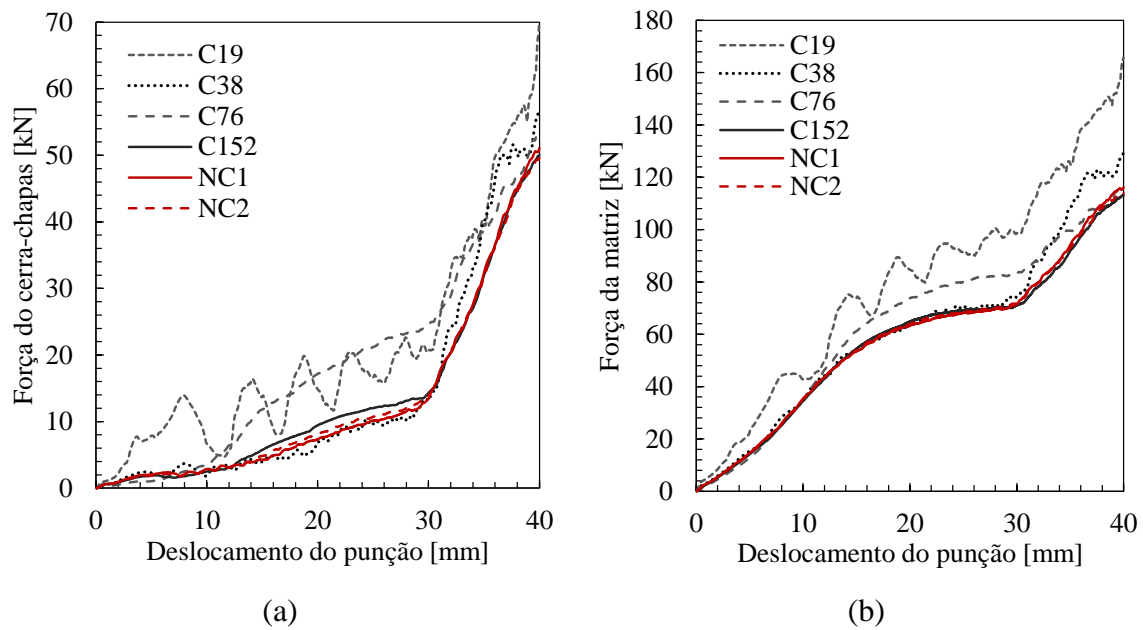


Figura 4.25. Conformação de uma taça quadrada: (a) evolução da força do cerra-chapas em função do deslocamento do punção; (b) evolução da força da matriz em função do deslocamento do punção.

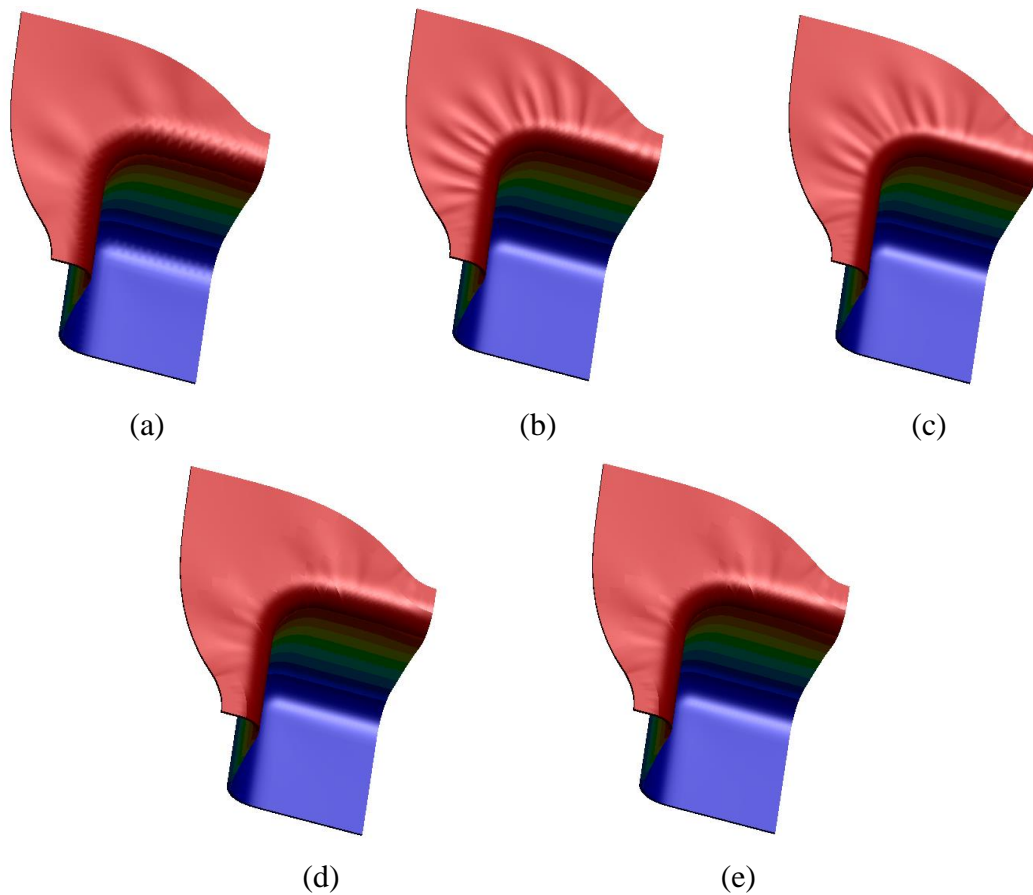


Figura 4.26. Conformação de uma taça quadrada. Geometria prevista no final do processo de conformação, evidenciando a ocorrência de rugas, nas malhas: (a) C38; (b) C76; (c) 152; (d) NC1; (e) NC2.

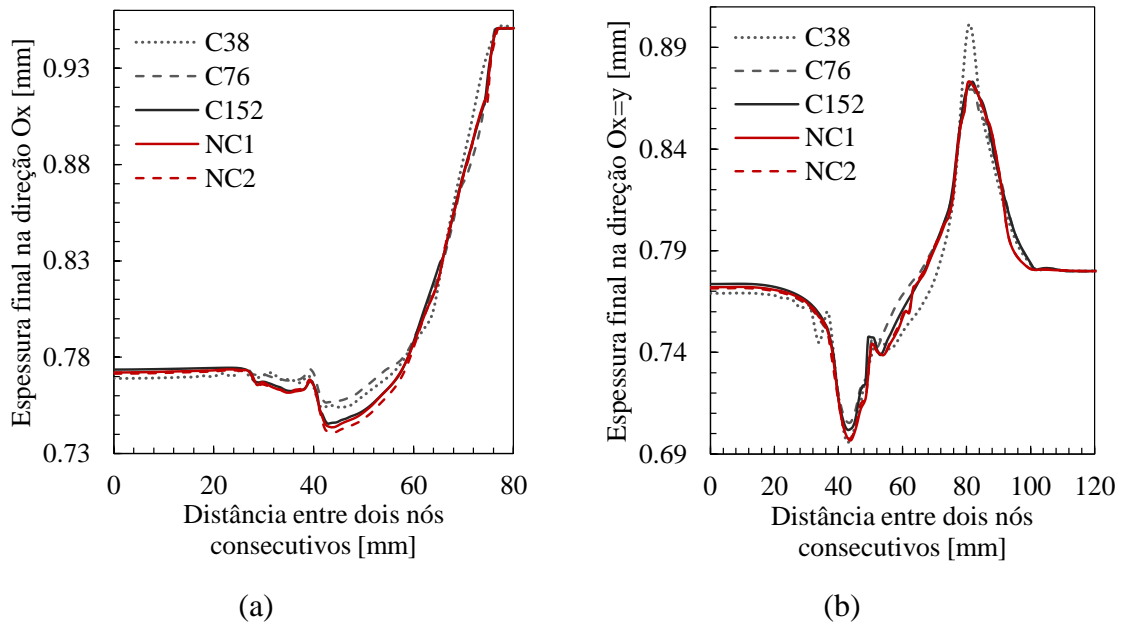


Figura 4.27. Conformação de uma taça quadrada: (a) espessura final na direção Ox em função da distância entre dois nós consecutivos; (b) espessura final na direção Ox=Oy em função da distância entre dois nós consecutivos.

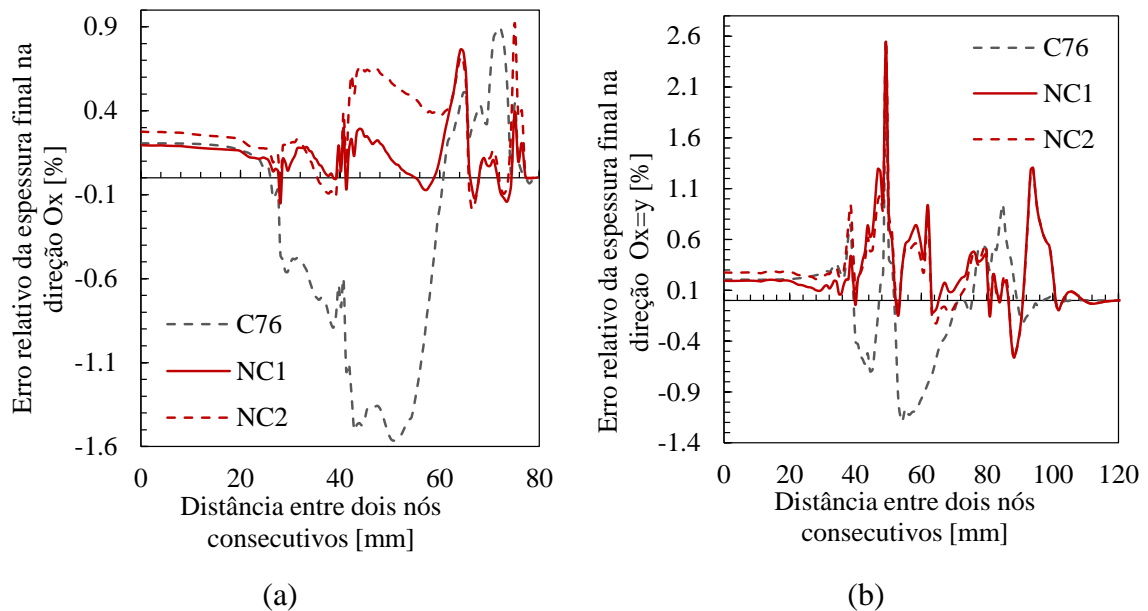


Figura 4.28. Conformação de uma taça quadrada: (a) evolução do erro relativo da espessura final na direção Ox em função da distância entre dois nós consecutivos.; (b) evolução do erro relativo da espessura final na direção Ox=Oy em função da distância entre dois nós consecutivos.

A Figura 4.29 (a) relaciona o tempo de simulação com o número de elementos. A Figura 4.29 (b) mostra o número de incrementos executados, e a Figura 4.30 o número médio de iterações. O tempo de simulação das malhas C19, C38 e C76 são bastante reduzidos, quando comparados com a malha C152, que tem uma duração de simulação muito elevada. As malhas não conformes têm tempos de simulação inferiores à C152, e a malha NC2, com aproximadamente 1/3 do número total de elementos, demora aproximadamente menos 75% do tempo de simulação relativamente à NC1. As malhas C19 e C38 precisam de um número de incrementos muito semelhante, seguidas da C76 que executa mais 200 incrementos. A C152 é a malha com mais incrementos por simulação. A malha NC1 apresenta um número de incrementos inferior ao da C152, mas superior aos da NC2. A média de iterações por incremento é superior na C76 comparativamente com as restantes malhas conformes. De notar que a C152 tem uma média inferior apesar de apresentar um número de elementos aproximadamente 18 vezes superior. Estas diferenças podem estar associadas ao desenvolvimento das rugas para um menor valor de deslocamento do punção, o que evidencia que o tempo de cálculo é influenciado pelos fenómenos de instabilidade que ocorrem no processo de conformação. A malha NC2 tem uma média de iterações próxima da C152, para um número de elementos 9 vezes inferior, e uma média superior à NC1 em aproximadamente 1,5 iterações.

Apesar da malha NC1 apresentar tempos de simulação mais elevados, apresenta resultados bastante satisfatórios comparativamente com as restantes malhas. Embora a malha NC2 possui um refinamento no plano idêntico à NC1, tem menor quantidade de elementos na espessura, o que influencia a precisão dos resultados. A malha NC1 tem o menor erro da força do punção, e possui uma evolução das forças do cerra-chapas e da matiz muito próximas da malha C152. O mesmo verifica-se na variação da espessura, que contém um erro muito reduzido nas duas direções, relativamente à malha C152. Estes resultados justificam-se pela discretização da malha NC1, nomeadamente na direção da espessura, que contém o mesmo tamanho de elemento nas zonas críticas, bem como no caso do refinamento no plano. No entanto, em termos globais, a discretização NC2 permite garantir erros inferiores a 3%, com um tempo de simulação 75% menor do que o da NC1.

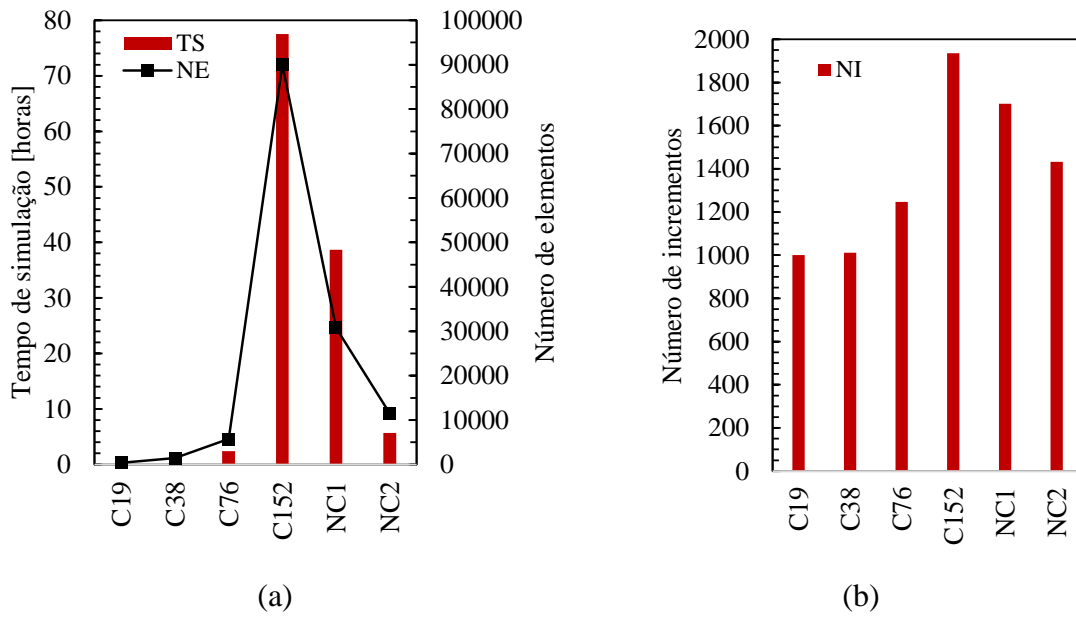


Figura 4.29. Conformação de uma taça quadrada: (a) comparação entre o tempo de simulação (TS) e o número de elementos (NE); (b) número de incrementos (NI) executados.

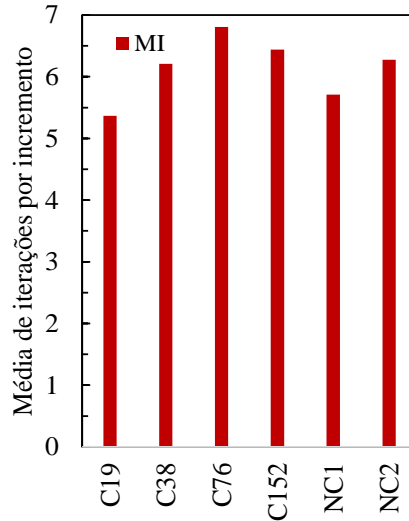


Figura 4.30. Conformação de uma taça quadrada: quantidade média de iterações (MI) por incremento.

4.4. Processo de conformação de um componente automóvel

Esta secção apresenta a conformação de um componente automóvel, propício ao retorno elástico após a operação de conformação. O esboço tem uma geometria complexa, com uma espessura de 1,4 mm. O esboço é proveniente de uma chapa metálica de um aço macio cujas propriedades mecânicas são apresentadas na Tabela 4.10. O comportamento elástico é considerado isotrópico e descrito pela lei de Hooke. O comportamento plástico é anisotrópico e é definido pelo critério de plasticidade de Hill e pela lei de Swift. Os parâmetros da lei de Swift para este aço macio estão indicados na Tabela 4.10. O atrito entre a chapa e as ferramentas é modelado pela lei de Coulomb, com um coeficiente de atrito constante, igual a $\mu=0,01$. Devido à ausência de condições de simetria é considerada toda a geometria do esboço na simulação numérica. A folga entre o cerra-chapas e a matriz é de 1,6 mm, sendo o deslocamento imposto pelo punção de 99,8 mm [29].

Tabela 4.10. Propriedades mecânicas do aço macio utilizado na simulação do processo de conformação de um componente automóvel.

E [GPa]	206	F	0,3807
Y	0,3	G	0,5531
σ_0 [MPa]	708,54	H	0,4469
K [MPa]	1349,7	L, M	1,5
n	0,0848	N	1,6809

O estudo da conformação plástica do componente automóvel está dividido em dois casos: o estudo do refinamento no plano com um número de camadas na espessura constante; e o estudo do refinamento na espessura com discretização no plano constante. Com base na análise da geometria final do componente, foram definidos três tipos de zonas na direção Oy: flange; parede vertical e zona em contacto com o fundo do punção. A dimensão do tamanho de elemento para a zona da parede vertical foi definida com base nas mesmas regras utilizadas na análise do U-rail. Na direção Ox também foram identificados três tipos de zonas: inclinada, com raio de curvatura e em linha reta. Nesta última zona, em comparação com o exemplo do perfil U-rail, seria possível utilizar um número muito reduzido de elementos. No entanto, a chapa é mantida na posição correta com o auxílio de pinos guias, pelo que é necessário definir os furos na zona que está em contacto com a zona

plana do punção. A necessidade de discretizar a zona dos furos impede a construção de uma malha com um número muito reduzido de elementos. Para a zona de raio de curvatura também foi cumprida a condição definida nas equações (4.2) e (4.3).

Para o caso do refinamento no plano são utilizadas quatro malhas conformes e uma malha não conforme. As malhas conformes são uma mais grosseira (G2), uma intermédia (I2), uma mais refinada (R2) e uma malha comumente utilizada para este componente (MCU), que recorre a uma discretização não estruturada na zona em contacto com a zona plana do punção. A malha não conforme (NC) tem um refinamento mais elevado nas zonas de maior deformação plástica, que contém elementos com tamanho próximo ao da malha conforme mais refinada. A restante zona crítica possui elementos menos refinados, e a restante área de menor interesse na deformação plástica tem elementos de tamanho igual à malha grosseira.

O estudo do refinamento na espessura utiliza três malhas conformes e uma não conforme. Uma das malhas conformes é a R2 utilizada no refinamento do plano e a malha não conforme é a mesma utilizada no refinamento do plano. De facto, as malhas conformes utilizam a mesma discretização no plano da malha R2 e diferem no refinamento na espessura. Uma malha conforme tem apenas 1 elemento em espessura (R1) e a outra é mais refinada, com 4 elementos na espessura (R4). As características principais das malhas utilizadas encontram-se na Tabela 4.11. As diferentes discretizações são apresentadas na Figura 4.31. O número de elementos da malha NC é relativamente elevado e justifica-se pela necessidade de aumentar a quantidade de elementos na zona dos furos, com discretizações não estruturadas, de forma a evitar elementos muito distorcidos.

A simulação da etapa de retorno elástico foi realizada com auxílio da estratégia OSS (Secção 3.6) impondo condições de fronteira a três nós, tal como se mostra na Figura 4.32 (a). O nó A está encastrado enquanto o nó B tem deslocamento nulo na direcção O_x e O_y e o nó C apenas na direcção O_z . A análise do retorno elástico é realizada para dois planos: em $x=-419,4$ mm e em $x=360$ mm [29]. A geometria obtida com a intersecção destes planos e o componente dão origem à Secção A e à Secção B, como se exemplifica na Figura 4.32 (b). Na secção seguinte, apresentam-se os resultados obtidos no estudo do refinamento no plano.

Tabela 4.11. Características das malhas utilizadas na simulação numérica da conformação de um componente automóvel para os diferentes casos de refinamento, no plano e na espessura.

Nome da malha	Número de elementos em z	Total de elementos	Nome da malha	Número de elementos em z	Total de elementos
Refinamento no plano			Refinamento na espessura		
G2	2	2130	R1	1	13053
I2	2	6858	R2	2	26106
R2	2	26106	R4	4	52212
NC	1 a 4	50737	NC	1 a 4	50737
MCU	2	86382			

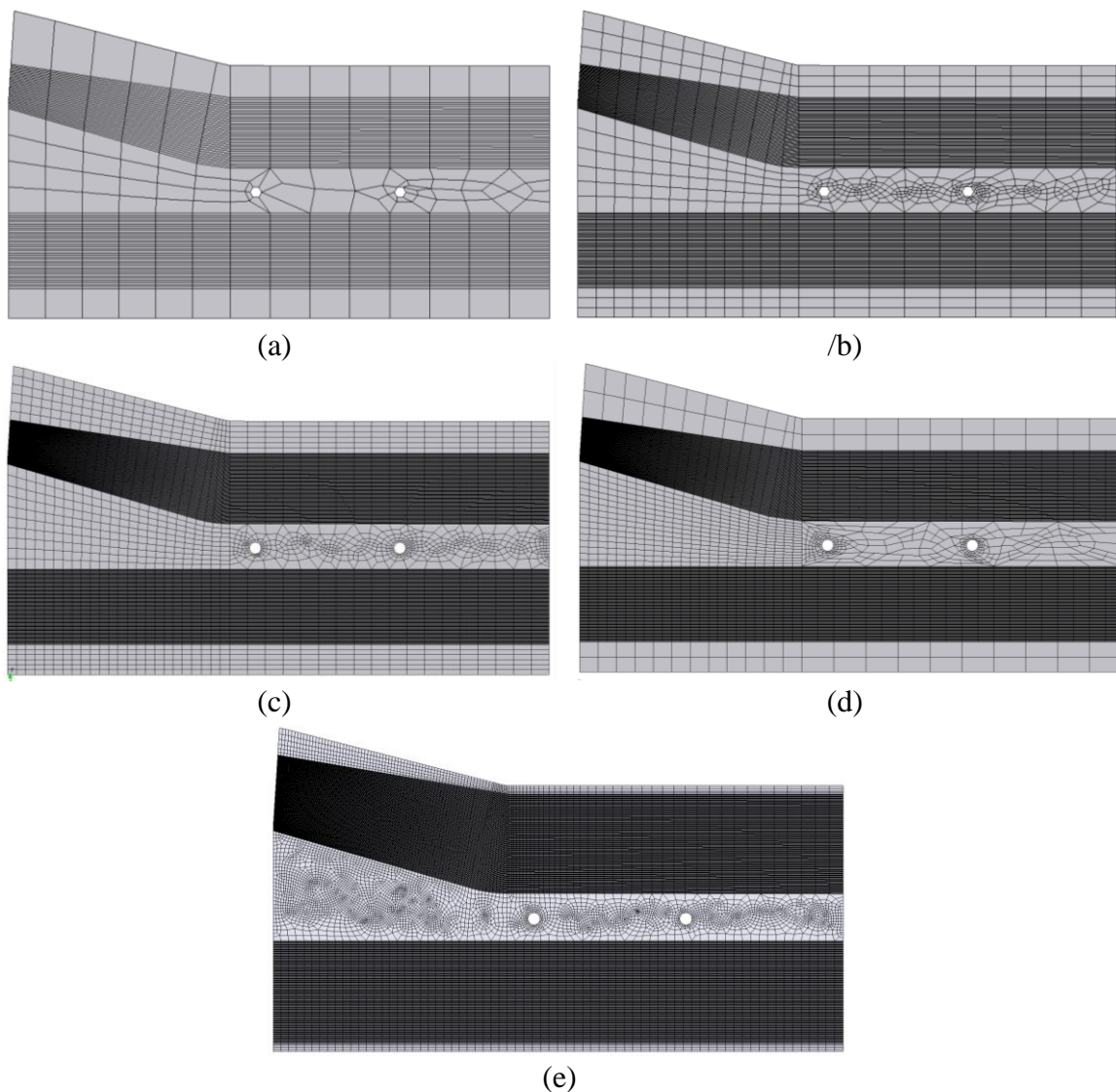


Figura 4.31. Malhas utilizadas no processo de conformação de um componente automóvel: (a) malha G2; (b) malha I2; (c) malha R2; (d) malha NC; (e) malha MCU.

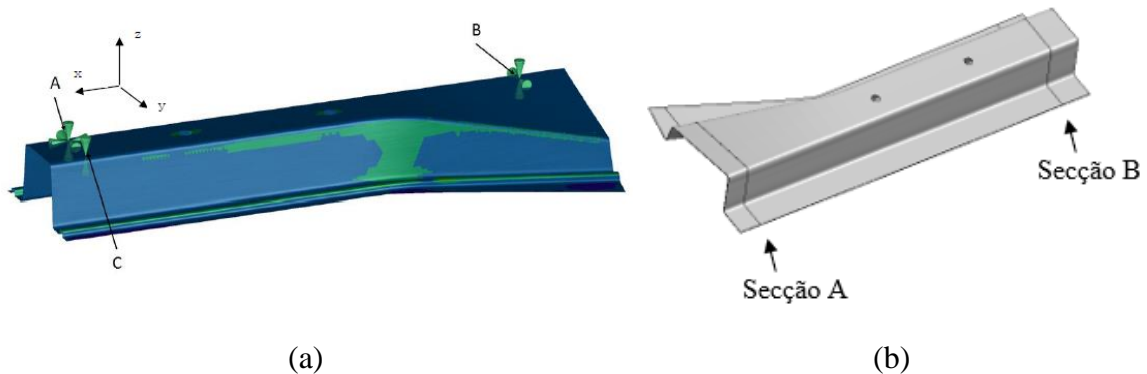


Figura 4.32. Representação: (a) das condições de fronteira para a simulação do retorno elástico [29]; (b) das secções de corte para análise do retorno elástico.

4.4.1. Refinamento no plano

A Figura 4.33 (a) apresenta a evolução da força do punção em função do seu deslocamento. A força apresenta uma evolução aproximadamente linear, após a fase inicial de flexão da chapa sendo que, ocorre um aumento repentino da força, aproximadamente aos 98mm de deslocamento do punção. Este fenómeno resulta da chapa estar sujeita ao duplo contacto, entre o punção e a matriz, que apresentam um valor de folga constante, ligeiramente superior à espessura da chapa. As malhas I2 e R2 apresentam evoluções idênticas, sendo que a malha G2 é a única que claramente sobrestima a força do punção, devido à maior dimensão do elemento na direção Oy na zona da parede vertical (ver Figura 4.31). A semelhança entre os resultados obtidos com as malhas NC e R2 é notória. A malha MCU conduz a menores valores de força a partir dos 60 mm, o que pode estar associado ao maior refinamento no plano da chapa. Para uma melhor perceção da qualidade dos resultados, recorre-se à evolução do erro da força do punção em função do seu deslocamento, apresentada na Figura 4.33 (b). As malhas G2, I2, NC e MCU atingem um valor máximo de erro de 179,51%, 31,27%, 22,37% e 41,60%, respetivamente. É clara a distinção da malha G2 e a evolução do erro quase constante (aproximadamente -20%) da malha I2.

A Figura 4.34 apresenta o perfil da chapa após o retorno elástico para as secções A e B. Globalmente, é mais fácil analisar a Secção B, localizada na zona em linha reta (ver Figura 4.32), uma vez que a Secção A apresenta diferentes rotações da zona do topo do perfil, em contacto com o punção. Na Secção B, verifica-se que o retorno elástico é subestimado pela malha G2, e um ligeiro desvio da I2 relativamente às malhas R2, NC e MCU. O perfil das malhas R2, NC e MCU são muito próximos, com um desvio quase

imperceptível da malha NC. Também para a Secção A, a malha G2 é a que apresenta maior desvio no perfil após o retorno elástico. A malha I2 mostra um pequeno desvio na extremidade esquerda, e as malhas I2 e NC são coincidentes na região mais à direita. A diferença no retorno elástico na zona inclinada e na flange direita é bastante acentuada entre as malhas conformes. No entanto, se os perfis forem sujeitos a rotação em torno do eixo Ox , verifica-se uma semelhança de resultados do perfil na zona superior e na flange à direita, de forma que ficam coincidentes com a malha MCU. A não sobreposição dos perfis obtidos com as diferentes malhas resulta do retorno elástico torsional, existente nesta secção desta geometria.

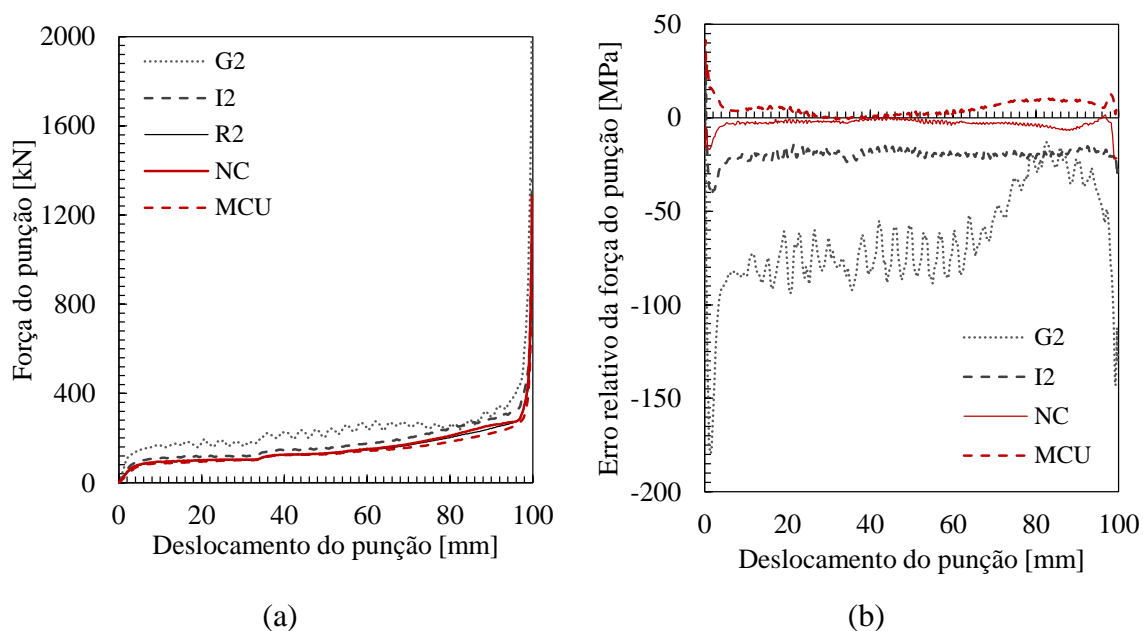


Figura 4.33. Conformação de um componente automóvel com refinamento no plano: (a) evolução da força do punção em função do seu deslocamento; (b) evolução do erro relativo da força do punção em função do seu deslocamento.

A Figura 4.35 (a) relaciona o tempo de simulação com o número de elementos. Observa-se que a malha R2 é a malha conforme com maior tempo de simulação, uma vez que apresenta um maior número de elementos. A malha NC, que contém aproximadamente o dobro dos elementos da R2, demora aproximadamente mais 50% do tempo da R2. A malha MCU é, de todas as malhas, a que tem maior tempo de simulação, aproximadamente mais 64% e 81% que as malhas NC e R2, respetivamente. A Figura 4.35 (b) apresenta o número de incrementos executados. Observa-se um aumento gradual entre as malhas conformes, inferior na G2 e superior na R2. A malha NC possui um maior número de incrementos, bem

como uma maior quantidade de elementos, acompanhada pela malha MCU que, apesar de ter aproximadamente o dobro de elementos da NC, executa um número de incrementos muito próximo. A Figura 4.36 apresenta a média de iterações por incremento. A malha R2 apresenta a média mais elevada entre as malhas conformes, com um aumento gradual, menor na G2 e intermédio na I2, com diferença de duas iterações entre as malhas. A NC tem uma média inferior à malha I2 e R2, apesar de possuir mais elementos, porém a malha MCU é a malha que, de todas, apresenta uma média mais elevada, de aproximadamente mais duas iterações que a R2, e mais 4 que a NC.

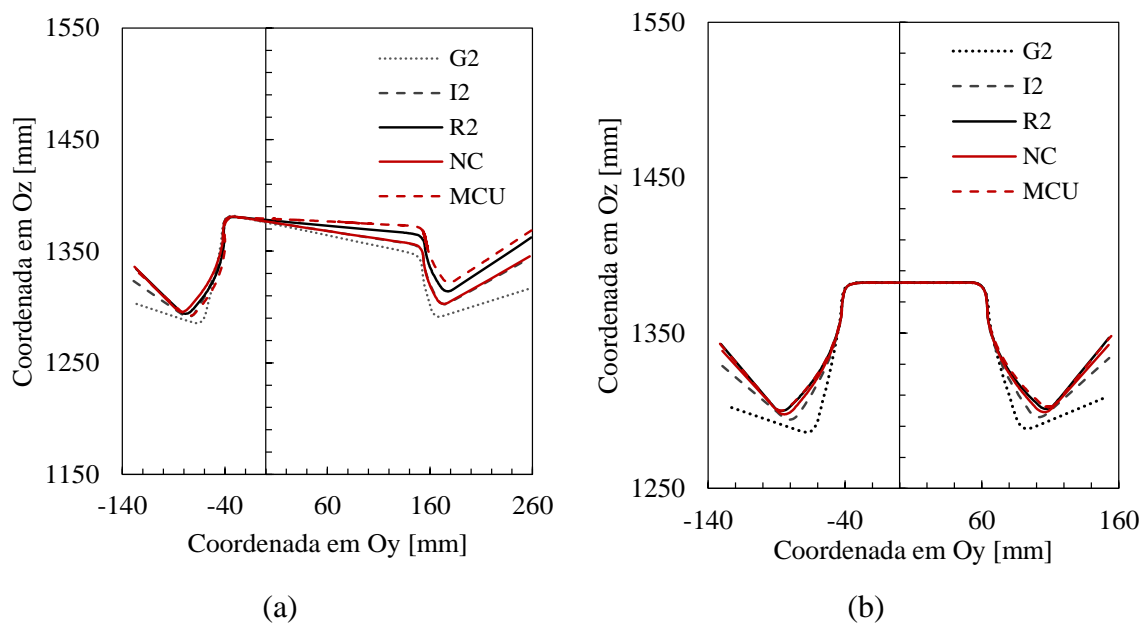


Figura 4.34. Conformação de um componente automóvel com refinamento no plano: (a) perfil após o retorno elástico para a Secção A; (b) perfil após o retorno elástico para a Secção B.

Através dos resultados analisados, é possível concluir que o refinamento no plano tem influência sobre a precisão dos resultados. Verifica-se que, para a malha G2, com menos elementos nas direções O_x e O_y , as previsões da força do punção e do retorno elástico apresentam um desvio considerável e muito insatisfatório. O mesmo verifica-se para a malha I2, apesar dos desvios serem inferiores. As malhas R2 e MCU têm uma grande proximidade de resultados, com uma forte coincidência no perfil após o retorno elástico. Apesar do menor número de elementos na R2 comparativamente à MCU, a previsão do perfil após o retorno elástico é muito próxima, para ambas as secções, apesar do retorno elástico torsional. A malha NC torna-se mais vantajosa porque o tempo de simulação é muito mais reduzido do que para a malha MCU, uma vez que o menor número de elementos conduz a um menor

número de incrementos executados e uma média de iterações por incremento mais baixa. Assim, adota-se a discretização no plano R2, para analisar a influência do número de elementos em espessura, na secção seguinte.

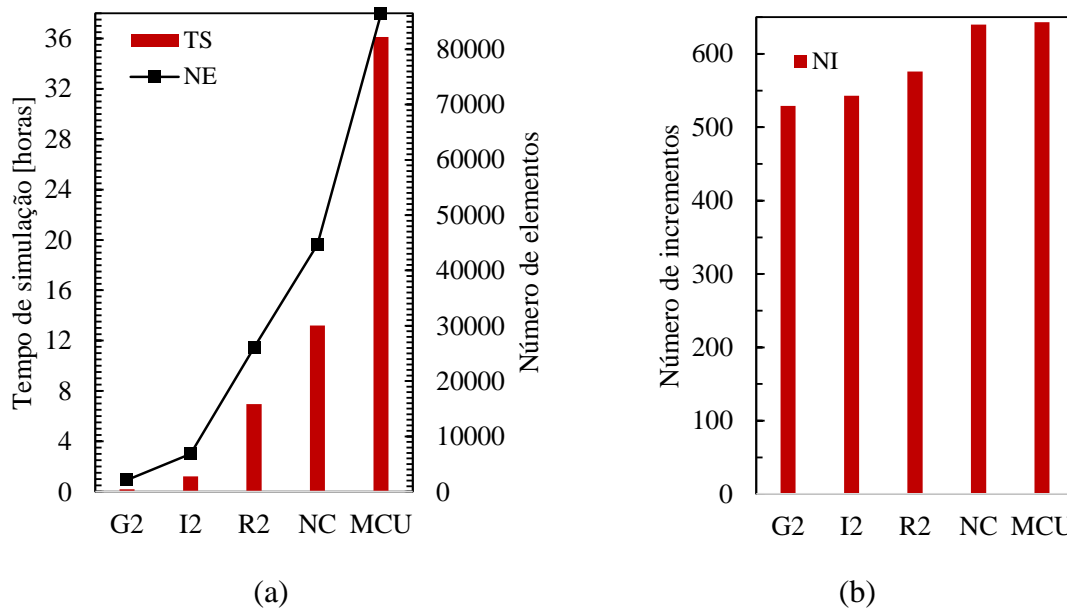


Figura 4.35. Conformação de um componente automóvel com refinamento no plano: (a) comparação entre o tempo de simulação (TS) e o número de elementos (NE); (b) número de incrementos (NI) executados.

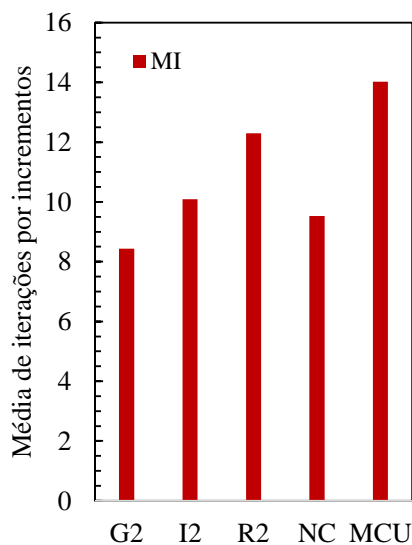


Figura 4.36. Conformação de um componente automóvel com refinamento no plano: quantidade média de iterações (MI) por incremento.

4.4.2. Refinamento na espessura

A Figura 4.37 (a) apresenta a evolução da força do punção em função do seu deslocamento. Observa-se o mesmo aumento súbito da força analisado no estudo do refinamento no plano. Neste caso, apenas a malha R1 apresenta resultados menos precisos, com a força a ser subestimada. Apesar de muito próximos, a malha NC tem um erro máximo inferior à R2, relativamente à malha de referência (R4). O erro da força do punção, apresentado na Figura 4.37 (b), atinge valores máximos de 52,73%, 37,99% e 33,18% para as malhas R1, R2 e NC. No entanto, importa mencionar que na fase de calibração o erro é maior para a malha NC, o que pode estar relacionado com a discretização mais grosseira da zona não estruturada (ver Figura 4.31). A Figura 4.38 apresenta o perfil do retorno elástico para ambas as secções, A e B. Globalmente, a malha R1, que contém apenas uma camada na espessura, apresenta um perfil de retorno elástico com uma geometria diferente das restantes malhas. Relativamente à Secção A, verifica-se uma semelhança entre as malhas R2 e R4 ao longo de todo o perfil, marcado novamente pelo retorno elástico torsional, daí os perfis não serem totalmente coincidentes. O mesmo verifica-se para a malha NC, que apresenta um comportamento muito semelhante às malhas R2 e R4. Na secção B observa-se um ligeiro desvio da malha R2 relativamente à malha R4, e uma forte coincidência dos perfis obtidos com as malhas R4 e NC.

A Figura 4.39 (a) relaciona o tempo de simulação com o número de elementos. Observa-se que a malha NC apresenta uma boa vantagem na relação entre o tempo de simulação e o número de elementos, comparativamente à malha de referência (R4). Relativamente ao número de incrementos, presente na Figura 4.39 (b), a malha R4 requer o menor número de incrementos comparativamente às restantes malhas. A malha R2 é a que faz um número de incrementos mais próximo da R4, comparativamente às malhas R1 e a NC, que executam um maior número de incrementos. A Figura 4.40 apresenta o número médio de iterações por incremento. A malha R1 é a malha que tem a maior média de iterações por incremento, na ordem das 14 iterações, mais duas que a R2 e R4, que têm uma média idêntica, apesar de terem um número de elementos distinto. Estes resultados indicam que o número médio de iterações por incremento está mais relacionado com a discretização no plano e o número de nós em contacto, sendo menos afetado pelo número de camadas em espessura. A malha NC é a que tem menor média de iterações, de aproximadamente 9 iterações, comparativamente com as restantes malhas, mas é também a malha que requer

mais incrementos. Apesar de conter mais elementos que G2 e R2, a malha NC tem uma média de iterações por incremento inferior.

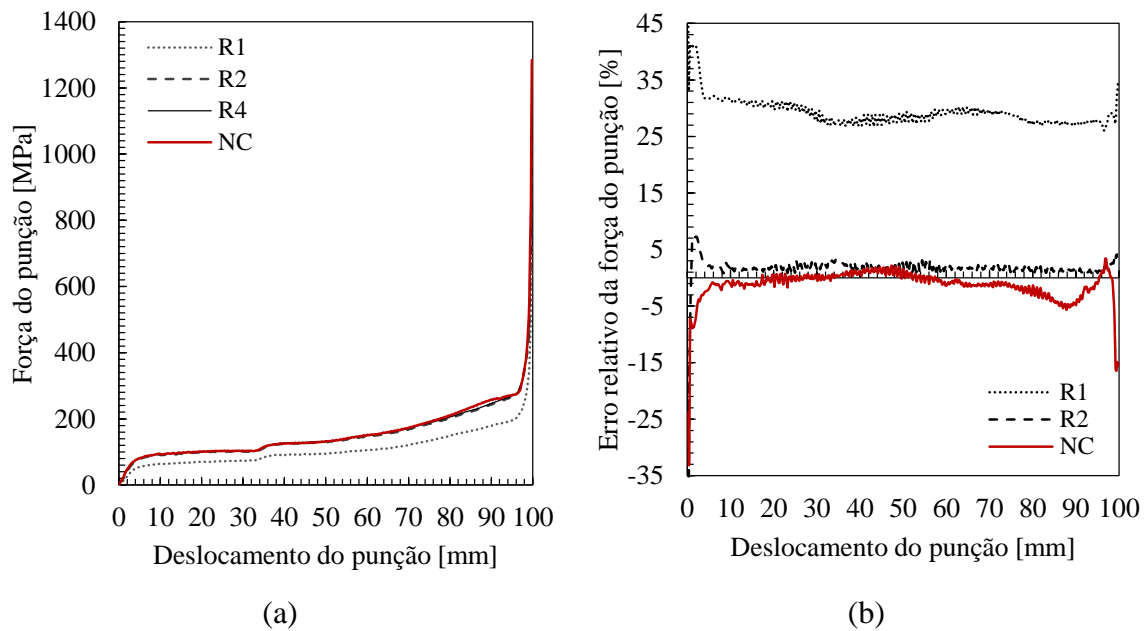


Figura 4.37. Conformação de um componente automóvel com refinamento na espessura: (a) evolução da força do punção em função do seu deslocamento; (b) evolução do erro relativo da força do punção em função do seu deslocamento.

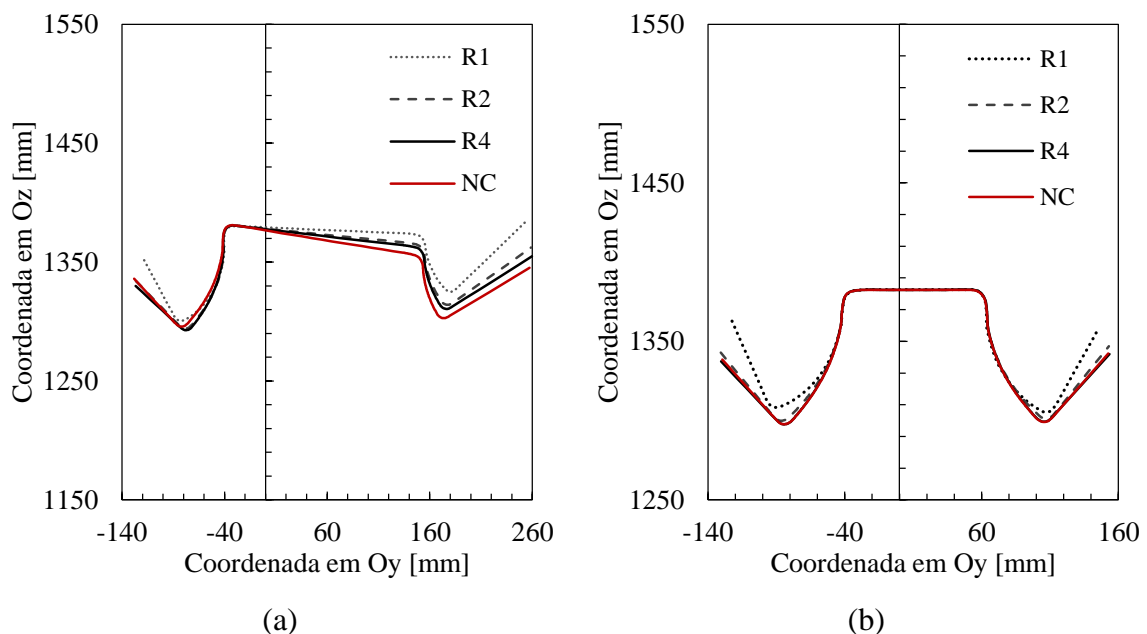


Figura 4.38. Conformação de um componente automóvel com refinamento na espessura: (a) perfil após o retorno elástico para a Secção A; (b) perfil após o retorno elástico para a Secção B.

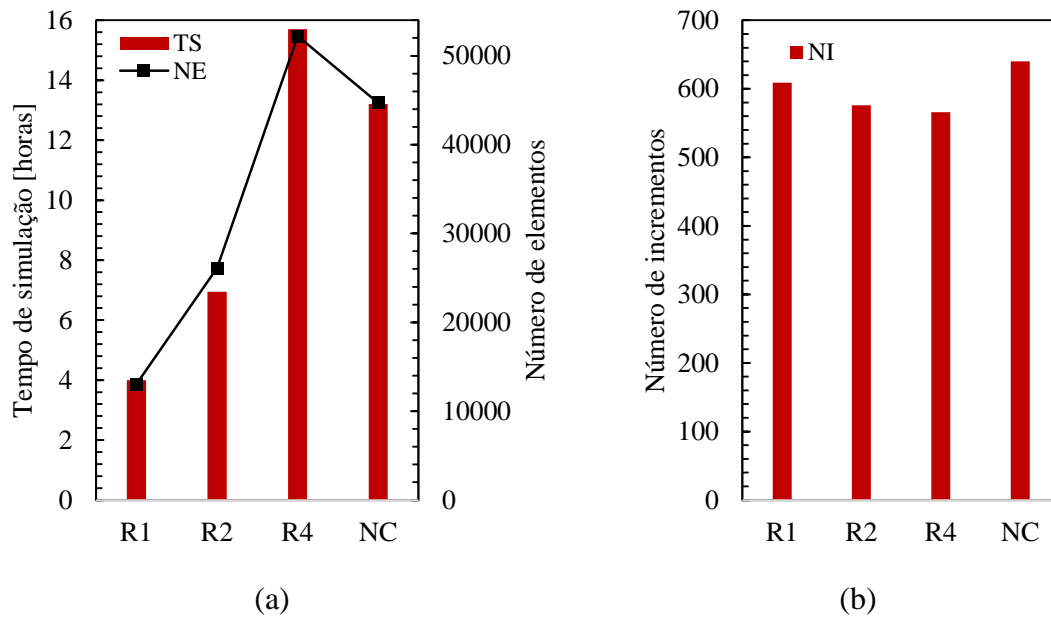


Figura 4.39. Conformação de um componente automóvel com refinamento na espessura: (a) comparação entre o tempo de simulação (TS) e o número de elementos (NE); (b) número de incrementos (NI) executados.

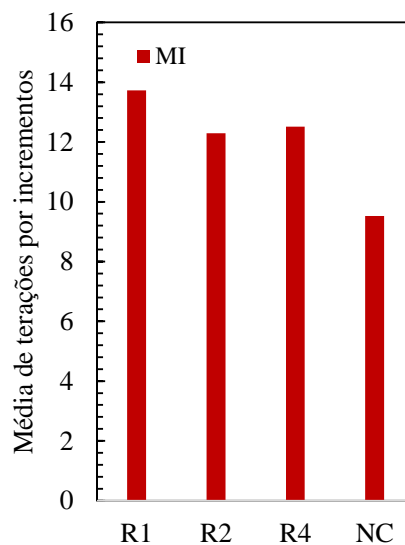


Figura 4.40. Conformação de um componente automóvel com refinamento na espessura: quantidade média de iterações por incremento em função do número de elementos.

À semelhança do caso do estudo do refinamento no plano, o refinamento na espessura também influencia os resultados obtidos, quer a nível da evolução de força do punção, quer a nível da previsão do retorno elástico. Observa-se que, apenas com um elemento na direção da espessura (malha R1), o perfil após o retorno elástico apresenta uma

forte disparidade em relação às restantes malhas conformes. A utilização de duas camadas de elementos na espessura já permite uma melhor previsão do retorno elástico, porém com a presença de desvios em algumas regiões. O retorno elástico torsional dificulta a observação da coincidência de perfis entre as malhas R2 e R4, mas esta verifica-se. A malha NC é a que possui resultados mais próximos dos da malha R4, com um desvio muito reduzido ou quase impercetível. Estes resultados são justificados pelo modelo de discretização da malha NC, com um tamanho de elementos igual ao da malha R4 em zonas críticas, o que se traduz em quatro elementos na direção da espessura.

5. CONCLUSÕES

A necessidade de reduzir os tempos de computação das simulações numéricas motiva o estudo de alternativas que garantam a obtenção de resultados com uma precisão elevada. A alternativa estudada neste trabalho foi a implementação de malhas não conformes de elementos finitos hexaédricos trilineares em simulações numéricas de conformação de chapas metálicas. As malhas não conformes permitem, contrariamente às malhas conformes, refinar zonas críticas com elementos de menor tamanho, e manter as restantes regiões de menor interesse com tamanhos de elemento maiores. A discretização de um sólido em zonas mais grosseira e mais refinadas permite a redução do número de elementos, relativamente às malhas uniformes.

Neste estudo foram utilizadas malhas conformes e malhas não conformes geradas através de duas estratégias distintas. As malhas conformes foram geradas no programa de pré-processamento GiD, por definição de diferentes tamanhos de elemento. As malhas não conformes foram geradas com recurso a um algoritmo de refinamento seletivo. A base para a aplicação deste algoritmo é uma malha conforme (grosseira), para a qual são selecionados os níveis de refinamento e as direções de refinamento. Assim, as malhas não conformes são constituídas por diferentes tamanhos de elemento. Nas malhas não conformes, as zonas críticas, que sofrem maior deformação plástica ou apresentam gradientes na distribuição de variáveis locais, são as zonas sujeitas a um maior refinamento. As zonas que sofrem pouca ou quase nenhuma deformação são zonas constituídas por tamanhos de elementos que correspondem ao menor nível de refinamento. A análise de resultados é efetuada através da comparação entre as malhas conformes, e entre as malhas conformes e não conformes. Assim, as malhas conformes foram construídas de forma a corresponderem aos diferentes graus de refinamento das malhas conformes. A definição das direções de refinamento permite também analisar a influência do refinamento no plano e na direção da espessura de forma independente. Os parâmetros de comparação para análise da precisão dos resultados incluem a evolução de variáveis globais, como a força exercida pelas ferramentas, bem como de variáveis locais, com a distribuição da espessura ou o perfil do componente após retorno elástico. A análise da performance computacional é realizada com

base no tempo de simulação, o número de incrementos executado, a média de iterações por incremento e o número de elementos.

Em geral, as malhas não conformes, apresentam resultados bastante satisfatórios, muito próximos dos obtidos com recurso à malha conforme com maior nível de refinamento. A sensibilidade dos resultados numéricos ao refinamento no plano e ao refinamento na direção da espessura, observada nas malhas conformes, repercute-se nas malhas não conformes. Assim, o nível de refinamento no plano adotado nas zonas identificadas como críticas deve permitir a descrição dos gradiente de tensão, induzidos pelos processos de flexão, de modo a permitir uma correta previsão do retorno elástico. No caso específico deste parâmetro, o refinamento na direção da espessura permite aumentar o número de pontos de integração. Estes pontos são necessários para a correta descrição do gradiente de tensões ao longo da espessura e, portanto, quantas mais camadas existirem na espessura, mais precisos são os resultados. A previsão do retorno elástico requer a utilização de discretizações em espessura com elementos aproximadamente cúbicos, nas zonas críticas. A utilização de malhas não conformes permite obter discretizações que cumprem estas condições, com um menor número de elementos do que as malhas conformes.

No global, os resultados obtidos com malhas não conformes apresentam um erro relativo, determinado comparativamente com a malha conformes mais refinadas, muito reduzido na força máxima de conformação (<15%) e na variação da espessura (<5%). Conclui-se, também, que a utilização de malhas não conformes permite reduzir bastante os tempos de simulação, que é um aspeto fundamental na área da simulação numérica de processo de conformação de chapas metálicas. De modo a corroborar esta última afirmação, a Figura 5.1 apresenta o tempo de computação em função do número de elementos, para os diferentes caso de estudo analisados no âmbito deste trabalho. Para referência todas as simulações foram realizadas num computador com um processador Intel® core™ i7-2600k CPU @ 3.4 GHz (16 GB RAM). Na figura recorre a escalas logarítmicas para facilitar a interpretação dos resultados, que evidenciam a diferença entre as simulações que envolvem e que não envolvem contacto com as ferramentas, sendo que as últimas apresentam menores tempos de cálculo para um número idêntico de elementos. A análise da figura também mostra a influência da condição de deformação plana no tempo de cálculo, uma vez que reduz o número de graus de liberdade. Na verdade, uma análise rigorosa implica a avaliação dos graus de liberdade, mas como este parâmetro varia nos problemas que envolvem

contacto com atrito, optou-se por manter o número de elementos. Na Figura 5.1 são assinalados com símbolos de maiores dimensões as discretizações não conformes, que conduzem a erros relativos reduzidos em relação à discretização mais refinada, quer para variáveis globais, quer locais. No pior dos casos, o recurso a uma malha não conforme permitiu uma redução do tempo de cálculo de 10%, que corresponde aproximadamente a 2 horas.

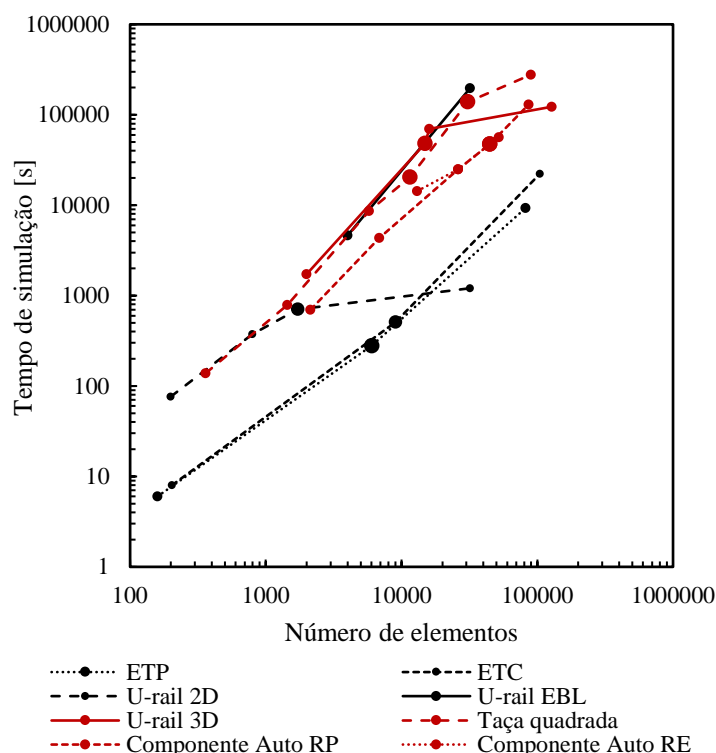


Figura 5.1. Comparação entre o tempo de simulação (TS) e o número de elementos (NE), para os diferentes exemplos estudados no âmbito deste trabalho. Os símbolos com maior diâmetro correspondem às malhas não conformes.

O estudo realizado permitiu também concluir que a construção das malhas não conformes exige algum cuidado na definição das zonas críticas e do tamanho de elemento utilizado na malha conforme de base. O algoritmo implementado não permite recuperar a definição geométrica, mas apenas refinar as zonas lineares definidas na malha conforme utilizada como inicial, como evidenciado no exemplo da tração de um provete cilíndrico. Esta pode ser uma oportunidade de melhoria para estudos futuros, que exige a alteração do algoritmo de modo a garantir a correlação com a geometria do componente. No entanto, no contexto da conformação de chapas metálicas esta limitação não se revela tão crítica, desde que os esboços não apresentem geometrias muito complexas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. P. Araujo e T. F. Gomes, «Estudo da transferência de calor entre caroço de aço e gás : uso de malhas conformes e não-conformes», Monografia para a obtenção do título de Bacharel, Universidade de Brasília, 2015.
- [2] W. H. Vieira, «Sobre o estudo de modelos numéricos aplicados à simulação multiescala do comportamento de estruturas de concreto», Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2021.
- [3] M. Tosati, «Estudo sobre a aplicabilidade de um novo método de acoplamento para malhas não conformes de elementos finitos em projetos mecânicos», Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista, 2019.
- [4] «GiD - The personal pre and post processor | GiD is a universal, adaptive and user-friendly pre and postprocessor for numerical simulations in science and engineering.» <https://www.gidhome.com/> (acedido Abr. 14, 2021).
- [5] T. Altan e A. E. Tekkaya, *Sheet Metal Forming Fundamentals*. ASM International, 2012.
- [6] E. B. Filho, I. B. Da Silva, G. F. Batalha, e S. T. Button, *Conformação Plástica dos Metais*, 6ª Edição. 2011.
- [7] P. S. P. Pião, «Modelação e Simulação Numérica de Processos de Conformação Plástica de Metais», Dissertação de mestrado, Universidade de Aveiro, 2010.
- [8] L. C. dos Reis, «Estudo dos parâmetros de influência na simulação numérica de estampagem de chapas», Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.
- [9] T. F. Neves, «Simulação Numérica do Retorno Elástico de um Componente Automóvel», Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra, 2016.
- [10] S. A. G. Oliveira, «Simulação numérica de processos de conformação mecânica», *POSMEC*, 2003.
- [11] M. A. Ablat e A. Qattawi, «Numerical simulation of sheet metal forming: a review», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 89, n. 1–4, pp. 1235–1250, Mar. 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9103-5.

- [12] J. M. F. Duarte, «Conformação plástica de chapas metálicas: simulação numérica e caracterização mecânica», Dissertação de doutoramento, Universidade do Porto, 1997.
- [13] P. da Silva, «Análise Do Uso De Escalas Nas Simulações de Processos de Estampagem», Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2016.
- [14] D. W. Jung e K. B. Yang, «Comparative investigation into membrane, shell and continuum elements for the rigid-plastic finite element analysis of two-dimensional sheet metal forming problems», *J. Mater. Process. Technol.*, pp. 185–190, 2000.
- [15] ABAQUS, «About the element library». <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEELMRefMap/simaelm-c-general.htm> (acedido Jun. 29, 2021).
- [16] C. A. T. Paitan, «Modelagem numérica de fluxo em meios fraturados e meios porosos fraturados», Dissertação de mestrado, Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2013.
- [17] R. ARAUJO DE SOUSA, «Adaptatividade geométrica e numérica na geração de malhas de elementos finitos em 2D e 3D», Dissertação de mestrado, Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- [18] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, e J. Z. Zhu, *The finite element method: its basis and fundamentals*, 6th Editio. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [19] O. J. B. d’Almeida Pereira, «Utilização de elementos finitos de equilíbrio em refinamento adaptativo», Tese de doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, 1996.
- [20] C. M. J. O. A. Andrade, «Numerical modelling of the Selective Laser Melting additive manufacturing process», 2020.
- [21] B. M. da S. V. Marques, «Selective Refinement Algorithm», 2020.
- [22] B. M. Marques, D. M. Neto, e M. C. Oliveira, «An octree-based adaptive mesh refinement for additive manufacturing», *1st Virtual Iber. Conf. Struct. Integr.*, 2020.
- [23] T. P. Fries, A. Byfut, A. Alizada, K. W. Cheng, e A. Schröder, «Hanging nodes and XFEM», *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 86, n. 4–5, pp. 404–430, 2011, doi: 10.1002/nme.3024.
- [24] E. E. Cabezas e D. J. Celentano, «Experimental and numerical analysis of the tensile test using sheet specimens», *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 40, pp. 555–575, 2004,

- doi: 10.1016/S0168-874X(03)00096-9.
- [25] R. R. L. Amaral, «Modelação Numérica de Processos de Conformação Plástica de Chapas», Dissertação de mestrado, Universidade do Porto, 2013.
- [26] L. Taylor, J. Cao, A. P. Karafillis, e M. C. Boyce, «Numerical simulations of sheet-metal forming», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 50, n. 1–4, pp. 168–179, 1995, doi: 10.1016/0924-0136(94)01378-E.
- [27] L. Papeleux e J.-P. Ponthot, «Finite element simulation of springback in sheet metal forming», *J. Mater. Process. Technol.*, pp. 785–791, 2002.
- [28] R. Padmanabhan, M. C. Oliveira, A. J. Baptista, J. L. Alves, e L. F. Menezes, «Study on the Influence of the Refinement of a 3-D Finite Element Mesh in Springback Evaluation of Plane-Strain Channel Sections», *Int. Conf. Numer. Methods Ind. Form. Process.*, 2007.
- [29] «Springback Prediction of Twist Die Panel», *2020 Numisheet Benchmark 1*, n. 2, pp. 1–11, 2020.