



• U • C •

FCTUC

FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Otimização da geometria inicial da chapa no processo de estampagem

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e
Gestão Industrial

Blank shape optimization for sheet metal forming processes

Autor

Telma Sofia Marques Morgado

Orientador

Diogo Mariano Simões Neto

Júri

Presidente	Professor Doutor Cristóvão Silva Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogais	Professora Doutora Marta Cristina Cardoso de Oliveira Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Diogo Mariano Simões Neto Professor Convidado da Universidade de Coimbra

Coimbra, Julho de 2016

“Para o trabalho que gostamos, levantamo-nos cedo e fazemo-lo com alegria.”

William Shakespeare

Agradecimentos

O trabalho aqui apresentado apenas foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais faço questão de prestar o meu reconhecimento.

Ao professor Doutor Diogo Neto, *pela confiança depositada e orientação de excelência, por toda a disponibilidade e conselhos assertivos, por todo o saber que transmitiu, pela rigorosa competência com que rege o seu trabalho, pelo o apoio incondicional nas minhas decisões, pelos incentivos constantes, pela boa disposição diária, pela honestidade e humildade e principalmente pela amizade.*

À Professora Doutora Marta Cristina Cardoso de Oliveira, *por todo o carinho com que me recebeu, por toda a disponibilidade que demonstrou em todas as minhas dúvidas e todos os bons conselhos que me deu, pelo apoio incondicional e pela alegria contagiante.*

Ao André Jacinto, André Pereira, ao João Martins, ao Pedro Barros, ao Pedro Prates, Rui Leal e ao Vasco Simões, *pela disponibilidade e apoio, pelos bons conselhos e bons momentos, pelas teorias moribundas, pelas gargalhadas que proporcionaram e sobretudo pela amizade.*

Aos meus pais, *por acreditarem em mim cegamente, pelo apoio incondicional, por compreender todas as minhas ausências e esquecimentos, pelo carinho com que me recebem, pela preocupação constante e principalmente pelo orgulho que sentem em mim.*

Ao Gonçalo e à Leonor, *por me apoiarem e inspirarem involuntariamente.*

À minha irmã, *por ser a minha fonte de inspiração e o meu maior orgulho.*

À minha restante família, *pelo carinho e preocupação que demonstraram.*

À Daniela, à Filipa e à Mafalda, *pelo apoio e amizade incondicionais, pelo carinho constante, pelas tardes e noites de conversa, pelos abraços nos dias certos, por compreenderem as minhas ausências e os meus raros telefonemas. Principalmente, por estarem presentes e por serem eternas.*

À Andreia, à Vera, à Joana, à Francisca, à Ana e ao José Pedro, *um obrigada por partilharem as loucuras comigo, pelas noites bem passadas, pelos momentos de alegria, pelo confiança indiscutível, pela sinceridade e amizade constante e por estarem sempre do meu lado.*

À Sílvia, ao Tiago, ao Carlos, ao Paulo, ao Fábio, à Sylvie e à Diana, *pelo companheirismo, pelos momentos divertidos e bem passados, pelos sorrisos partilhados, pelos abraços nos dias menos bons, pela confiança que depositam em mim, pela compreensão, pelos bons conselhos e acima de tudo obrigada por sermos uma família.*

Aos restantes membros do Grupo de Tecnologia Mecânica, *pela disponibilidade, partilha de experiências e bom ambiente que proporcionaram.*

Aos de Coimbra, *por todos os anos maravilhosos de companheirismo.*

O presente trabalho foi realizado no âmbito do projeto “*Improving the manufacturing of metallic bipolar plates for fuel cells using the rubber forming process*” com a referência PTDC/EMS-TEC/0702/2014, cofinanciado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia e pelo EU/FEDER, através do programa COMPETE2020 com referência POCI-01-0145-FEDER-016779.

Resumo

Os processos de conformação plástica de chapas metálicas têm atualmente uma importância crucial em diversas indústrias produtivas, nomeadamente na indústria automóvel. O objetivo deste trabalho é desenvolver um algoritmo de otimização capaz de prever rapidamente e com precisão a geometria a utilizar no esboço inicial. Deste modo, o desperdício de matéria-prima resultante do corte de material em excesso após a operação de conformação é reduzido ou mesmo eliminado.

O presente trabalho é exposto de forma sequencial, onde inicialmente é estudada a influência da geometria do esboço na configuração final da peça conformada. De realçar que a geometria final do componente após operação de estampagem é prevista numericamente com o método dos elementos finitos. Nesta fase do estudo são utilizados dois processos de conformação com graus de complexidade distintos: a conformação de um perfil em U e a conformação de uma taça cilíndrica. O algoritmo desenvolvido é baseado nos resultados obtidos com estes exemplos, observando-se uma relação aproximadamente linear entre a dimensão inicial do esboço e o comprimento final da flange, em ambos os casos. Além disso o algoritmo utiliza uma relação analítica obtida através da condição de conservação do volume, assumindo que não existe variação da espessura durante o processo de conformação.

Numa fase posterior, e por forma a validar o algoritmo proposto, foram seleccionados três algoritmos de otimização existentes na literatura, com os quais é comparado o algoritmo proposto. Esta comparação permite observar a superioridade do algoritmo proposto em termos de velocidade de convergência, dado que todos eles têm em comum o facto de a geometria do esboço ser corrigida iterativamente partindo de uma solução inicial. Finalmente, o algoritmo proposto é utilizado para fazer a otimização da geometria do esboço em dois processos de estampagem, um processo de estampagem seguida de estiramento de uma taça cilíndrica e num processo de conformação de uma taça em cruz.

Palavras-chave: Otimização, Geometria do esboço, Estampagem, Simulação numérica, Relações analíticas, Taça em cruz.

Abstract

Sheet metal forming processes present a vital importance in several manufacturing industries, including in the automotive industry. The objective of this work is to develop an optimization algorithm able to predict quickly and accurately the blank shape geometry. This allows to reduce or even eliminate the excess of material resulting from the trimming operation performed after the forming operation.

This study is presented sequentially, where the influence of blank shape geometry on the final configuration of the component is studied firstly. Note that the final geometry after forming operation is provided by numerical simulation using the finite element method. In this stage of the study, two forming examples with different degree of complexity are analyzed: a 2-D bending problem and the forming of a cylindrical cup. The proposed algorithm is developed based on results obtained with these examples, observing an approximately linear relationship between the initial dimension of the blank and the final geometry of the flange. In addition, the algorithm takes into account the relationship provided by the plastic incompressibility condition, assuming that there is no thickness deformation during the forming process.

In order to validate the proposed algorithm, three different optimization algorithms were selected, which are compared with the proposed algorithm. This comparison allows to observe the superiority of the proposed algorithm in terms of convergence speed, since all of them have in common the fact that the blank shape geometry is iteratively modified. Finally, the proposed algorithm is used to optimize the blank shape geometry of two forming processes: a cylindrical cup with drawing and ironing of and the cross-shaped tool forming.

Keywords Optimization, Blank shape, Sheet metal forming, Numerical simulation, Analytical approach, Cross tool forming.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
Simbologia e Siglas	xvii
Simbologia.....	xvii
Siglas	xix
1. Introdução.....	1
1.1. Processos de conformação por deformação plástica.....	1
1.2. Simulação numérica do processo.....	2
1.3. Otimização da geometria do esboço	3
1.4. Objetivos do trabalho e guia de leitura	4
2. Influência da geometria do esboço na configuração final	7
2.1. Conformação de um perfil em U	7
2.1.1. Modelo numérico.....	9
2.1.2. Resultados e discussão	10
2.2. Conformação de uma taça cilíndrica.....	15
2.2.1. Modelo numérico.....	17
2.2.2. Resultados e discussão	18
3. Otimização da geometria do esboço	27
3.1. Algoritmo proposto para otimização do esboço	27
3.2. Algoritmos de otimização existentes	30
3.2.1. Método da Projeção da Fronteira.....	31
3.2.2. Teoria da Conformação Ideal	33
3.2.3. <i>Push-pull</i>	35
3.3. Comparação entre algoritmos de otimização.....	36
3.4. Aplicação do algoritmo proposto (chapa anisotrópica)	39
3.5. Processo de estampagem e estiramento de uma taça cilíndrica.....	43
3.5.1. Resultados e discussão	46
3.6. Conformação de uma taça em cruz.....	50
3.6.1. Resultados e discussão	51
4. Conclusões.....	59
Referências bibliográficas	61
Apêndice A.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema do processo de conformação de um perfil em U e as respectivas variáveis geométricas.	8
Figura 2.2. Discretização das (a) ferramentas utilizadas na conformação do perfil em U e (b) esboço.	10
Figura 2.3. Força do punção em função do seu deslocamento na conformação de um perfil em U, comparando vários comprimentos de esboço.	11
Figura 2.4. Evolução do deslizamento da flange em função do deslocamento do punção na conformação de um perfil em U, comparando vários comprimentos de esboço. .	12
Figura 2.5. Comprimento final da flange em função do comprimento do esboço. Comparação entre resultados numéricos e analíticos.	13
Figura 2.6. Distribuição da espessura ao longo do comprimento do perfil em U (após conformação) para vários comprimentos de esboço.	15
Figura 2.7. Esquema do processo de conformação de uma taça cilíndrica: (a) geometria das ferramentas; (b) conformação final da taça.	16
Figura 2.8. Discretização das (a) ferramentas utilizadas na conformação da taça cilíndrica e (b) $\frac{1}{4}$ do esboço discretizado com elementos finitos.	17
Figura 2.9. Força do punção em função do seu deslocamento na conformação da taça cilíndrica para várias dimensões de esboço (material isotrópico $r=1$).	19
Figura 2.10. Deslizamento da flange em função do deslocamento do punção na conformação da taça cilíndrica para várias dimensões de esboço (material isotrópico $r = 1$).	20
Figura 2.11. Relação entre o comprimento da flange e o raio inicial do esboço para os diferentes coeficientes de anisotropia (r) associados ao material.	21
Figura 2.12. Distribuição da espessura em função da coordenada cilíndrica para: (a) coeficiente de anisotropia $r=1$; (b) coeficiente de anisotropia $r=1.5$	23
Figura 2.13. Deslizamento da flange em função do deslocamento do punção calculada pelo método analítico (taça cilíndrica).	24
Figura 2.14. Comparação entre resultados analíticos e numéricos da espessura final no contorno da flange, de acordo com o coeficiente de anisotropia (r), para os diferentes raios iniciais do esboço (R_0).	26
Figura 3.1. Procedimento utilizado na otimização do esboço inicial.	28
Figura 3.2. Esquematização do processo iterativo utilizado para fazer a otimização da geometria do esboço inicial.	30
Figura 3.3. Esquema do método da projeção da fronteira em duas situações distintas: (a) ponto Q dentro da fronteira do esboço deformado (b) ponto Q fora do esboço deformado (Vafaeesefat, 2011)	32
Figura 3.4. Diagrama esquemático da diferença de volume (a) adição (b) remoção (Park et al., 1999).	34

Figura 3.5. Variáveis intervenientes no método <i>push-pull</i> : (a) conjunto de pontos iniciais e finais; (b) aplicação da técnica (Padmanabhan et al., 2009).	36
Figura 3.6. Evolução do erro geométrico durante o processo iterativo para vários métodos de otimização: (a) erro geométrico em função do número da iteração; (b) módulo do erro geométrico em função do número da iteração.	37
Figura 3.7. Comprimento da flange em função dos vários raios iniciais do esboço utilizados durante o processo iterativo (comparação entre vários algoritmos de otimização).	38
Figura 3.8. Evolução da geometria do esboço e flange durante o processo otimização proposto: (a) raio inicial do esboço em relação à direção de laminagem; (b) comprimento da flange em relação à direção de laminagem.	41
Figura 3.9. Evolução do erro geométrico cometido durante o processo iterativo do algoritmo proposto, aplicado a uma taça cilíndrica com material da chapa anisotrópico.	42
Figura 3.10. Geometria da flange na taça cilíndrica após conformação considerando geometrias diferentes para o esboço: (a) esboço circular (solução inicial); (b) esboço não circular (solução otimizada).	43
Figura 3.11. Esquema representativo das variáveis envolvidas no processo.	45
Figura 3.12. Comportamento do algoritmo proposto quando aplicado ao processo de estampagem e estiramento de uma taça cilíndrica: (a) evolução da fronteira do esboço durante o processo iterativo; (b) evolução da altura da taça durante o processo iterativo.	47
Figura 3.13. Distribuição da espessura no final do processo de estampagem e estiramento: (a) comparação entre três direções diferentes para o esboço inicial circular; (b) comparação entre várias iterações no processo iterativo, considerando a espessura na direção de laminagem.	48
Figura 3.14. Evolução do erro geométrico cometido durante o processo iterativo para o caso de estampagem e estiramento de uma taça cilíndrica.	49
Figura 3.15. Geometria final da taça cilíndrica após estampagem e estiramento: (a) esboço inicial circular; (b) esboço otimizado não circular (2ª iteração).	50
Figura 3.16. Trajetória de deslizamento de alguns pontos pertencentes à fronteira durante a deformação do esboço.	53
Figura 3.17. Comparação entre geometria do esboço e geometria final da fronteira da taça em cruz para várias iterações do algoritmo de otimização.	54
Figura 3.18. Evolução do erro geométrico calculado em cada iteração no processo de otimização da geometria do esboço para a taça em cruz.	55
Figura 3.19. Geometria final da taça em cruz após conformação utilizando o esboço otimizado: (a) vista XY; (b) vista XYZ. A distribuição de cores representa a tensão de escoamento.	55
Figura 3.20. Força exercida pelo punção em função do seu deslocamento para a taça em cruz, comparando as várias iterações do processo de otimização.	56

Figura 3.21. Distribuição da espessura na direção de laminagem no caso da taça em cruz, comparando as várias iterações do algoritmo.....	57
Figura A.1. Passos para criar uma linha reta.	64
Figura A.2. Passos para introduzir a curva NURBS que define a fronteira do esboço.	64
Figura A.3. Evolução da fronteira definida pela curva NURBS com: (a) 1 ponto suplementar e 1 ponto da curva (b) 1 ponto suplementar e 2 pontos da curva (c) 1 ponto suplementar e 3 pontos da curva (d) 1 ponto suplementar e 4 pontos da curva (e) 1 ponto suplementar e 5 pontos da curva (f) 2 pontos suplementares e 5 pontos que definem a curva completa.	65
Figura A.4. Função para interseção da curva NURBS com as linhas retas que define a fronteira.	66
Figura A.5. Ilustração da etapa de interseção com a curva NURBS: (a) eixo horizontal (b) eixo vertical.	66
Figura A.6. Função utilizada para eliminar linhas indesejáveis.	67
Figura A.7. Função utilizada para gerar a superfície da zona exterior do esboço.....	68
Figura A.8. Linha reta adicionada na zona interna do esboço.....	69
Figura A.9. Função utilizada para gerar a superfície que define a zona interna do esboço.	69
Figura A.10. Esboço gerado sem malha de elementos finitos.....	70

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Dimensões das ferramentas de conformação utilizadas no perfil em U.....	8
Tabela 2.2. Propriedades mecânicas do aço macio utilizado na conformação do perfil em U.....	8
Tabela 2.3. Dimensões das ferramentas de conformação utilizadas na taça cilíndrica.	16
Tabela 2.4. Propriedades mecânicas do aço macio utilizado na conformação da taça cilíndrica.....	16
Tabela 2.5. Parâmetros do critério de anisotropia Hill'48 utilizados para descrever o comportamento mecânico da chapa (isotropia no plano) utilizada na taça cilíndrica.....	18
Tabela 3.1. Variáveis utilizadas nos algoritmos de otimização em estudo.	31
Tabela 3.2. Parâmetros do critério de anisotropia Hill'48 utilizados para descrever o comportamento anisotrópico da chapa utilizada na taça cilíndrica.....	39
Tabela 3.3. Dimensões das ferramentas de conformação utilizadas no processo de estampagem e estiramento.....	44
Tabela 3.4. Propriedades mecânicas da liga de alumínio AA5042 utilizada na conformação da taça cilíndrica com estiramento.....	44
Tabela 3.5. Propriedades do aço macio utilizado no processo de estampagem de uma traça em cruz.....	51

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

A_{Cilindro} - Área do cilindro entre o toróide do punção e da matriz

$A_{\text{Círculo}_1}$ - Área do círculo da base

$A_{\text{Círculo}_2}$ - Área do círculo do topo da taça cilíndrica

A_{final} - Área superficial do perfil em U após conformação

A_{inicial} - Área superficial do esboço

$A_{\text{Toróide}_{\text{matriz}}}$ - Área do toróide relativa à matriz

$A_{\text{Toróide}_{\text{punção}}}$ - Área do toróide relativa à curva provocada pelo punção

b - Ordenada na origem

C - Parâmetro da lei de Swift

C_0 - Comprimento inicial do esboço

C_f - Comprimento da flange.

C_{final} - Comprimento do perfil em U após conformação

C_{inicial} - Comprimento do esboço

d - Distância entre geometria deformada e o objetivo

d_p - Deslocamento total do punção

D_p - Diâmetro do punção

D_m - Diâmetro da matriz

D_{m1} - Diâmetro da matriz (estampagem)

D_{m2} - Diâmetro da matriz (estiramento)

E - Módulo de Young

E'_k - Elemento finito k

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

L_m - Largura da cavidade da matriz

L_p - Largura do punção

m - Declive da reta do tipo $y = mx + b$

n - Parâmetro da lei de Swift

N - Número de pontos onde é avaliada a distância

P_1, P_2 - Nós do elemento gerado

P'_1, P'_2, \dots, P'_k - Nós de cada elemento finito

Q - Ponto da fronteira objetivo

r - Coeficiente de anisotropia

R - Raio final do esboço após conformação

R_0 - Raio inicial do esboço

R_1, R_2 - Comprimento do elemento finito gerado

R_{final} - Raio da flange

R_k^{final} - Raio do esboço inicial k deformado

R_k^{inicial} - Raio do esboço inicial k antes da deformação

R_m - Raio de curvatura da matriz

R_{obj} - Raio da flange objetivo

$R_{\text{obj}}^{\text{final}}$ - Raio do esboço objetivo deformado

$R_{\text{obj}}^{\text{inicial}}$ - Raio do esboço objetivo antes da deformação

R_p - Raio de curvatura do punção

S'_p - Projeção da fronteira na malha

t - Espessura final da chapa

t_0 - Espessura inicial da chapa

V_{Final} - Volume da taça cilíndrica após conformação

V_{Inicial} - Volume inicial do esboço

Y_0 - Tensão limite de elasticidade

ΔABC - Volume adicionado/removido ao esboço inicial

Δabc - Volume em excesso/defeito do esboço deformado

- Δ_{erro} - Erro geométrico
- α - Ângulo em relação à direção de laminagem
- δ - Tolerância admissível
- ε_1 - Deformação no plano da chapa
- ε_2 - Deformação no plano da chapa
- ε_3 - Deformação em espessura
- ε_σ - Deformação na direção circunferencial
- ε_w - Deformação na direção radial
- ε_t - Deformação em espessura
- λ - Coeficiente da função exponencial
- μ - Coeficiente de atrito
- ν - Coeficiente de Poisson
- ξ - Coeficiente de amortecimento

Siglas

- CAD – Computer Aided Design
- DD3IMP – Deep Drawing 3D IMPLICIT code
- MEF – Método de Elementos Finitos
- NURBS – Non Uniform Rational Basis Spline

1. INTRODUÇÃO

Com o crescente desenvolvimento do mundo industrial e a progressiva redução de recursos naturais e matéria-prima, torna-se imprescindível trazer a palavra otimização como uma das mais importantes neste meio. Devido à cadência de produção exigida, as empresas têm, muitas vezes, desperdício de matéria-prima e matéria semiacabada em quantidades que se refletem na fatura anual de forma assustadora. Assim, otimizar processos torna-se mais uma vez uma atividade fundamental com obrigatoriedade de implementação.

1.1. Processos de conformação por deformação plástica

O processo tecnológico de estampagem consiste em conferir, por deformação plástica, uma determinada forma a uma chapa fina que traduza o componente que se pretende produzir. Com efeito, são utilizadas ferramentas (punção, cerra-chapas e matriz) que promovem o escoamento do material no estado sólido, induzindo deformação plástica no material (Oliveira, 2005). Geralmente a fase inicial está associada ao aperto do cerra-chapas, este exerce uma força sobre o esboço e contra a matriz, impedindo a formação de defeitos e controlando o escoamento do esboço durante todo o processo. De seguida inicia-se a fase de avanço do punção, caracterizada pelo deslocamento do mesmo entre a cavidade definida pela matriz, sendo ele responsável por dar forma ao esboço inicialmente plano (Alves, 2003). A sua capacidade de produção com alta cadência faz com que este tipo de processo seja especialmente adequado para a produção de componentes em larga escala.

Efetivamente, o processo tecnológico relativo à conformação plástica de chapas metálicas é um dos mais importantes a nível mundial. Este processo é implementado nas mais diversas áreas de produção, tais como na indústria automóvel, na indústria aeroespacial, na indústria aeronáutica, na indústria dos recipientes alimentares, entre outras. O enorme nível de competitividade instalado na indústria automóvel leva a uma grande pressão no desenvolvimento tecnológico, bem como a necessidade de produzir mais, melhor e a um menor custo. O facto de se objetivar um automóvel perfeito com um baixo consumo e um

preço coerente, leva à obrigatoriedade de explorar novos materiais aliados à necessidade de recorrer a processos tecnológicos de conformação mais eficientes.

Os custos associados à estampagem de componentes metálicos na indústria automóvel representam uma percentagem considerável no custo total de produção automóvel. Por essa razão, a indústria automóvel tornou-se uma das mais impulsionadoras desta área nas últimas décadas. Sabendo que um automóvel comporta cerca de 500 componentes em chapa, este valor representa cerca de 20% dos custos associados à sua produção (Baptista, 2006). Aliado a estes 20% de custos, estão associadas diversas atividades que não acrescentam valor para a produção, assim como custos de desperdícios e ainda mau aproveitamento de materiais.

1.2. Simulação numérica do processo

A simulação numérica do processo de estampagem de chapas metálica têm sido um tópico de investigação desde o final dos anos 80. Apesar da complexidade associada a este processo, o desenvolvimento feito nas últimas décadas em termos de ferramentas numéricas de produção virtual tem permitindo melhorar a precisão das soluções numéricas. A simulação numérica permite à indústria efetuar uma validação virtual das ferramentas de estampagem, substituindo os testes experimentais. Assim, os custos envolvidos no desenvolvimento de novos produtos são reduzidos consideravelmente. Além disso, o tempo necessário para introduzir um novo produto no mercado também diminui de igual forma, melhorando a competitividade das empresas.

No entanto, os programas de elementos finitos têm de cumprir um conjunto de requisitos, nomeadamente a nível de fiabilidade e precisão dos seus resultados. Portanto, tem sido dedicado um grande esforço ao desenvolvimento das ferramentas numéricas, especificamente na modelação do comportamento mecânico dos materiais e nos aspetos relacionados com o contacto ferramentas/esboço. Atualmente existem diversos programas de elementos finitos, tanto de carácter comercial como de utilização académica. Independentemente da tipologia do programa, o desenvolvimento destes programas tem sido no sentido de aproximar os resultados dados pela simulação à realidade experimental. De destacar o programa de elementos finitos DD3IMP (*Deep-Drawing 3D IMPLICIT finite element code*) que tem vindo a ser desenvolvido ao longo dos anos pelo Grupo de Tecnologia do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra (Menezes & Teodosiu, 2000).

Para além da precisão, o tempo de cálculo também é um fator muito importante, sobretudo do ponto de vista de utilização industrial. De facto, com a evolução exponencial da tecnologia dos computadores, os tempos de simulação tiveram uma redução drástica na última década. A análise completa por simulação numérica da mesma chapa metálica em 1990 demorava quase 100 vezes mais do que hoje em dia (Baptista, 2006). Apesar da sucessiva evolução do processo de conformação de materiais metálicos, ainda existem parâmetros que deverão ser devidamente estudados. Com a crescente tendência de utilização de novos materiais (mais leves e mais resistentes), alia-se a necessidade de conhecer todas as características mecânicas inerentes a eles. Devido a esta falta de conhecimento tecnológico, após a estampagem do componente metálico podem surgir alguns defeitos de estampagem, nomeadamente retorno elástico, rotura e enrugamento (Andersson, 2005).

1.3. Otimização da geometria do esboço

Uma das variáveis que mais influencia o processo de estampagem é a geometria do esboço utilizado. De facto, a geometria do esboço determina em parte a geometria final do componente, nomeadamente a existência ou não de excesso de material a remover. Uma forma de reduzir o desperdício de matéria-prima (melhor utilização de material) é fazer a otimização da geometria do esboço com recurso a ferramentas de simulação numérica. Deste modo, o objetivo é obter a forma final desejada imediatamente após conformação, não requerendo uma etapa adicional de corte. No entanto, esta abordagem tem a desvantagem de ser mais difícil fazer o controlo do escoamento da chapa e conseqüentemente redução de formabilidade, especificamente na indústria automóvel.

Como já referido, o setor automóvel é o maior impulsionador do desenvolvimento tecnológico nesta área e por isso as empresas tendem a competir cada vez mais objetivando a inovação. A fabricante automóvel Ford recorre à simulação numérica da conformação de chapas metálicas no sentido de desenvolver mecanismos de otimização que evitam o desperdício de matéria-prima (Basu, 2006). A atuação é feita a nível da geometria do esboço para evitar o desperdício. Apesar de parecer irrelevante a quantidade de material desperdiçado no processamento de um componente, quando multiplicado por milhares de milhões de componentes, como acontece na indústria automóvel, a quantidade de material não aproveitado revela-se financeiramente inconsistente.

Na tentativa de resolver este problema, têm vindo a ser desenvolvidos vários algoritmos de otimização, os quais recorrem a um procedimento iterativo baseado na simulação do processo com o método dos elementos finitos. Apesar se existirem muitas variantes, todos têm em comum o facto de a geometria do esboço ser iterativamente corrigida partindo de uma solução inicial. A ideia principal é aumentar (diminuir) a dimensão do esboço caso o componente final tenha uma dimensão inferior (superior) ao objetivo. No entanto, isto requer o desenvolvimento de algoritmos capazes de lidar com geometrias complexas, onde a geometria do esboço pode ter uma forma arbitrária.

1.4. Objetivos do trabalho e guia de leitura

Uma vez que o processo de estampagem de chapas metálicas é caracterizado por ter grandes cadências de produção, uma pequena poupança em cada componente tem um grande impacto no custo total de produção. Uma forma de otimizar recursos é utilizar uma geometria para o esboço que permita produzir um componente sem necessidade de fazer cortes para remover o material em excesso após conformação.

O objetivo deste trabalho consiste em desenvolver um algoritmo de otimização dedicado à previsão da geometria inicial do esboço, minimizando o desperdício de material na operação de corte após estampagem. O método dos elementos finitos será utilizado durante a fase de desenvolvimento e validação do algoritmo. Durante esta fase, o algoritmo proposto vai ser aplicado a diversas geometrias de componentes, permitindo fazer a sua validação para um leque alargado de situações e condições. Uma vez que a maioria dos algoritmos existentes recorrem a um procedimento iterativo (bem como o algoritmo proposto), a avaliação da velocidade de convergência é um ponto crucial.

De modo a facilitar a leitura e consulta desta dissertação, apresenta-se em seguida a estrutura do trabalho, bem como uma breve descrição dos temas abordados em cada capítulo.

Capítulo 1 – Apresenta um resumo do estado atual dos processos de conformação plástica de chapas metálicas, bem como das ferramentas de simulação numérica utilizadas atualmente por parte da indústria. Sendo a geometria do esboço um dos parâmetros do processo, a sua otimização com recurso a ferramentas de produção virtual é brevemente discutida.

Capítulo 2 – Contém o estudo da influência da geometria do esboço inicial na configuração final do componente conformado. Uma vez que esta relação depende de muitos fatores, entre os quais a geometria do componente desejado, são selecionados dois exemplos com diferentes níveis de complexidade: conformação de um perfil em U e a conformação de uma taça cilíndrica. Os resultados obtidos através de simulação numérica mostram que existe uma relação aproximadamente linear entre a geometria inicial do esboço e a geometria final do componente conformado.

Capítulo 3 – Descreve o algoritmo desenvolvido para fazer a otimização da geometria inicial do esboço em processos de conformação plástica de chapas metálicas. Este algoritmo é comparado com outros algoritmos propostos na literatura, permitindo apurar a velocidade de convergência de cada um deles, quando aplicados a um exemplo simples. De seguida, o algoritmo proposto é utilizado para fazer a otimização da geometria do esboço a utilizar em dois processos de estampagem, nomeadamente um processo de estampagem e estiramento de uma taça cilíndrica e na conformação de uma taça em cruz.

Capítulo 4 – Apresenta o resumo das principais conclusões resultantes dos diferentes estudos apresentados e discutidos nos capítulos anteriores.

Anexo A – Descreve o procedimento realizado no programa de pós-processamento **GID** para criar a nova geometria do esboço recorrendo à interpolação com curva **NURBS**.

2. INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO ESBOÇO NA CONFIGURAÇÃO FINAL

Esta secção apresenta o estudo numérico realizado para avaliar a influência da geometria inicial do esboço na configuração final do componente conformado. Para tal, foram selecionados dois exemplos de estampagem com graus de complexidade diferentes, nomeadamente a conformação de um perfil em U (Numisheet 1993) e a conformação de uma taça cilíndrica (Numisheet 2002). Todas as simulações numéricas apresentadas neste estudo foram realizadas com o programa de elementos finitos DD3IMP, o qual tem vindo a ser continuamente desenvolvido e otimizado para simular processos de conformação plástica de chapas metálicas (Menezes & Teodosiu, 2000) (Oliveira, Alves, & Menezes, 2008).

2.1. Conformação de um perfil em U

O perfil em U foi o primeiro exemplo selecionado para estudar a influência das dimensões do esboço nos resultados da conformação. Este exemplo de estampagem foi originalmente proposto no congresso Numisheet 1993 com o objetivo de avaliar o retorno elástico após conformação (Taylor, Cao, Karafillis, & Boyce, 1995). A conformação envolve três ferramentas: o punção, o cerra-chapas e a matriz. A Figura 2.1 apresenta um esquema da geometria das ferramentas de conformação, cujas dimensões se apresentam na Tabela 2.1. O material utilizado é um aço macio cujos parâmetros constitutivos são sumariados na Tabela 2.2. De modo a simplificar a análise, o material é assumido como isotrópico. A força de aperto do cerra-chapas é assumida constante com valor de 19.6 kN, sendo que a fase de conformação termina para um deslocamento do punção de 70 mm. Uma vez que o objetivo é avaliar a influência do comprimento do esboço na dimensão final da flange, a operação de retorno elástico não é simulada. O esboço tem 0.78 mm de espessura e 35 mm de largura.

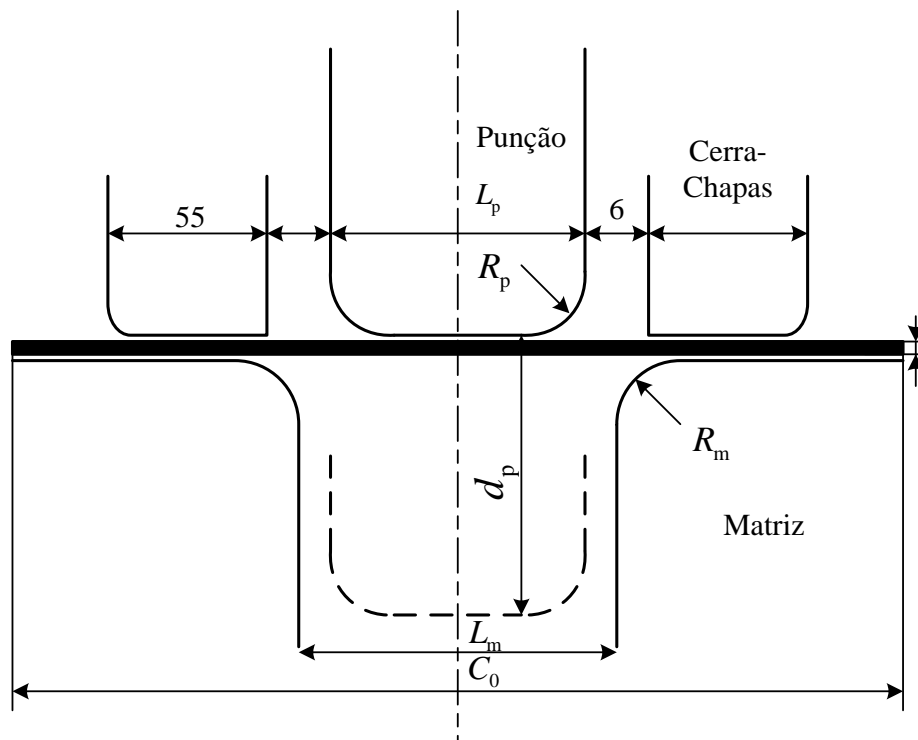


Figura 2.1. Esquema do processo de conformação de um perfil em U e as respectivas variáveis geométricas.

Tabela 2.1. Dimensões das ferramentas de conformação utilizadas no perfil em U.

Variável	Símbolo	Valor [mm]
Largura da cavidade da matriz	L_m	52
Largura do punção	L_p	50
Raio do punção	R_p	5
Raio da matriz	R_m	5
Deslocamento do punção	d_p	70

Tabela 2.2. Propriedades mecânicas do aço macio utilizado na conformação do perfil em U.

Variável	Símbolo	Valor
Módulo de Young	E	206 GPa
Coefficiente de Poisson	ν	0.30
Tensão limite de elasticidade	Y_0	157.12 MPa
Parâmetros da lei de Swift	C	565.32 MPa
	n	0.2589

2.1.1. Modelo numérico

Devido às condições de simetria geométrica e material, simula-se apenas metade do problema. Além disso, devido à grande relação entre largura e espessura do esboço, o processo de conformação é modelado considerando estado plano de deformação, ou seja, não existe deformação em largura. A geometria das ferramentas é discretizada com superfícies Nagata (ver Figura 2.2 (a)) (Neto, Oliveira, Menezes, & Alves, 2014), enquanto o esboço é discretizado com elementos finitos hexaédricos de 8 nós (ver Figura 2.2 (b)) com integração reduzida seletiva (Hughes, 1980). Dado que o raio de curvatura na matriz é de 5 mm (ver Tabela 2.1), o número de elementos finitos utilizado no esboço na direção do comprimento foi escolhido de forma a ter pelo menos 15 elementos finitos para descrever o arco de círculo (tamanho de 0.5 mm). Para descrever corretamente os gradientes ao longo da espessura são utilizadas duas camadas de elementos em espessura. O atrito entre a superfície das ferramentas e o esboço é descrito pela lei de Coulomb, sendo o coeficiente de atrito $\mu = 0.144$. Com o objetivo de quantificar a influência do comprimento do esboço no comprimento da flange após conformação, vários comprimentos de esboço são testados, nomeadamente, $C_0 = 310$ mm, $C_0 = 330$ mm, $C_0 = 350$ mm, $C_0 = 370$ mm e $C_0 = 390$ mm. De notar que apenas metade do comprimento é simulado devido às condições de simetria.

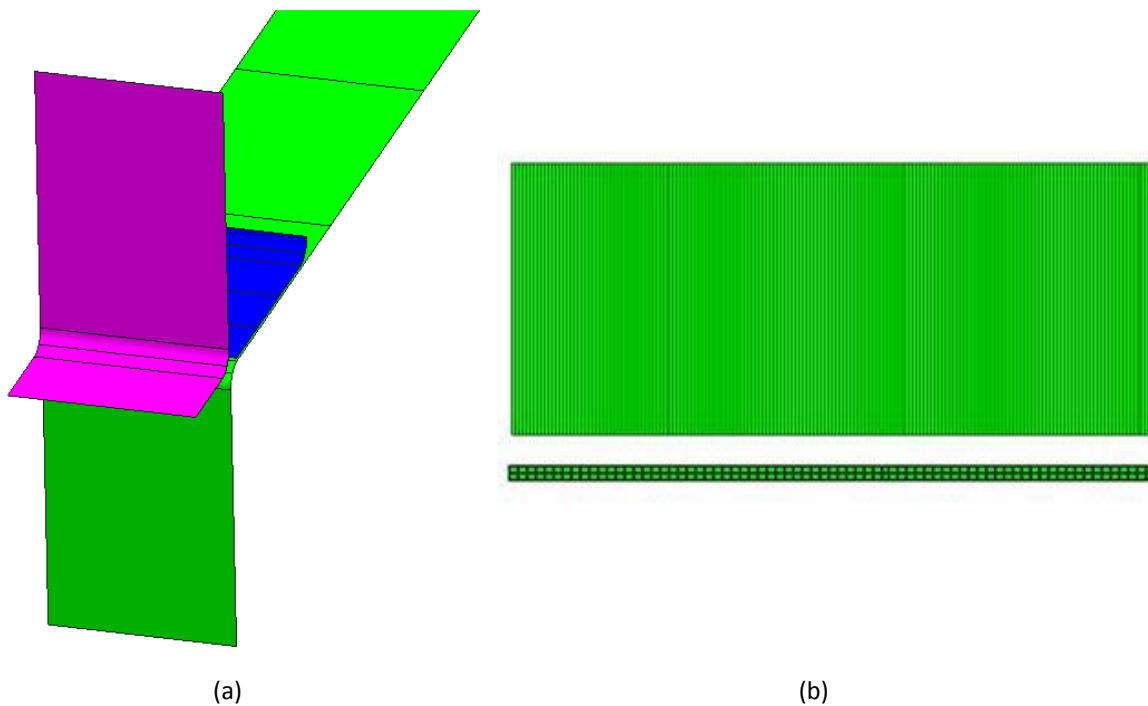


Figura 2.2. Discretização das (a) ferramentas utilizadas na conformação do perfil em U e (b) esboço.

2.1.2. Resultados e discussão

A força exercida pelo punção em função do seu deslocamento é apresentada na Figura 2.3, comparando os vários comprimentos de esboço utilizados na simulação numérica. As oscilações observadas na força resultam de instabilidades numéricas relacionadas com o contacto entre a chapa e a matriz, nomeadamente o tratamento do contacto com elementos do tipo *node-to-segment*. A força tem inicialmente um comportamento crescente aproximadamente linear até atingir 8 kN, tornando-se de seguida constante (regime estacionário). Globalmente, o comprimento do esboço não afeta significativamente a evolução da força do punção, como se mostra na Figura 2.3.

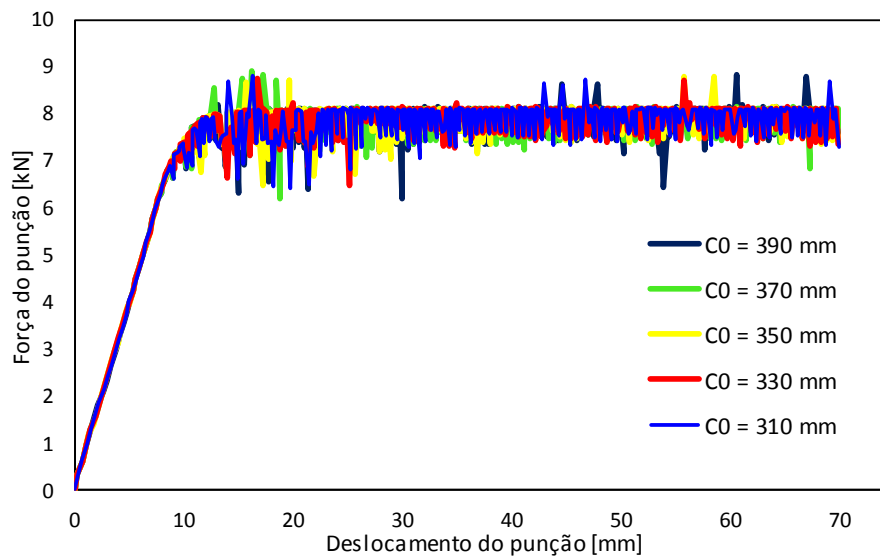


Figura 2.3. Força do punção em função do seu deslocamento na conformação de um perfil em U, comparando vários comprimentos de esboço.

A evolução do deslizamento da flange em função do deslocamento do punção é apresentada na Figura 2.4 para vários comprimentos de esboço. Após aproximadamente 10 mm de deslocamento do punção, existe um aumento linear do deslizamento da flange, o qual coincide com o regime estacionário observado na evolução da força (ver Figura 2.3). Assim, quando o processo de conformação atinge o regime estacionário, o deslizamento da flange evolui de forma proporcional ao deslocamento do punção. Portanto, a evolução do deslizamento da flange na conformação de um perfil em U não é influenciada pelo comprimento inicial do esboço, como se mostra na Figura 2.4.

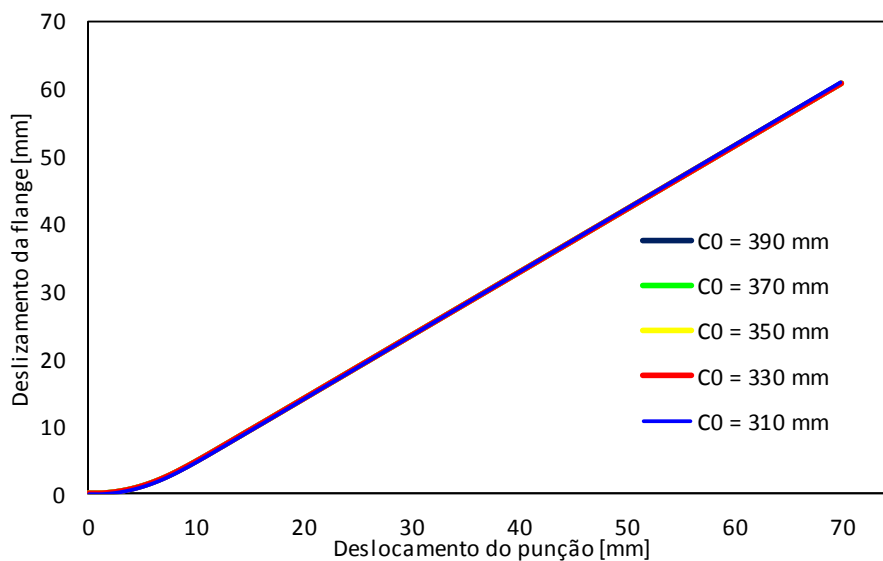


Figura 2.4. Evolução do deslizamento da flange em função do deslocamento do punção na conformação de um perfil em U, comparando vários comprimentos de esboço.

O comprimento final da flange no perfil em U está diretamente relacionado com o deslizamento sofrido por esta. Assim, o comprimento final da flange previsto pela simulação numérica é apresentado na Figura 2.5, para os cinco valores de comprimento de esboço. Uma vez que o deslizamento da flange é igual para todos os comprimentos de esboço (ver Figura 2.4), o comprimento final da flange é proporcional ao comprimento do esboço. Além disso, a relação de proporcionalidade (declive) é aproximadamente unitária, como se mostra na Figura 2.5. Isto significa que um aumento (redução) do comprimento de $\frac{1}{2}$ esboço conduz a um aumento (redução) do comprimento final da flange de igual valor.

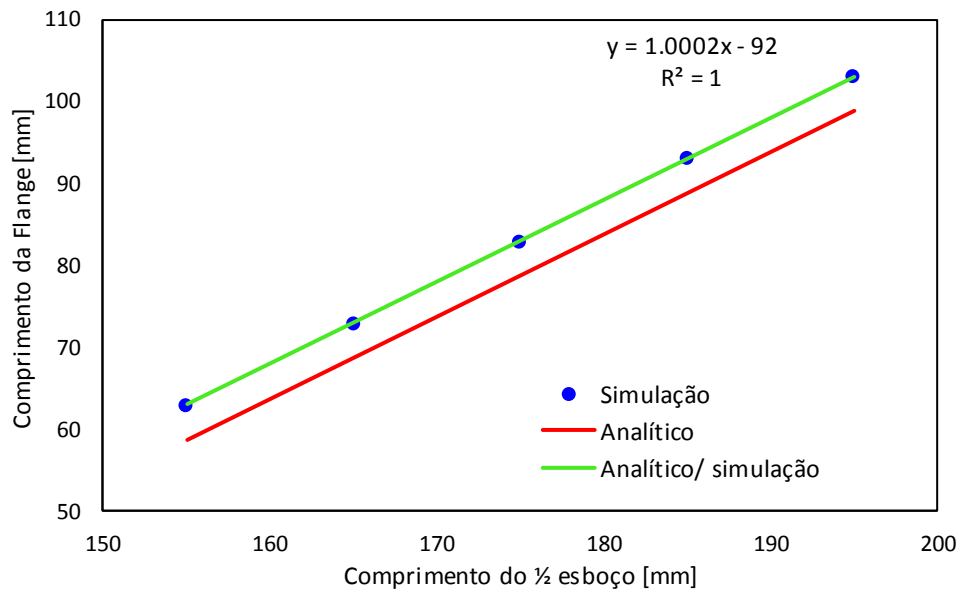


Figura 2.5. Comprimento final da flange em função do comprimento do esboço. Comparação entre resultados numéricos e analíticos.

Dada a simplicidade deste processo de conformação, é possível calcular de forma analítica uma estimativa para o comprimento da flange. Para tal, assume-se que a área superficial do perfil em U após conformação é igual à área superficial do esboço. Este pressuposto impõe que a espessura final após conformação seja igual à espessura inicial para que a condição de conservação do volume se verifique. Dado que não existe deformação em largura (estado plano de deformação), a igualdade nas áreas superficiais pode ser convertida numa igualdade de comprimentos:

$$A_{\text{inicial}} = A_{\text{final}} \Rightarrow C_{\text{inicial}} = C_{\text{final}}, \quad (2.1)$$

onde A_{inicial} e A_{final} representam, respetivamente, área superficial do esboço e área superficial do perfil em U após conformação. Assim, o comprimento do esboço deve ser igual ao comprimento da secção transversal do perfil em U após conformação (ver Figura 2.1). Considerando que este comprimento é avaliado na linha média (meia espessura), esta relação é descrita pela seguinte expressão:

$$C_0 = \underbrace{(L_p - 2R_p)}_{\text{base}} + \underbrace{2(d_p - R_p - R_m - t_0)}_{\text{parede vertical}} + \underbrace{\pi \left(R_p + \frac{t_0}{2} \right)}_{\text{raio do punção}} + \underbrace{\pi \left(R_m + \frac{t_0}{2} \right)}_{\text{raio da matriz}} + \underbrace{2C_f}_{\text{flange}}, \quad (2.2)$$

onde C_0 represente o comprimento inicial do esboço, L_p a largura do punção, R_p o raio do punção, R_m o raio da matriz, d_p o deslocamento total do punção, t_0 a espessura da chapa e

C_f o comprimento da flange. Após alguma manipulação matemática é possível isolar o comprimento da flange, dado por:

$$C_f = \frac{C_0}{2} - \left(\frac{L_p}{2} - R_p \right) - (d_p - R_p - R_m - t_0) - \left(\frac{\pi \left(R_p + \frac{t_0}{2} \right)}{2} \right) - \left(\frac{\pi \left(R_m + \frac{t_0}{2} \right)}{2} \right), \quad (2.3)$$

onde o valor de cada uma das variáveis envolvidas na definição (analítica) do comprimento da flange é apresentado na Tabela 2.1. O cálculo analítico do comprimento da flange em função do comprimento do esboço, descrito pela equação (2.3), é apresentado na Figura 2.5. Dado que relação analítica apresentada em (2.3) pressupõe que não existe variação de espessura, o comprimento da flange é globalmente subestimado (aproximadamente 4.3 mm). No entanto, a relação de proporcionalidade (declive) é idêntica em ambos os casos, existindo apenas uma translação vertical da curva, como se mostra na Figura 2.5.

A distribuição da espessura da chapa prevista numericamente, medida ao longo do comprimento do perfil em U após conformação, é apresentada na Figura 2.6. Existe uma redução de espessura na parede vertical do perfil (0.73 mm), enquanto a flange e a base do perfil mantêm a espessura inicial (0.78 mm). A redução de espessura resulta da deformação plástica da chapa, a qual ocorre devido à dobragem e estiramento no raio de curvatura da matriz, consequência do deslizamento da chapa sobre a matriz. Com base no conhecimento da espessura final é possível calcular o alongamento da chapa na direção do comprimento através da equação de conservação de volume (em deformação plástica):

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0, \quad (2.4)$$

onde ε_1 e ε_2 são as deformações principais no plano da chapa, enquanto ε_3 representa a deformação em espessura. Dado que o processo foi simulado em estado plano de deformação ($\varepsilon_2 = 0$), a deformação da chapa na direção do comprimento é dada por:

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_3 = -\ln(t/t_0), \quad (2.5)$$

onde t representa a espessura final. Utilizando a distribuição da espessura prevista numericamente (Figura 2.6) é possível calcular o alongamento de cada elemento finito e posteriormente o comprimento planejado do perfil em U. A integração do comprimento de cada elemento finito permite calcular o comprimento total do esboço deformado. O cálculo do comprimento da flange através da equação (2.3) utilizando este novo “comprimento inicial do esboço” conduz a valores idênticos aos obtidos na simulação numérica, como se

mostra na Figura 2.5. De notar que a distribuição de espessura obtida numericamente é utilizada no cálculo analítico.

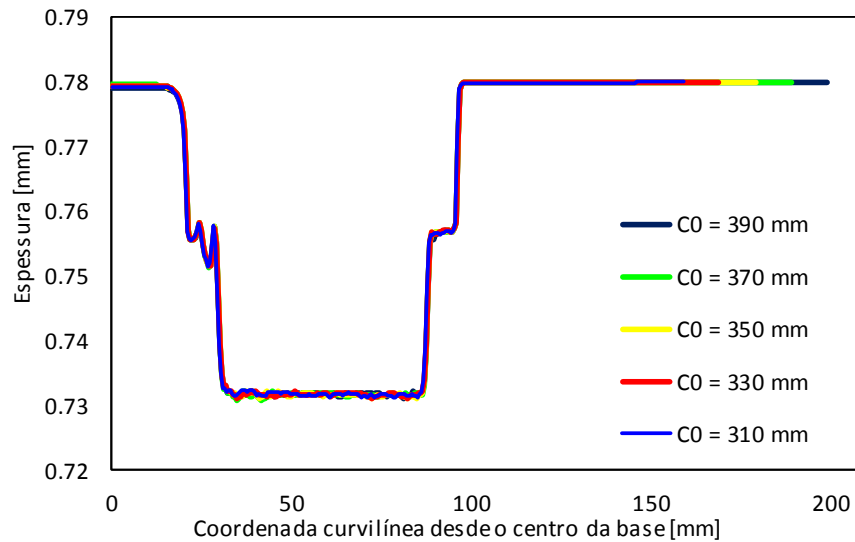


Figura 2.6. Distribuição da espessura ao longo do comprimento do perfil em U (após conformação) para vários comprimentos de esboço.

2.2. Conformação de uma taça cilíndrica

O segundo exemplo selecionado para estudar a influência das dimensões do esboço no comprimento da flange é a conformação de uma taça cilíndrica. Este exemplo de estampagem foi originalmente proposto no congresso Numisheet 2002 com o objetivo de avaliar a influência da anisotropia dos materiais na geometria final do conformado, bem como estudar o aparecimento de rugas nas abas da taça cilíndrica (Meinders, 2002). A Figura 2.7 (a) apresenta um esquema da geometria das três ferramentas de conformação (punção, cerra-chapas e matriz), cujas dimensões se apresentam na Tabela 2.3. A força de aperto do cerra-chapas é de 70 kN, sendo que a fase de conformação termina para um deslocamento do punção igual a 40 mm. O material utilizado é um aço macio cujos parâmetros constitutivos são sumariados na Tabela 2.4. O esboço adotado tem geometria circular e 1 mm de espessura. No entanto são testados vários raios de esboços, nomeadamente: $R_0 = 85$ mm, $R_0 = 90$ mm, $R_0 = 95$ mm, $R_0 = 100$ mm e $R_0 = 105$ mm.

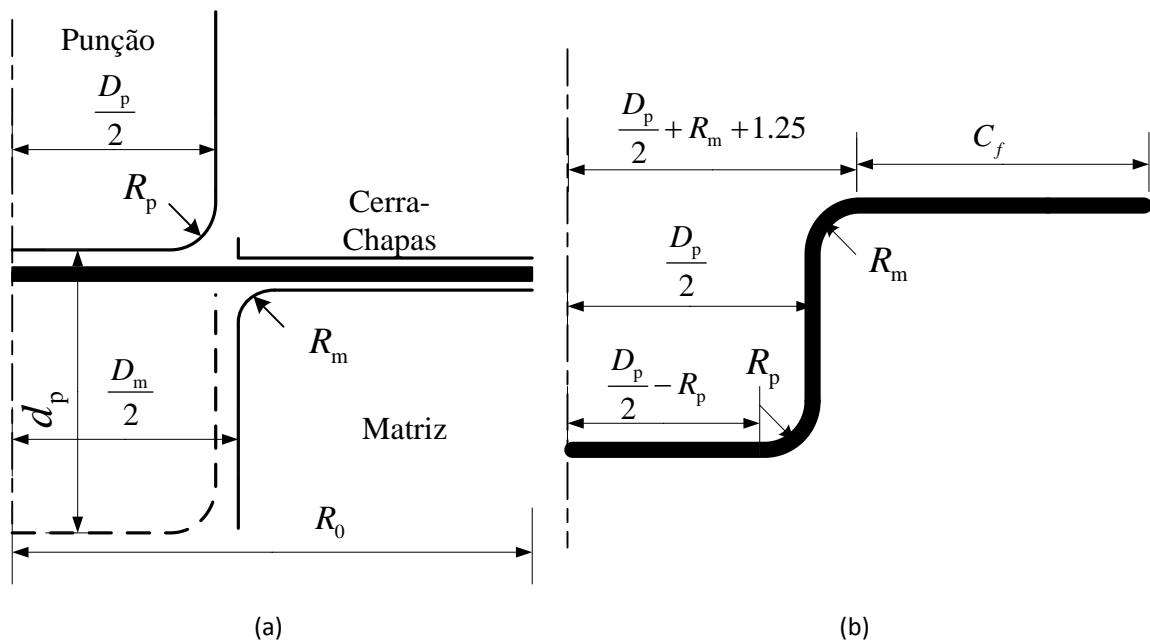


Figura 2.7. Esquema do processo de conformação de uma taça cilíndrica: (a) geometria das ferramentas; (b) conformação final da taça.

Tabela 2.3. Dimensões das ferramentas de conformação utilizadas na taça cilíndrica.

Variável	Símbolo	Valor [mm]
Diâmetro do punção	D_p	100
Raio de curvatura do punção	R_p	9.5
Diâmetro da matriz	D_m	102.5
Raio de curvatura da matriz	R_m	7
Deslocamento do total do punção	d_p	40

Tabela 2.4. Propriedades mecânicas do aço macio utilizado na conformação da taça cilíndrica.

Variável	Símbolo	Valor
Módulo de Young	E	221.37 GPa
Coefficiente de Poisson	ν	0.30
Tensão limite de elasticidade	Y_0	157.70 MPa
Parâmetros da lei de Swif	C	544.27 MPa
	n	0.2701

2.2.1. Modelo numérico

Devido às condições de simetria geométrica e material, simula-se apenas um quarto do problema, utilizando condições de simetria nos planos $x=0$ e $y=0$. A geometria das ferramentas é discretizada com superfícies Nagata (Neto et al., 2014), como se mostra na Figura 2.8 (a). Quanto à discretização do esboço, com elementos finitos hexaédricos de 8 nós, este é dividido em duas zonas: uma zona central com malha não estruturada e a parte externa com malha estruturada, como se mostra na Figura 2.8 (b). A zona estruturada é definida através do número de elementos na direção circunferencial e o número de elementos finitos na direção radial, que dependerá do raio de curvatura da matriz (7 mm). Assim, foi selecionada uma malha constituída por 80 elementos na direção circunferencial e elementos com dimensão de 1 mm na direção radial, sempre com duas camadas de elementos em espessura. O atrito entre a superfície das ferramentas e o esboço é descrito pela lei de Coulomb, sendo o coeficiente de atrito $\mu = 0.0426$.

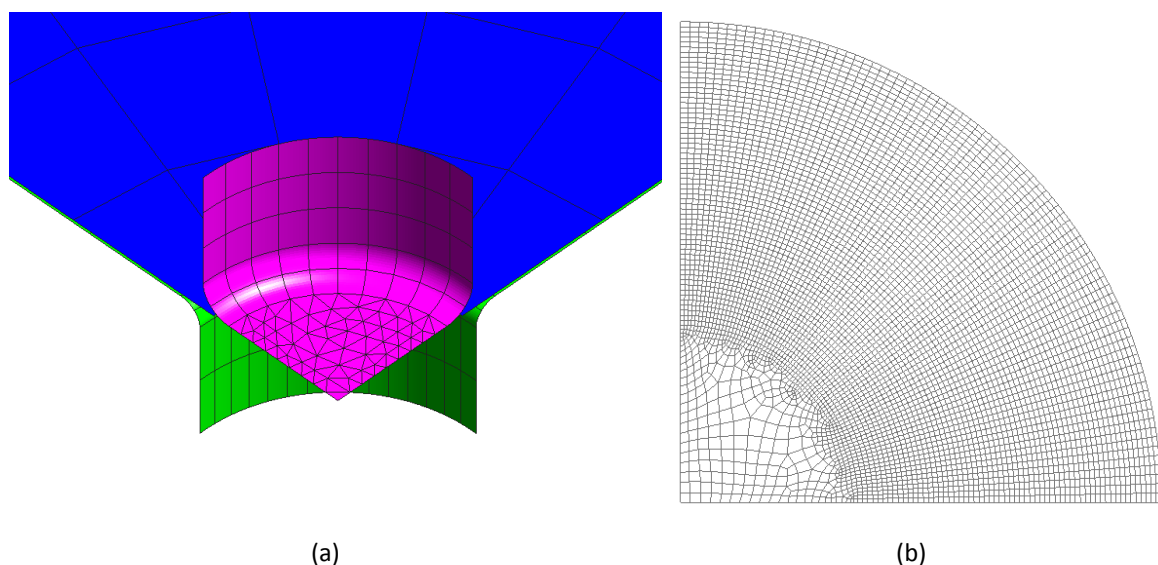


Figura 2.8. Discretização das (a) ferramentas utilizadas na conformação da taça cilíndrica e (b) $\frac{1}{4}$ do esboço discretizado com elementos finitos.

Além de quantificar a influência da dimensão do esboço no comprimento da flange após conformação, este exemplo de estampagem pretende estudar também o efeito da anisotropia do material da chapa. Assim, são estudados três materiais diferentes em termos de anisotropia, cujos parâmetros do critério de Hill'48 se apresentam na Tabela 2.5. O

coeficiente de anisotropia em tração é definido pela razão entre a deformação plástica em largura e a deformação plástica em espessura. Cada um dos materiais estudados apresenta isotropia no plano da chapa, ou seja, o coeficiente de anisotropia é constante no plano da chapa, sendo utilizados os valores $r = 1$, $r = 1.5$ e $r = 2.5$. Esta abordagem permite estudar diferentes coeficientes de anisotropia plástica, enquanto a geometria da flange se mantém circular.

Tabela 2.5. Parâmetros do critério de anisotropia Hill'48 utilizados para descrever o comportamento mecânico da chapa (isotropia no plano) utilizada na taça cilíndrica.

Coeficiente de anisotropia	F	G	H	L	M	N
$r = 1$	0.5	0.5	0.5	1.5	1.5	1.5
$r = 1.5$	0.4	0.4	0.6	1.5	1.5	1.6
$r = 2.5$	0.2857	0.2857	0.7143	1.5	1.5	1.7143

2.2.2. Resultados e discussão

Considerando o material da chapa isotrópico ($r = 1$), a evolução da força exercida pelo punção em função do seu descolamento é apresentada na Figura 2.9. Para fins de comparação, são usados vários raios iniciais do esboço, variando de 85 mm até 105 mm. A força do punção é tanto maior, quanto maior for o raio inicial do esboço, como se mostra na Figura 2.9. As oscilações observadas na força resultam de instabilidades no contacto entre chapa (comportamento isotrópico) e as ferramentas (axissimétricas). Os esboços com raios menores conduzem a uma queda na força do punção a partir de um dado deslocamento, ao contrário dos esboços de maior dimensão que originam uma força do punção sempre crescente.

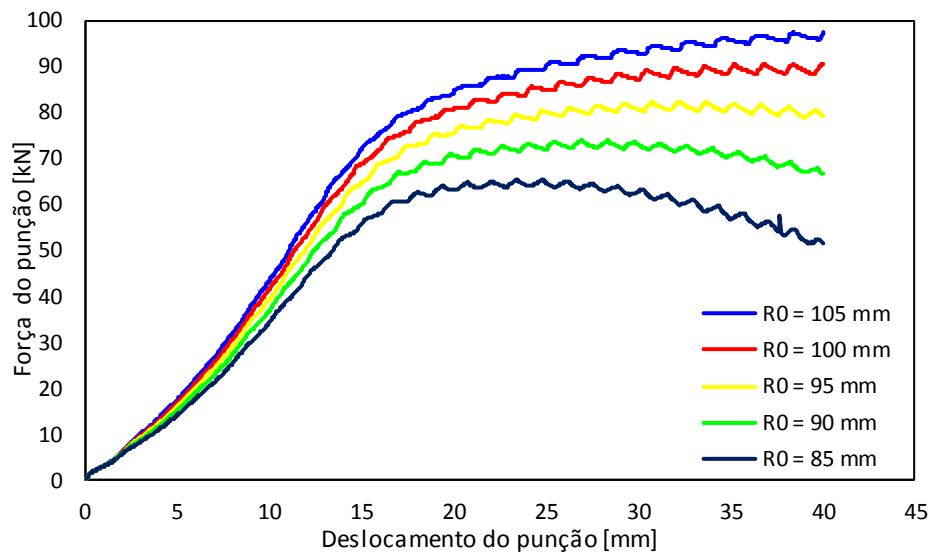


Figura 2.9. Força do punção em função do seu deslocamento na conformação da taça cilíndrica para várias dimensões de esboço (material isotrópico $r=1$).

O deslizamento da flange em função do deslocamento do punção é apresentado na Figura 2.10 para vários valores de raio inicial de esboço. O deslizamento da flange é influenciado pelo raio inicial do esboço, sendo tanto maior quanto menor for o raio, como se mostra na Figura 2.10. De facto, o esboço de maior dimensão conduz a uma força do punção maior (Figura 2.9) e um deslizamento da flange menor (Figura 2.10). Estas condições são propícias ao aparecimento de fenómenos de estrição e rotura, pelo que se devem evitar razões de estampagem (relação entre raio do esboço e raio da taça cilíndrica) superiores a 2 nos aços macios (Marciniak et al., 2002). A partir de aproximadamente 15 mm de deslocamento do punção (valor correspondente à soma do raio de curvatura do punção e da matriz), o deslizamento da flange aumenta de forma proporcional, independentemente da dimensão do esboço. Efetivamente o valor da força do punção também estabiliza para valores de deslocamento de punção superiores a 15 mm (ver Figura 2.9).

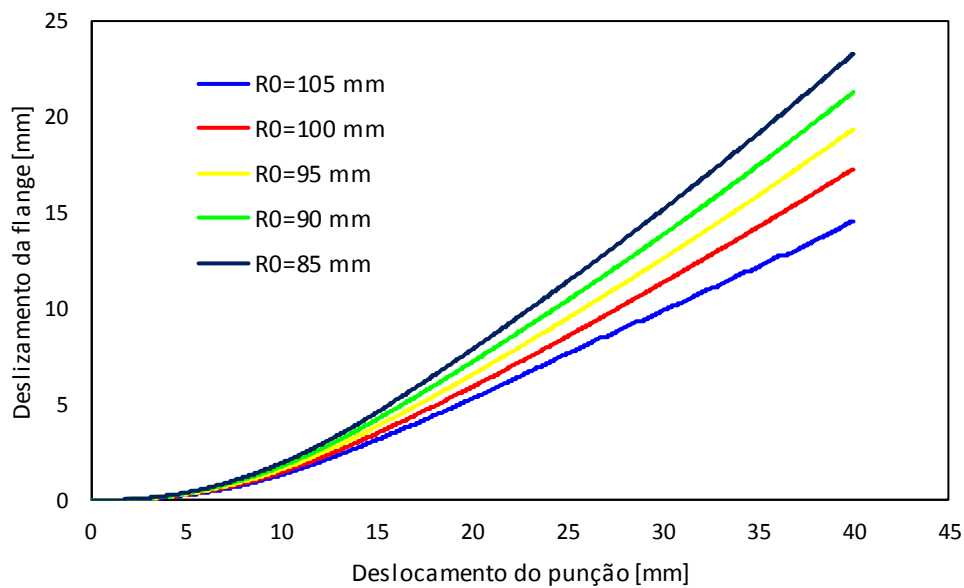


Figura 2.10. Deslizamento da flange em função do deslocamento do punção na conformação da taça cilíndrica para várias dimensões de esboço (material isotrópico $r = 1$).

A relação entre o comprimento final da flange e o raio inicial do esboço é apresentada na Figura 2.11 para os diferentes coeficientes de anisotropia, especificamente $r = 1$, $r = 1.5$ e $r = 2.5$. Independentemente do coeficiente de anisotropia considerado para a chapa, existe uma relação aproximadamente linear entre estas duas variáveis. No entanto, a relação de proporcionalidade (declive) diminui com o aumento do coeficiente de anisotropia, como se observa na Figura 2.11. O declive da reta que aproxima os 5 pontos dados pela simulação é de 1.4285 para $r = 1$, 1.3216 para $r = 1.5$ e 1.2847 para $r = 2.5$. Apesar de todos os valores de declive serem bastante próximos, o declive da reta que mais se afasta é o caso da simulação numérica com um material isotrópico ($r = 1$). De notar que no caso da conformação do perfil em U, o declive que relaciona o comprimento final da flange e o comprimento inicial do esboço foi aproximadamente 1 (ver Figura 2.5), ao passo que na taça cilíndrica varia entre 1.3 e 1.4.

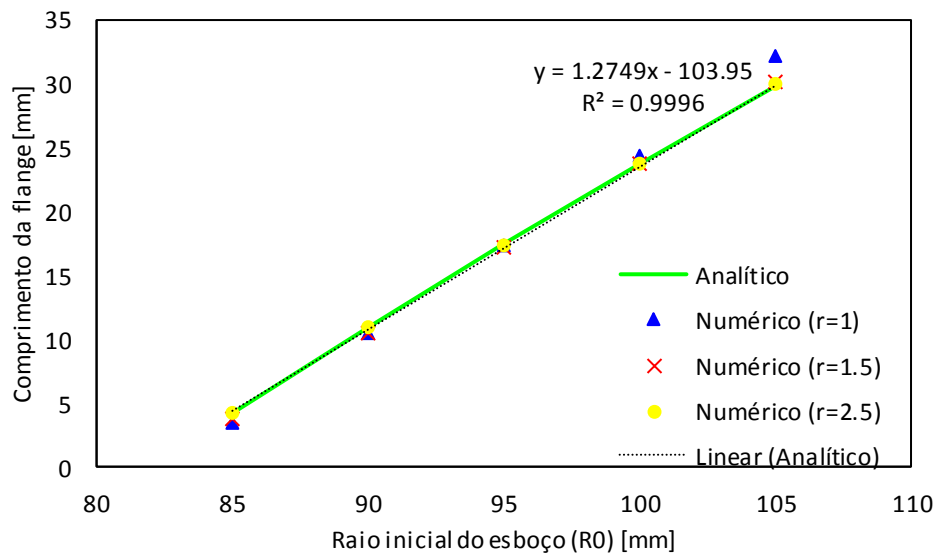


Figura 2.11. Relação entre o comprimento da flange e o raio inicial do esboço para os diferentes coeficientes de anisotropia (r) associados ao material.

Dada a simplicidade da geometria das ferramentas de conformação (ver Figura 2.7), tal como no exemplo anterior, é possível estabelecer uma relação entre o comprimento final da flange e as restantes variáveis geométricas. Respeitando a condição de conservação de volume aquando da deformação plástica, o volume inicial do esboço é igual ao volume da taça cilíndrica após conformação. Além disso, supondo que o material apresenta um comportamento isotrópico no plano da chapa, a geometria da flange é circular no final do processo, podendo definir-se apenas um comprimento de flange. Deste modo, considerando que não existe variação da espessura durante o processo de conformação, a igualdade de volumes pode ser substituída pela igualdade de áreas no plano da chapa:

$$V_{\text{Inicial}} = V_{\text{Final}} \Rightarrow A_{\text{Inicial}} = A_{\text{Final}} \quad (2.6)$$

onde V_{Inicial} é o volume inicial do esboço e V_{Final} é o volume da taça cilíndrica após conformação. Assim, A_{Inicial} e A_{Final} são, respetivamente, a área do esboço e a área após conformação da taça cilíndrica. De acordo com a geometria da taça cilíndrica (Figura 2.7), a área final pode ser calculada através da soma de áreas resultantes de geometrias simples:

$$A_{\text{Final}} = A_{\text{Círculo}_1} + A_{\text{Toróide}_{\text{punção}}} + A_{\text{Cilindro}} + A_{\text{Toróide}_{\text{matriz}}} + A_{\text{Círculo}_2} \quad (2.7)$$

onde $A_{\text{Círculo}_1}$ representa a área do círculo da base, $A_{\text{Toróide}_{\text{punção}}}$ é a área do toróide relativa à curva provocada pelo punção, A_{Cilindro} é a área do cilindro entre o toróide do punção e da matriz, $A_{\text{Toróide}_{\text{matriz}}}$ é a área do toróide relativa à matriz e $A_{\text{Círculo}_2}$ representa a área do círculo

do topo da taça cilíndrica. Considerando que as variáveis são avaliadas na linha média (meia espessura), tem-se:

$$C_f^2 + C_f(2R_m + D_m) = \left\{ \begin{aligned} &R_0^2 - \left(\frac{D_p}{2} - R_p\right)^2 - \left[\left(\frac{D_p}{2} - R_p\right) \pi \left(R_p + \frac{t_0}{2}\right) + 2 \left(R_p + \frac{t_0}{2}\right)^2 \right] - \\ &\left[(d_p - R_m - R_p - t_0)(D_p + t_0) - \left[\left(\frac{D_m}{2} + R_m\right) \pi \left(R_m + \frac{t_0}{2}\right) - 2 \left(R_m + \frac{t_0}{2}\right)^2 \right] \right] \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

onde C_f representa o comprimento da flange, R_m é o raio da matriz, D_m é o diâmetro da matriz, R_0 é o raio inicial do esboço, D_p é o diâmetro do punção, R_p é o raio do punção e t_0 representa a espessura inicial do esboço. Dada a complexidade da equação obtida, para determinar o comprimento da flange é necessário utilizar a fórmula resolvente (resolução de equações de segundo grau):

$$C_f = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (2.9)$$

onde:

$$a = 1 \quad (2.10)$$

$$b = 2R_m + D_m \quad (2.11)$$

$$c = - \left[\begin{aligned} &R_0^2 - \left(\frac{D_p}{2} - R_p\right)^2 - \left\{ \left(\frac{D_p}{2} - R_p\right) \pi \left(R_p + \frac{t_0}{2}\right) + 2 \left(R_p + \frac{t_0}{2}\right)^2 \right\} - \\ &\left[(d_p - R_m - R_p - t_0)(D_p + t_0) - \left\{ \left(\frac{D_m}{2} + R_m\right) \pi \left(R_m + \frac{t_0}{2}\right) - 2 \left(R_m + \frac{t_0}{2}\right)^2 \right\} \right] \end{aligned} \right] \quad (2.12)$$

onde os valores de cada variável utilizados nas equações (2.11) e (2.12) encontram-se expostas na Tabela 2.3. A relação analítica pressupõe que não existe variação de espessura ao longo do processo. O resultado analítico do comprimento da flange em função do raio inicial do esboço é apresentado na Figura 2.11, em conjunto com os resultados numéricos da simulação. Apesar da variação de espessura não ser consideradas na equação (2.8), a relação de proporcionalidade dada pela equação analítica (declive=1.2749) é próxima do resultado numérico, tal como se mostra na Figura 2.11. De facto, o aumento do coeficiente de anisotropia na simulação numérica conduz a um declive mais próximo daquele calculado com a equação analítica. Isto porque a deformação em espessura diminui com aumento do

coeficiente de anisotropia, convergindo para a condição adotada na formulação analítica (2.8).

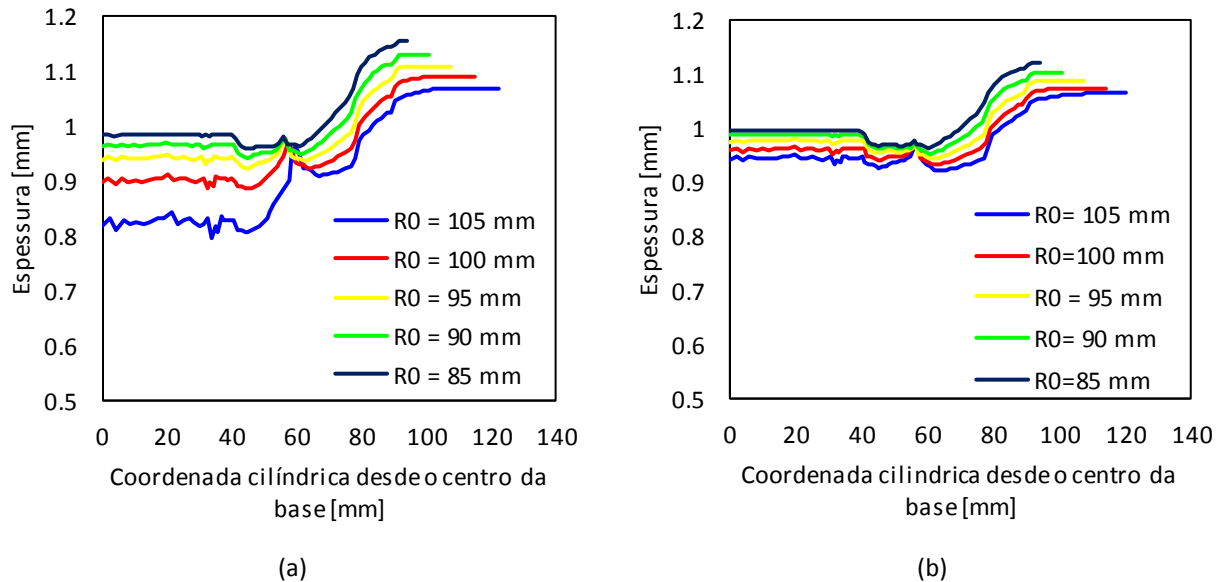


Figura 2.12. Distribuição da espessura em função da coordenada cilíndrica para: (a) coeficiente de anisotropia $r=1$; (b) coeficiente de anisotropia $r=1.5$.

A Figura 2.12 expõe a distribuição da espessura final em função da coordenada cilíndrica medida desde o centro da base, considerando um material com coeficiente de anisotropia $r=1$ (Figura 2.12 (a)) e $r=1.5$ (Figura 2.12 (b)). Independentemente do raio inicial do esboço, existe uma maior uniformização da espessura à medida que o coeficiente de anisotropia aumenta. Portanto, à medida que o r aumenta, a espessura final (t) irá tender para a espessura inicial (t_0), pois haverá menos deformação em espessura. Além disso, existe uma relação entre o raio do esboço e a espessura final, de tal forma que, quanto menor o raio do esboço, maior será a tendência para conservar a espessura inicial da chapa ao longo do processo (Figura 2.12). Em qualquer dos casos, a redução de espessura é maior quando se considera um raio de esboço maior, como se mostra na Figura 2.12.

Os resultados numéricos referentes ao comprimento da flange em função do raio do esboço (ver Figura 2.11) estão diretamente relacionados com a distribuição de espessura apresentada na Figura 2.12. Quando o coeficiente de anisotropia da chapa é elevado, a deformação em espessura é menor, sendo que o resultado numérico se aproxima do resultado analítico, como se mostra na Figura 2.11. Pelo contrário, para valores baixos de coeficiente de anisotropia, os resultados da simulação numérica afastam-se do resultado analítico,

essencialmente para valores de raio de esboço demasiado pequenos ($R_0 = 85$ mm) e demasiado grandes ($R_0 = 105$ mm).

Recorrendo à equação (2.8) é possível calcular o deslizamento da flange em função do deslocamento do punção. A Figura 2.13 apresenta o deslizamento da flange em função do deslocamento do punção, calculado com recurso à equação (2.8) para diferentes valores de deslocamento. Para um mesmo deslocamento do punção, o deslizamento da flange é máximo quando o raio inicial é 85 mm, indo progressivamente baixando consoante o valor do raio inicial vai aumentando. De notar que o deslizamento só é calculado a partir de 17 mm de deslocamento do punção, o que corresponde ao início da formação da parede vertical na taça cilíndrica. A comparação entre a solução numérica (ver Figura 2.10) e solução analítica (ver Figura 2.13) permite concluir que as relações analíticas fornecem uma boa aproximação do deslizamento. Efetivamente, a diferença máxima ocorre no final do processo de conformação para o esboço de maior raio, sendo esta diferença de aproximadamente 2.43 mm.

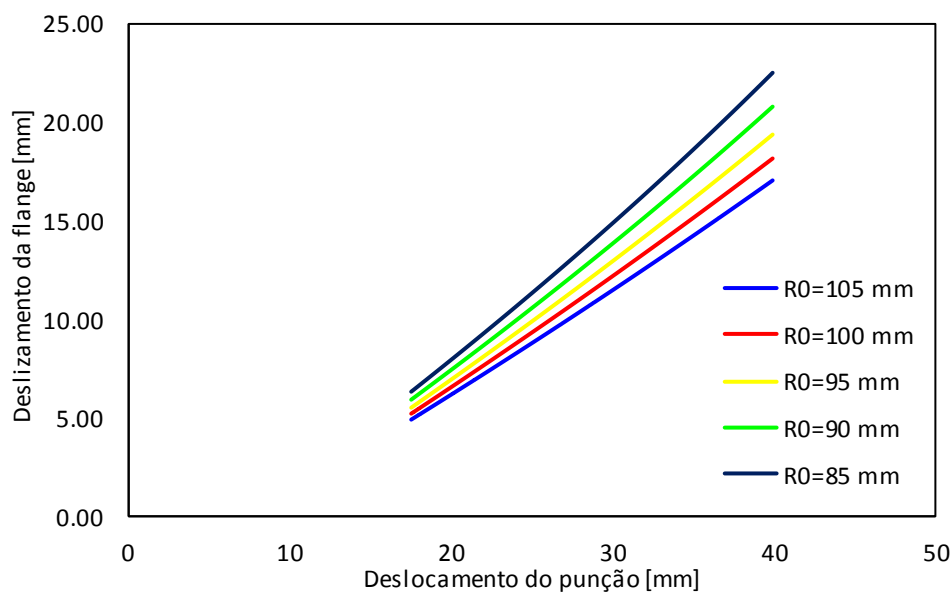


Figura 2.13. Deslizamento da flange em função do deslocamento do punção calculada pelo método analítico (taça cilíndrica).

Na Figura 2.12 é possível verificar a redução de espessura na base e na parede da taça, bem como o aumento de espessura na flange, resultado da deformação plástica sofrida pela chapa, consequência do processo de conformação. Apesar de ser impossível calcular analiticamente a distribuição de espessura em toda a extensão da taça cilíndrica, é sabido

que a zona do contorno da flange tem um estado de deformação próximo da compressão uniaxial segundo a direção circunferencial (Marques, 2014), isto quando a força de aperto do cerra-chapas não é muito elevada. Assim, é exequível calcular deformação em espessura no contorno da flange com base na equação da conservação do volume:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \Rightarrow \varepsilon_\sigma + \varepsilon_w + \varepsilon_t = 0, \quad (2.13)$$

onde ε_σ representa a deformação na direção circunferencial, ε_w é deformação na direção radial e ε_t representa a deformação em espessura. Assim, ao considerar um coeficiente de anisotropia constante no plano da chapa e sabendo que o coeficiente de anisotropia, r , é dado pela razão entre a deformação na direção radial e a deformação em espessura, então:

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \Rightarrow \varepsilon_\sigma + r\varepsilon_t + \varepsilon_t = 0 \Rightarrow \varepsilon_t = -\frac{\varepsilon_\sigma}{1+r}, \quad (2.14)$$

$$t = t_0 \exp \left[-\left(\frac{1}{1+r} \right) \left(\ln \frac{R}{R_0} \right) \right], \quad (2.15)$$

em que t representa a espessura final, t_0 é a espessura inicial e R é o raio final do esboço após conformação. A deformação na direção circunferencial é calculada através da relação entre o perímetro do contorno da flange no final e no início, sendo estes proporcionais aos raios finais e iniciais do esboço.

A Figura 2.14 apresenta a comparação entre a espessura prevista numericamente e analiticamente, medida no contorno da flange após conformação. Dado o estado de tensão assumido para a flange (compressão uniaxial), existe sempre um aumento de espessura durante a conformação, independentemente do raio inicial do esboço ou da anisotropia do material. No entanto, existe menor aumento de espessura quando o raio inicial do esboço é maior, como se mostra na Figura 2.14. Por outro lado, o aumento do coeficiente de anisotropia conduz a uma menor deformação em espessura, como era de esperar. A diferença entre o resultado analítico e numérico é bastante reduzida qualquer que seja a condição considerada (ver Figura 2.14), evidenciando que o estado de deformação nesta zona é muito próximo de compressão uniaxial.

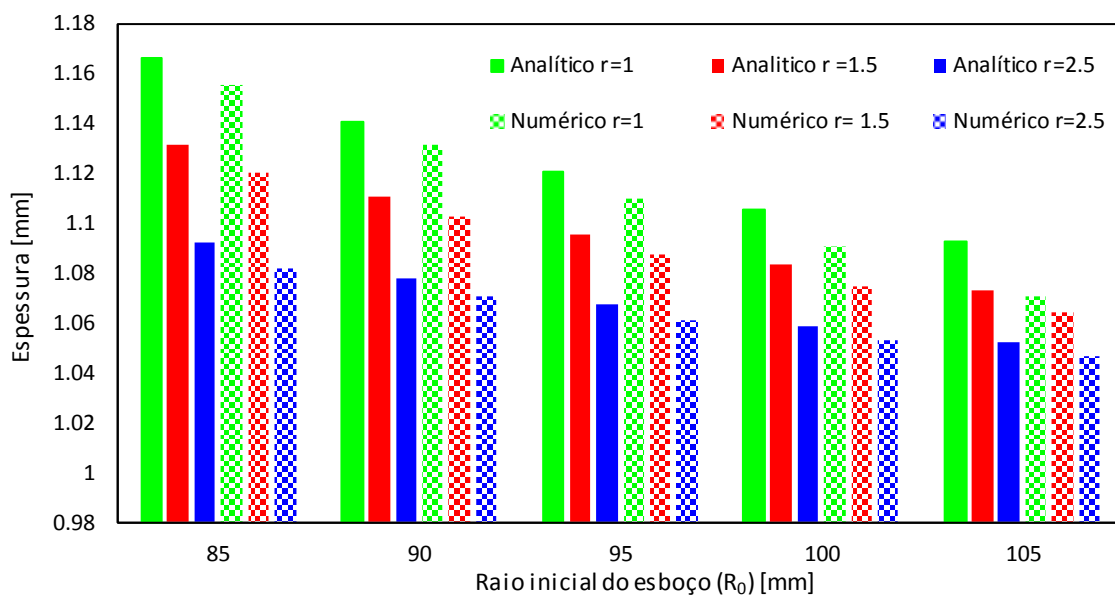


Figura 2.14. Comparação entre resultados analíticos e numéricos da espessura final no contorno da flange, de acordo com o coeficiente de anisotropia (r), para os diferentes raios iniciais do esboço (R_0).

3. OTIMIZAÇÃO DA GEOMETRIA DO ESBOÇO

Esta secção apresenta o algoritmo desenvolvido para fazer a otimização da geometria inicial do esboço em processos de conformação plástica de chapas metálicas. O algoritmo desenvolvido é baseado nos resultados obtidos na secção anterior, onde foi possível observar uma relação aproximadamente linear entre o raio do esboço e o comprimento final da flange (conformação de uma taça cilíndrica isotrópica). Este algoritmo é comparado com outros algoritmos propostos na literatura, permitindo apurar a velocidade de convergência de cada um deles, quando aplicados a um exemplo simples. De seguida, o algoritmo proposto é utilizado para fazer a otimização da geometria do esboço a utilizar em dois processos de estampagem, nomeadamente um processo de estampagem e estiramento de uma taça cilíndrica e na conformação de uma taça em cruz.

3.1. Algoritmo proposto para otimização do esboço

O algoritmo proposto neste trabalho tem como objetivo reduzir o desperdício de material em processos de conformação plástica de chapas metálicas, modificando a geometria inicial do esboço a utilizar no processo. Uma vez que o método proposto contempla um ciclo iterativo para aproximar a geometria ideal do esboço, o método dos elementos finitos é utilizado neste estudo para prever numericamente a geometria final do componente obtido por estampagem. O programa de elementos finitos DD3IMP é utilizado para prever a geometria final do componente, partindo de uma geometria inicial qualquer para o esboço.

O procedimento iterativo de otimização é realizado até encontrar uma geometria inicial para esboço que origine uma geometria deformada da peça muito próxima da geometria pretendida (objetivo). O fluxograma relativo ao algoritmo de otimização proposto neste estudo é apresentado na Figura 3.1, onde é possível observar o ciclo iterativo conjugado com os resultados obtidos por simulação numérica. Por forma a quantificar o desvio entre a geometria deformada do componente e o contorno objetivo é imperativo usar uma medida de erro. No caso de problemas simples, em que a geometria final possa ser completamente

definida com uma única variável, o erro geométrico é expresso pela distância entre o contorno objetivo e geometria deformada do componente, avaliado em cada iteração. Além disso, com o objetivo de identificar durante o processo iterativo se a geometria inicial do esboço requer uma adição ou remoção de material, o valor do erro pode ser positivo ou negativo. Assim, considerando uma geometria axissimétrica com flange no final do processo de conformação, o erro geométrico é definido pela diferença entre o raio da flange objetivo e o raio final do componente deformado:

$$\Delta_{\text{erro}} = R_{\text{obj}} - R_{\text{final}} \quad (3.1)$$

onde R_{obj} é o raio do flange objetivo e R_{final} é o raio da flange previsto numericamente após processo de conformação. Quando o erro geométrico em valor absoluto for menor que um valor predeterminado δ , o processo iterativo é interrompido, estando encontrada a geometria ótima para o esboço a utilizar no processo de conformação, tal como se mostra na Figura 3.1.

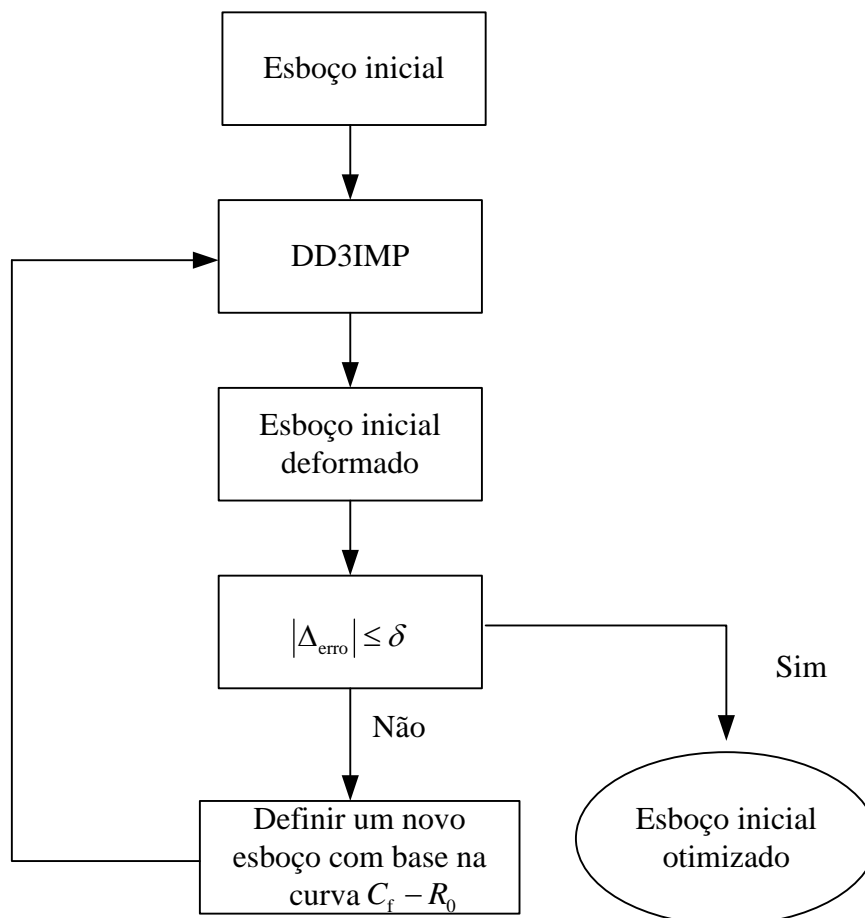


Figura 3.1. Procedimento utilizado na otimização do esboço inicial.

A maioria dos métodos de otimização utilizados atualmente recorre a um ciclo iterativo onde é avaliado o erro em cada iteração, diferindo apenas na forma como é feita a correção à geometria do esboço (Kitayama, Natsume, Yamazaki, Han, & Uchida, 2015). No entanto, cada iteração requer uma nova simulação numérica do processo de estampagem, a qual tem um custo computacional elevado. Assim, é necessário encontrar um método de otimização que necessite de poucas iterações (simulações) para atingir o objetivo (Kitayama, Saikyo, Kawamoto, & Yamamichi, 2015). Usualmente, o valor da correção, feita na geometria do esboço obtido na iteração anterior, é função do erro geométrico cometido nessa iteração.

Como se observou na Secção 2, existe uma relação aproximadamente linear entre a dimensão inicial do esboço e o comprimento final da flange, tanto na conformação de um perfil em U (ver Figura 2.5), bem como na conformação de uma taça cilíndrica (ver Figura 2.11). Deste modo, o algoritmo de otimização proposto neste trabalho recorre a estas relações para fazer a correção à geometria do esboço. Apesar de os dois exemplos avaliados anteriormente apresentarem relações de proporcionalidade diferentes entre a dimensão do esboço e o comprimento final da flange, grande parte dos processos de estampagem assemelha-se mais à conformação de taças (componentes fechados). Portanto, a relação analítica utilizada no algoritmo de otimização é obtida através da condição de conservação do volume, assumindo que não existe variação da espessura durante o processo de conformação e considerando o material da chapa isotrópico (ver Figura 2.11). O declive da reta ($m=1.2749$) é a única variável de interesse para o algoritmo uma vez que o valor de b (ordenada na origem) depende das dimensões da taça em questão. Então, a relação entre as duas variáveis é a seguinte:

$$C_f = 1.2749R_0 - b, \quad (3.2)$$

onde C_f é o comprimento da flange e R_0 é o raio do esboço inicial.

Tal como qualquer processo iterativo, este requer uma geometria inicial para o esboço (solução inicial), a partir da qual se vai proceder à otimização (ver Figura 3.1). Após obtenção da geometria deformada do componente, recorrendo à simulação numérica com o método dos elementos finitos, é possível calcular o comprimento final da flange (ver Figura 3.2). Conhecendo este valor e o raio do esboço inicial, é possível calcular o valor de b presente na equação (3.2). Tendo em conta o valor pretendido para o comprimento da flange (objetivo), é possível calcular o valor do raio a utilizar no esboço inicial da próxima

simulação recorrendo à equação (3.2). Este procedimento é repetido até o erro geométrico atingir valores suficientemente pequenos. De notar que o valor de b deve ser atualizado em cada iteração, recorrendo aos valores de comprimento de flange e raio do esboço da iteração anterior.

O esquema do processo iterativo resultante do algoritmo de otimização proposto é apresentado na Figura 3.2. Apesar de poder existir uma relação linear entre o comprimento da flange e o raio do esboço, a relação de proporcionalidade (declive) utilizada no algoritmo é geralmente diferente da que existe efetivamente. Deste modo o comprimento da flange oscila em torno da solução objetivo, como se mostra na Figura 3.2. A diferença de declives dita a velocidade de convergência do processo iterativo de otimização.

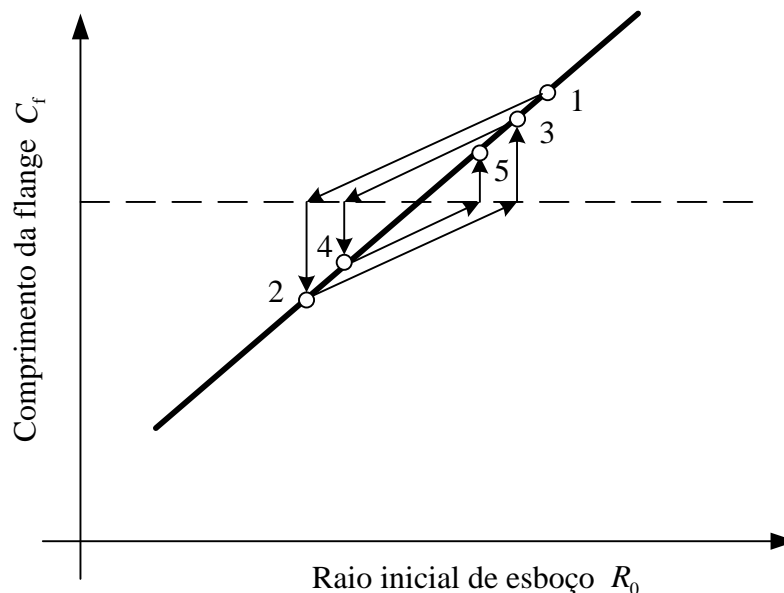


Figura 3.2. Esquemática do processo iterativo utilizado para fazer a otimização da geometria do esboço inicial.

3.2. Algoritmos de otimização existentes

Por forma a validar o algoritmo descrito anteriormente, foram selecionados três algoritmos de otimização existentes na literatura, com os quais vai ser comparado o algoritmo proposto. Os algoritmos selecionados para a otimização da geometria do esboço

são: Método da Projeção da Fronteira¹ (Vafaeseefat, 2011), Teoria da Conformação Ideal² (Park, Yoon, Yang, & Kim, 1999) e *Push-Pull* (Padmanabhan, Oliveira, Baptista, Alves, & Menezes, 2009). O objetivo de todos eles é obter uma geometria para esboço inicial, conhecendo a geometria final pretendida. Todos eles tem em comum um processo iterativo, ou seja, a geometria do esboço é corrigida incrementalmente, recorrendo à simulação numérica para ter uma previsão da geometria final do componente após conformação.

As variáveis utilizadas na descrição dos modelos estudados estão expostas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Variáveis utilizadas nos algoritmos de otimização em estudo.

Variável	Símbolo
Raio do esboço objetivo antes da deformação	$R_{obj}^{inicial}$
Raio do esboço objetivo deformado	R_{obj}^{final}
Raio do esboço inicial k antes da deformação	$R_k^{inicial}$
Raio do esboço inicial k deformado	R_k^{final}
Espessura inicial do esboço	t_0
Espessura do esboço deformado	t

3.2.1. Método da Projeção da Fronteira

O primeiro algoritmo apresentado foi proposto por Abbas Vafaeseefat (Vafaeseefat, 2011), denominando-o Método da Projeção da Fronteira. O procedimento do método baseia-se na projeção da fronteira objetivo (R_{obj}^{final}) sobre o esboço deformado (R_k^{final}). A projeção dos pontos é posteriormente transferida para o esboço inicial (não deformado), $R_k^{inicial}$, permitindo definir um novo raio para o esboço, $R_{k+1}^{inicial}$ (ver Figura 3.3), dado por:

$$R_{k+1}^{inicial} = \left[\frac{R_{obj}^{final} - R_{k-1}^{final}}{R_k^{final} - R_{k-1}^{final}} * (R_k^{inicial} - R_{k-1}^{inicial}) \right] + R_{k-1}^{inicial}. \quad (3.3)$$

¹ Do inglês Boundary Projection Method

² Do inglês The Ideal Forming Theory

Para calcular as projeções do contorno objetivo no esboço deformado é feita uma busca para detetar os elementos finitos, E'_k , próximos da fronteira do ponto Q , (ver Figura 3.3 (a)). Seguidamente o ponto Q é projetado no plano delimitado por esses elementos finitos, sendo cada elemento definido no plano pelos nós, P'_1, P'_2, \dots, P'_k . As distâncias entre o ponto projetado S'_p e os nós desses elementos são calculadas. O ponto Q é projetado dentro do elemento selecionado, aquele que tem a mínima de distância. Para transferir o ponto de projeção para o esboço inicial são utilizadas as coordenadas canónicas do elemento finito, como mostra na Figura 3.3 (a), através das coordenadas u^* e v^* .

Por outro lado, se a projeção do ponto Q fica do lado exterior do esboço deformado, o procedimento é idêntico, no entanto a transferência dos pontos projetados para o esboço inicial processa-se de forma diferente (ver Figura 3.3 (b)). Assim, para transferir os pontos projetados para o esboço inicial, são calculadas as distâncias, R_1 e R_2 , entre os nós mais próximos, P'_1 e P'_2 , e o ponto projetado S'_p . O novo ponto definido na fronteira do esboço inicial é calculado através da interseção de dois círculos cujos centros são definidos por P_1 e P_2 (coordenada iniciais dos nós) e os raios R_1 e R_2 , respetivamente, como mostra na Figura 3.3 (b).

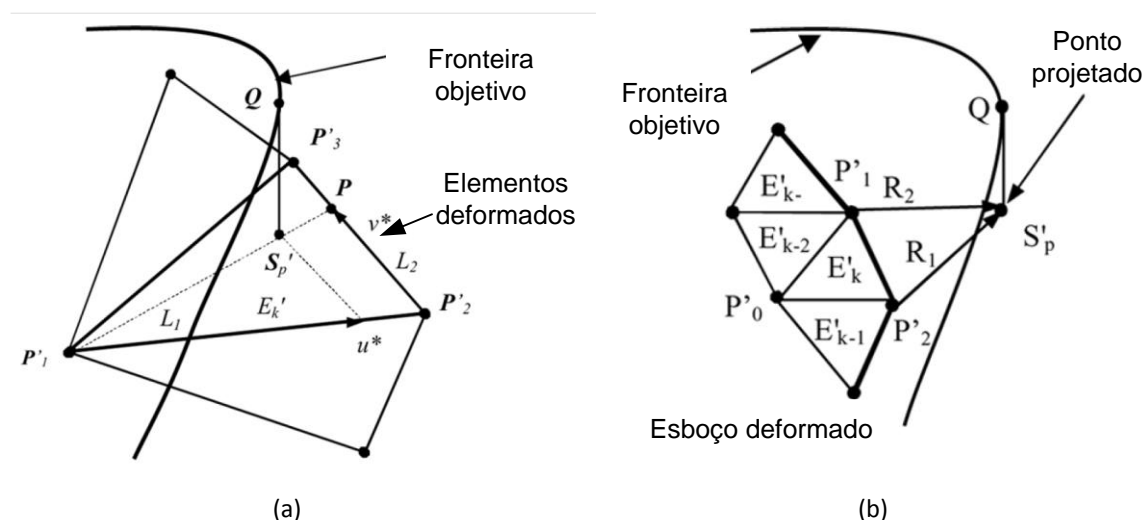


Figura 3.3. Esquema do método da projeção da fronteira em duas situações distintas: (a) ponto Q dentro da fronteira do esboço deformado (b) ponto Q fora do esboço deformado (Vafaeseefat, 2011)

3.2.2. Teoria da Conformação Ideal

O segundo método apresentado foi proposto por (Park et al., 1999), sendo aqui denominado por teoria da conformação ideal. Tal como os outros modelos em estudo, também este modelo recorre a um processo iterativo, o qual consiste na remoção ou adição de material no esboço inicial (R_k^{inicial}), consoante detenha excesso ou defeito, respetivamente. Assim, o volume que se encontra entre a geometria resultante da deformação e o objetivo é calculado e posteriormente subtraído ou adicionado ao esboço inicial (R_k^{inicial}).

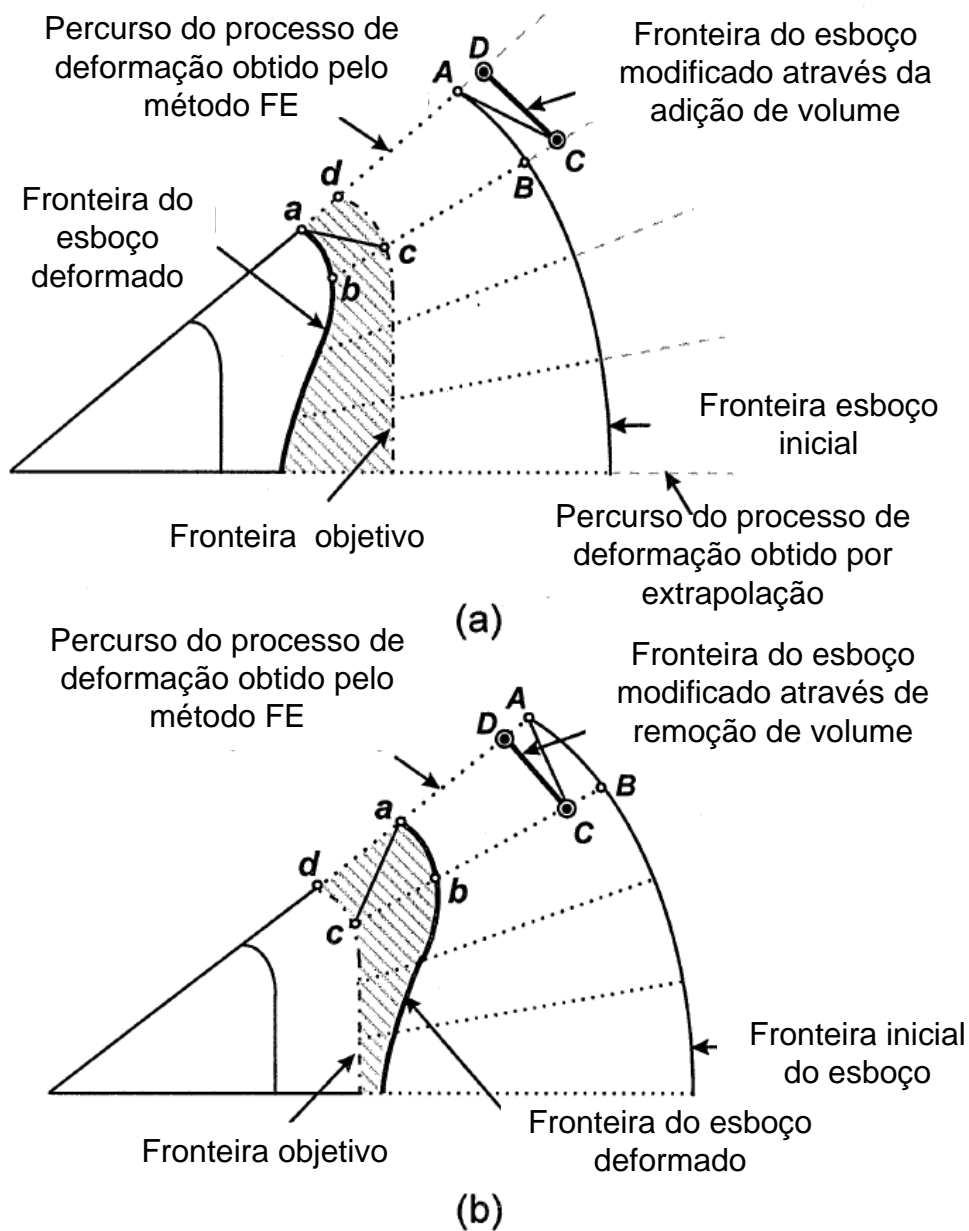
Durante o método iterativo o esboço inicial é modificado através da adição ou subtração de volumes até que o erro seja reduzido.

$$\text{Volume inicial} = \text{Volume final}, \quad (3.4)$$

$$\text{Volume final} = \begin{cases} \pi \left[\left(R_k^{\text{final}} \right)^2 - \left(R_{\text{obj}}^{\text{final}} \right)^2 \right] t, & \text{se } R_k^{\text{final}} \geq R_{\text{obj}}^{\text{final}} \\ \pi \left[\left(R_{\text{obj}}^{\text{final}} \right)^2 - \left(R_k^{\text{final}} \right)^2 \right] t, & \text{se } R_k^{\text{final}} \leq R_{\text{obj}}^{\text{final}} \end{cases}, \quad (3.5)$$

$$\text{Volume inicial} = \begin{cases} \pi \left[\left(R_k^{\text{inicial}} \right)^2 - \left(R_{k+1}^{\text{inicial}} \right)^2 \right] t_0, & \text{se } R_k^{\text{inicial}} \geq R_{k+1}^{\text{inicial}} \\ \pi \left[\left(R_{k+1}^{\text{inicial}} \right)^2 - \left(R_k^{\text{inicial}} \right)^2 \right] t_0, & \text{se } R_k^{\text{inicial}} \leq R_{k+1}^{\text{inicial}} \end{cases}, \quad (3.6)$$

onde as variáveis que compõem as expressões estão descritas na Tabela 3.1. A espessura média é considerada para calcular o volume Δabc entre esboço deformado e a fronteira objetivo. A espessura inicial (t_0), é usada para calcular o volume ΔABC do esboço, como se mostra na Figura 3.4.



Área entre a fronteira do esboço objectivo e a fronteira do esboço deformado

- (Ponto: a, b, c, d, A, B) ; Posições dos nós conhecidas
- (Ponto: C, D) ; Posições dos nós calculadas seguindo as ideologias:
 - Volume de $\Delta abc = \text{Volume de } \Delta ABC$
 - Volume de $\Delta acd = \text{Volume de } \Delta ACD$

Figura 3.4. Diagrama esquemático da diferença de volume (a) adição (b) remoção (Park et al., 1999).

3.2.3. *Push-pull*

Este método de otimização foi proposto por (Padmanabhan et al., 2009), sendo chamado de método *push-pull*. Este algoritmo tem por objetivo obter uma geometria ótima do esboço com base no deslocamento da aba. As superfícies NURBS (*Non-Uniforme Racional B-spline Surfaces*) são utilizadas para definir a geometria do esboço em cada iteração, sendo que o procedimento de otimização atua sobre a posição dos pontos de controlo que definem a superfície NURBS. Deste modo, a superfície NURBS é modificada através da técnica *push-pull*, a qual é aplicada a um conjunto de pontos interpolados pela superfície (Figura 3.5 (a)).

A seleção inicial de um conjunto de pontos onde a técnica *push-pull* irá ser aplicada é baseada na distância mínima entre os pontos de controlo da curva P^i e os nós da malha inicial mais próximos destes pontos, como mostra a Figura 3.5 (a). Os nós selecionados na malha inicial, designados por $Q^i = R_k^{\text{inicial}}$, mudam a sua posição durante processo de estampagem. A interseção da sua trajetória e o contorno objetivo define a posição de intersecção chamada $R_{\text{obj}}^{\text{final}}$. Tendo em conta que são conhecidas a posição inicial R_k^{inicial} , intersecção $R_{\text{obj}}^{\text{final}}$ e da final R_k^{final} é possível calcular as posições ao novo conjunto de pontos de controlo.

$$Q_{k+1} = R_k^{\text{inicial}} + \xi (R_{\text{obj}}^{\text{final}} - R_k^{\text{final}}), \quad (3.7)$$

onde Q_{k+1} é o novo conjunto de pontos de define o novo contorno de esboço, R_k^{inicial} representa o conjunto de pontos que define o esboço inicial, $R_{\text{obj}}^{\text{final}}$ o conjunto de pontos do contorno deformado objetivo, R_k^{final} o conjunto de pontos que define a fronteira do componente deformado e ξ o coeficiente de amortecimento. O vetor $R_{\text{obj}}^{\text{final}} - R_k^{\text{final}}$ define a direção e a distância para mover cada nó inicial selecionado.

O coeficiente de amortecimento, ξ , envolvido na técnica *push-pull* é aplicado para controlar as oscilações observada no contorno da flange durante o processo iterativo do algoritmo. No entanto, como o seu valor é de difícil identificação (depende muito do exemplo em questão), neste estudo o coeficiente de amortecimento é definido como 1.

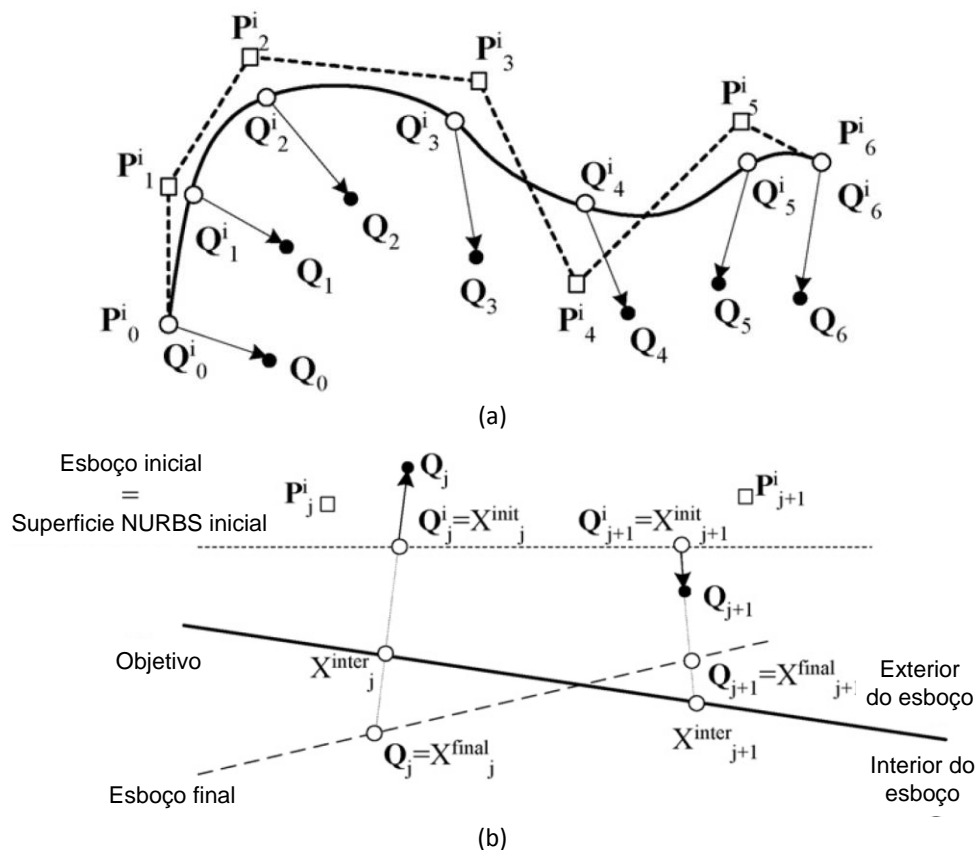


Figura 3.5. Variáveis intervenientes no método *push-pull*: (a) conjunto de pontos iniciais e finais; (b) aplicação da técnica (Padmanabhan et al., 2009).

3.3. Comparação entre algoritmos de otimização

De forma a fazer a comparação entre os algoritmos foi selecionado o exemplo de conformação de uma taça cilíndrica, descrito na secção 2.2, sendo que o objetivo é obter um componente com um comprimento de flange de 20 mm. Considerou-se para a solução inicial um esboço circular com raio de 100 mm. Obviamente o facto de ser considerado um material isotrópico e consequentemente apenas um parâmetro ser considerado no processo de otimização são fatores que ajudam à convergência de qualquer um dos métodos. Dependendo do algoritmo utilizado, o valor do coeficiente λ presente no expoente na função exponencial varia entre 0.8 e 2.0, como se mostra na Figura 3.6 (b). Quanto maior o valor do coeficiente λ , maior é a velocidade de convergência do algoritmo de otimização.

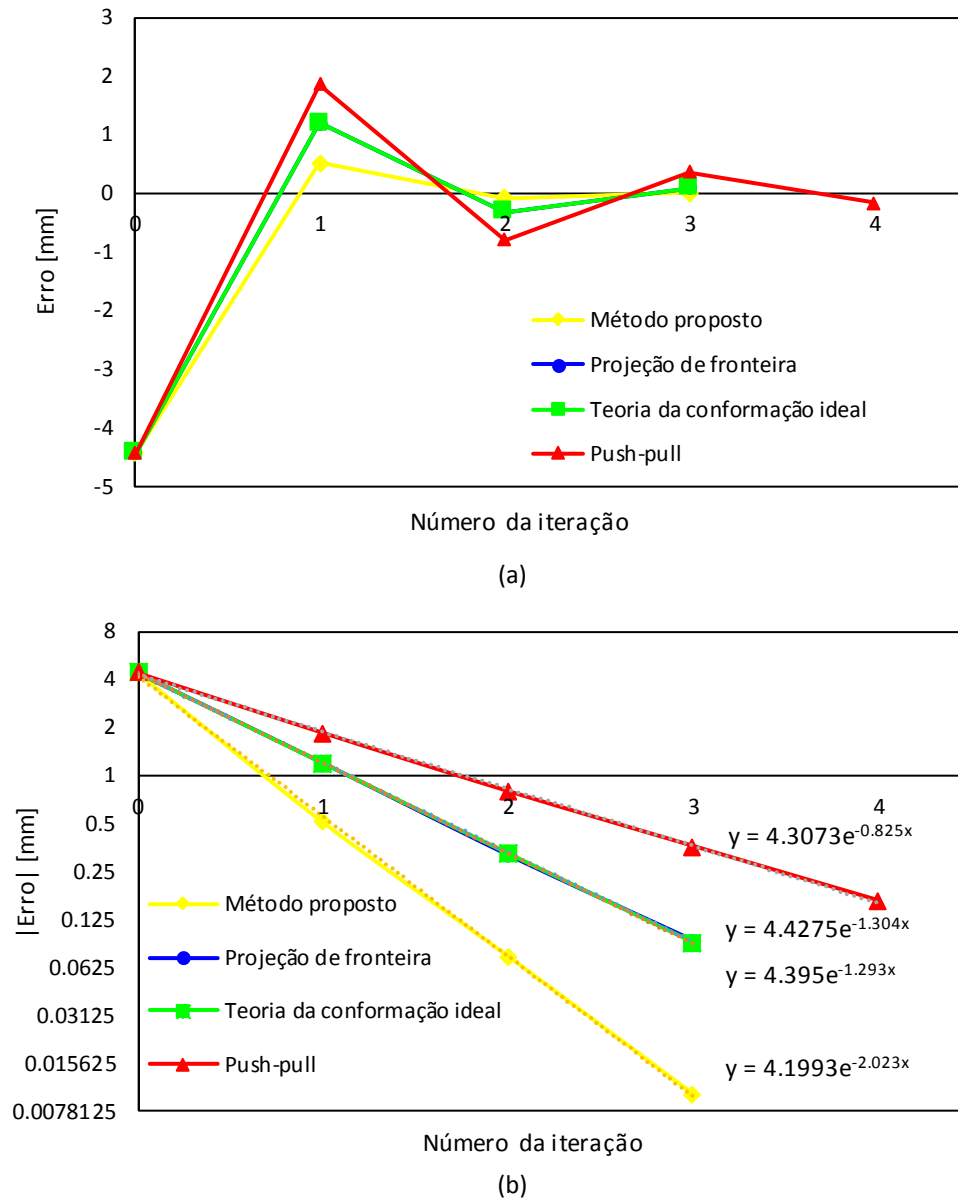


Figura 3.6. Evolução do erro geométrico durante o processo iterativo para vários métodos de otimização: (a) erro geométrico em função do número da iteração; (b) módulo do erro geométrico em função do número da iteração.

A Figura 3.7 apresenta os valores dos comprimentos da flange resultantes de cada raio inicial do esboço utilizado no processo iterativo, comparando os vários algoritmos apresentados com o algoritmo proposto. Efetivamente existe uma relação quase linear entre estas duas variáveis, sendo a relação de proporcionalidade aproximadamente $m=1.42$. Deste modo, a utilização deste valor no método proposto (equação (3.2)) iria melhorar significativamente a velocidade de convergência. De notar que o comprimento da flange oscila entre os valores inferiores e superiores ao comprimento de flange objetivo, como se

mostra na Figura 3.7. Apesar de o método *push-pull* apresentar a pior velocidade de convergência, esta é diretamente influenciada pelo valor do coeficiente de amortecimento adotado. Deste modo, a utilização de um coeficiente de amortecimento inferior a 1 iria conduzir a uma velocidade de convergência superior. No entanto, valores muito próximos de zero também conduzem a reduzidas velocidades de convergência, uma vez que o valor de correção feito em cada iteração é demasiado pequeno (não existe comportamento oscilatório).

Os resultados apresentados mostram que o algoritmo proposto possui a velocidade de convergência mais rápida, em comparação com os restantes algoritmos de otimização. Além disso, a velocidade de convergência ainda pode ser melhorada através da alteração do valor de declive utilizado na equação (3.2). Nos resultados apresentados foi utilizado o valor $m=1.2749$ que resulta da relação geométrica descrita em (2.6). No entanto, a utilização de um declive calculado através do resultado de duas simulações numéricas ($m=1.42$ na Figura 3.7) pode melhorar de forma significativa a velocidade de convergência.

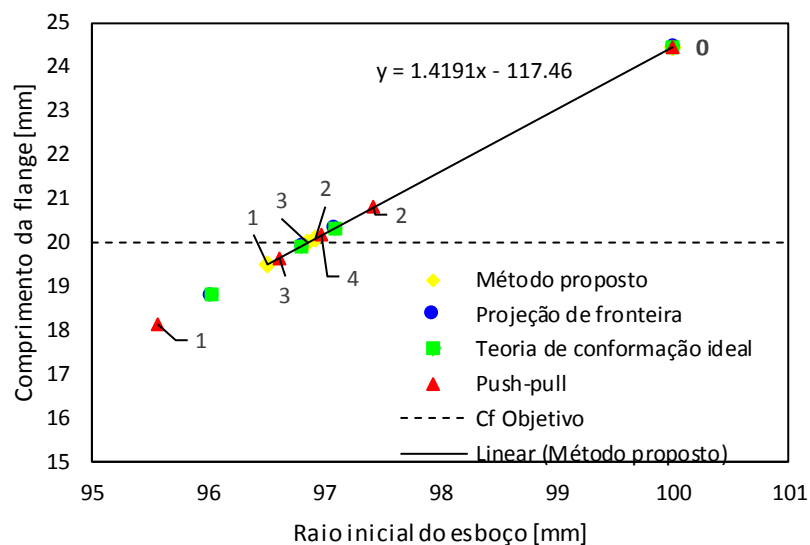


Figura 3.7. Comprimento da flange em função dos vários raios iniciais do esboço utilizados durante o processo iterativo (comparação entre vários algoritmos de otimização).

3.4. Aplicação do algoritmo proposto (chapa anisotrópica)

Apesar dos exemplos apresentados até ao momento serem 3D, durante o processo de otimização foi considerada apenas uma variável a otimizar. Isto só foi possível porque as ferramentas de conformação tinham uma geometria axissimétrica e o material da chapa era considerado isotrópico. De forma a alargar a aplicação do algoritmo proposto a processos de conformação mais próximos da realidade, a inclusão da anisotropia material é considerada no próximo exemplo. Para isso recorre-se ao exemplo da conformação de uma taça cilíndrica, descrito na Secção 2.2. As dimensões das ferramentas de conformação estão expostas na Tabela 2.3, sendo o material do esboço um aço macio, cujos parâmetros da lei constitutiva estão indicados na Tabela 2.4. Relativamente ao comportamento anisotrópico da chapa que constitui o esboço, este é descrito numericamente através do critério de plasticidade Hill'48. Os parâmetros do critério de plasticidade utilizados neste estudo estão indicados na Tabela 3.2, os quais foram extraídos do estudo feito por (Alves, 2003).

Tabela 3.2. Parâmetros do critério de anisotropia Hill'48 utilizados para descrever o comportamento anisotrópico da chapa utilizada na taça cilíndrica.

F	G	H	L	M	N
0.2826	0.3584	0.6416	1.5	1.5	1.2885

Devido às condições de simetria geométrica e material, simula-se apenas um quarto da taça cilíndrica. A força de aperto do cerra-chapas é de 70 kN e o deslocamento do punção de 40 mm. A malha de elementos finitos utilizada na discretização da chapa foi construída de tal forma que a dimensão de cada elemento finito seja de aproximadamente 1 mm no plano da chapa, utilizando duas camadas de elementos em espessura. O coeficiente de atrito entre a superfície do esboço e as ferramentas é descrito pela lei de Coulomb com o valor de $\mu = 0.0426$.

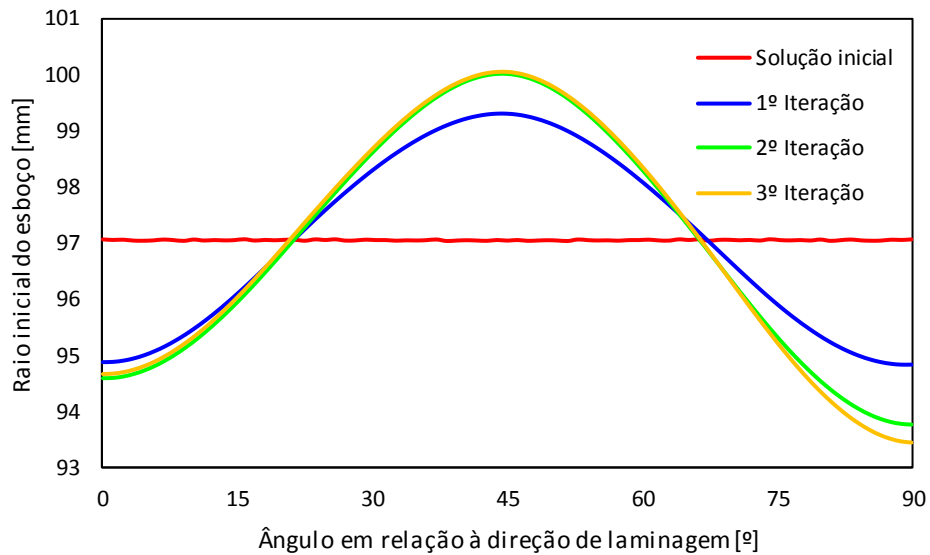
O objetivo delineado para este exemplo de conformação é obter uma taça cilíndrica com uma flange perfeitamente circular, sendo o seu comprimento de 20 mm. Sabendo que o material do esboço tem comportamento anisotrópico, a geometria do esboço que origina uma flange perfeitamente circular não pode ter uma geometria circular. Assim, a definição da geometria do esboço não pode ser feita apenas com um raio. No entanto, considerou-se que a geometria inicial do esboço era perfeitamente circular, tendo um raio de 97.1 mm, o qual

é obtido através da equação (2.8), ou seja, igualdade nas áreas superficiais antes e depois da estampagem.

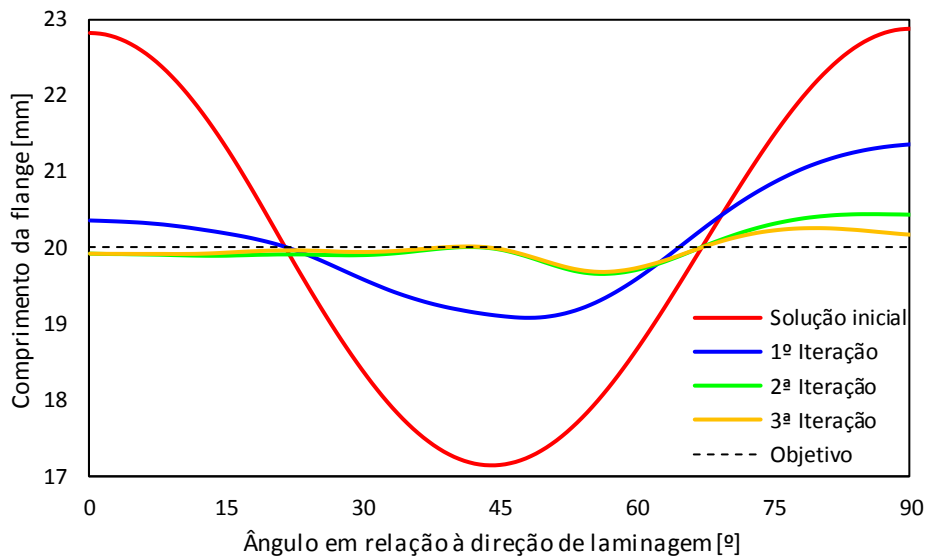
Uma vez que a geometria da flange não é circular durante o processo iterativo de otimização, torna-se necessário quantificar o seu desvio em relação ao objetivo definido. Assim, a diferença entre geometria da flange e o objetivo é avaliada em cinco pontos distintos ao longo da periferia da flange, pontos esses que são definidos pelos ângulos em relação à direção de laminagem, $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 22.5^\circ$, $\alpha = 45^\circ$, $\alpha = 67.5^\circ$, $\alpha = 90^\circ$. Portanto, o algoritmo proposto para otimização do esboço, descrito na Secção 3.1, é aplicado de forma independente a cada uma destas cinco direções, originando cinco valores diferentes de raio para o esboço. Tendo cinco valores de raio associados a cinco direções diferentes, recorre-se à interpolação com curvas NURBS para criar a geometria da fronteira do esboço a utilizar na simulação. Este procedimento é feito no programa de pré-processamento GID, recorrendo à função *Create nurbs line*. A descrição detalhada de cada passo necessário para definir a geometria do esboço é apresentada no Apêndice A.

O resultado do processo iterativo de otimização quando aplicado a este exemplo é apresentado na Figura 3.8. A geometria do esboço em cada iteração é apresentada na Figura 3.8 (a), onde se mostra o raio inicial do esboço em relação à direção de laminagem. A geometria apresentada resulta da interpolação NURBS com cinco pontos uniformemente espaçados. A geometria da flange após processo de estampagem é apresentada na Figura 3.8 (b) para cada iteração do processo de otimização. A escolha de uma geometria completamente circular para solução inicial resulta em desvios na ordem dos 3 mm relativamente ao objetivo, tal como se mostra na Figura 3.8 (b). Por outro lado, após a 1ª iteração, a geometria do esboço apenas sofre apenas pequenas alterações (ver Figura 3.8 (a)), uma vez que o comprimento final da flange já se encontra muito próximo do objetivo (diferenças inferiores a 0.5 mm). Uma vez que são utilizados apenas cinco pontos para definir a geometria do esboço por interpolação, o desvio em relação ao objetivo é superior nas zonas entre os pontos, como se pode ver na Figura 3.8. Efetivamente, a otimização da geometria do esboço com o algoritmo proposto necessitou de apenas quatro simulações numéricas para atingir o objetivo com um erro admissível. Ao contrário do exemplo anterior (isotropia material), neste caso não se verifica um comportamento oscilatório durante o processo iterativo (Figura 3.8). O facto de este aço apresentar um valor médio dos

coeficientes de anisotropia superior a 1 pode ser a causa para esta alteração de comportamento.



(a)



(b)

Figura 3.8. Evolução da geometria do esboço e flange durante o processo de otimização proposto: (a) raio inicial do esboço em relação à direção de laminagem; (b) comprimento da flange em relação à direção de laminagem.

O erro geométrico associado a cada geometria de esboço pode ser calculado de várias formas uma vez que a geometria da flange tem uma forma livre, não podendo ser definido apenas com uma distância. Deste modo, o erro geométrico é definido por:

$$\Delta_{\text{erro}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N d_i^2}, \quad (3.8)$$

onde N representa o número de pontos onde é avaliada a distância d entre geometria deformada e o objetivo. No entanto, neste estudo são estudadas duas variantes deste erro, diferindo apenas no número de pontos utilizados no seu cálculo. Num dos casos a distância d é calculada apenas nos cinco pontos utilizados para fazer a interpolação da geometria da fronteira do esboço. Na segunda variante, a distância d é calculada em todos os nós que pertencem à fronteira da flange. A Figura 3.9 apresenta a evolução do erro geométrico (ambas as variantes) durante o processo iterativo. O erro diminui de forma exponencial à medida que é efetuada uma nova iteração do processo de otimização, com exceção da última iteração. De facto, as duas variantes do erro apenas divergem de forma mais significativa na última iteração. O valor do erro geométrico calculado com a informação de toda a fronteira tende a estabilizar uma vez que o erro cometido na interpolação da geometria do esboço tende a ganhar importância para valores de erro pequenos.

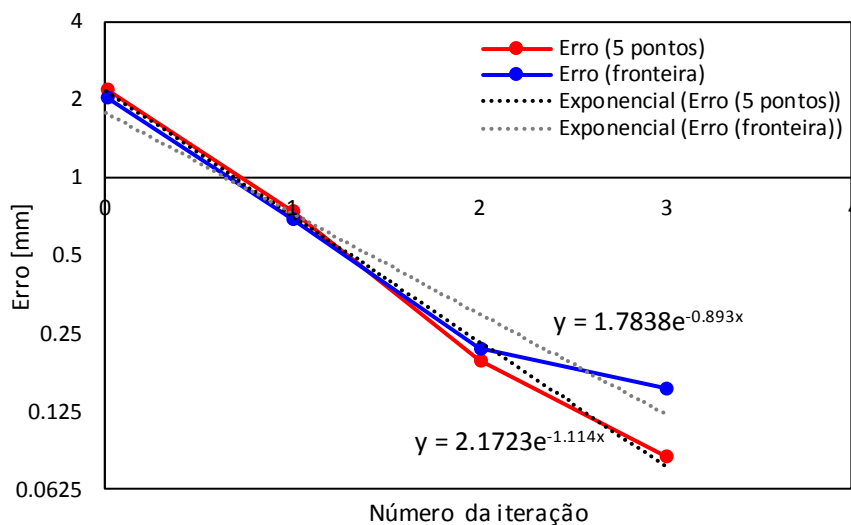


Figura 3.9. Evolução do erro geométrico cometido durante o processo iterativo do algoritmo proposto, aplicado a uma taça cilíndrica com material da chapa anisotrópico.

A geometria da flange na taça cilíndrica após conformação é exposta na Figura 3.10, comparando a geometria obtida com um esboço de geometria circular e a geometria obtida após otimização do esboço (3ª iteração). Como se pode observar na Figura 3.10 (b), a geometria da flange está muito próxima do objetivo pretendido, ou seja, tem um

comprimento uniforme ao longo de toda a periferia com 20 mm. A distribuição da deformação plástica equivalente é indicada na Figura 3.10. Verifica-se que a alteração da geometria do esboço conduz a uma alteração na distribuição da deformação plástica, principalmente na região da flange.

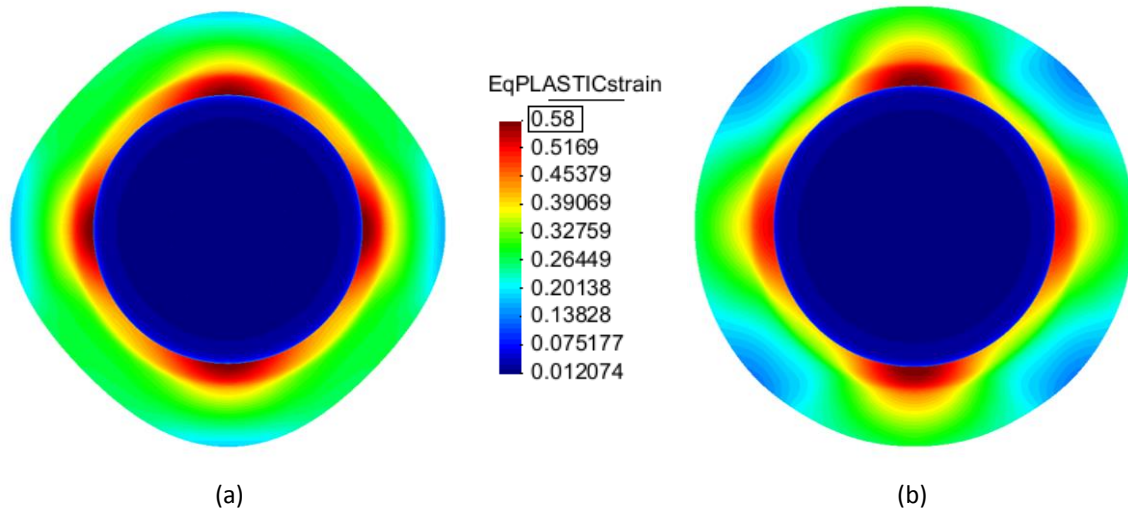


Figura 3.10. Geometria da flange na taça cilíndrica após conformação considerando geometrias diferentes para o esboço: (a) esboço circular (solução inicial); (b) esboço não circular (solução otimizada).

3.5. Processo de estampagem e estiramento de uma taça cilíndrica

Esta secção apresenta um exemplo de estampagem e estiramento de uma taça cilíndrica, o qual foi proposto no congresso Numisheet 2011 (Yoon & Dick, 2011) com o objetivo de estudar a evolução da altura das orelhas de estampagem. A liga de alumínio AA 5042 (0.208 mm de espessura) foi o material selecionado por apresentar um comportamento fortemente anisotrópico. Relativamente ao exemplo anterior, este exemplo contempla o processo de estampagem (não existe flange) seguido de estiramento da parede vertical. Isto faz com que o grau de complexidade aumente relativamente ao exemplo anterior.

Este processo de conformação envolve quatro ferramentas: o punção, o cerra-chapas e duas matrizes, uma destinada à estampagem e a outra ao estiramento. O facto de contemplar duas matrizes, permite estudar os dois processos simultaneamente (estampagem e estiramento), recorrendo apenas a uma simulação numérica. O deslocamento do punção chega ao fim quando atinge os 70 mm de profundidade, sendo que 40 mm pertencem à parte

da estampagem e os restantes 30 mm correspondem à fase de estiramento. As dimensões das ferramentas são apresentadas na Tabela 3.3 e os parâmetros da lei constitutiva utilizada para descrever o comportamento mecânico desta liga de alumínio estão indicados na Tabela 3.4.

Uma vez que neste processo não existe flange após conformação, o objetivo é obter uma taça cilíndrica com uma altura uniforme ao longo de toda a periferia, sendo essa altura de 20 mm.

Tabela 3.3. Dimensões das ferramentas de conformação utilizadas no processo de estampagem e estiramento.

Variável	Símbolo	Valor [mm]
Diâmetro do punção	D_p	45.72
Raio do punção	R_p	2.229
Deslocamento do Punção	d_p	70
Diâmetro da matriz (estampagem)	D_{m1}	46.736
Raio da matriz (estampagem)	R_m	1.905
Diâmetro da matriz (estiramento)	D_{m2}	46.05

Tabela 3.4. Propriedades mecânicas da liga de alumínio AA5042 utilizada na conformação da taça cilíndrica com estiramento.

Variável	Símbolo	Valor
Módulo de Young	E	68.90 GPa
Coeficiente de Poisson	ν	0.33
Parâmetros da lei de Voce	Y_0	296.99 MPa
	Y_{sat}	404.16 MPa
	C_Y	18,416
Critério de plasticidade Hill' 48	F	0.166345
	G	0.781645
	H	0.218382
	N	1.408586
	$L=M$	1.500000

Devido às condições de simetria geométrica e material, simula-se apenas um quarto da taça. O esboço é discretizado com elementos finitos hexaédricos de 8 nós, sendo este dividido em duas zonas: uma zona central com malha não estruturada e a parte externa com malha estruturada (semelhante à discretização apresentada na Figura 2.8 (b)). O número total de elementos finitos utilizados na descrição do esboço foi de aproximadamente 9000, permitindo que estes tenham uma dimensão média no plano da chapa de aproximadamente 0.5 mm. A geometria das ferramentas é discretizada com superfícies Bézier (Marques, 2014). O atrito entre a superfície das ferramentas e o esboço é descrito pela lei de Coulomb, sendo o coeficiente de atrito $\mu = 0.05$.

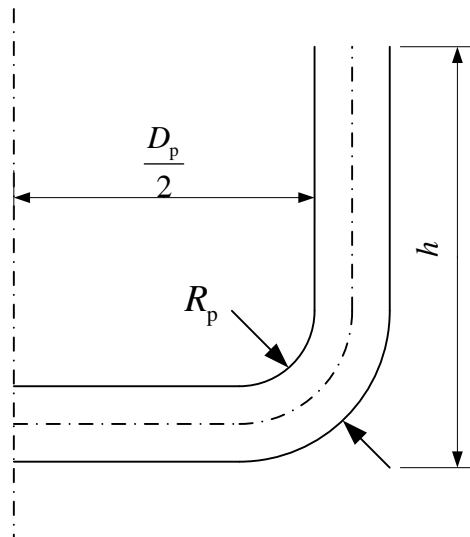


Figura 3.11. Esquema representativo das variáveis envolvidas no processo.

Como forma de ter uma boa solução inicial para a geometria do esboço, aplica-se o procedimento feito anteriormente, ou seja, calcula-se um raio de esboço que tenha o mesmo volume que a geometria da taça desejada, considerando que não existe variação da espessura durante o processo de conformação. Deste modo, a igualdade de volumes pode ser substituída pela igualdade de áreas no plano da chapa:

$$V_{\text{Inicial}} = V_{\text{Final}} \Rightarrow A_{\text{Inicial}} = A_{\text{Final}}, \quad (3.9)$$

onde V_{Inicial} é o volume inicial do esboço e V_{Final} é o volume da taça cilíndrica após conformação. Assim, A_{Inicial} e A_{Final} são, respetivamente, a área do esboço e a área após

conformação da taça cilíndrica. De acordo com a geometria da taça cilíndrica (ver Figura 3.11), a área final pode ser calculada através da soma de áreas resultantes de geometrias simples:

$$A_{\text{Inicial}} = A_{\text{Circulo}} + A_{\text{Toroide}} + A_{\text{Cilindro}}, \quad (3.10)$$

onde A_{Circulo} representa a área do círculo da base, A_{Toroide} a área do toróide dado pelo raio da do punção e A_{Cilindro} a área do cilindro. Considerando que as variáveis são avaliadas na linha média (meia espessura), tem-se:

$$\frac{\pi(R_0)^2}{4} = \left\{ \frac{\pi\left(\frac{D_p}{2} - R_p\right)^2}{4} + \frac{1}{2} \left\{ 2\left(\frac{D_p}{2} - R_p\right) \pi^2 \left(R_p + \frac{t_0}{2}\right) + 4\pi \left(R_p + \frac{t_0}{2}\right)^2 \right\} \right\} + \left. \frac{(h - R_p - t_0) \pi (D_p + t_0)}{4} \right\}, \quad (3.11)$$

onde R_0 corresponde ao raio do esboço inicial, D_p ao diâmetro do punção, R_p ao raio de curvatura do punção, t_0 a espessura inicial do esboço e h a altura objetivo da taça. Após alguma manipulação matemática é possível isolar a variável corresponde ao raio do esboço inicial:

$$R_0 = \sqrt{\left(\frac{D_p}{2} - R_p\right)^2 + \left(\frac{D_p}{2} - R_p\right) \pi \left(R_p + \frac{t_0}{2}\right) + 2\left(R_p + \frac{t_0}{2}\right)^2 + (h - R_p - t_0)(D_p + t_0)}. \quad (3.12)$$

3.5.1. Resultados e discussão

O cálculo analítico do raio inicial em função da altura desejada para a taça (20 mm) é obtido pela equação (3.12), utilizando os valores indicados na Tabela 3.3. Apesar de existir deformação ao longo da espessura da chapa durante o processo de estampagem, a relação analítica (3.12) não considera essa deformação. Portanto, o valor obtido foi de 37.34 mm, sendo este utilizado para construir o esboço circular a utilizar na solução inicial do processo iterativo.

A Figura 3.12 (a) apresenta a evolução da geometria do esboço durante o processo iterativo do algoritmo de otimização. A altura da taça em função do ângulo formado com a direção de laminagem é representada na Figura 3.12 (b), comparando as várias iterações do

algoritmo. Observa-se que a geometria do esboço converge rapidamente para a geometria ótima, sendo que ao fim da 2ª iteração o desvio na altura da taça em relação ao objetivo é inferior a 0.4 mm. De notar que, a geometria do esboço é obtida através de interpolação com NURBS, recorrendo a apenas dez pontos uniformemente espaçados em termos de ângulo. A utilização de mais pontos permite obter uma geometria mais precisa para a fronteira do esboço. No entanto, uma vez que o algoritmo de otimização proposto na Secção 3.1 é aplicado a cada um dos pontos, a utilização de mais pontos conduz a um aumento da dificuldade.

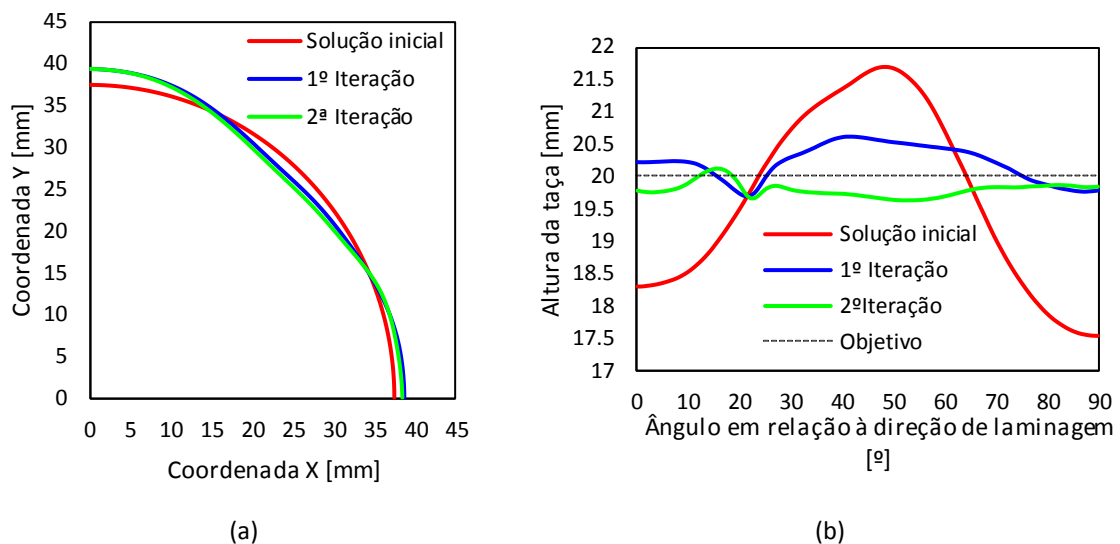


Figura 3.12. Comportamento do algoritmo proposto quando aplicado ao processo de estampagem e estiramento de uma taça cilíndrica: (a) evolução da fronteira do esboço durante o processo iterativo; (b) evolução da altura da taça durante o processo iterativo.

A anisotropia plástica do material (descrita pelo critério de plasticidade Hill'48) leva ao deslizamento não uniforme da flange (ver Figura 3.10) devido ao facto da deformação plástica não ocorrer de forma igual ao longo da direção circunferencial. Além disso, a espessura final da taça não é uniforme ao longo da direção circunferencial, tendo valores diferentes quando medida a várias direções com a direção de laminagem. A distribuição da espessura no final do processo de estampagem e estiramento é apresentada na Figura 3.13 (a) para três direções diferentes com a direção de laminagem. Observa-se uma grande discrepância na espessura prevista para as várias direções, sendo esta mais baixa na direção de laminagem e mais elevada na direção transversa. De facto, esta liga de alumínio apresenta

um coeficiente de anisotropia de aproximadamente 0.35 na direção de laminagem e aproximadamente 1.4 na direção transversa (Marques, 2014). A zona da flange tem um estado de deformação próximo da compressão uniaxial segundo a direção circunferencial e sabendo que coeficiente de anisotropia é dado por:

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t}, \quad (3.13)$$

onde ε_w representa a deformação plástica na direção radial e ε_t representa deformação em espessura. Portanto, a deformação em espessura é menor (coeficiente de anisotropia maior) na zona da taça alinhada com direção de laminagem. Deste modo, a espessura final na parede da taça é menor na direção de laminagem (DL), como se mostra na Figura 3.13 (a), uma vez que a espessura da chapa tende a aumentar durante o escoamento da flange. A espessura final da taça na direção de laminagem é apresentada na Figura 3.13 (b) para as várias iterações do processo de otimização. Apenas o resultado da solução inicial difere de forma significativa, verificando-se uma redução do valor da espessura na parede vertical da taça (coordenada desde o centro da base superior a 26 mm) para a geometria do esboço otimizada. Esta redução de espessura deve-se ao facto de localmente o esboço ter aumentado de raio nesta direção (ver Figura 3.12 (a)), o que origina uma redução de espessura global, como observado anteriormente em Figura 2.12.

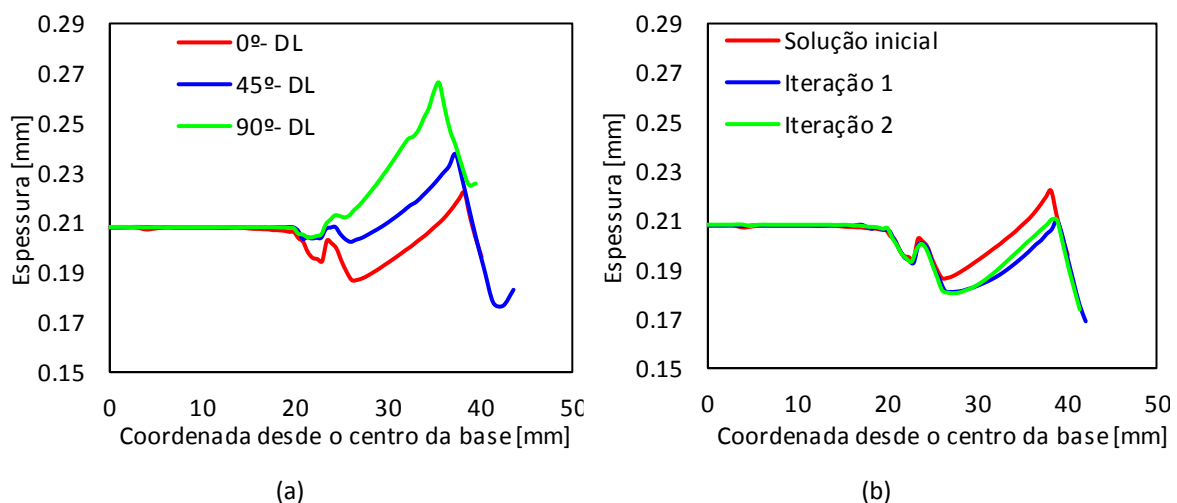


Figura 3.13. Distribuição da espessura no final do processo de estampagem e estiramento: (a) comparação entre três direções diferentes para o esboço inicial circular; (b) comparação entre várias iterações no processo iterativo, considerando a espessura na direção de laminagem.

A evolução do erro geométrico (ambas as variantes) durante o processo iterativo é apresentada na Figura 3.14. O erro diminui à medida que é efetuada uma nova iteração do processo de otimização, no entanto, não de uma forma exponencial. Além disso, as duas variantes do erro são quase coincidentes, o que pode ser justificado pelo facto de serem utilizados 10 pontos para fazer a interpolação com curva NURBS. Ao fim de duas iterações, o valor do erro é aproximadamente 0.25 mm para ambas as variantes.

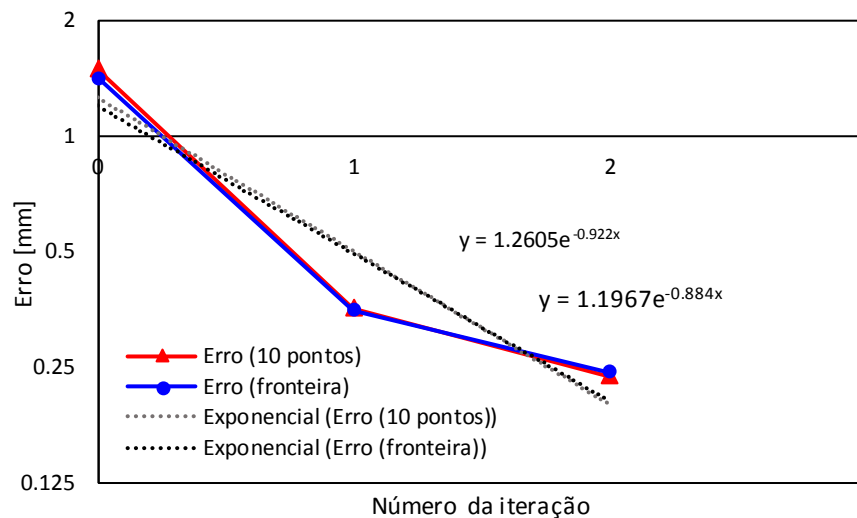


Figura 3.14. Evolução do erro geométrico cometido durante o processo iterativo para o caso de estampagem e estiramento de uma taça cilíndrica.

A geometria final da taça cilíndrica após estampagem e estiramento é apresentada na Figura 3.15, comparando a solução inicial para a geometria do esboço (circular) com a geometria otimizada (não circular). Efetivamente, após otimização da geometria do esboço, a taça cilíndrica tem uma altura aproximadamente uniforme ao longo de toda a periferia (ver Figura 3.15 (b)), ao contrário do surgimento de orelhas de estampagem quando é utilizado um esboço de geometria circular (Figura 3.15 (a)). A distribuição da deformação plástica equivalente é indicada na Figura 3.15, evidenciando que a alteração da geometria do esboço conduz a uma alteração significativa na distribuição da deformação plástica equivalente. Esta alteração deve-se ao facto de o escoamento da flange se dar de forma mais heterogênea, conduzido à concentração da deformação em algumas zonas.

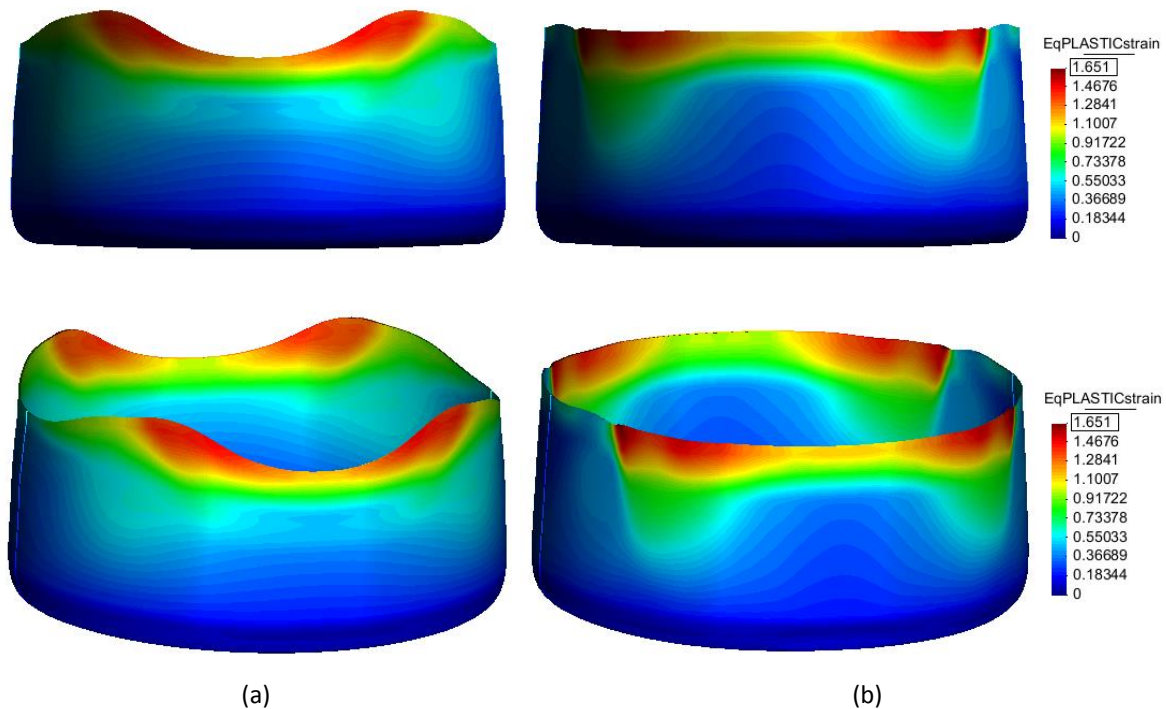


Figura 3.15. Geometria final da taça cilíndrica após estampagem e estiramento: (a) esboço inicial circular; (b) esboço otimizado não circular (2ª iteração).

3.6. Conformação de uma taça em cruz

O último exemplo escolhido para testar o algoritmo de otimização tem em conta uma geometria relativamente complexa para as ferramentas de estampagem. Assim, a estampagem de uma taça em forma de cruz é o exemplo escolhido (Santos, 2012). Para além do comportamento anisotrópico da chapa metálica, a grande dificuldade está relacionada com a geometria das ferramentas. O objetivo neste caso é determinar a geometria do esboço que permita obter uma taça em forma de cruz com uma flange de uniforme ao longo de toda a periferia com dimensão de 20 mm.

O processo de estampagem é dividido em duas fases: (i) aperto do cerra-chapas e (ii) deslocamento do punção, sendo que a força de aperto do cerra-chapas é de 75 kN e o processo de conformação é finalizado quando o punção se desloca 60 mm. O material que constitui o esboço é um aço macio cujas propriedades são apresentadas na Tabela 3.5. Os parâmetros da lei constitutiva (lei de Swift e critério de plasticidade Hill'48) utilizada para descrever o comportamento mecânico deste aço estão indicados na Tabela 3.5. A geometria

das ferramentas de conformação é descrita com superfícies Bézier. O coeficiente de atrito entre a chapa e as ferramentas é de 0.03. Devido às condições de simetria geométrica e material, simula-se apenas um quarto da taça. A chapa tem 1 mm de espessura e inicialmente é considerado um esboço geometricamente circular, tal como foi feito no exemplo anterior. Relativamente à discretização do esboço, este é constituído por elementos finitos hexaédricos, sendo que estes têm aproximadamente a dimensão de 1 mm no plano da chapa e sempre com duas camadas de espessura.

Tabela 3.5. Propriedades do aço macio utilizado no processo de estampagem de uma traça em cruz.

Variável	Símbolo	Valor
Módulo de Young	E	210 GPa
Coefficiente de Poisson	ν	0.300
Tensão limite de elasticidade	Y_0	123.610 MPa
Parâmetros da lei de Swift	K	529.500 MPa
	ε_0	0.00439
	n	0.268
Critério de plasticidade de Hill'48	F	0.251
	G	0.297
	H	0.703
	$L=M$	1.500
	N	1.290

3.6.1. Resultados e discussão

O primeiro passo necessário para o algoritmo de otimização é a seleção da solução inicial, ou seja, uma geometria inicial para o esboço. Considerando a condição de conservação do volume e assumindo que não existe deformação em espessura durante o processo (área superficial do esboço inicial é igual à área superficial do componente após conformação), temos:

$$V_{\text{Inicial}} = V_{\text{Final}} \Rightarrow A_{\text{Inicial}} = A_{\text{Final}} \quad (3.14)$$

$$A_{\text{Inicial}} = \frac{\pi R_0^2}{4} \quad (3.15)$$

onde o V_{Inicial} e A_{Inicial} são, respetivamente, o volume e a área antes da deformação; V_{Final} e A_{Final} , o volume e a área depois da conformação do componente. Assim, obtida a área final da taça objetivo torna-se possível calcular o raio inicial do esboço necessário para a solução inicial. Dada a complexidade da geometria da taça em forma de cruz, recorreu-se a um programa CAD (Autodesk Inventor) para calcular a área final do componente objetivo. O raio correspondente ao esboço circular inicial é calculado através da equação (3.15), utilizando a área final da superfície da taça em cruz, obtendo-se o valor de 137.02 mm.

Na Figura 3.16 está representada a evolução da fronteira da flange durante o processo de conformação, bem como fronteira objetivo final. Uma vez que as ferramentas de conformação não são axissimétricas, a trajetória de deslizamento dos pontos pertencentes à fronteira não é exatamente radial. O desvio relativamente a uma trajetória radial é mais pronunciado no final do processo em algumas direções, como se mostra na Figura 3.16. Anteriormente, o algoritmo proposto assumia que as trajetórias de todos pontos seguiam uma linha reta na direção radial. No entanto, neste exemplo o ângulo formado entre um dado ponto da fronteira e a direção de laminagem pode ser consideravelmente diferente no início e no fim do processo de conformação. Deste modo, são utilizados dez pontos uniformemente espaçados em termos de ângulo para definir a nova geometria do esboço através de interpolação com NURBS. Estes dez pontos são definidos apenas na fronteira da taça em cruz após deformação, onde é avaliado erro geométrico com recurso à equação (3.8). Posteriormente, a correção feita à geometria do esboço é levada a cabo através da alteração das coordenadas destes mesmos pontos, mas nas suas coordenadas iniciais (podem estar localizados num ângulo diferente). A distância envolvida no cálculo do erro é avaliada na direção radial, o que pode não representar a distância mínima entre a geometria deformada e o objetivo.

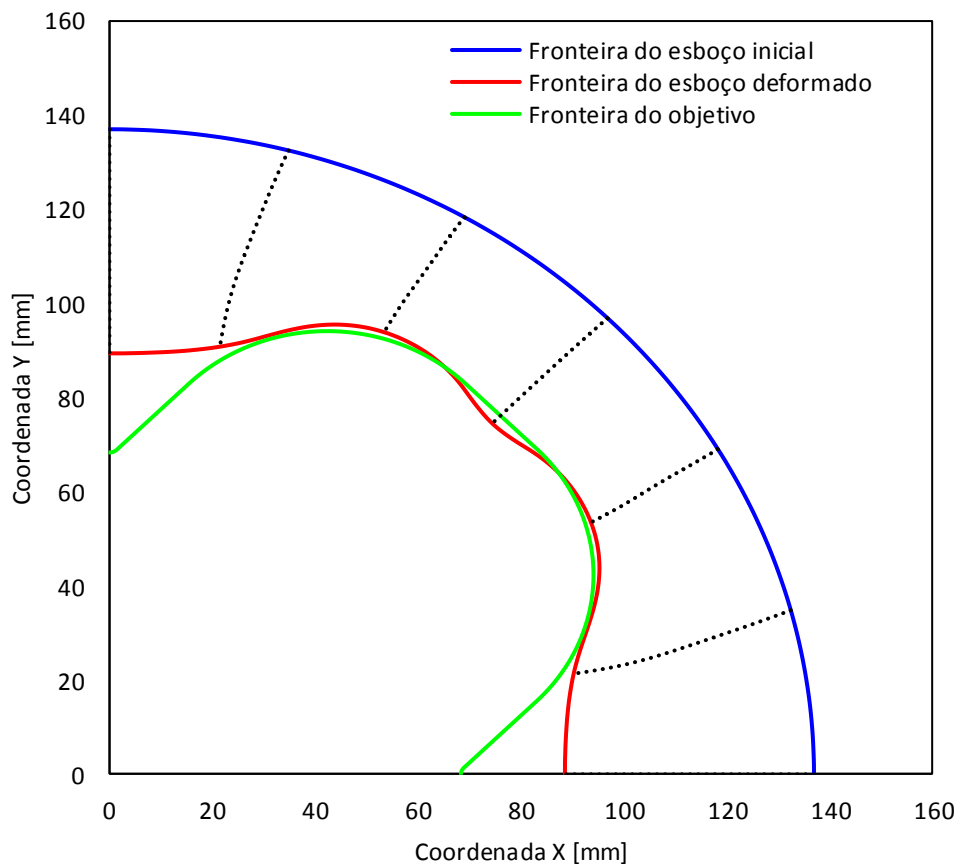


Figura 3.16. Trajetória de deslizamento de alguns pontos pertencentes à fronteira durante a deformação do esboço.

A evolução da fronteira do esboço após várias iterações é apresentada na Figura 3.17, comparando a fronteira do esboço inicial com a fronteira do esboço após sofrer deformação devido ao processo de conformação. Analisando a Figura 3.17, a solução inicial afasta-se do objetivo, principalmente junto à direção de laminagem e direção transversa. Assim torna-se necessário ajustar o esboço inicial de forma a obter uma solução mais próxima do objetivo. Apesar de se verificar um comportamento oscilatório na geometria do esboço, nomeadamente na direção de laminagem e na direção transversa, o processo iterativo do algoritmo proposto é convergente, como se mostra Figura 3.17.

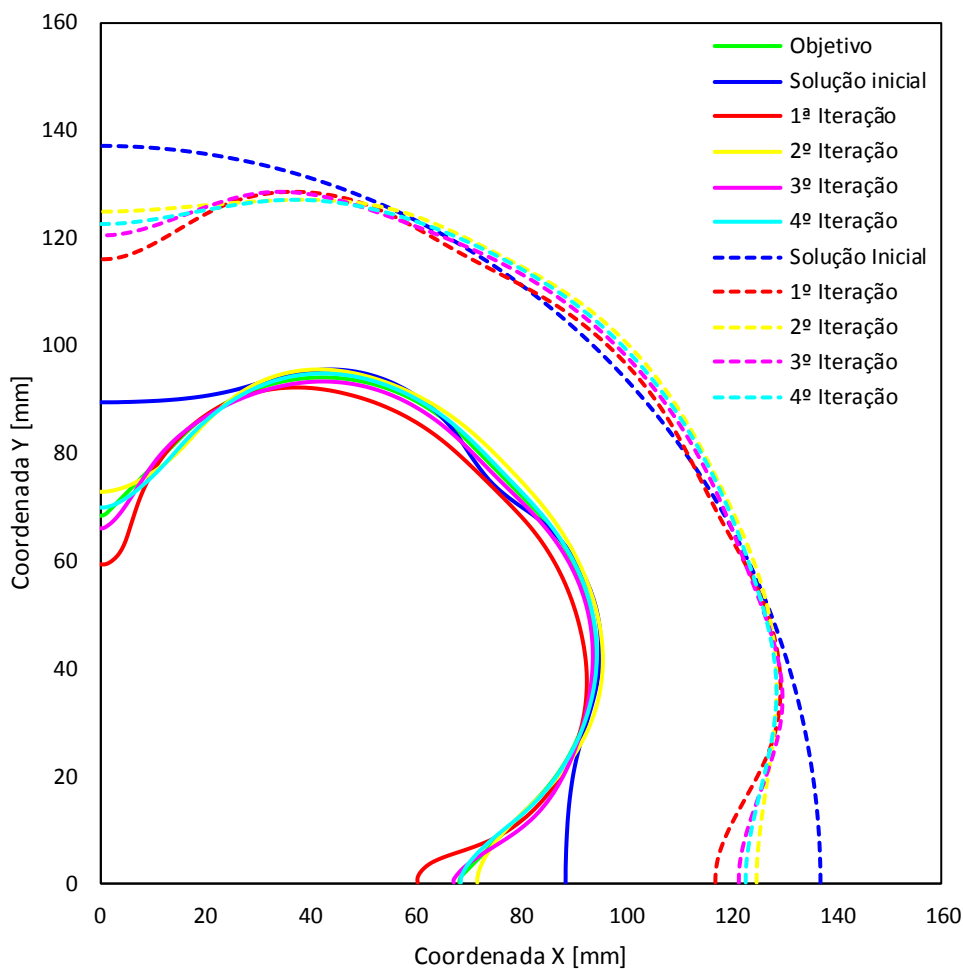


Figura 3.17. Comparação entre geometria do esboço e geometria final da fronteira da taça em cruz para várias iterações do algoritmo de otimização.

A evolução do erro geométrico em cada iteração do processo de otimização é apresentada na Figura 3.18. Tal como nos exemplos anteriores, o erro tem uma evolução aproximadamente exponencial, convergindo rapidamente para a solução desejada. De facto, ao fim da 4ª iteração o erro já é inferior a 1 mm. De notar que o erro foi avaliado em 10 pontos. Apesar da solução inicial estar mais afastada do objetivo neste exemplo em comparação com os anteriores, a velocidade de convergência também é mais reduzida. Esta deve-se essencialmente à complexidade da geometria pretendida e da não linearidade das trajetória de escorregamento, motivadas pela geometria das ferramentas.

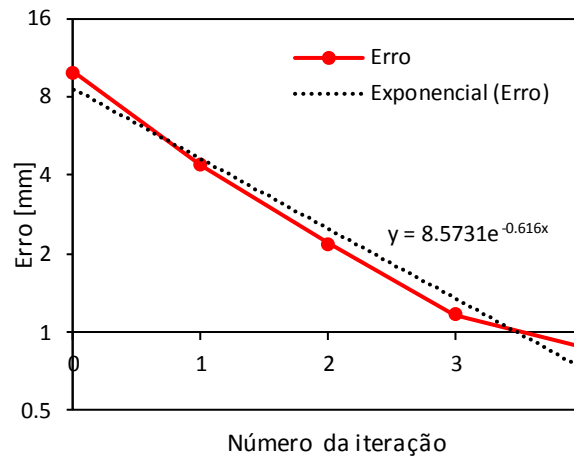


Figura 3.18. Evolução do erro geométrico calculado em cada iteração no processo de otimização da geometria do esboço para a taça em cruz.

A geometria final da taça em cruz após conformação é apresentada na Figura 3.19 para a geometria de esboço otimizada (4ª iteração). Verifica-se que o componente tem uma flange uniforme ao longo de toda a periferia com a dimensão pretendida. A distribuição da tensão de escoamento é representada na mesma figura. O valor máximo ocorre nas zonas de curvatura da flange, tanto na direção de laminagem como na direção transversa. O valor máximo de deformação plástica surge na mesma posição. Por outro lado, tanto a tensão de escoamento como a deformação plástica têm um valor reduzido na base da taça, como se mostra na Figura 3.19.

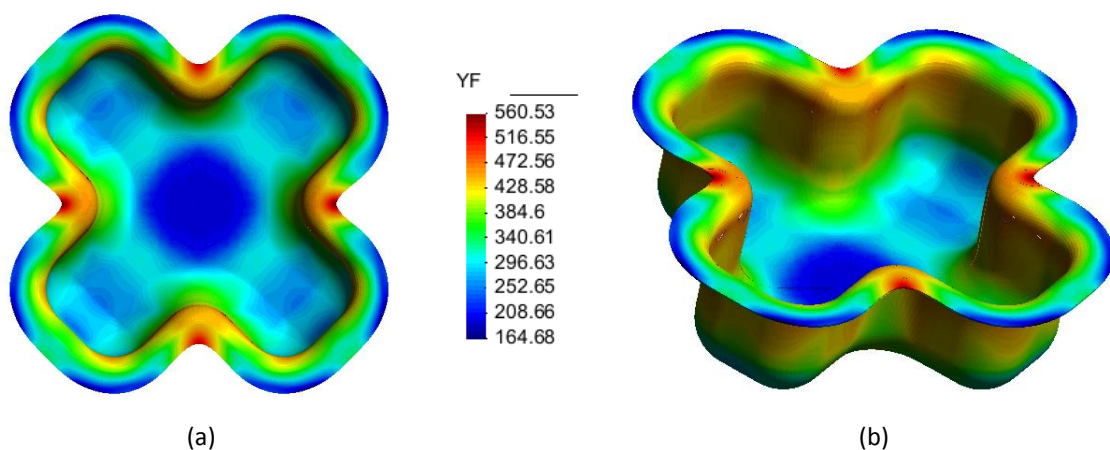


Figura 3.19. Geometria final da taça em cruz após conformação utilizando o esboço otimizado: (a) vista XY; (b) vista XYZ. A distribuição de cores representa a tensão de escoamento.

A Figura 3.20 apresenta a força exercida pelo punção em função do deslocamento realizado por este, comparando os resultados de várias iterações do processo de otimização. Apenas a solução inicial e a 1ª iteração conduzem a resultados ligeiramente diferentes, nomeadamente na zona de regime estacionário (força relativamente constante). A subida repentina da força no final do processo de conformação (onde atinge o valor máximo) resulta do fecho completo da chapa entre a matriz e o punção (etapa de calibração). Dado que a dimensão do esboço utilizado na solução inicial é maior (ver Figura 3.17), a força exercida pelo punção também é globalmente maior, como se mostra na Figura 3.20.

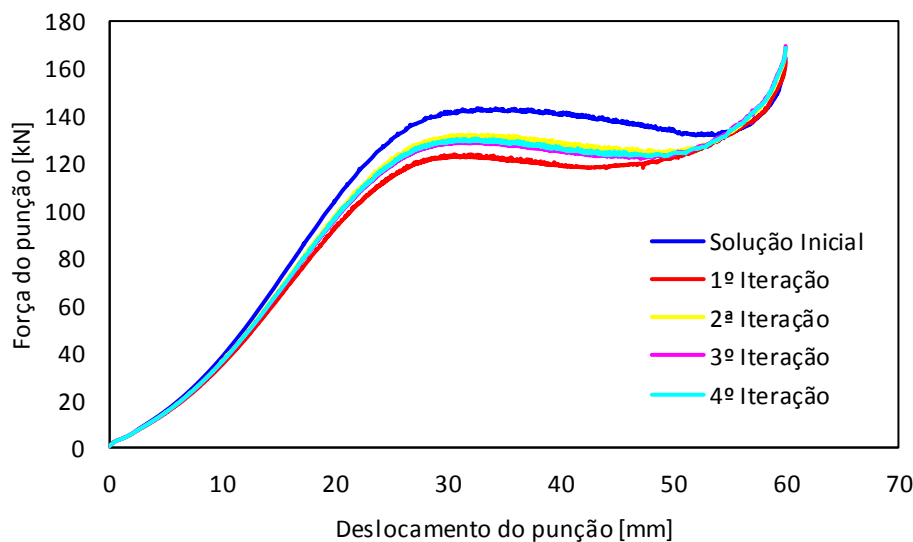


Figura 3.20. Força exercida pelo punção em função do seu deslocamento para a taça em cruz, comparando as várias iterações do processo de otimização.

A Figura 3.21 apresenta distribuição da espessura ao longo da direção de laminagem desde o centro da base até à extremidade, comparando as soluções das várias iterações. Tal como no caso da evolução da força, também a espessura tem uma distribuição diferente no caso da solução inicial, nomeadamente uma maior redução de espessura. De facto, a distribuição de espessura é idêntica para as duas últimas iterações do processo de otimização, como se mostra na Figura 3.21.

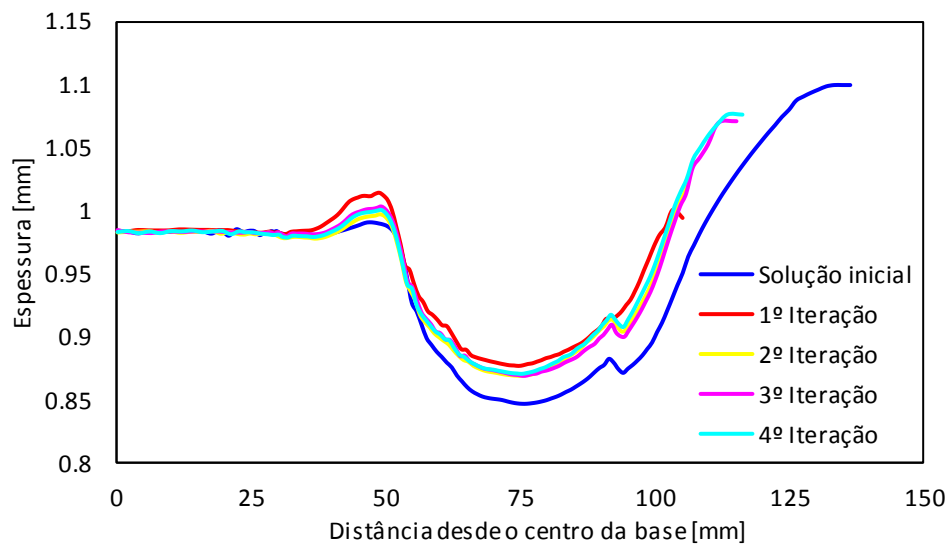


Figura 3.21. Distribuição da espessura na direção de laminagem no caso da taça em cruz, comparando as várias iterações do algoritmo.

4. CONCLUSÕES

O processo de estampagem de chapas metálicas é muito utilizado em diversas indústrias, em particular na indústria automóvel, onde são necessárias grandes cadências de produção. O objetivo principal do presente trabalho foi o desenvolvimento de um algoritmo de otimização que permitisse obter a geometria inicial do esboço, minimizando a quantidade de material desperdiçado. Para isso, foram escolhidos, inicialmente, dois exemplos de estampagem, onde foi possível avaliar a influência da geometria inicial do esboço na configuração final do componente conformado. Um dos exemplos selecionados foi a conformação do perfil em U, sendo o segundo exemplo a conformação de uma taça cilíndrica, considerando diferentes coeficientes de anisotropia no plano da chapa. No caso do perfil em U, o comprimento do esboço não influencia o deslizamento da flange. Por outro lado, na taça cilíndrica o raio do esboço influencia significativamente o deslizamento da flange, bem como a evolução da força do punção. Em ambos os exemplos, existe uma relação aproximadamente linear entre o comprimento final da flange e o comprimento do esboço. Deste modo, foi possível estabelecer uma relação analítica baseada na igualdade de áreas antes e depois da deformação. Apesar da deformação em espessura não ser considerada no processo analítico, foi possível obter uma boa aproximação para o comprimento da flange. De notar ainda que os diferentes valores para os coeficientes de anisotropia influenciam a espessura final da taça cilíndrica, de tal forma que quanto maior o coeficiente de anisotropia, menor será a deformação em espessura sofrida.

Uma vez que os estudos realizados permitiram observar uma relação aproximadamente linear entre o raio do esboço e o comprimento final da flange é proposto um novo algoritmo de otimização. Este foi posteriormente comparado com outros algoritmos propostos na literatura, permitindo apurar a velocidade de convergência de cada um deles. De todos os algoritmos avaliados, o método proposto apresentou uma velocidade de convergência maior em comparação com os outros, sendo que o modelo *push-pull* apresenta a menor velocidade de convergência. De seguida, o algoritmo proposto foi utilizado para fazer a otimização da geometria do esboço em dois processos de estampagem, nomeadamente um processo de estampagem e estiramento de uma taça cilíndrica e na conformação de uma taça em cruz.

Em ambos os casos, a geometria do esboço converge rapidamente para a geometria ótima, tendo um comportamento aproximadamente exponencial. De notar que, a geometria da fronteira do esboço foi obtida através de interpolação com uma curva NURBS, recorrendo a apenas dez pontos uniformemente espaçados em termos de ângulo. No caso da conformação de uma taça em cruz verificou-se um comportamento oscilatório para a geometria do esboço, nomeadamente na direção de laminagem e na direção transversa, onde o escoamento é mais pronunciado.

Em forma de conclusão foi possível ainda analisar que a velocidade de convergência do algoritmo proposto ainda pode ser melhorada através da alteração do valor de declive utilizado na equação (3.2). Nos resultados apresentados foi utilizado o valor $m=1.2749$, que resulta da relação geométrica da área do esboço e da área após conformação da taça cilíndrica isotrópica. No entanto, a utilização de um declive calculado através do resultado de duas simulações numéricas (declive calculado através de dois pontos) pode melhorar de forma significativa a velocidade de convergência. Além disso, este declive pode ser diferente em cada um dos pontos utilizados para fazer a interpolação com curva NURBS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, J. L. D. C. M. (2003). *Simulação numérica do processo de estampagem de chapas metálicas - Modelação mecânica e métodos numéricos*.
- Andersson, A. (2005). Numerical and experimental evaluation of springback in a front side member. *Journal of Materials Processing Technology*, 169(3), 352–356.
<http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.04.095>
- Baptista, A. (2006). *Modelação Mecânica e Simulação Numérica do Processo de Estampagem Multi-Etapas Modelação Mecânica e Simulação Numérica do Processo de Estampagem Multi-Etapas – Aplicação ao processo de estampagem de chapas soldadas* –. Universidade de Coimbra.
- Basu, P. (2006). Material Issues, 299–336. <http://doi.org/10.1201/9781420005158.ch9>
- Hughes, T. J. R. (1980). Generalization of selective integration procedures to anisotropic and nonlinear media. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 15(9), 1413–1418. <http://doi.org/10.1002/nme.1620150914>
- Kitayama, S., Natsume, S., Yamazaki, K., Han, J., & Uchida, H. (2015). Numerical optimization of blank shape considering flatness and variable blank holder force for cylindrical cup deep drawing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1–12. <http://doi.org/10.1007/s00170-015-8087-x>
- Kitayama, S., Saikyo, M., Kawamoto, K., & Yamamichi, K. (2015). Multi-objective optimization of blank shape for deep drawing with variable blank holder force via sequential approximate optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 52(5), 1001–1012. <http://doi.org/10.1007/s00158-015-1293-1>
- Marciniak, Z., Duncan, J. ., Hu, S. J., Marciniak, Z., Duncan, J. ., & Hu, S. J. (2002). Mechanics of Sheet Metal Forming. In *Elsevier*. <http://doi.org/10.1016/B978-075065300-8/50003-0>
- Marques, R. (2014). *Otimização da Geometria do Esboço na Estampagem de Componentes Cilíndricos*. Universidade de Coimbra.
- Meinders, T. (2002, September 9). Numisheet 2002 Benchmark Test A: Cylindrical cup drawing. Retrieved from

- http://doc.utwente.nl/59402/1/numisheetBenchA_conference_2002_meinders.pdf
- Menezes, L. F., & Teodosiu, C. (2000). Three-dimensional numerical simulation of the deep-drawing process using solid finite elements. *Journal of Materials Processing Technology*, 97(1-3), 100–106. [http://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00345-3](http://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00345-3)
- Neto, D. M., Oliveira, M. C., Menezes, L. F., & Alves, J. L. (2014). Applying Nagata patches to smooth discretized surfaces used in 3D frictional contact problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 271, 296–320. <http://doi.org/10.1016/j.cma.2013.12.008>
- Oliveira, M. C. (2005). *Algoritmos e Estratégias de Gestão do Problema de Contacto com Atrito em Grandes Deformações Aplicação à Estampagem de Chapas Metálicas*.
- Oliveira, M. C., Alves, J. L., & Menezes, L. F. (2008). Algorithms and strategies for treatment of large deformation frictional contact in the numerical simulation of deep drawing process. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 15(2), 113–162. <http://doi.org/10.1007/s11831-008-9018-x>
- Padmanabhan, R., Oliveira, M. C., Baptista, A. J., Alves, J. L., & Menezes, L. F. (2009). Blank design for deep drawn parts using parametric NURBS surfaces. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(5), 2402–2411. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.05.035>
- Park, S. H., Yoon, J. W., Yang, D. Y., & Kim, Y. H. (1999). Optimum blank design in sheet metal forming by the deformation path iteration method. *International Journal of Mechanical Sciences*, 41(10), 1217–1232. [http://doi.org/10.1016/S0020-7403\(98\)00084-8](http://doi.org/10.1016/S0020-7403(98)00084-8)
- Santos, H. (2012). *Validação e otimização de algoritmos de contacto com atrito aplicados a superfícies Nagata*. Universidade de Coimbra.
- Taylor, L., Cao, J., Karafillis, A. P., & Boyce, M. C. (1995). Numerical simulations of sheet-metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 50(1-4), 168–179. [http://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)01378-E](http://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01378-E)
- Vafaeseefat, A. (2011). Finite Element Simulation for Blank Shape Optimization in Sheet Metal Forming. *Materials and Manufacturing Processes*, 26(1), 93–98. <http://doi.org/10.1080/10426914.2010.498072>
- Yoon, J. W., & Dick, R. E. (2011). Earing Evolution During Drawing and Ironing Processes. In *Numisheet' 2011*.

APÊNDICE A

Este apêndice contém a descrição detalhada de todos os passos efetuados para construir a geometria do esboço, recorrendo à interpolação com curvas NURBS. Como descrito na Secção 3.4, a diferença entre a geometria final da flange e o objetivo é avaliada em 5 pontos distintos definidos pelos ângulos em relação à direção de laminagem. Como tal, o algoritmo proposto é aplicado de forma independente a cada uma das 5 direções, originando os 5 valores diferentes de raio para o esboço. Assim, recorre-se à interpolação dos pontos com uma curva NURBS para gerar a fronteira do esboço, o qual vai ser posteriormente utilizado na simulação. Este procedimento é realizado com recurso ao programa GID no modo de pré-processamento.

O esboço utilizado tem uma fronteira que não é totalmente circular, sobre o qual vai ser construída uma malha de elementos finitos composta por duas zonas, uma zona interna com uma malha não estruturada e uma zona externa com uma malha estruturada. Para o exemplo apresentado, a zona interna tem um raio de 35 mm e a zona externa é definida pelos 5 pontos acima referidos, que representam a fronteira não circular do esboço. De referir que apenas $\frac{1}{4}$ do esboço é necessário para proceder à simulação.

A Figura A.1 ilustra os passos para criar uma linha reta. Com as coordenadas dos três pontos que definem a extremidade são geradas as duas retas que são coincidentes com os dois planos de simetria.

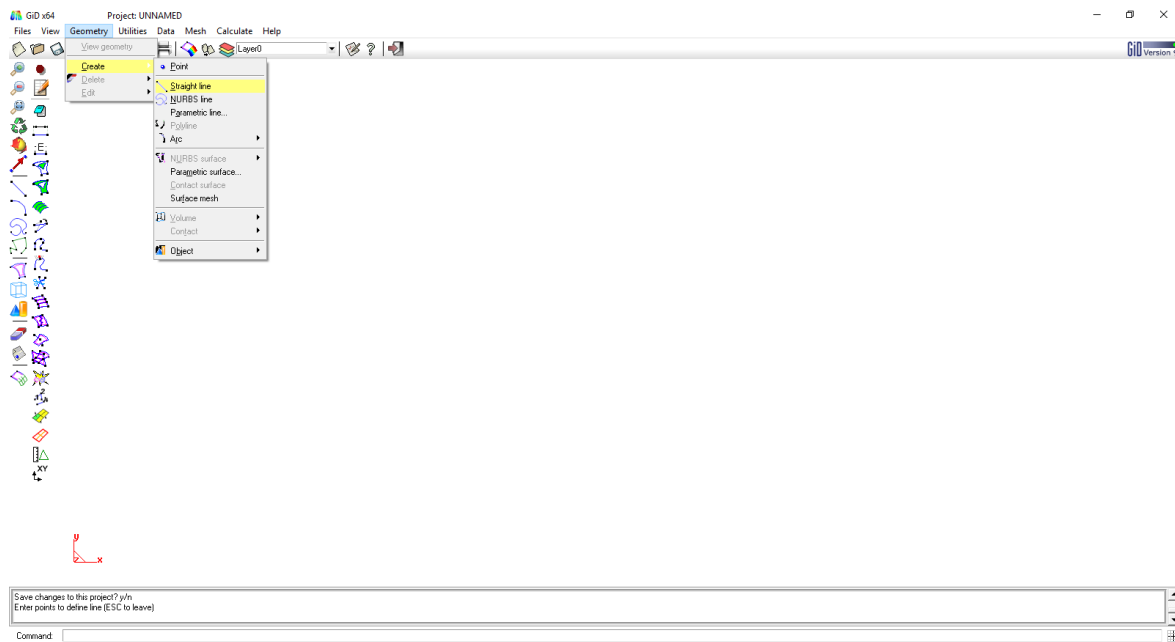


Figura A.1. Passos para criar uma linha reta.

Para criar a fronteira do esboço (não circular), recorre-se à função do GiD, *Create NURBS line*, como apresenta a Figura A.2.

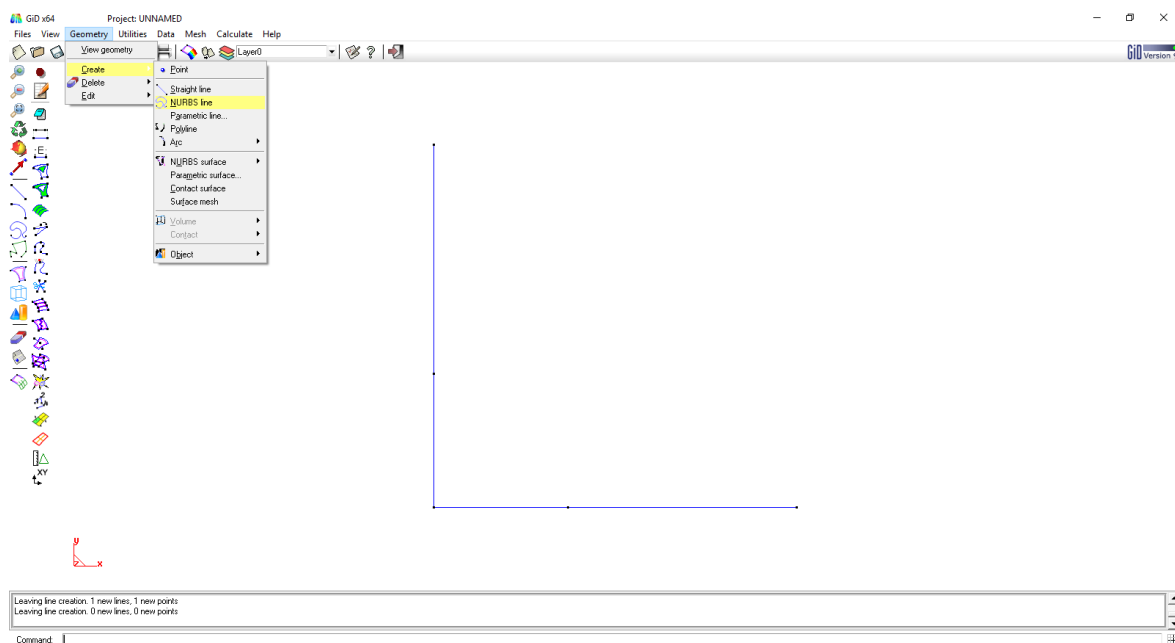


Figura A.2. Passos para introduzir a curva NURBS que define a fronteira do esboço.

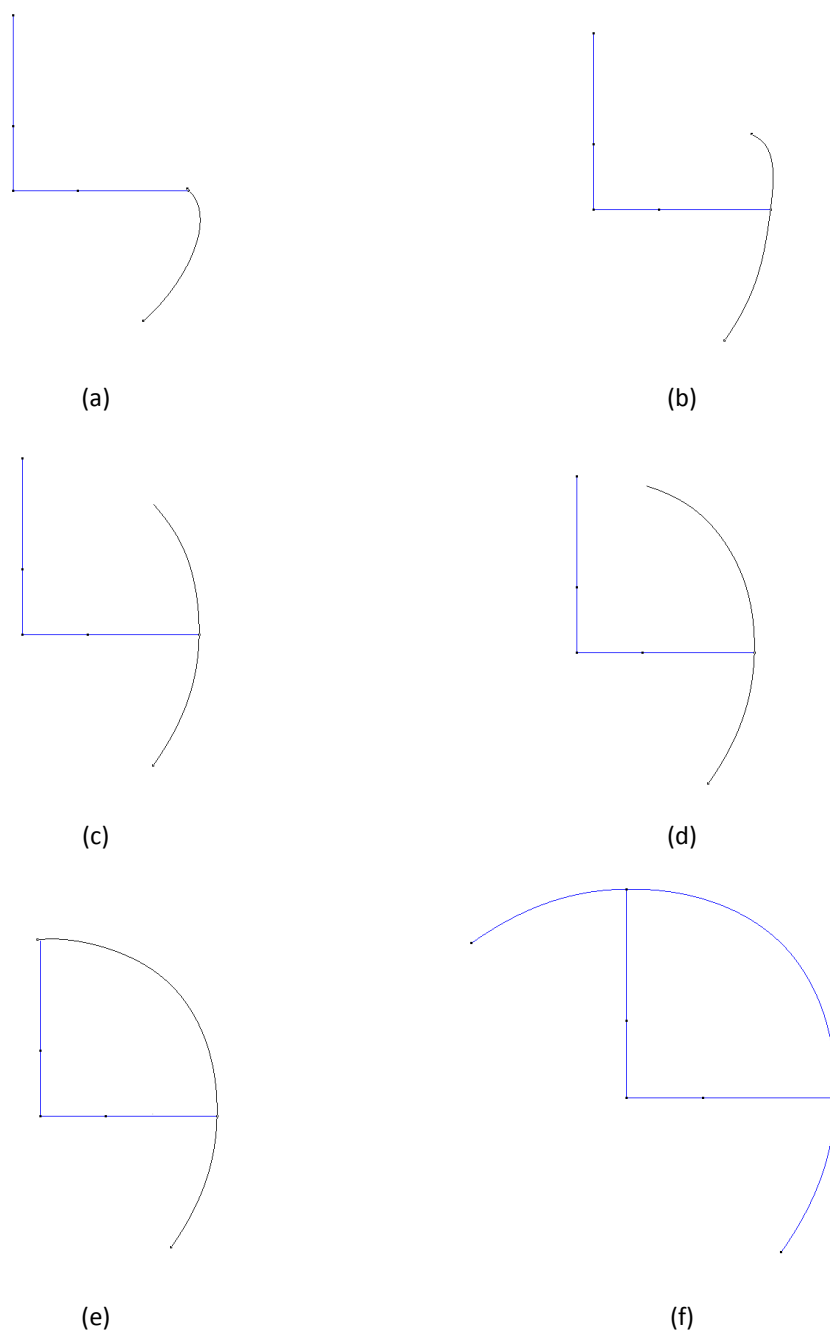


Figura A.3. Evolução da fronteira definida pela curva NURBS com: (a) 1 ponto suplementar e 1 ponto da curva (b) 1 ponto suplementar e 2 pontos da curva (c) 1 ponto suplementar e 3 pontos da curva (d) 1 ponto suplementar e 4 pontos da curva (e) 1 ponto suplementar e 5 pontos da curva (f) 2 pontos suplementares e 5 pontos que definem a curva completa.

No passo seguinte são introduzidas as coordenadas referentes aos 5 pontos de fronteira, definidos por ângulos equitativamente espaçados ao longo da direção circunferencial. Com

o intuito de criar a curva NURBS perpendicular aos dois planos de simetria, são introduzidos 2 pontos suplementares, definidos pelos eixos de simetrias OX (4º quadrante) e OY (2º quadrante), com o mesmo valor absoluto das coordenadas do raio a 45 graus, como se mostra na Figura A.3.

Como o objetivo é apenas ter $\frac{1}{4}$ da geometria do esboço, é necessário eliminar as linhas e os pontos que se encontram em excesso. Assim, recorre-se à função de interseção de linhas (Figura A.4), com o intuito de intersestar as retas com a curva NURBS (Figura A.5).

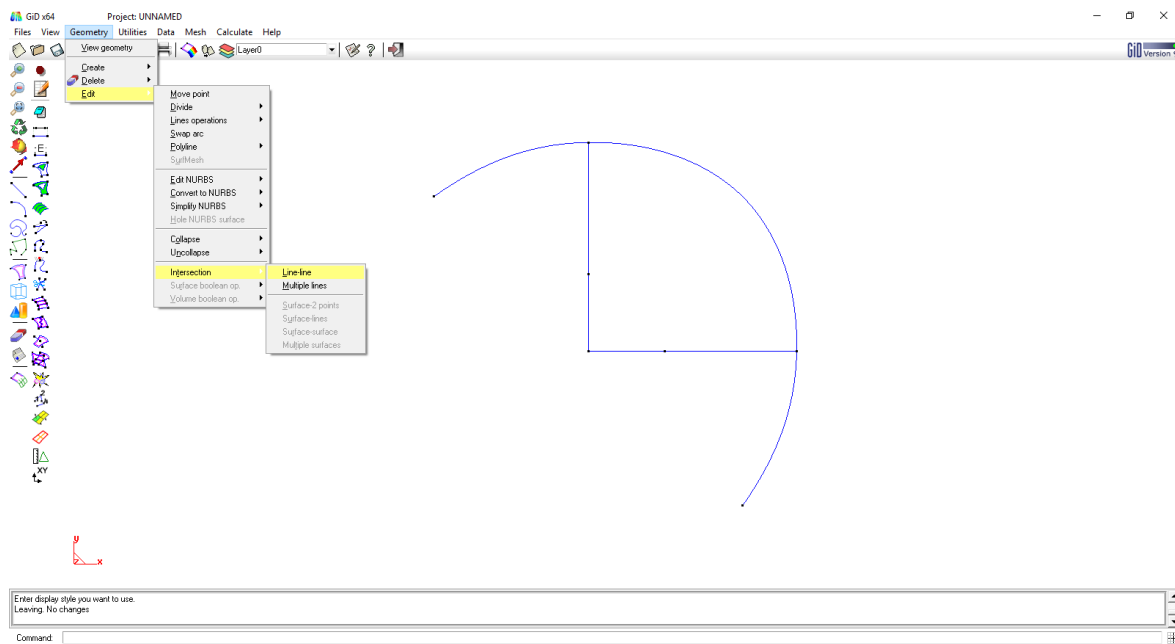


Figura A.4. Função para intersestar a curva NURBS com as linhas retas que define a fronteira.

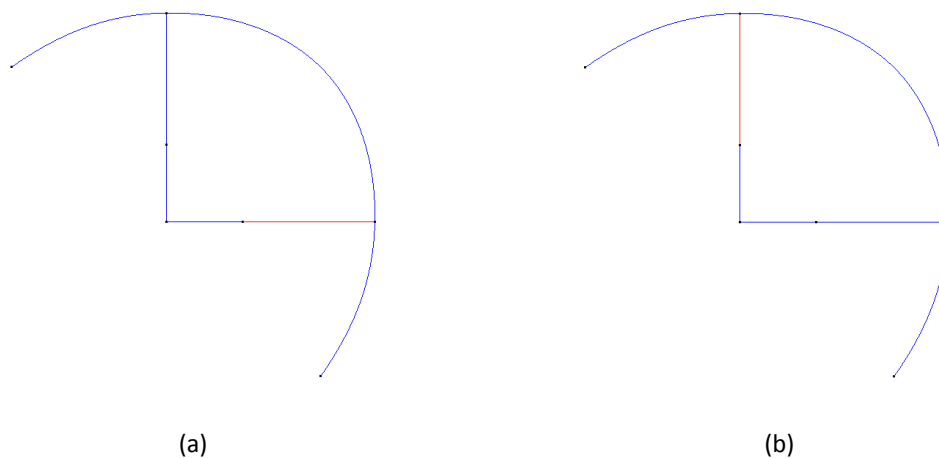


Figura A.5. Ilustração da etapa de interseção com a curva NURBS: (a) eixo horizontal (b) eixo vertical.

O passo que se encontra na Figura A.6 é utilizado para eliminar as linhas que se encontram na parte externa do quarto da geometria a utilizar na simulação. Depois de eliminadas as linhas terá de se repetir o passo, mas agora com o objetivo de eliminar os pontos que se encontram no exterior do quarto de círculo.

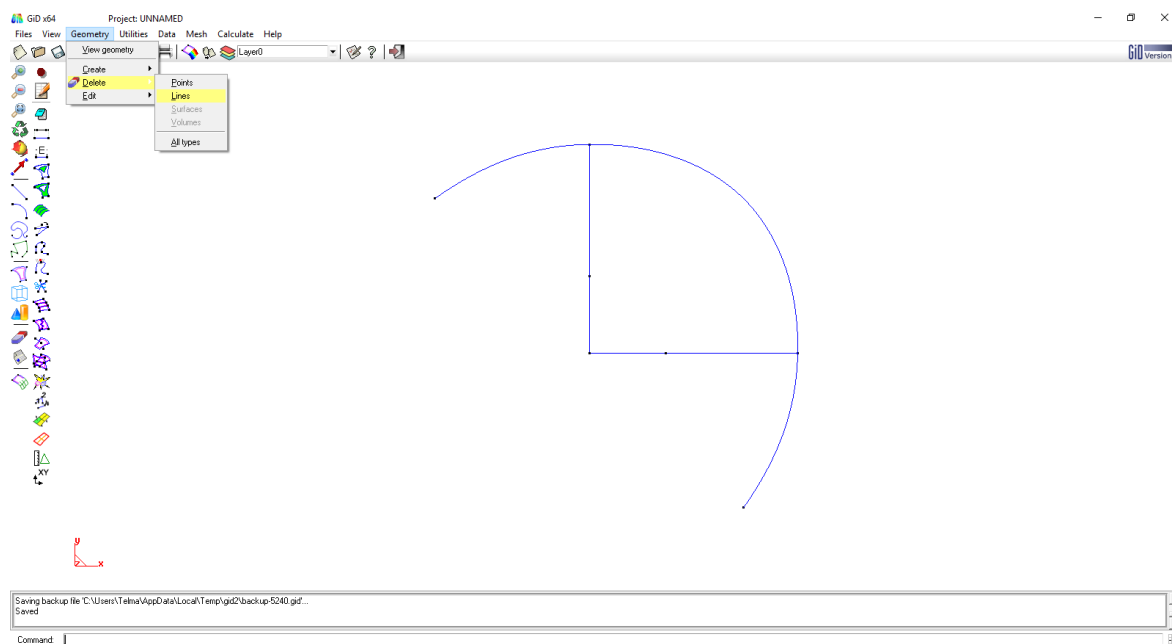


Figura A.6. Função utilizada para eliminar linhas indesejáveis.

Como referido acima, o esboço é constituído por duas zonas. Desta forma é necessário gerar duas superfícies, recorrendo à função: *Utilities-Copy*. Na função *Copy*, a transladação da curva NURBS realiza-se de forma escalar. Esta escala é definida pela razão entre o raio da zona não estruturada e o raio do esboço avaliado segundo o eixo X, como ilustra a Figura A.7.

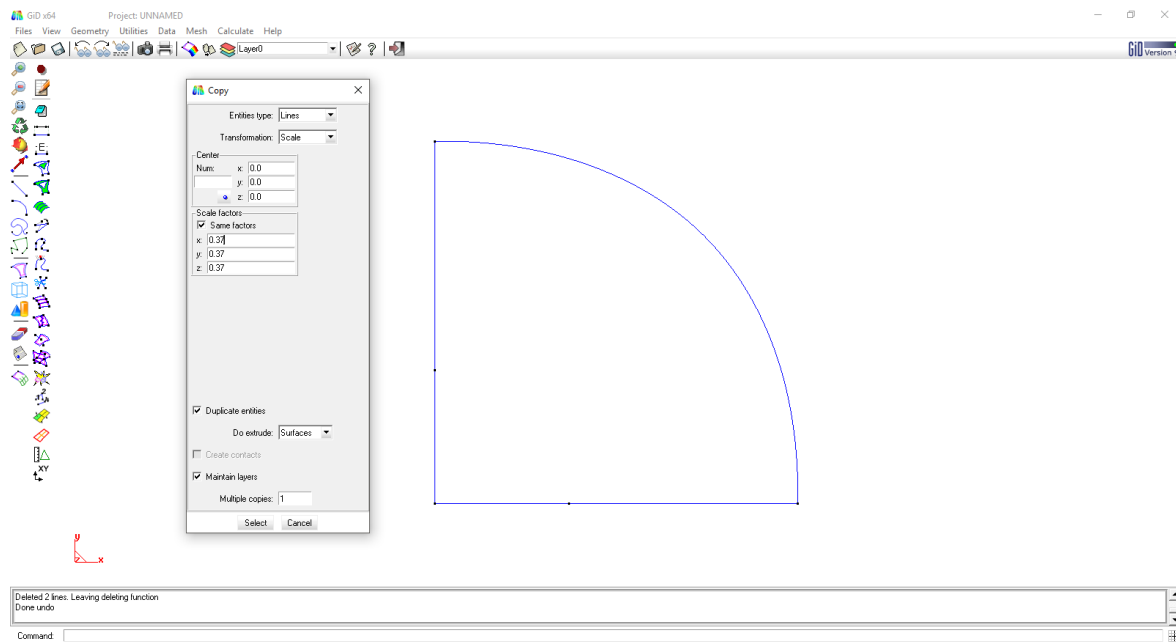


Figura A.7. Função utilizada para gerar a superfície da zona exterior do esboço.

Depois do passo ilustrado na Figura A.7, as linhas retas que definem os extremos da fronteira curva do esboço deverão ser eliminadas através da função exposta na Figura A.6, visto que é desejado criar uma nova superfície na zona interna e para isso as linhas retas que definem as duas superfícies deverão ser independentes. Posto isto, são adicionadas as duas retas que irão definir a zona interna do esboço (Figura A.8).

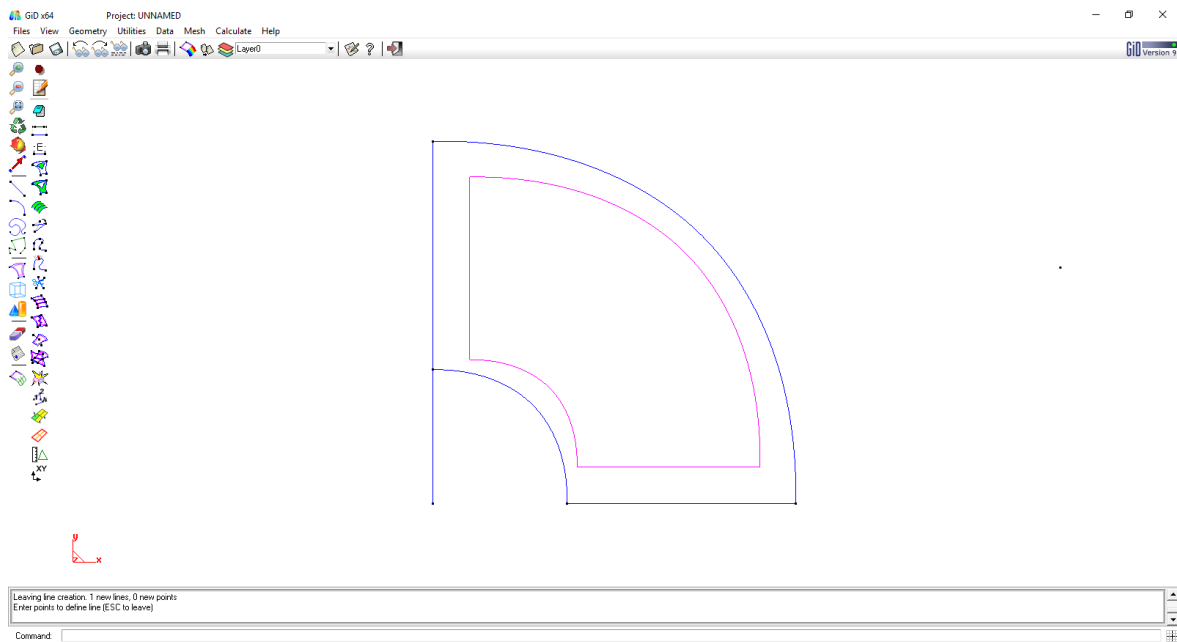


Figura A.8. Linha reta adicionada na zona interna do esboço.

O último passo é apresentado na Figura A.9, onde se apresenta a função que gera a superfície da zona interna do esboço. Após selecionar a função a utilizar é necessário selecionar as linhas que irão definir a superfície da zona.

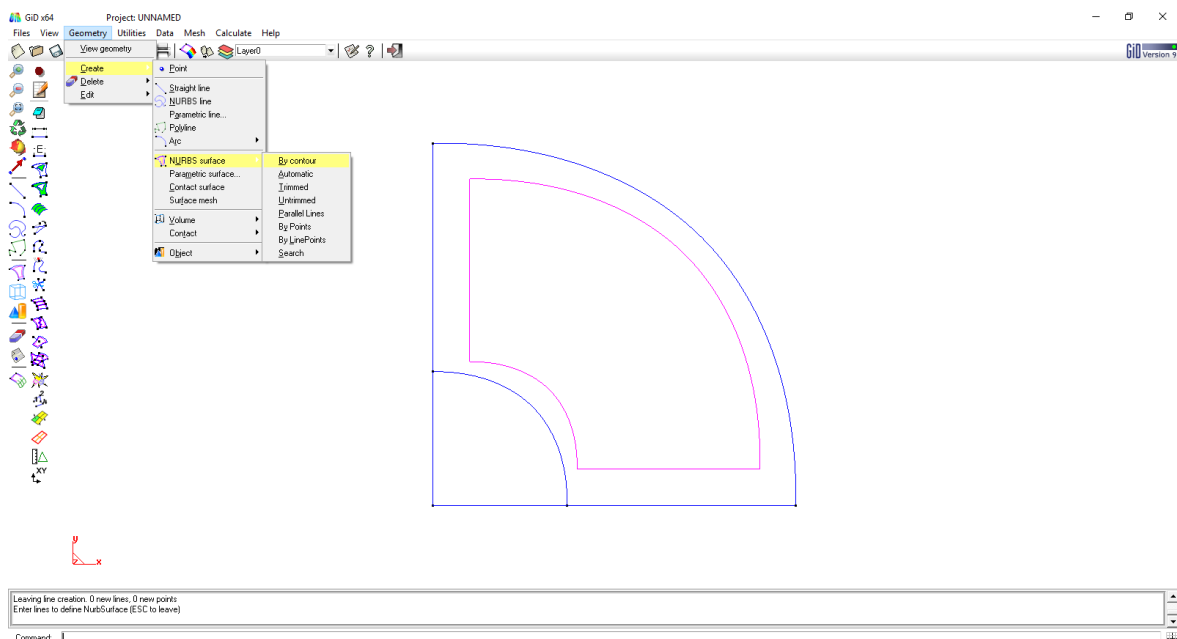


Figura A.9. Função utilizada para gerar a superfície que define a zona interna do esboço.

Em forma de conclusão, é apresentado na Figura A.10, o esboço após serem geradas as duas superfícies.

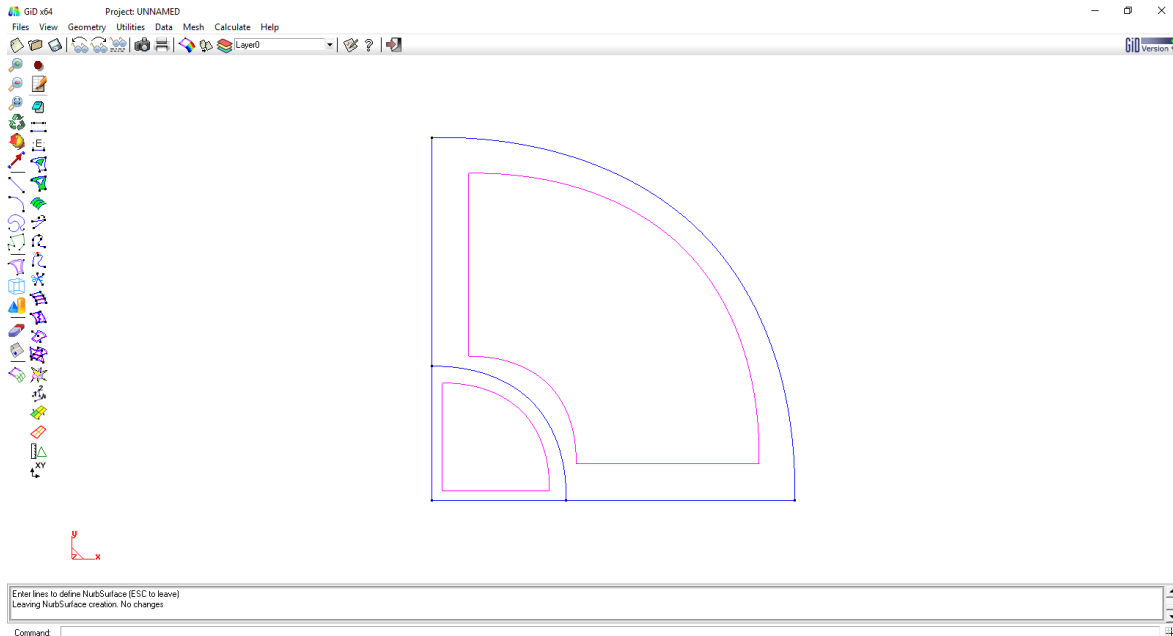


Figura A.10. Esboço gerado sem malha de elementos finitos.

Futuramente ter-se-á de gerar a malha 2D, assim como a malha 3D. Esta última é gerada com recurso ao programa Bi2tri.

