

# **LIGAÇÃO DE TUBOS A CHAPAS POR SHEET BULK FORMING**

Análise experimental e numérica

**Rafael Augusto Nunes Miranda Malta Afonso**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

## **Engenharia Mecânica**

Orientadores: Prof. Luís Manuel Mendonça Alves

Prof. Paulo António Firme Martins

### **Júri**

Presidente: Prof. Paulo Rui Alves Fernandes

Orientador: Prof. Luís Manuel Mendonça Alves

Vogais: Eng. Pedro Tomé Datia Santos

Prof. Carlos Manuel Alves da Silva

**Outubro 2017**

## **Agradecimentos**

Quero começar por agradecer ao meu orientador, o Professor Luís Alves, muito mais que um professor e uma verdadeira inspiração. Muito obrigado por todo o conhecimento e todas as experiências que partilhámos.

Agradeço igualmente ao Professor Paulo Martins, pelo contínuo apoio ao longo desta etapa e pela dedicação que nos motiva a dar o nosso melhor. Foi um enorme prazer poder colaborar consigo na sua investigação.

Por fim e nada menos importante, à minha companheira Carina, por me acompanhar ao longo deste e de todos os desafios que a vida tem para oferecer. Estarei eternamente agradecido pelo amor e dedicação que ninguém consegue oferecer de forma tão genuína.

A todas as outras pessoas que contribuíram para o meu sucesso durante este percurso, o meu verdadeiro e sentido agradecimento.



## **Abstract**

Fixing tubes to sheets at room temperature without the need of adding material is fundamental for the evolution of the way we can join different materials, because as we know almost every single component results from the joining of two different components.

The new proposed process of joining by forming for fixing tubes to sheets at room temperature takes place in two stages. The first stage involves the production of an annular flange by partial compression of the tube wall thickness along the longitudinal direction and the second and final stage consists in the upsetting of the free tube end against a sheet with a beveled hole in order to lock the two parts together.

This dissertation combines experimentation and finite element modelling and uses different arrangements of process variables for characterizing typical failures and defects, for understanding the mechanics of material pile-up and for determining the overall force requirements.

Also included in this dissertation is an analytical model for designing the joints and the validation of the overall joining concept by means of finite element modelling and experimentation.

Destructive pull-out test demonstrates the effectiveness of the new proposed joining process.

**Keywords:** Boss forming, Joining by forming, Upsetting, Tubes, Sheets, Finite element modelling

## Resumo

Fixar tubos a chapas à temperatura ambiente sem a necessidade de adicionar material é fundamental para a evolução do modo como conseguimos unir componentes de diferentes materiais pois como sabemos, quase todas as estruturas mecânicas resultam da junção de dois ou mais componentes diferentes.

O novo processo proposto para unir por enformação plástica a frio (*Joining by forming*) tubos a chapas à temperatura ambiente, desenrola-se em duas fases. A primeira fase envolve a produção de flanges anelares por compressão parcial da espessura da parede do tubo ao longo da direção longitudinal (*Boss Forming*), e a segunda e última fase consiste na compressão (*Upsetting*) da extremidade livre do tubo contra a chapa de furo chanfrado, de forma a unir as duas partes rigidamente.

Esta dissertação conjuga a experimentação e a modelação por elementos finitos, analisa as diferentes combinações das variáveis processuais para caracterizar as falhas típicas e defeitos, permitindo assim entender toda a mecânica da deformação e os requisitos gerais das forças.

Apresenta-se ainda nesta dissertação o modelo analítico que permite dimensionar as uniões e validar o novo conceito de ligação através da modelação em elementos finitos e dos testes experimentais.

Os ensaios destrutivos demonstram a eficiência do novo processo de ligação.

**Palavras-chave:** Boss forming, União por enformação, Upsetting, Tubos, Chapas, Modelação em elementos finitos

## Conteúdo

Agradecimentos .....	I
Abstract .....	III
Resumo .....	IV
Conteúdo .....	V
Lista de Figuras .....	VIII
Lista de Tabelas .....	XI
Nomenclatura .....	XII
Símbolos Gregos .....	XIII
Capítulo 1 .....	14
1. Introdução .....	14
1.1. Motivação .....	14
1.2. Objetivos .....	17
1.3. Estrutura da Tese .....	18
Capítulo 2 .....	19
2. Estado da Arte .....	19
2.1. Introdução .....	19
2.3. Produção Sustentável .....	22
2.4. Principais mecanismos de deformação plástica em tubos sujeitos a compressão axial .....	22
2.4.1. Sheet-Bulk Forming .....	22
2.4.2. Instabilidade Local em Tubos .....	23
2.4.3. Inversão Externa .....	25
2.4.4. Expansão e Redução .....	26
Capítulo 3 .....	28
3. Teoria da Plasticidade .....	28
3.1. Introdução .....	28
3.2. Teoria da Plasticidade .....	28
3.2.1. Tensão, Extensão e Velocidade de Deformação .....	28
3.2.2. Critérios de Plasticidade .....	30
3.2.3. Equações Constitutivas .....	33
Capítulo 4 .....	34
4. Método dos Elementos Finitos .....	34
4.1. Introdução .....	34

4.2.	Equações Fundamentais .....	35
4.3.	I-FORM.....	36
Capítulo 5 .....		37
5.	Desenvolvimento experimental .....	37
5.1.	Introdução .....	37
5.2.	Descrição do Processo .....	37
5.3.	Caracterização do Material .....	38
5.4.	Equipamentos, Ferramentas e Pré-formas.....	41
5.5.	Procedimento Experimental .....	42
5.5.1.	Enformação do Tubo.....	42
5.5.2.	Ligação do Tubo à Chapa .....	44
5.6.	Ensaio Realizados.....	44
5.6.1.	Obtenção do Tubo Enformado.....	44
5.6.2.	Obtenção da Ligação Tubo-Chapa .....	47
5.6.3.	Ensaio Destrutivos.....	49
Capítulo 6 .....		50
6.	Desenvolvimento Numérico .....	50
6.1.	Introdução .....	50
6.2.	Refinamento da Malha .....	50
6.3.	Parâmetros do Processo.....	50
6.4.	Simulações Numéricas Realizadas .....	51
6.4.1.	Deformação Pretendida .....	51
6.4.2.	Surgimento da Fissura .....	52
6.4.3.	Processo de Inversão Externa .....	53
6.4.4.	Processo de Sheet Bulk Forming.....	53
Capítulo 7 .....		55
7.	Apresentação de Resultados e Discussão .....	55
7.1.	Introdução .....	55
7.2.	Análise das Variáveis de Campo .....	55
7.2.1.	Operação de Boss Forming no tubo .....	55
7.2.2.	Ligação do Tubo à Chapa .....	58
7.3.	Evolução da Carga com o Deslocamento.....	61
7.3.1.	Enformação do Tubo.....	61
7.3.2.	Ligação Tubo-Chapa.....	62
7.3.3.	Ensaio Destrutivos.....	65
Capítulo 8 .....		67
8.	Adaptações e aplicações dos novos processos .....	67

8.1. Ligação de Tubo a Chapa com Seção Quadrada.....	67
8.2. Outras aplicações .....	71
Capítulo 9 .....	72
9. Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuro.....	72
9.1. Conclusões.....	72
9.2. Perspetivas de Trabalho Futuro.....	73
Referências .....	74



## Lista de Figuras

Figura 1- Representação esquemática do processo de produção de flanges anelares em tubos de paredes finas por SBF. a) Processo baseado no movimento da matriz superior e fluxo de material não restringido, como sugerido por Alves et al. (2017). b) Novo processo proposto, que consiste em duas matrizes móveis que constroem o fluxo de material por Alves et. al. (2017) (a).....	15
Figura 2- Ligações tubo-chapa por dois processos diferentes. a) Representação esquemática do processo de ligação anterior sugerido por Alves et al. (2017). b) Representação do novo processo de ligação proposto (Alves et al., 2017 (b)). c) Raio inicial e final do tubo obtido pelo anterior e novo processo de enformação do tubo. ....	16
Figura 3- Processos convencionais de ligação mecânica. Da esquerda para a direita: ligação roscada, ligação aparafusada e ligação com acessórios. ....	19
Figura 4- Processo convencional de ligação de colagem por adesivo.....	20
Figura 5- Processo convencional de ligação por soldadura.....	21
Figura 6- Ligação resultante do processo anterior (Alves et al., 2017). a) Saliência formada na superfície da chapa pela dobragem do tubo. b) Fissura resultante do limite crítico de expansão tangencial para o material em estudo.....	23
Figura 7- Instabilidade plástica em tubos sujeitos a compressão axial. a) Instabilidade; b) Instabilidade local (Rosa et al., 2003). c) Dobras axissimétricas sucessivas (Bardi et al., 2003). ....	24
Figura 8- Processos de inversão externa e interna em extremidades de tubos (Rosa et al., 2004 (a,b)). .....	25
Figura 9- Processos de inversão externa e interna em extremidades de tubos. (Rosa et al., 2004 (a,b)). .....	25
Figura 10- Processos de expansão e redução em extremidades de tubos. (Alves et al., 2006) .....	27
Figura 11- Sólido infinitesimal num sistema de coordenadas fixo.....	28
Figura 12- Critérios de Tresca e Von Mises representados no plano das tensões principais .....	32
Figura 13- Discretização de um domínio curvo em elementos quadrangulares. a) Malha grosseira (41 elementos). b) Refinamento (192 elementos.).....	34
Figura 14- Formação de flanges anelares em tubos e ligações de tubo a chapa. a) Representação esquemática do conjunto de ferramentas para realizar a bossa enformada e o produto final obtido (primeira operação do novo processo de ligação). b) Representação esquemática do conjunto de ferramentas para realizar a ligação por enformação do tubo contra o chanfro maquinado no furo da chapa e o produto final obtido (segunda operação do novo processo de ligação). ....	38
Figura 15- Instabilidade plásticas de tubos e anéis de parede fina. a) Evolução experimental da força com o deslocamento durante a compressão axial do tubo de parede fina entre pratos paralelos. b)	

Evolução experimental da força com o deslocamento durante a compressão axial de anéis de diferentes tamanhos entre pratos paralelos (Os anéis nos seus estados iniciais e finais são apresentados na seção inferior do gráfico).....	40
Figura 16- Conjunto de ferramentas utilizadas para a enformação do tubo. Da esquerda para a direita tem-se a matriz inferior encamisada, a matriz superior e o mandril no meio de ambas. ....	42
Figura 17- Resultados obtidos pelo novo processo de enformação do tubo. ....	43
Figura 18- Influência da seção transversal das flanges anelares. a) Flange anelar livre de defeitos (modo de deformação I). b) Buckling da flange anelar quando a altura $h_d$ é muito grande (modo de deformação II). c) Rotura da flange anelar quando a largura $w_d$ é muito grande (modo de deformação III). ....	45
Figura 19- Influência da espessura final $t$ do tubo após compressão parcial da espessura da parede do tubo ao longo da direção longitudinal. a) Flange anelar sem defeitos (modo de deformação I). b) Buckling da flange anelar devido à espessura final $t$ do tubo a ser enformado ser muito pequena (modo de deformação II). ....	46
Figura 20- Representação esquemática do novo processo de ligação de tubo a chapa. a) Variáveis principais. b) Domínio de admissibilidade do novo processo associado às dimensões do chanfro maquinado na chapa e localização dos modos de deformação plástica. c) Representação esquemática dos modos de deformação plástica associados ao domínio de admissibilidade do novo processo. ....	47
Figura 21- Simulação numérica do novo processo de enformação do tubo com $d_f = 34$ mm, $t = 1.25$ mm e $h_d = 3$ mm.....	52
Figura 22- Representação da fissura no tubo e respetiva simulação numérica do modo de deformação IV para $d_f = 42$ mm, $t = 1.25$ mm e $h_d = 3$ mm. ....	52
Figura 23- Simulação numérica do processo de ligação anteriormente introduzido.....	53
Figura 24- Simulação numérica do novo processo de ligação introduzido com a cavidade totalmente preenchida e sem excesso de material. ....	54
Figura 25- Resultados numéricos e experimentais para o novo processo de formação de flanges anelares em tubos de parede fina. a) Processo anterior apresentado por Alves et al. (2017) b) Novo processo que consiste de duas matrizes móveis e uma cavidade que restringe o fluxo de material (Alves et al., 2017 (a)).....	56
Figura 26- Vetores da velocidade total e respetiva evolução experimental ao longo do deslocamento das matrizes. a) Compressão (Upsetting). b) Extrusão inversa de material para a cavidade da matriz. c) Injeção de material na cavidade da matriz para completar a flange anelar. ....	57
Figura 27- Casos de estudo e equações dos parâmetros avaliados no novo processo de união de tubos a chapas.....	58
Figura 28- Comparação entre os resultados experimentais e numéricos obtidos para o novo processo de ligação. a) Ligações obtidas experimentalmente para os Modos I a IV (Casos 1 a 4 representados	

na Figura 27). b) Evolução prevista pela análise de elementos finitos para os modos de deformação plástica apresentados. ....	59
Figura 29- Evolução da força e deslocamento ao longo da enformação do tubo por este novo processo. a) Resultados numéricos-experimentais da evolução da força com o deslocamento para dois tipos diferentes de flanges. b) Malhas deformadas ao longo dos deslocamentos nos pontos A, B e C. ....	62
Figura 30- Evolução numérico-experimental da força e deslocamento ao longo da união do tubo à chapa por este novo processo. ....	62
Figura 31- Distribuição da extensão efetiva (MPa) na fase final da deformação do tubo de $t = 1.25$ mm, $h_d = 3$ mm e $d_f = 34$ mm. ....	64
Figura 32- Distribuição da extensão efetiva (MPa) na fase final da deformação (Modo II). ....	64
Figura 33- Ensaio destrutivo de uma ligação sem saliências acima da superfície da chapa (modo de deformação II). a) Representação esquemática das duas disposições experimentais (força aplicada no sentido descendente e ascendente) com fotografias das uniões depois do ensaio destrutivo. b) Evolução experimental da força com o deslocamento para os dois ensaios destrutivos realizados. ...	65
Figura 34- Desenho da nova aplicação. a) Variáveis principais e notação. b) Curva do processo e modos de deformação associados a diferentes condições definidas de 'A' a 'E'. ....	67
Figura 35- Modelação em elementos finitos da ligação do tubo à chapa com a nova seção quadrada desenhada no furo da chapa para os instantes inicial (lado esquerdo) e final (lado direito). ....	68
Figura 36- União de tubos a chapas com furos de seção quadrada. a) Curva do processo $b = f(a)$ para tubos enformados por Sheet Bulk Forming com dimensões $r_0 = 14.5$ mm, $t = 1.2$ mm e $h = 3.2$ mm. b) Estado inicial (lado esquerdo) e previsão de deformação em modelo de elementos finitos (lado direito) para os casos 'D', 'A', 'E' e 'C' da Tabela 6. ....	69
Figura 37- Previsão experimental e em elementos finitos das curvas de força-deslocamento para os casos A, D e E da Tabela 6 durante o processo de união. ....	70
Figura 38- Outras adaptações e aplicações dos novos processos introduzidos: Ligações de tubos de alumínio a policarbonato, PVC e laminado, respetivamente. ....	71

## Lista de Tabelas

Tabela 1- Resumo do trabalho experimental realizado para determinar a ocorrência de <i>buckling</i> na compressão de anéis de parede fina. ....	39
Tabela 2- Alturas críticas obtidas para anéis de tubos de parede de fina de diferentes espessuras. .	41
Tabela 3- Intervalo de valores utilizados nos ensaios experimentais. ....	44
Tabela 4- Tabela de ensaios para avaliar os modos de deformação plástica .....	49
Tabela 5- Principais parâmetros das simulações numéricas realizadas. ....	51
Tabela 6- Sumário do plano de trabalhos experimentais para unir tubos a chapas com furos de seção quadrada por <i>Sheet Bulk Forming</i> e <i>upsetting</i> , e fotografias dos componentes antes e após as ligações. ....	68

## Nomenclatura

$F(\sigma_{ij})$	Função limite de elasticidade
$k$	Constante associada aos critérios de plasticidade dos metais
$I_1$	Primeiro invariante do tensor das tensões aparentes
$J_2$	Segundo invariante do tensor desviador das tensões aparentes
$E$	Módulo de Young
$r_0$	Raio exterior inicial da pré-forma tubular
$r_f$ ou $r_d$	Raio final do tubo enformado
$l_0$	Altura inicial da pré-forma
$l_c$	Comprimento total de material do tubo empilhado na matriz
$l_d$	Profundidade da cavidade da matriz
$h_d$	Altura da cavidade da matriz
$w_d$	Largura da cavidade da matriz
$t$	Espessura final da parede do tubo
$t_0$	Espessura inicial da parede da pré-forma tubular
$t_s$	Espessura da chapa
$a$	Comprimento da aresta da seção triangular do chanfro
$l$	Altura total da extremidade superior do tubo
$h$	Altura livre da extremidade superior do tubo
$v$	Velocidade da matriz

## Símbolos Gregos

$\delta_{ij}$	- Delta de Kronecker
$\varepsilon$	- Extensão verdadeira
$\varepsilon_{ij}$	- Tensor das tensões
$\bar{\varepsilon}$	- Extensão efetiva
$\dot{\bar{\varepsilon}}$	- Velocidade de deformação efetiva
$\dot{\varepsilon}_v$	- Velocidade de deformação volumétrica
$d\lambda$	- Constante de proporcionalidade das equações de <i>Levy-Mises</i>
$\nu$	- Coeficiente de Poisson
$\sigma$	- Tensão verdadeira
$\sigma_e$	- Tensão limite de elasticidade no ensaio de tração uniaxial
$\sigma_{ij}$	- Tensor das tensões
$\sigma'_{ij}$	- Tensor desviador das tensões
$\bar{\sigma}$	- Tensão efetiva
$\sigma_{ii}$	- Tensões principais
$\sigma_m$	- Tensão média ou hidrostática
$\tau$	- Tensão de corte
$\gamma$	- Constante de penalidade para a velocidade normal entre nós
$\tau_f$	- Tensão de corte de atrito (modelo de atrito de Prandtl)

# Capítulo 1

---

## 1. Introdução

Ao longo dos tempos tem surgido uma crescente necessidade de investir numa produção mais limpa, adotando-se soluções que visem proteger o meio ambiente sem prejudicar a qualidade do produto final. Esta necessidade tem motivado o desenvolvimento e inovação da indústria, que tem procurado não só cumprir os requisitos evolutivos das normas europeias, mas também otimizar os processos já existentes. O acabamento estético do produto final acaba igualmente por ser um fator essencial, pois para além de aumentar o campo de aplicações do produto, é também uma assinatura de qualidade e rigor do produto oferecido.

Muitos dos produtos obtidos, resultam por vezes da união de uma ou mais geometrias, de materiais iguais ou dissimilares, uniões estas que podem ser utilizadas recorrendo a diferentes processos de ligação. Segundo Messler (2004), os processos de ligação são utilizados para “juntar peças ou componentes independentes de forma a criar uma montagem unificada ou entidade estrutural”. Assim, o processo de ligar componentes permite transformar várias peças num todo, oferecendo uma melhor distribuição de esforços que agora se propagam por uma estrutura mais complexa cuja contribuição deixa de depender apenas de um único componente.

Na constante evolução dos processos de fabrico tem-se procurado obter produtos de transporte fácil e cuja montagem/união possa ser realizada facilmente e de forma automatizada. Assim, pretendem-se processos com elevado nível de repetibilidade, permitindo a produção em larga escala com tempos de fabrico e custos reduzidos, tendo também em atenção o desperdício de material ao longo do fabrico.

Poder combinar ilimitadamente materiais diferentes é também um fator de interesse na escolha e desenvolvimento do processo de ligação, dado que aumenta bastante a versatilidade e aplicação do produto fabricado, tornando possível a criação de novos produtos e conceitos.

A ligação desenvolvida neste trabalho utiliza a enformação tubular na direção da espessura (*Boss Forming*) para produzir tubos com engrossamentos locais através da redução da espessura. Essas flanges produzidas no tubo servem de suporte às chapas onde os tubos serão posteriormente unidos numa operação de *upsetting*.

### 1.1. Motivação

Os processos convencionais de ligação apresentam elevados tempos de preparação e de produção, e são muitas vezes dependentes do utilizador, limitando assim a produção de grandes séries. Desta forma, torna-se necessário encontrar soluções que resolvam estas lacunas e que também apresentem soluções alternativas, inovadoras e sustentáveis.

A dissertação que aqui se redige pretende apresentar uma otimização dos processos de ligação, analisando-se o processo de enformação plástica a frio aplicado a tubos de parede fina que resulta na produção de flanges anelares (*Boss Forming*), com vista à realização posterior de ligações de tubo a chapa por *upsetting*. O âmbito desta dissertação recai na otimização deste processo que foi anteriormente estudado por Alves et al. (2017), e que apresenta agora mais robustez e uma zona de contato mais definida entre o tubo e a chapa, bem como um aspeto estético mais adequado.

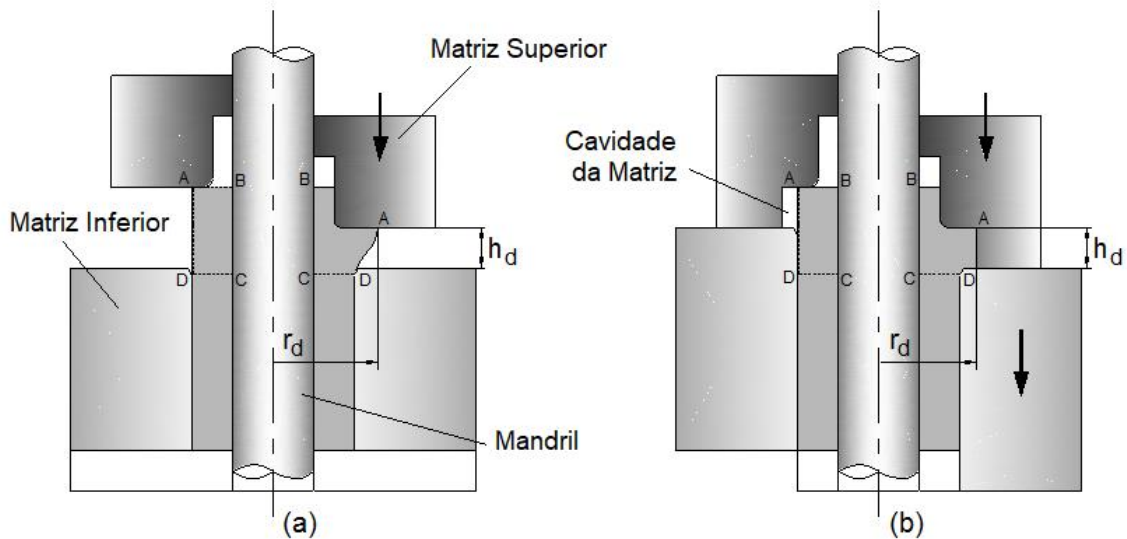


Figura 1- Representação esquemática do processo de produção de flanges anelares em tubos de paredes finas por SBF. a) Processo baseado no movimento da matriz superior e fluxo de material não restringido, como sugerido por Alves et al. (2017). b) Novo processo proposto, que consiste em duas matrizes móveis que constroem o fluxo de material por Alves et. al. (2017) (a).

Para além das inovações introduzidas no tubo enformado, introduziu-se um novo processo de união do tubo à chapa cuja aplicação está dependente da espessura da chapa utilizada e também da tensão de cedência de ambos os materiais envolvidos (tubo e chapa). Deste modo, para chapas espessas tanto se pode utilizar este novo processo, como também se pode utilizar o processo introduzido anteriormente por Alves et al. (2017). No caso de chapas finas, apenas se pode utilizar o processo já existente devido à espessura da chapa.



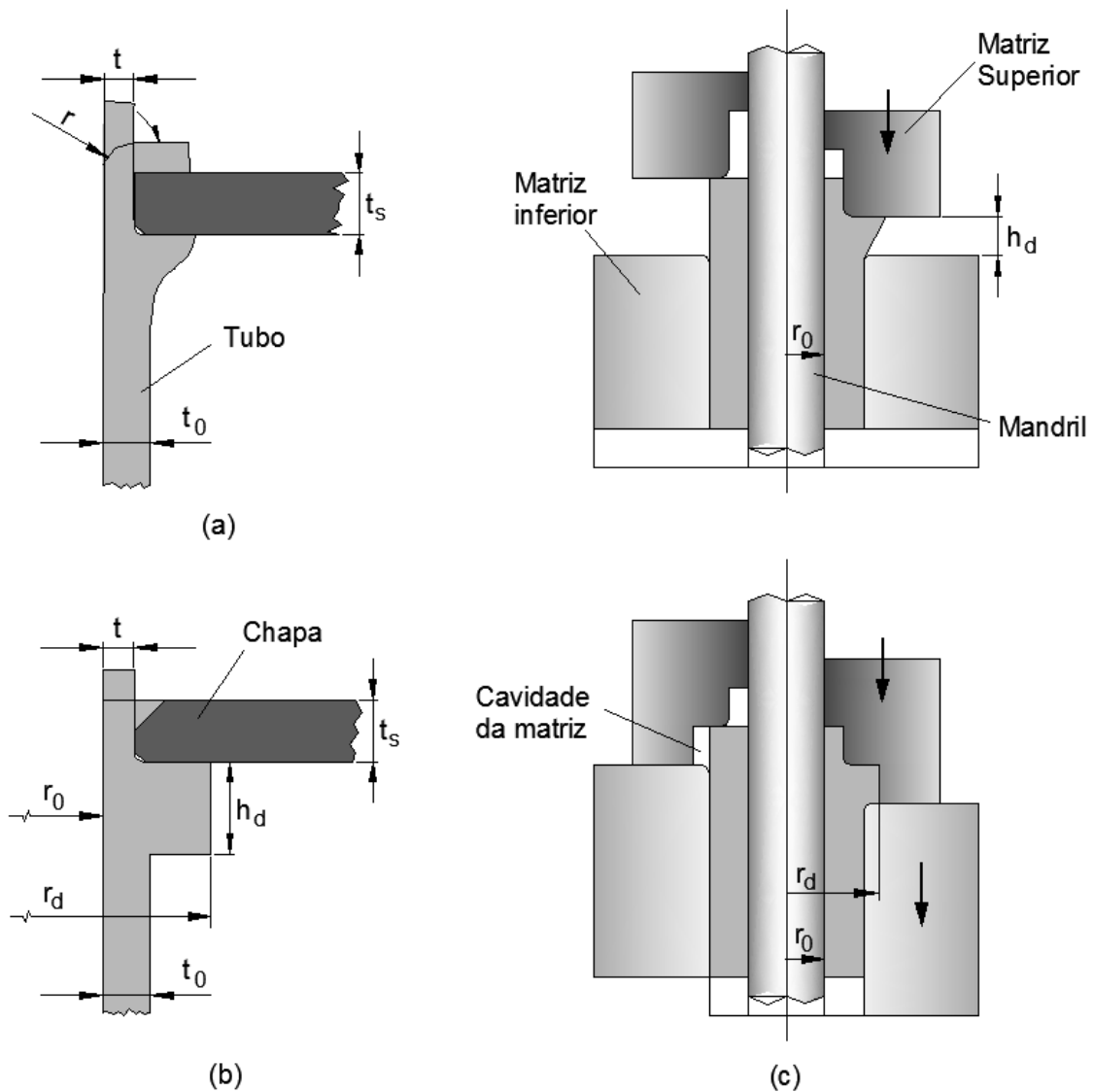


Figura 2- Ligações tubo-chapa por dois processos diferentes. a) Representação esquemática do processo de ligação anterior sugerido por Alves et al. (2017). b) Representação do novo processo de ligação proposto (Alves et al., 2017 (b)). c) Raio inicial e final do tubo obtido pelo anterior e novo processo de enformação do tubo.

O novo processo de ligação baseia-se na compressão uniaxial de tubos metálicos de parede fina, numa operação chamada *upsetting* que consiste em comprimir parte do material do tubo para uma cavidade cônica bem definida com as dimensões de espessura e raio final que se pretendem obter, semelhante ao processo de *Boss Forming* que se utiliza para formar uma flange anelar no tubo. Preenchida esta caixa, obtém-se um batente sólido e bem definido que servirá de suporte à chapa a que se pretende unir o tubo.

A ligação pode ser finalizada dobrando a altura livre do tubo para cima da chapa tanto em chapas finas como em chapas espessas (Figura 2 a)), ou unicamente no caso das chapas espessas, pode ser aberta uma caixa para a qual se deformará essa altura livre de tubo (Figura 2 b)). Quando essa caixa

estiver preenchida obtém-se uma ligação sólida e amovível, e sem saliências acima da superfície da chapa.

As metodologias implementadas na presente dissertação têm por base o trabalho desenvolvido no âmbito do estudo da deformação plástica de perfis tubulares (Miller, 2003). Os conhecimentos existentes em compressão axial (Gupta et al., 2006 (I, II)), inversão externa (Reddy, 1992; Yang et al., 2001; Rosa et al., 2004), formação de dobra por compressão (Bardi et al., 2003; Gouveia et al., 2006) e ligações de tubo a chapa (Alves et al., 2017 (a)), permitem uma compreensão isolada de cada um dos fenómenos envolvidos.

Tendo em conta os requisitos anteriormente mencionados e que este novo processo pretende cumprir, procurou-se com esta nova ligação e processo de enformação a frio do tubo, garantir a solidez estrutural e redução de custos para além de permitir a ligação entre materiais que de outra forma não poderiam ser unidos.

Para produzir os componentes desta ligação bem como a própria ligação, foram fabricados protótipos de ferramentas e desenvolvidas metodologias de trabalho que permitirão no futuro, automatizar o processo em análise, que apresentou uma boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais.

## **1.2. Objetivos**

Nesta dissertação apresenta-se um estudo comparativo entre a simulação numérica e os resultados obtidos experimentalmente para uma variante dos conceitos desenvolvidos anteriormente por Alves et al. (2017), de ligação de tubos de alumínio de parede fina a chapas finas ou espessas, com diferentes materiais e geometrias.

O estudo experimental passou pelo projeto e desenvolvimento de ferramentas, fabrico de pré-formas e a sua união por deformação a frio, enquanto que o estudo numérico assentou na utilização do método dos elementos finitos através do programa I-FORM desenvolvido na seção de tecnologia mecânica do Instituto Superior Técnico.

Com este estudo foi possível compreender e controlar as variáveis envolvidas na deformação e verificar a validade da simulação numérica, o que permitiu analisar e desenvolver diferentes tipos de uniões.

### 1.3. Estrutura da Tese

A presente dissertação está dividida em nove capítulos. Inicia-se com a presente introdução referindo os tipos de ligações já existentes, explorando as suas lacunas e expondo o que motivou a concretização desta dissertação face a essas limitações.

Em seguida, introduz-se o segundo capítulo “Estado da Arte” onde se apresentam os conhecimentos já existentes nesta área e os avanços que têm vindo a ser realizados.

No terceiro capítulo “Teoria da Plasticidade” são abordados essencialmente os fundamentos teóricos que são a base da deformação plástica do material e no quarto capítulo “Método dos Elementos Finitos” é feita uma exposição do modo como é feita a análise pelo *software* I-FORM, no escoamento plástico do material nas várias etapas do processo.

No quinto capítulo designado “Desenvolvimento Experimental” são explicadas as várias etapas do processo bem como as ferramentas, as pré-formas e a metodologia que permite a realização da união com sucesso.

No sexto capítulo “Desenvolvimento Numérico”, a ênfase recai na simulação numérica, observando-se a evolução da deformação ao longo do tempo e identificando-se os parâmetros e simplificações utilizadas.

No sétimo capítulo “Resultados e Discussão” é feita uma comparação entre os resultados numéricos e os resultados experimentais, com a respetiva discussão dos resultados obtidos para cada uma das ligações em análise.

No oitavo capítulo “Adaptações e Aplicações” são apresentados alguns exemplos de aplicação e outras variantes já desenvolvidas, que podem ser exploradas utilizando os conhecimentos presentes nesta dissertação.

Por fim, apresenta-se o nono e último capítulo “Conclusões e perspetivas de trabalho futuro” onde é avaliada a viabilidade do processo apresentado através dos pontos positivos e negativos a ele associados.

## Capítulo 2

---

### 2. Estado da Arte

#### 2.1. Introdução

Atualmente, para realizar a junção de materiais existem três tipos de ligações habitualmente utilizadas: mecânicas, químicas e físicas.

As ligações mecânicas são basicamente as ligações que se obtêm quando se utilizam parafusos, pregos, rebites, roscas ou acessórios para unir os componentes (Figura 3). Em todas elas, as forças resultam do par ação-reação entre os componentes e da interferência direta entre as superfícies. Essas forças bem como o atrito que se cria entre as partes em contato, são os responsáveis por realizar e manter a ligação.

As principais vantagens são a montagem e desmontagem simples sem alteração das propriedades mecânicas dos componentes. No entanto, este tipo de ligação ainda não consegue garantir a estanquicidade da estrutura obtida para além de aumentar o peso e dimensões da mesma, no caso de ligações em que sejam usados parafusos ou outro tipo de fixação. Para além do exposto, importa referir que este tipo de ligação sofre de uma elevada concentração de tensão nos pontos onde é feita a fixação, porém permite a ligação de materiais dissimilares a um custo reduzido.

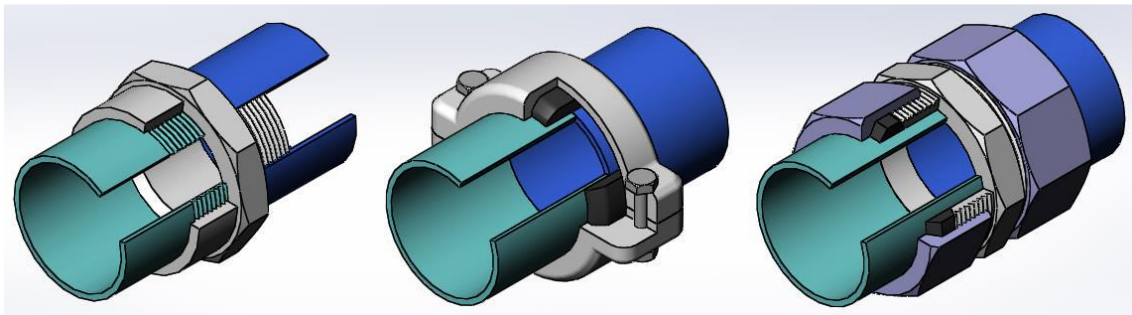


Figura 3- Processos convencionais de ligação mecânica. Da esquerda para a direita: ligação roscada, ligação aparafusada e ligação com acessórios.

As ligações químicas são conseguidas através de adesivos estruturais. Por ser uma ligação química implica que a ligação dependa de reações químicas que vão ocorrer na superfície de contato entre ambos os materiais (embora possam existir forças mecânicas ou electroestáticas no processo) de onde resultam forças químicas que promovem a adesão entre os materiais. Ao contrário das ligações mecânicas, não se obtêm elevadas concentrações de tensões em nenhum ponto da superfície e a resistência mecânica é proporcional à área ocupada pelo adesivo, estando a estanquicidade garantida. As implicações deste tipo de ligação surgem da necessidade de preparação prévia e cuidada das

superfícies a unir e de não ser possível a sua reparação, pelo que estão limitadas a uma utilização onde não existam condições ambientais adversas que possam prejudicar esta ligação.

Este processo ocorre ao nível da superfície dos materiais e por isso não altera as microestruturas dos mesmos. Contudo para que a ligação ocorra, o adesivo tem de ser compatível com os materiais a ligar e portanto, este método só pode ser aplicado a materiais dissimilares no caso do adesivo conseguir ativar a reação química de ambos.

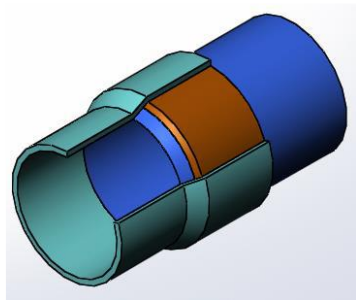


Figura 4- Processo convencional de ligação de colagem por adesivo.

A última das ligações aqui referidas são as ligações físicas que se processam a nível atómico, donde surgem forças resultantes da atração entre átomos, iões ou moléculas. A soldadura é a principal forma de conseguir este tipo de ligação e consegue-o aproximando as superfícies a unir de modo a proporcionar a ligação a nível atómico e fazendo-se valer da facilidade que os átomos têm em se combinarem e organizarem até atingir uma configuração estável de eletrões.

Normalmente a soldadura é utilizada na ligação de metais, embora possa também ser utilizada para soldar materiais poliméricos, cerâmicos e vidros. As ligações obtidas são permanentes e estanques, com uma elevada resistência mecânica e podem ser automatizadas, sendo o seu custo geralmente reduzido. Assim sendo, cumprem na perfeição muitos dos requisitos necessários à produção de ligações.

Todavia, podem existir alterações das propriedades mecânicas da maioria dos materiais e por isso este processo requer operadores qualificados para garantir a qualidade da ligação, contribuindo para o aumento do custo do processo. Importa referir que este processo também não permite a ligação de materiais dissimilares, falhando assim um dos focos de interesse no desenvolvimento dos processos de ligação.

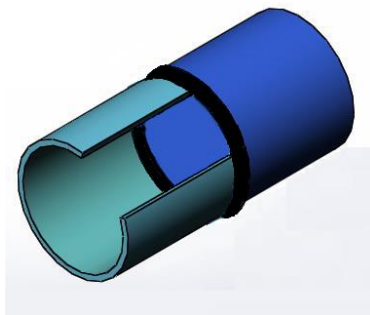


Figura 5- Processo convencional de ligação por soldadura.

Tal como vimos, existem vários pontos bem definidos que ao serem satisfeitos vão permitir uma produção mais limpa e mais eficiente. Porém, nenhum dos processos de ligação existentes e normalmente utilizados permite atingir este objetivo. A soldadura apesar de se aproximar deste objetivo, não consegue cumprir todos os seus pontos e convém ter em atenção que mesmo resolvidas as suas limitações, devido aos gases que a soldadura produz, nunca poderia ser considerada um processo de produção ecológico para além de nunca ser totalmente perfeita do ponto de vista estético.

Então e se fosse possível ter um processo de ligação que permitisse verificar todos os requisitos e resolver as limitações da soldadura?

A solução para esta questão motivou o desenvolvimento desta dissertação e o seu estudo tem vindo a ser realizado nos últimos tempos por Alves et al. (2017), procurando-se agora neste trabalho otimizar as soluções anteriormente encontradas de modo a obter uma ligação de tubos de parede fina a chapas com elevada resistência mecânica, de fácil conceção e bom aspeto estético.

## 2.2. Enformação Plástica a Frio

O processo de enformação plástica a frio aplicado a tubos de parede fina permite produzir flanges anelares calibradas na direção da espessura, que posteriormente servirão de suporte ao mecanismo de ligação do tubo à chapa por enformação plástica a frio, no novo processo de ligação apresentado neste estudo.

O estudo de ligações obtidas através de enformação plástica a frio tem sido feito por Mori (2014) e Groche (2014) e existem diversas razões para a sua utilização ser útil tais como: o produto ser demasiado grande para fabricar como uma peça unitária, o produto ter de ser montado *in situ*, ser necessária flexibilidade no nível de repetibilidade da produção e no tamanho dos lotes produzidos ou a complexidade da forma requerer a montagem do produto através das partes individualmente criadas.

Ao longo dos últimos anos tem sido estudada a enformação tubular através da ocorrência de instabilidade local (Alves et al. (2011)), contudo o presente estudo foca-se na enformação plástica a frio resultante, simultaneamente, da compressão axial e parcial da parede do tubo de espessura fina.

### 2.3. Produção Sustentável

Atendendo às técnicas existentes para unir tubo a chapa apresentadas no início deste capítulo, conclui-se que é necessário desenvolver uma solução simples, efetiva e amiga do ambiente. Com este objetivo em mente, o processo desenvolvido nesta dissertação propõe algumas vantagens que eliminam alguns dos problemas ou necessidades mencionadas no subcapítulo anterior.

Deste modo, o novo processo introduzido apresenta as seguintes vantagens face aos processos convencionais:

- Processo ecológico que permite reduzir os desperdícios de material e dispensa a necessidade de adicionar material para efetuar a ligação ou gases protetores que protejam a ligação da corrosão;
- Economizador de energia dado que elimina os ciclos de aquecimento-arrefecimento assim como zonas de calor e tensões residuais nas regiões das placas e tubos que vão ser unidos;
- Flexível na produção de lotes de várias dimensões e geometrias, com elevados níveis de repetibilidade na linha de produção;
- Permite a união entre tubos e chapas dissimilares;
- Não requer a projeção de novos equipamentos pois pode ser realizado nas máquinas ferramenta já existente, através de ferramentas relativamente simples.

### 2.4. Principais mecanismos de deformação plástica em tubos sujeitos a compressão axial

O processo de ligação em análise tem na sua conceptualização, diferentes mecanismos de deformação que combinados permitem realizar as ligações estudadas nesta dissertação. Para melhor compreender os fenómenos envolvidos neste processo é necessário compreender os fundamentos teóricos que nos próximos parágrafos se introduzem.

Embora existam vários processos e mecanismos envolvidos, este capítulo apenas incide naqueles que se consideram ser as operações de deformação fundamentais que sustentam o desenvolvimento desta dissertação. Essas operações são *Sheet Bulk Forming* (SBF), Instabilidade Local em Tubos e Inversão Externa em Extremidades de Tubos.

#### 2.4.1. Sheet-Bulk Forming

A análise anterior feita por Alves et al. (2017) propôs a combinação da operação de *Boss Forming* com a operação de *flaring* para unir tubos a chapas à temperatura ambiente.

O processo de *Boss Forming* (Sieczkarek et al., 2013) é um processo de SBF (Merklein et al., 2012) que envolve a compressão parcial da espessura das paredes do tubo de forma a empilhar material ao

longo da direção axial (longitudinal), produzindo uma flange com um perfil curvo. Esta flange serve posteriormente de suporte à chapa para cima da qual se comprime a extremidade do tubo para fazer a ligação dos dois materiais. Este processo de união de duas fases provou ser adequado para fixar tubos metálicos a chapas de metal ou polímero, porém também revelou duas grandes desvantagens: (i) as superfícies resultantes não são lisas e (ii) a área do material empilhado no tubo que servirá de encosto à chapa, é muito pequena.

A primeira desvantagem resulta da protuberância resultante do tubo quando este é dobrado para cima da superfície da chapa na operação conhecida por *flaring*, e que consiste na conjugação simultânea de dois processos básicos, a expansão radial e dobragem. O inconveniente da protuberância formada é que limita a sua utilização por razões estéticas e por constrangimentos dimensionais (Figura 6 a)).

A segunda desvantagem resulta do fluxo livre do material empilhado não permitir a formação de grandes flanges, restringindo por isso as cargas que podem ser aplicadas nas uniões. Na verdade, a quantidade do material empilhado necessita de ser pequena por forma a evitar a ocorrência de fissuras nos perfis curvos das flanges.



Figura 6- Ligação resultante do processo anterior (Alves et al., 2017). a) Saliência formada na superfície da chapa pela dobragem do tubo. b) Fissura resultante do limite crítico de expansão tangencial para o material em estudo.

#### 2.4.2. Instabilidade Local em Tubos

Durante o ensaio de compressão uniaxial de tubos, a energia fornecida dissipa-se sobretudo na deformação plástica do material e no atrito. Consoante a geometria e dimensão do tubo, a deformação plástica pode ocorrer de forma simétrica ou assimétrica e a instabilidade pode ser local ou global, surgindo quando se atinge uma determinada carga crítica que provoca a instabilidade do material.

A instabilidade global ocorre na compressão axial de tubos compridos e com parede de espessura relativamente elevada, caracterizando-se por uma dobragem de todo o tubo de forma simétrica em relação a um plano que atravessa a região média da dobra. Por sua vez, a instabilidade local ocorre localmente em tubos curtos ou compridos de parede fina e origina uma dobra simétrica com o eixo do



tubo (Rosa et al., 2003). Este padrão vai-se repetindo à medida que o material vai encontrando espaço livre para escoar, dando origem a um efeito de engelhamento consecutivo referido em diversos estudos prévios (Alves et al., 2012; Groche et al., 2014; Mori et al., 2014).

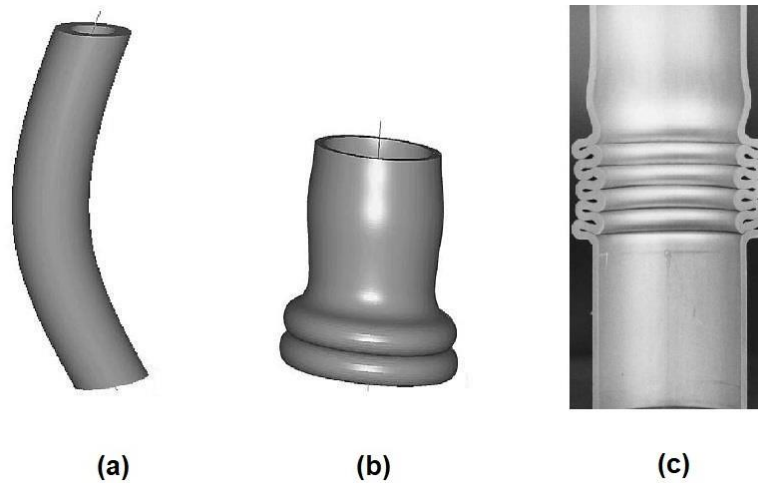


Figura 7- Instabilidade plástica em tubos sujeitos a compressão axial. a) Instabilidade; b) Instabilidade local (Rosa et al., 2003). c) Dobras axissimétricas sucessivas (Bardi et al., 2003).

O controlo deste engelhamento através de um conjunto de matrizes permitiu avanços na tecnologia do processo SBF aplicado à ligação de tubo a chapa e está na base dos desenvolvimentos presentes nesta dissertação.

As paredes do tubo engrossam ligeiramente quando sofrem esforços de compressão e após ser atingida uma carga crítica, dá-se o início da instabilidade local. Ao continuar a compressão das matrizes verifica-se o escoamento radial do material com o seu afastamento do eixo vertical devido à conservação de volume, dando origem à dobra pretendida de forma progressiva. Na Figura 7 c), verifica-se que embora o escoamento ocorra preferencialmente para o exterior, existe também uma ligeira redução do raio interno do tubo que impõe a utilização de um mandril interno para manter o raio interno inalterável.

A Figura 8 apresenta o escoamento e os principais parâmetros envolvidos no processo, sendo eles o comprimento inicial do espaçamento entre matrizes ( $l_{gap}$ ), a relação entre o raio exterior ( $r_0$ ) e a espessura do tubo ( $t_0$ ). A combinação destes parâmetros define a geometria da dobra criada por instabilidade local. Falta referir que o vetor  $v$  representa a velocidade de deslocamento da matriz superior e  $l_0$  o comprimento inicial do tubo.

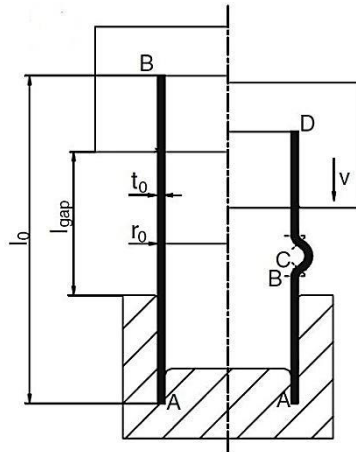


Figura 8- Processos de inversão externa e interna em extremidades de tubos (Rosa et al., 2004 (a,b)).

### 2.4.3. Inversão Externa

A inversão externa bem como a inversão interna (outro modo possível de inversão) foram amplamente estudadas ao longo dos tempos (Sekhon et al., 2002; Rosa et al., 2003; Rosa et al., 2004; Alves et al., 2010) e são inversões normalmente associadas à criação de peças tubulares de parede dupla, embora tenham aplicação em peças tubulares de parede fina para além de operações de acabamento e na obtenção de pré-formas.

A forma final é conseguida através da compressão axial do tubo sobre uma matriz específica que conduz o material a escoar sobre a mesma, no sentido exterior no caso de uma inversão externa, ou no sentido interior no caso de inversão interna.

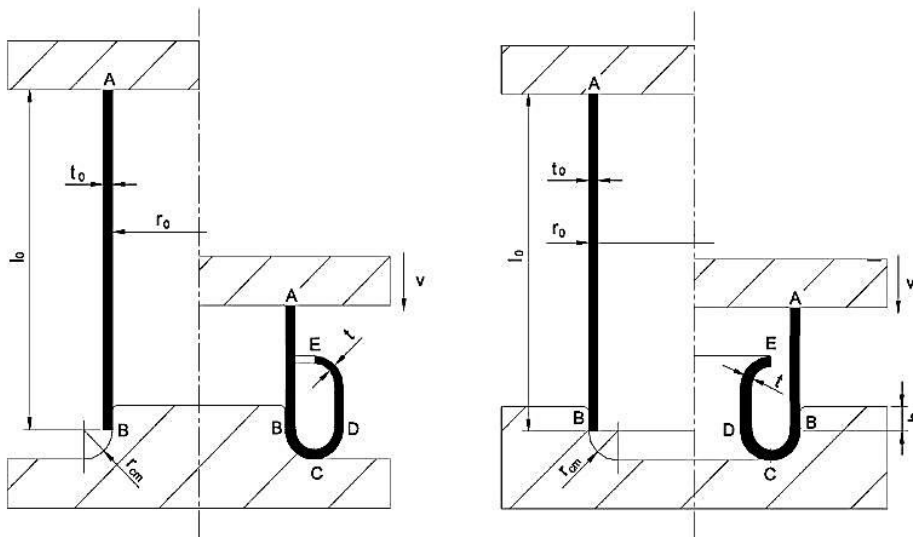


Figura 9- Processos de inversão externa e interna em extremidades de tubos. (Rosa et al., 2004 (a,b)).

Vários autores contribuíram para a classificação dos modos de deformação, identificando os principais parâmetros e características geométricas do processo. Analisaram ainda a influência das matrizes no fluxo do material e desenharam curvas de tensão-extensão através de análise de elementos finitos (Reddy et al., 1992; Sekhon et al., 2003; Sun et al., 2006). Esforços mais recentes têm vindo a ser realizados na tentativa de definir os parâmetros que permitem que o processo ocorra sem defeitos.

Graças à representação da Figura 9 à esquerda, verifica-se como o processo evolui em comparação com as condições iniciais (parte esquerda do eixo de simetria da figura) até a um determinado deslocamento da matriz superior (parte direita do eixo de simetria da figura). Nesta figura,  $r_0$  representa o raio do tubo,  $l_0$  o seu comprimento e  $t_0$  a sua espessura. Analisando agora a evolução do processo, o contato inicial e a dobragem ocorrem no ponto B, sendo que o material permanece em contato com a matriz inferior ao longo de todo o raio de curvatura até ao ponto C, a partir do qual o material deixa de contactar a matriz e continua a sua expansão radial e tangencial. Por fim, no ponto D tem-se a desdobragem do material que começa a escoar na direção oposta ao deslocamento da matriz.

Como se observa na Figura 9, o atrito irá verificar-se ao longo do segmento BC na zona do raio de canto da matriz inferior ( $r_{cm}$ ) e portanto, o valor deste parâmetro será determinante para que a operação se conclua sem defeitos. Para valores pequenos deste parâmetro, o tubo pode instabilizar localmente dado que se aumenta o atrito nessa zona. Por sua vez, para valores grandes do  $r_{cm}$  as paredes do tubo ficam muito finas levando à sua fratura.

#### 2.4.4. Expansão e Redução

Embora não estejam envolvidos diretamente no desenvolvimento desta dissertação, a compreensão dos fenómenos de expansão e redução são essenciais. Estas duas operações estão esquematizadas na Figura 10.

A expansão é representada no lado esquerdo da Figura 10 e inicia-se no ponto B com uma dobragem até ao ponto C. Entre o ponto C e D dá-se a expansão radial e tangencial onde o atrito é predominante. No ponto D, o material deixa de estar em contato com a matriz e dá-se a desdobragem do tubo até ao ponto E. Por fim, entre o ponto E e F, o material deforma-se de forma livre e comporta-se de forma rígida.

O processo de redução (lado direito da Figura 10) é muito semelhante ao processo de expansão, divergindo no troço CD onde o material agora está em compressão e sofre uma redução radial e tangencial.

As variáveis que controlam a geometria do tubo obtido são a razão de deformação ( $r_0/r_d$ ) e o ângulo da ferramenta ( $\alpha$ ). Se durante a expansão alguns destes parâmetros forem demasiado elevados, podem ocorrer situações de instabilidade local ou fratura dúctil. Já no caso da redução, pode ocorrer para além da instabilidade, o engelhamento na direção tangencial (Alves et al., 2011).

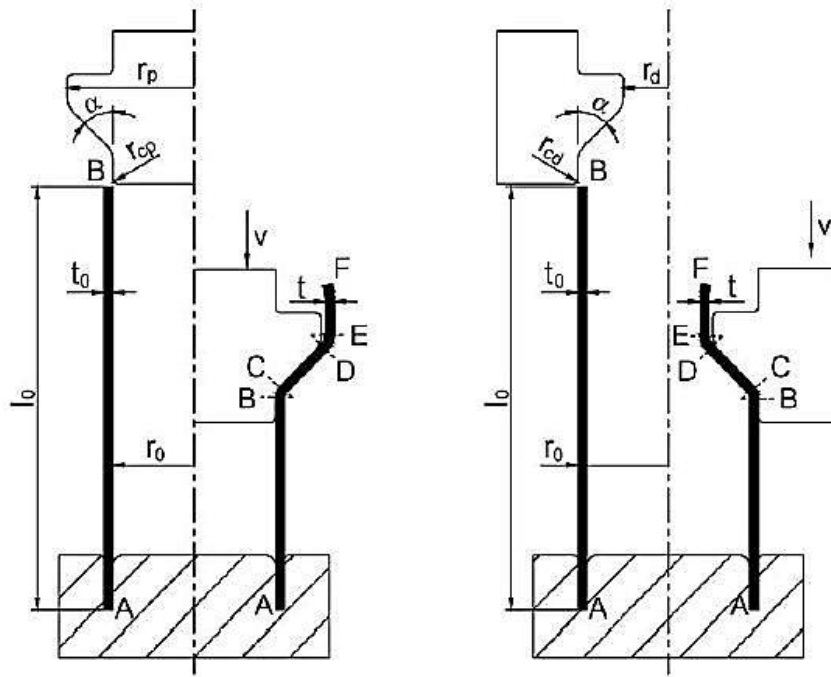


Figura 10- Processos de expansão e redução em extremidades de tubos. (Alves et al., 2006)

## Capítulo 3

### 3. Teoria da Plasticidade

#### 3.1. Introdução

O processo que é apresentado nesta dissertação assenta na enformação plástica a frio de pré-formas tubulares de alumínio e do tubo enformado na chapa. De forma a melhor se compreender os parâmetros e variáveis envolvidas neste processo, descreve-se sucintamente esta teoria.

#### 3.2. Teoria da Plasticidade

Quando sujeitos a solicitações exteriores, os corpos sólidos sofrem diferentes tipos de deformações. Se a sua deformação for no domínio elástico (ou seja, se os corpos se deformarem elasticamente), ao ser retirada a carga, o corpo recupera para as suas condições iniciais e a deformação é anulada. Contudo, se as cargas aplicadas excederem a tensão de cedência do material  $\sigma_y$ , a deformação do corpo ocorrerá no domínio plástico e o corpo já não conseguirá recuperar sua forma inicial, ficando deformado permanentemente. Para quantificar essa deformação é necessário recorrer à teoria matemática infinitesimal da plasticidade.

##### 3.2.1. Tensão, Extensão e Velocidade de Deformação

As condições de carga e tensão responsáveis pela deformação plástica de um material podem ser quantificadas através da teoria da plasticidade que assume particular importância quando se projeta um processo de enformação, pois permite estudar a mecânica envolvida na deformação e como tal dimensionar ferramentas ou peças, por forma a prevenir fraturas ou alcançar a forma desejada (Rodrigues, 2005).

De acordo com esta teoria, as deformações num meio contínuo são avaliadas assumindo as coordenadas no estado deformado como variáveis independentes e impondo que as tensões, extensões e velocidades de deformação sejam apresentadas relativamente a um sistema de coordenadas fixo ao material no estado deformado.

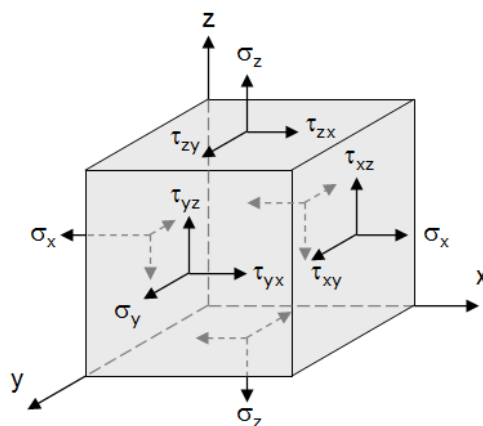


Figura 11- Sólido infinitesimal num sistema de coordenadas fixo.

Para garantir um estado de equilíbrio de forças e respeitando a 3ª Lei de Newton, quando um corpo está sujeito a um conjunto de forças externas existe para cada uma dessas forças, uma força interna correspondente a contrariar o seu efeito donde resultarão diversas tensões. Considerando um elemento de volume infinitesimal é possível introduzir o conceito de tensão como puramente matemático, por estar associado à noção de força aplicada por unidade de superfície. A generalização do conceito de tensão ao domínio tridimensional dá origem à noção de estado de tensão num ponto, que pode ser definido matematicamente pelo tensor das tensões,

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

onde  $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ , o que implica que o tensor é simétrico.

O tensor das tensões pode ser decomposto num tensor hidrostático ou de tensões médias ( $\sigma_{kk}$ ) envolvendo somente estados puros de tração ou compressão e um desviador ( $\sigma'_{ij}$ ), onde as componentes normais são o remanescente da tensão hidrostática para a total (Rodrigues, 2005),

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_{kk} + \sigma'_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma'_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma'_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma'_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

em que  $\delta_{ij}$  é o delta de *Kronecker* e  $\sigma_m$  a tensão média é dada por,

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3} \quad (3.3)$$

O conceito matemático de extensão apresentado na expressão seguinte permite descrever e quantificar as deformações nos corpos sólidos. Note-se que para grandes deformações é habitual recorrer-se à extensão verdadeira ou logarítmica  $\varepsilon$ ,

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \left( \frac{l}{l_0} \right) \quad (3.4)$$

A generalização do conceito de extensão ao domínio tridimensional permite para incrementos de deslocamento pequenos, determinar o acréscimo de deformação num elemento de volume arbitrário através do tensor das extensões (Rodrigues, 2005),

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial \hat{x}_j} + \frac{\partial u_j}{\partial \hat{x}_i} \right) \quad (3.5)$$

em que  $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$  e por isso o tensor das extensões é simétrico. Na expressão apresentada,  $u$  corresponde ao deslocamento desde o início até à posição deformada para o eixo correspondente.

De forma análoga ao conceito de extensão é possível obter a velocidade de deformação em cada ponto  $\dot{\epsilon}$ , notando que as extensões são expressas em função do campo de deslocamentos  $u_{ij}$  enquanto que a velocidade de deformação é, por conseguinte, expressa em função do campo de velocidades  $v_{ij}$  e portanto,

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.6)$$

### 3.2.2. Critérios de Plasticidade

A teoria da plasticidade assenta no estabelecimento de relações entre as tensões que permitem definir o limite de elasticidade, o que corresponde a determinar as condições nas quais o material sai do domínio elástico e entra no domínio plástico, independentemente do estado de tensão a que está sujeito. Geralmente, um critério de plasticidade irá depender do estado de tensão completo de um ponto, logo será função dos nove componentes de tensão nesse ponto. Qualquer critério de plasticidade pode ser escrito na forma (Rodrigues, 2005),

$$F(\sigma_{ij}) = K \quad \text{para } i = j = 1, 2, 3 \quad (3.7)$$

Onde  $F(\sigma_{ij})$  é uma função limite de elasticidade conhecida do estado de tensão e a constante K pode ser obtida experimentalmente.

No caso da superfície de cedência ser representada no espaço das tensões principais, a relação anterior pode ser simplificada substituindo  $\sigma_{ij}$  pelas tensões principais  $\sigma_1, \sigma_2$  e  $\sigma_3$ .

Caso o material seja isotrópico, o critério de plasticidade pode ser escrito como,

$$F(I_1, I_2, I_3) = K \quad (3.8)$$

Onde  $I_1, I_2, I_3$  representam os invariantes do tensor das tensões que podem ser escritos através das tensões nos pontos, segundo a relação,

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_{IJ} \\ I_2 &= \frac{1}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ij} \\ I_3 &= \frac{1}{2} \sigma_{ij} \sigma_{jk} \sigma_{kl} \end{aligned} \quad (3.9)$$

O tensor das tensões pode ser decomposto num tensor hidrostático e num tensor desviador. A tensão hidrostática (ou média) obtêm-se através de,

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3} = \frac{I_1}{3} \quad (3.10)$$

Como para materiais metálicos densos, a deformação plástica não é afetada pela tensão hidrostática, a função limite de elasticidade é somente função do segundo e terceiro invariantes do tensor desviador das tensões representados, respetivamente, por  $J_2$  e  $J_3$  (Rodrigues, 2005),

$$F(J_2, J_3) = K \quad (3.11)$$

Que têm as seguintes relações,

$$J_2 = \frac{1}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}$$

$$J_3 = \frac{1}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{jk} \sigma'_{kl} \quad (3.12)$$

Os critérios de Tresca e von Mises são os critérios de plasticidade mais comuns no estudo dos materiais metálicos. Segundo Tresca, a deformação plástica inicia-se quando a tensão de corte máxima  $\tau_{max}$  atinge um valor crítico de tensão de corte  $k$ ,

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \geq k \quad (3.13)$$

Onde  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  representam as tensões principais ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ )

Por outro lado, von Mises afirma que a deformação plástica se inicia quando a energia elástica de distorção atinge um valor crítico e que as tensões principais se relacionam com a tensão de cedência do material  $\sigma_y$  através da seguinte igualdade,

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = \sigma_y^2 \quad (3.14)$$

A tensão de cedência do material  $\sigma_y$ , relaciona-se com o valor de  $k$  introduzido anteriormente, através das seguintes expressões,

$$\text{Para o critério de Tresca: } k = \frac{\sigma_y}{2}$$

$$\text{Para o critério de von Mises: } k = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}$$

A representação gráfica destas equações no espaço tridimensional de Haigh-Westergaard, também conhecido por espaço das tensões principais, define a superfície limite de elasticidade de Tresca



(representada por um prisma hexagonal) juntamente com a superfície limite de elasticidade de von Mises (aqui representada por um cilindro), estando ambas as superfícies centradas no eixo hidrostático onde  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$  (Figura 12).

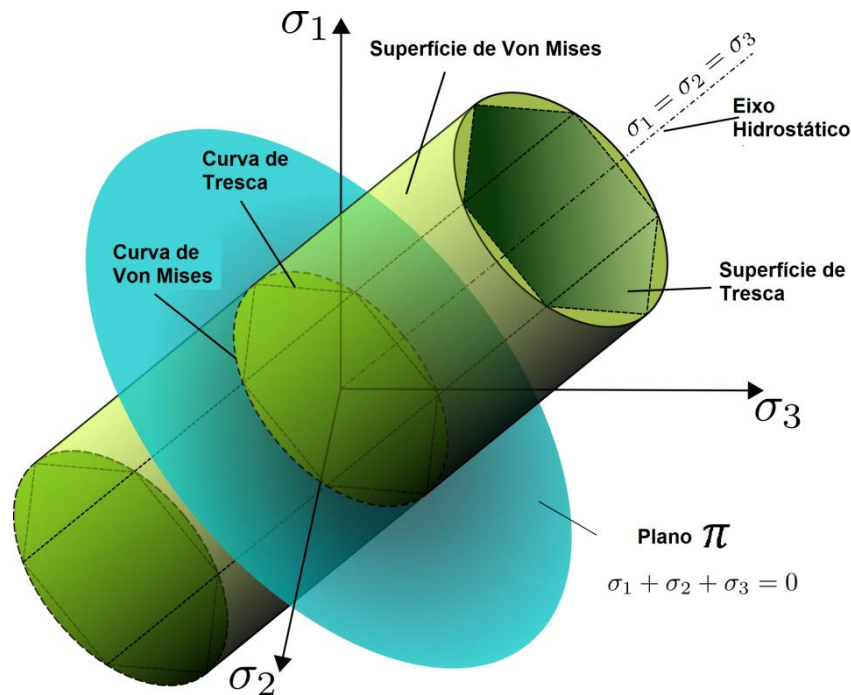


Figura 12- Critérios de Tresca e Von Mises representados no plano das tensões principais

Uma vez que a superfície de Tresca está circunscrita pela superfície de von Mises, diz-se que o critério de Tresca é mais conservativo pois existem tensões já em domínio plástico que segundo o critério de von Mises ainda ocorrem no domínio elástico (Rodrigues,2005).

A teoria da plasticidade vem assim simplificar os complexos estados de tensão multiaxial que se desenvolvem em processos de deformação plástica, baseando-se em ensaios simples com estados de tensões uniaxiais e no limite, estados de tensão biaxiais. Para fazer esta transição entre estados complexos de deformação e uniaxiais, surgem os conceitos de tensão e extensão efetiva que para o critério de von Mises são dados respetivamente por,

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]^{1/2} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ij}} \quad (3.15)$$

E por,

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} [(d\bar{\varepsilon}_1 - d\bar{\varepsilon}_2)^2 + (d\bar{\varepsilon}_2 - d\bar{\varepsilon}_3)^2 + (d\bar{\varepsilon}_1 - d\bar{\varepsilon}_3)^2]^{1/2} = \sqrt{\frac{2}{3}} d\varepsilon'_{ij} d\varepsilon'_{ij} \quad (3.16)$$

Onde  $\bar{\varepsilon}$  representa a extensão efetiva  $\bar{\varepsilon}$ , considerando-se um incremento infinitesimal da extensão efetiva  $d\bar{\varepsilon}$ .

### 3.2.3. Equações Constitutivas

As equações constitutivas relacionam as extensões com as tensões no domínio plástico. A primeira equação constitutiva é a equação de *Levy-Misses* que foi obtida por Levy e mais tarde aperfeiçoada por von Mises, e que permite relacionar os incrementos da tensão desviadora  $\sigma'_{ij}$  com os incrementos da extensão plástica  $d\varepsilon_{ij}^p$  através da constante de proporcionalidade  $d\lambda$ , que depende dos carregamentos aplicados segundo a seguinte expressão (Rodrigues, 2005),

$$\frac{d\varepsilon_{ij}^p}{\sigma'_{ij}} = d\lambda = \frac{3 d\bar{\varepsilon}^p}{2 \bar{\sigma}} \Leftrightarrow d\varepsilon_{ij}^p = \frac{3 d\bar{\varepsilon}^p}{2 \bar{\sigma}} \sigma'_{ij} \quad (3.17)$$

Onde  $d\bar{\varepsilon}$  e  $\bar{\sigma}$  representam um incremento infinitesimal da extensão efetiva e a tensão efetiva, respetivamente. Note-se que a equação determinada despreza a componente elástica da deformação e portanto, só é válida no regime plástico.

Por forma a contabilizar a contribuição da componente elástica da deformação é essencial o uso da equação constitutiva de *Prandtl-Reuss* que resulta de uma generalização da equação de *Levy-Misses*, na medida em que considera o incremento de extensão total como a soma dos incrementos de extensão elástica e plástico,

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad (3.18)$$

Onde o incremento de extensão elástica  $d\varepsilon_{ij}^e$  resulta das Lei de Hooke, também conhecidas por relações tensão-extensão e expressas por,

$$d\varepsilon_{ij}^e = \frac{1 + \nu}{E} d\bar{\sigma}'_{ij} + \frac{(1 - 2\nu)}{\nu} \frac{d\sigma_{ij}}{3} \delta_{ij} \quad (3.19)$$

onde  $E$  representa o módulo de Young,  $\nu$  o coeficiente de Poisson e como já referido anteriormente,  $\delta_{ij}$  representa o delta de Kronecker (Rodrigues, 2005).

## Capítulo 4

---

### 4. Método dos Elementos Finitos

#### 4.1. Introdução

Com o contínuo desenvolvimento da indústria e a crescente necessidade de analisar as estruturas para além do nível macroscópico, garantindo que estas terão o desempenho pretendido quando solicitado, houve a necessidade de se começar a apostar no método dos elementos finitos, aproveitando os úteis conhecimentos da teoria da plasticidade já existentes na altura e que são a base para este método.

No início de 1940, Courant introduziu o conceito de funções contínuas por troços ou intervalos num subdomínio específico. Mais tarde foram desenvolvidos métodos de análise de força através de matrizes onde os deslocamentos eram conhecidos e as forças eram as incógnitas a determinar manualmente, dado que nesta altura ainda não existia o poder de computação que existe atualmente. Este método era designado como método da flexibilidade.

O método dos elementos finitos atualmente conhecido, pode também ser designado de método dos deslocamentos, uma vez que neste método as incógnitas a determinar são os deslocamentos que as forças provocam. O deslocamento tem agora um significado mais generalizado, dado que não só representa o deslocamento físico como também pode representar ou a temperatura ou até a velocidade de escoamento.

Dado a globalidade deste método, a sua aplicação foi feita em problemas de análise estrutural elástica, escoamento de fluidos e transmissão de calor (Hutton, 2004).

Relativamente aos outros métodos, o método dos elementos finitos destaca-se pela discretização de um determinado domínio que consiste em dividir qualquer geometria em subdomínios mais simples, denominados elementos finitos. Essa divisão é feita através de pontos nodais localizados nos vértices destes elementos.

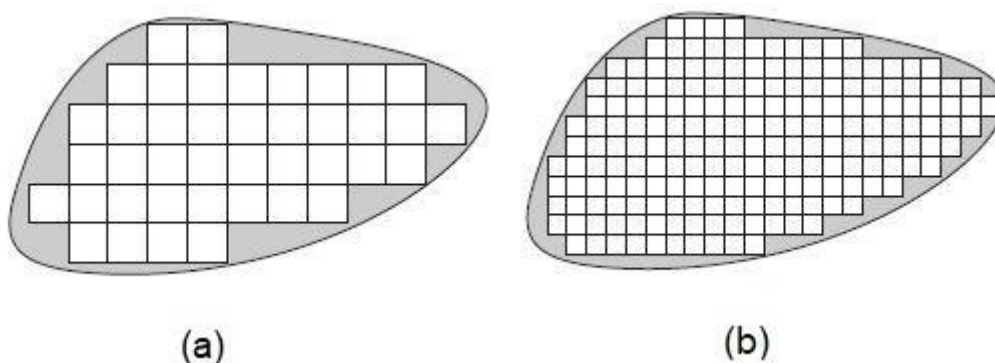


Figura 13- Discretização de um domínio curvo em elementos quadrangulares. a) Malha grosseira (41 elementos). b) Refinamento (192 elementos.)

A Figura 13 a) mostra uma malha inicial mais grosseira e com uma discretização menos acentuada, enquanto que a Figura 13 b) mostra um refinamento a esta malha que consiste numa discretização mais acentuada da malha da Figura 13 a). O refinamento permite reduzir o erro da geometria obtida face à geometria real e pode ser realizado várias vezes consoante se pretenda aumentar o rigor da simulação.

#### 4.2. Equações Fundamentais

Os programas de simulação do método dos elementos finitos são baseados na fórmula irredutível de elementos finitos que contabiliza o atrito entre objetos rígidos e objetos deformáveis,

$$\Pi = \int_V \bar{\sigma} \bar{\varepsilon} dV + \frac{1}{2} K \int_V \dot{\varepsilon}_V^2 dV - \int_{S_T} T_i u_i dS + \int_{S_f} \int_0^{|u_r|} \tau_f du_r dS + \frac{1}{2} P \sum_{c=1}^{N_c} (g_n^c)^2 + \frac{1}{2} P \sum_{c=1}^{N_c} (g_t^c)^2 \quad (4.1)$$

onde o símbolo  $\bar{\sigma}$  representa a tensão efetiva,  $\bar{\varepsilon}$  a extensão efetiva,  $\dot{\varepsilon}_V$  a taxa de extensão volumétrica,  $K$  uma constante de grande valor positivo que exige a incompressibilidade do volume  $V$ ,  $T_i$  e  $u_i$  são as trações de superfície e velocidades na superfície  $S_T$ ,  $\tau_f$  e  $u_r$  são as tensões de corte por atrito e a velocidade relativa na superfície de contato  $S_f$  entre material e ferramenta, e entre materiais.

O atrito é modelado através da utilização da lei de atrito constante  $\tau_f = mK$  e o fator de atrito  $m$  foi definido após se estimar quais as forças de atritos que melhor se adequam, com base nos resultados obtidos experimentalmente.

Os últimos dois termos da expressão apresentada fazem parte da componente do atrito entre objetos deformáveis (no caso em estudo, entre o tubo e a chapa) ao longo das suas fronteiras partilhadas aqui definidas pelos pares de contato  $N_c$ . No caso de modelos de elementos finitos que fazem uso das condições de simetria rotacional do processo, os símbolos  $g_n^c$  e  $g_t^c$  representam a componente normal e tangencial das velocidades de penetração nos pares de contato, e que têm de ser penalizados por um pénalti  $P$ , por forma a evitar a penetração do material nas matrizes.

Quando existe escorregamento por atrito ao longo das superfícies de contato, a velocidade de penalização tangencial  $g_t^c$  é omitida e as tensões de corte são aplicadas às superfícies de contato através da tração da superfície  $T_i$ . Uma descrição mais detalhada do tratamento numérico do contato por atrito entre objetos deformáveis é dada por Nielsen et al. (2013).

Os modelos de elementos finitos utilizados no desenvolvimento desta dissertação fazem uso das condições de simetria rotacional do processo e discretizam a seção transversal longitudinal dos tubos e das chapas por meio de elementos quadriláteros. Os tubos e as chapas foram modelados como objetos deformáveis e o contato por fricção ao longo das suas interfaces foi calculado por meio de um algoritmo *two pass node-to-surface* com um pénalti por defeito de  $10^6$ .

### 4.3. I-FORM

O *software* I-FORM utilizado para a simulação do método dos elementos finitos tem vindo a ser desenvolvido no Instituto Superior Técnico desde os finais dos anos 80 e mais recentemente permite a simulação de ligações entre estruturas, sendo este avanço motivado pelo estudo que tem vindo a ser realizado na união de componentes neste e noutros projetos.

O programa oferece uma solução na análise dos problemas de enformação plástica dos materiais e tem capacidade de apresentar resultados fidedignos nos mais variados processos de enformação plástica, permitindo caracterizar e compreender os mecanismos envolvidos na deformação. Para além disto, o programa está preparado para fazer uma análise bidimensional do problema (I-FORM 2D) ou tridimensional (I-FORM 3D).

As simulações realizadas nesta dissertação foram feitas com recurso ao I-FORM 2D pois a deformação no estudo realizado é axissimétrica, não se alterando as condições segundo a direção tangencial  $\theta$ .

O *software* está dividido em quatro partes: o pré-processador, o processador de resolução do sistema de equações (*solver*), o pós-processador e o *remesh*. No primeiro define-se a geometria inicial do problema bem como os parâmetros e as respetivas variáveis envolvidas. Para definir a geometria pode-se desenhá-la diretamente no programa ou então importar as matrizes e a malha das pré-formas através de um *software* alternativo tal como o *AutoCAD* ou o *GID*. Em seguida, escolhe-se o material da malha, os parâmetros para a convergência das iterações, as velocidades das matrizes, o atrito entre superfícies, entre outros. Estas informações são guardadas nos ficheiros *Die.dat*, *Fem.dat*, *Material.dat* e *Simulation.dat*.

O *solver* lê todos os parâmetros e variáveis introduzidas no pré-processador, e faz o seu processamento e a respetiva simulação numérica. Essas informações ficam por sua vez guardadas em ficheiros *fem.neu*.

O pós-processador permite verificar toda a evolução do processo através dos ficheiros *fem.neu* resultantes do *solver*. A partir deste processador pode-se observar a geometria da peça inicial e deformada, as cargas e deslocamentos, e outras variáveis de campo.

Caso surjam erros de geometria que impossibilitam a continuação da simulação numérica é necessário recorrer ao *remesh* para que a simulação possa voltar a correr. Esta parte do programa permite refinar a malha e reestruturá-la de forma a permitir a continuação da simulação da sua deformação.

## Capítulo 5

---

### 5. Desenvolvimento experimental

#### 5.1. Introdução

Neste capítulo será apresentado o estudo experimental elaborado, o desenvolvimento e fabrico de ferramentas, o processo de SBF aplicado ao tubo de parede fina e por fim a ligação entre o tubo e a chapa.

#### 5.2. Descrição do Processo

A união de tubos de parede fina a chapas de diferentes materiais, geometrias e espessuras é realizada por enformação plástica a frio. A ligação obtida é constituída por um tubo de parede fina que sofreu uma operação de *Boss Forming* de modo a obter um aumento de espessura localizado, que servirá de suporte ao componente a unir (neste caso a chapa).

Assim, torna-se necessário realizar duas operações independentes, uma para obter a geometria do tubo e outra para obter a ligação. Para obter a geometria do tubo final apresentada, partimos de uma pré-forma tubular, a qual sofrerá um carregamento axial segundo o seu próprio eixo através de duas matrizes (que se movem juntamente) e um mandril responsável por manter a geometria interior da pré-forma inalterável. O processo consiste em comprimir parcialmente a parede da pré-forma tubular, escoando o material do tubo para uma cavidade maquinada na matriz com dimensões conhecidas. Após essa cavidade estar preenchida, o processo termina e dele resulta uma flange calibrada no exterior do tubo e uma redução de espessura deste na sua extremidade superior (Figura 14 a)).

A segunda operação começa por encostar a chapa (previamente furada) ao topo da bossa que resulta da operação anterior e que será o suporte desta chapa. A partir daqui pode ser finalizada a ligação de duas formas: A primeira e mais simples é recorrendo a uma matriz de inversão externa que dobra a altura da extremidade superior livre do tubo para cima da chapa, restringindo o movimento da mesma e garantindo a fixação de ambos (Alves et al., 2017). Note-se que a altura final da extremidade superior do tubo tem de ser superior à espessura da chapa para que a ligação seja possível; E a segunda consiste em maquinar um chanfro com um determinado ângulo e dimensões, que será preenchido pelo material da extremidade superior livre do tubo que sofre novamente um carregamento axial sobre o seu próprio eixo (Alves et al., 2017 (b)). O resultado é, como se pode observar na Figura 14 b), uma superfície ligada uniforme e sem saliências. No entanto, para não existir falta ou excesso de material do tubo nesta ligação ou até instabilidade do tubo, existem parâmetros que foram estudados de forma a conhecer as dimensões do chanfro para se obter a ligação pretendida. Como neste processo é necessário maquinar um chanfro na superfície da chapa, fica assim inviabilizada a sua utilização para chapas finas.

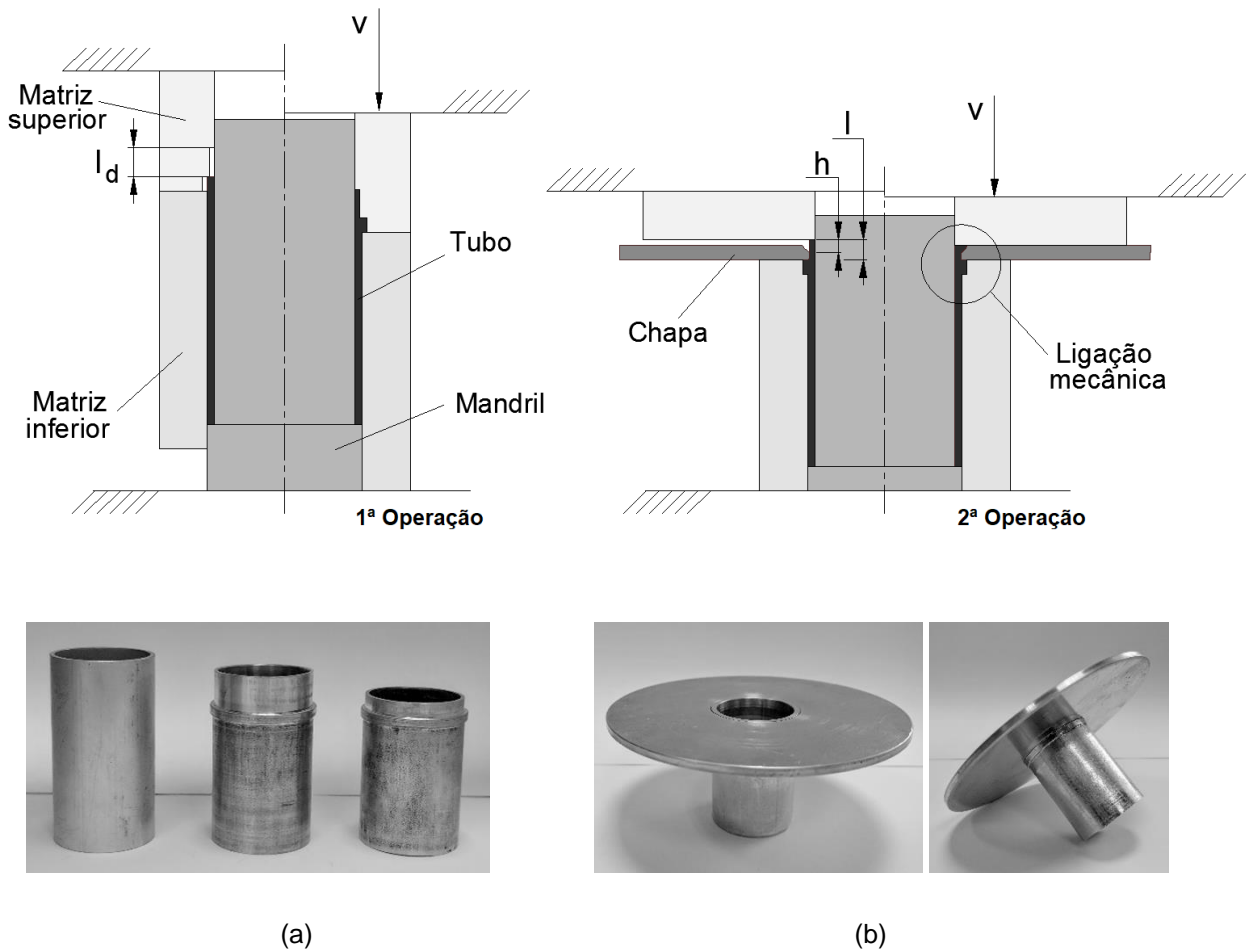


Figura 14- Formação de flanges anelares em tubos e ligações de tubo a chapa. a) Representação esquemática do conjunto de ferramentas para realizar a bossa enformada e o produto final obtido (primeira operação do novo processo de ligação). b) Representação esquemática do conjunto de ferramentas para realizar a ligação por enformação do tubo contra o chanfro maquinado no furo da chapa e o produto final obtido (segunda operação do novo processo de ligação).

### 5.3. Caracterização do Material

O desenvolvimento deste novo processo de unir tubo a chapa foi levado a cabo utilizando tubos de parede fina de liga de alumínio AA6063-T6, composta essencialmente por alumínio e por pequenas percentagens inferiores a 1%, de Si, Fe, Cu, Mn, Mg, Cr, Zn e Ti. Os tubos no seu estado inicial (pré-formas) têm um raio exterior  $r_0$  de 16 mm e espessura  $t_0$  igual a 1.5 mm. As chapas utilizadas são em liga de alumínio AW5754-H111 e têm uma espessura  $t_s$  igual a 3 mm, sendo utilizadas sem nenhum tratamento adicional. A caracterização mecânica dos materiais do tubo e da chapa que permite obter a curva tensão-extensão para cada material foi realizada à temperatura ambiente, numa prensa hidráulica (Instron SATEC 1200kN) com uma velocidade de deslocamento de 10 mm/min.

A caracterização do material do tubo consistiu, primeiramente, num ensaio de compressão uniaxial sobre uma pré-forma constituída por anéis cortados a partir de uma pré-forma com as dimensões

apresentadas na Tabela 1, de forma a analisar a instabilidade plástica (a partir de agora designada de *buckling*).

$r_0$ (mm)	
14.5	
$h$ (mm)	
2, 3, 5, 8, 10	
$t_0$ (mm)	
0.75, 1.0, 1.25, 1.5	

Tabela 1- Resumo do trabalho experimental realizado para determinar a ocorrência de buckling na compressão de anéis de parede fina.

Para caracterizar o material da chapa realizou-se igualmente um ensaio de compressão uniaxial mas agora sobre um provete que neste caso resultou do empilhamento de três discos de 10 mm de diâmetro, cortados diretamente do material na sua forma inicial.

Em ambos os ensaios de caracterização dos materiais utilizou-se estearato de zinco para lubrificar as superfícies de contato entre o material e os pratos da prensa, minimizando o efeito de barril durante a compressão do provete. Mais pormenores acerca do procedimento para determinar a curva tensão-extensão dos materiais podem ser encontrados em Alves et al. (2017).

As curvas tensão-extensão resultantes foram aproximadas pelas seguintes equações de Ludwik-Hollomon,

$$\sigma = 340.2 \varepsilon^{0.16} \text{ (Tubos AA6063-T6)} \quad (5.1)$$

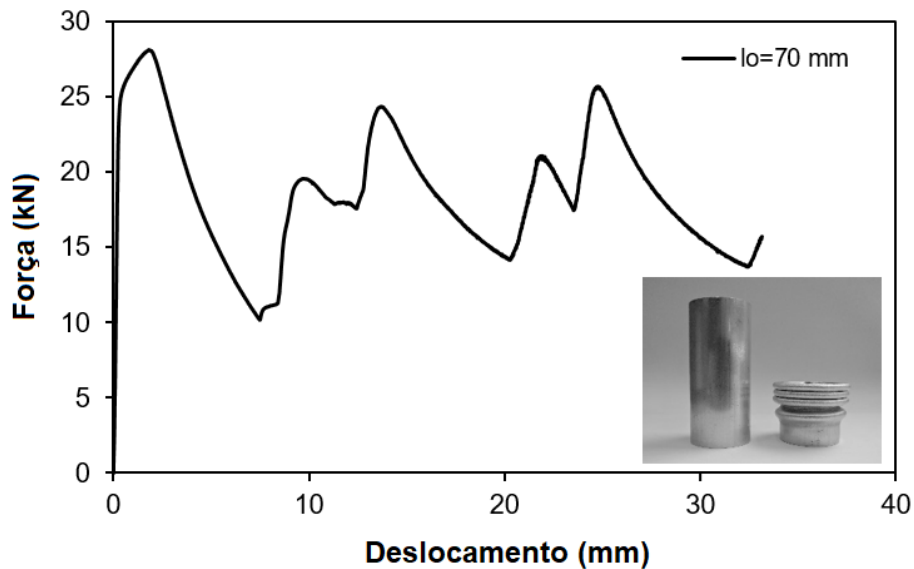
$$\sigma = 352.9 \varepsilon^{0.217} \text{ (Chapa AW5754-H11)} \quad (5.2)$$

### 5.3.1. Carga Crítica de Instabilidade

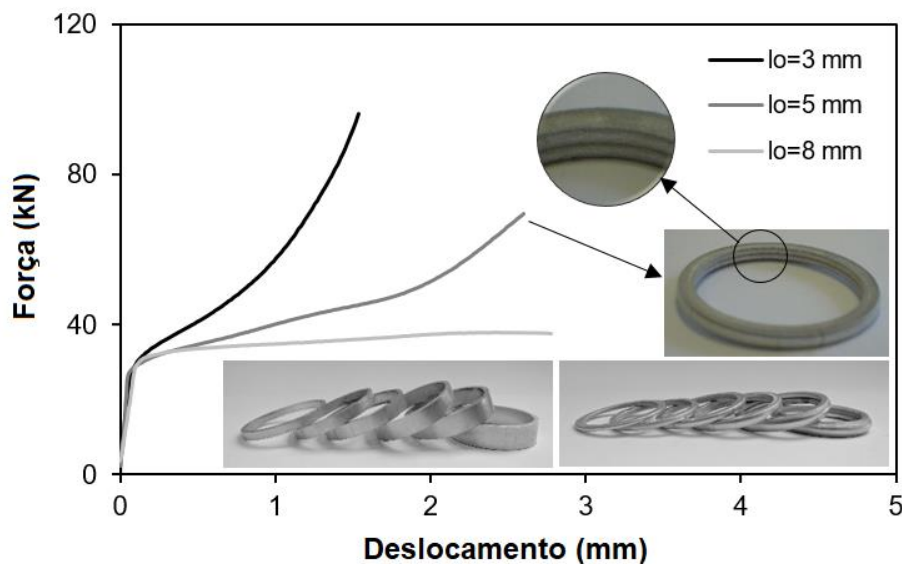
A carga crítica de instabilidade para despoletar o *buckling* local e a relação de esbelte  $l_0/t_0$ , abaixo da qual o *buckling* local não surge, foram determinadas através da compressão de vários tubos com diferentes comprimentos iniciais  $l_0$ , para cada uma das espessuras  $t_0$  e condições de fronteira livres entre pratos planos e paralelos. Os testes foram realizados na prensa hidráulica referida anteriormente e utilizada para a caracterização do material.



Após a compressão da pré-forma com comprimento inicial  $l_0 = 70\text{ mm}$ , obteve-se uma carga crítica de instabilidade igual a 25.5 kN (Figura 15 a). A relação de esbeltez  $l_0/t_0$  foi identificada através da compressão anéis de parede fina com espessura  $t_0$  igual a 1.25 mm e comprimentos  $l_0$  compreendidos entre 2 e 10 mm (conforme a Tabela 1). Na Figura 15 b) mostram-se as evoluções obtidas para anéis com comprimentos  $l_0$  iguais a 3, 5 e 8 mm.



(a)



(b)

Figura 15- Instabilidade plásticas de tubos e anéis de parede fina. a) Evolução experimental da força com o deslocamento durante a compressão axial do tubo de parede fina entre pratos paralelos. b) Evolução experimental da força com o deslocamento durante a compressão axial de anéis de diferentes tamanhos entre pratos paralelos (Os anéis nos seus estados iniciais e finais são apresentados na seção inferior do gráfico).

Observou-se através da Figura 15 b) que os anéis de parede fina com um comprimento inicial  $l_0 = 3$  mm, experienciam um aumento acentuado da força de compressão com o deslocamento, semelhante ao observado na compressão de anéis de parede espessa. Por sua vez, os anéis com um comprimento inicial  $l_0 = 5$  mm também mostram um aumento acentuado da força de compressão até o início da instabilidade plástica, mas depois começam a sofrer *buckling* e a taxa de crescimento da força diminui. No caso dos anéis com  $l_0 = 8$  mm, o *buckling* pode surgir durante uma carga de compressão quase constante, devido ao facto da carga resultante do *buckling* ser compensada pelo aumento da força causada pelo contato entre as superfícies próprias dos anéis dobrados.

A Tabela 2 sumariza os valores de altura  $h^{buckling}$  acima da qual começa a existir *buckling*. Com estas alturas é possível definir para cada espessura  $t_0$  a altura máxima que evita a instabilidade do tubo. Como o tubo que foi utilizado nos ensaios realizados nesta dissertação tinha uma espessura  $t_0$  igual a 1.25 mm, a altura a partir da qual o tubo instabiliza é  $h^{buckling}$  igual a 3.3 mm.

$t_0$ (mm)	$h^{buckling}$ (mm)
0.75	2
1.00	2.7
1.25	3.3
1.50	4

Tabela 2- Alturas críticas obtidas para anéis de tubos de parede de fina de diferentes espessuras.

#### 5.4. Equipamentos, Ferramentas e Pré-formas

As operações que permitiram obter a ligação tubo-chapa e todos os processos intermédios foram executados no laboratório da seção de Tecnologia Mecânica do Instituto Superior Técnico, onde também foi feita toda a aquisição de dados que possibilitou, posteriormente, a comparação entre os resultados obtidos por métodos numéricos e os resultados experimentais. Os tipos de máquinas utilizadas para as diversas operações são descritas no próximo subcapítulo.

As pré-formas utilizadas foram obtidas através do corte de tubos compridos de alumínio de liga AA6063-T6 em vários tubos com aproximadamente 60 mm de comprimento, utilizando um serrote de fita. Esses tubos foram em seguida colocados no torno mecânico, onde através de uma operação de facejamento nas superfícies inferior e superior do tubo, se removeu o corte grosseiro deixado pelo corte com o serrote de fita.

As ferramentas utilizadas foram maquinadas no mesmo torno mecânico, nomeadamente a matriz superior e inferior, bem como o mandril. De modo a evitar a alteração das dimensões maquinadas nestas ferramentas e para tentar diminuir as folgas entre a peça e a ferramenta (já que as ferramentas

estarão sujeitas a cargas elevadas durante vários ensaios), o material escolhido foi um aço inoxidável e a matriz inferior foi encamisada.

A utilização do mandril tem como objetivo manter inalterada a seção interior de cada um dos tubos, impedindo a deformação no sentido radial interior.

As ferramentas utilizadas são apresentadas na Figura 16 que mostra todos os componentes envolvidos na primeira fase da ligação através do novo processo proposto de *Boss Forming* e que permite obter o tubo para fazer a ligação à chapa.

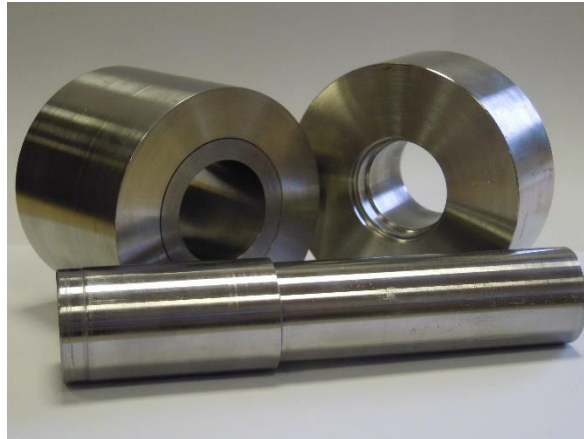


Figura 16- Conjunto de ferramentas utilizadas para a enformação do tubo. Da esquerda para a direita tem-se a matriz inferior encamisada, a matriz superior e o mandril no meio de ambas.

Para a segunda fase da ligação pelo novo processo de *Sheet Bulk Forming*, as ferramentas utilizadas são semelhantes e consistem numa matriz inferior de suporte à bossa formada na primeira fase do processo (com uma caixa de dimensões iguais à da gerada na parte superior dessa matriz) e numa matriz superior igual à anterior mas de forma invertida, por forma a comprimir a extremidade superior livre do tubo de forma a fechar a ligação. O processo de dobragem do tubo estudado anteriormente por Alves et. al (2017), também pode ser aplicado nesta segunda fase em vez do novo processo apresentado, bastando para isso utilizar uma matriz de inversão externa.

## 5.5. Procedimento Experimental

### 5.5.1. Enformação do Tubo

Para realizar a primeira fase da operação que consiste na formação de uma flange anelar no tubo, tem-se o seguinte procedimento:

1. Preparar as pré-formas tubulares, cortadas a partir de um tubo longo e maquinadas até à dimensão desejada;
2. Lubrificar as ferramentas e a pré-forma com estearato de zinco;

3. Colocar o mandril dentro da pré-forma e as matrizes superior e inferior em torno desta;
4. Posicionar o conjunto de ferramentas montado entre os pratos da prensa, em contato e centrado com eles;
5. Programar os valores de velocidade e deslocamento desejados no *software* da prensa;
6. Realizar o ensaio;
7. Remover as matrizes e o mandril;
8. Processar os dados adquiridos;

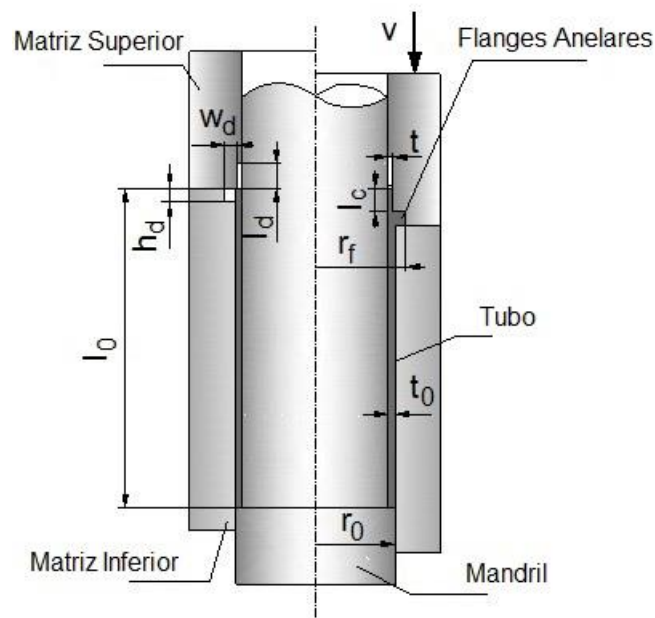


Figura 17- Resultados obtidos pelo novo processo de enformação do tubo.

Este processo permitiu identificar as seguintes variáveis:

- i) O raio exterior inicial  $r_0$  e a espessura inicial  $t_0$  da parede do tubo na sua forma inicial;
- ii) A altura  $h_d$  e a largura  $w_d$  da cavidade da matriz (que definem a seção quadrada da flange anelar);
- iii) A profundidade  $l_d$  da cavidade da matriz e o comprimento total de material empilhado  $l_c$ ;
- iv) A espessura final da parede do tubo  $t$  e o raio final  $r_f$  resultantes da compressão parcial da espessura da parede do tubo ao longo do comprimento  $l_c$ .

### 5.5.2. Ligação do Tubo à Chapa

A segunda fase do processo permite unir o tubo (já enformado) à chapa. O procedimento para a realizar é o seguinte:

1. Maquinar um furo na chapa (e adicionalmente, um chanfro nesse furo para o caso de chapas espessas onde se pretenda fazer a união sem recorrer à dobragem do tubo);
2. Montar o conjunto de ferramentas:
  - a. Colocar o mandril dentro do tubo e encostar a chapa no topo da flange anelar formada no tubo;
  - b. Introduzir a matriz que fará a compressão da extremidade livre do tubo e cujo processo é introduzido nesta dissertação (apenas aplicável a chapas espessas e maquinadas com um chanfro definido).
3. Realizar os mesmos procedimentos que para a primeira fase da operação a partir do passo 3.

Uma representação esquemática das duas fases deste processo é apresentada na Figura 14 deste capítulo.

## 5.6. Ensaios Realizados

### 5.6.1. Obtenção do Tubo Enformado

Até à obtenção do tubo enformado com as dimensões que se consideraram adequadas para testar o novo processo de ligação, foram realizados diversos ensaios com diferentes diâmetros finais e mantendo sempre constante a altura da bossa pretendida  $h_d$ . O plano de trabalhos experimentais inclui diferentes valores de  $w_d$ ,  $t$  e  $l_d$  de modo a caracterizar os defeitos, a compreender a mecânica do preenchimento da cavidade da matriz e a evolução da força com o deslocamento, e também para caracterizar as roturas e defeitos no material.

O intervalo de valores dos parâmetros do processo utilizados nos ensaios experimentais é dado na Tabela 3.

$r_0$ (mm)	$t_0$ (mm)	$h_d$ (mm)	$w_d$ (mm)	$t$ (mm)	$l_d$ (mm)
16	1.5	3	1 to 2.75	0.75 to 1.0	2.5 to 12

Tabela 3- Intervalo de valores utilizados nos ensaios experimentais.

O raio exterior inicial  $r_0$ , a espessura inicial  $t_0$  das pré-formas tubulares e a altura  $h_d$  da cavidade da matriz mantiveram-se inalteráveis, de forma a reduzir o número geral de parâmetros que influenciam a viabilidade do novo processo proposto.

Após se observar o modo de deformação em cada um dos diâmetros finais testados, optou-se por utilizar tubos com 34 mm de diâmetro final. A Figura 17 mostra a influência dos parâmetros principais da operação nos modos de deformação que foram observados durante o desenvolvimento deste novo processo de *Boss Forming*.

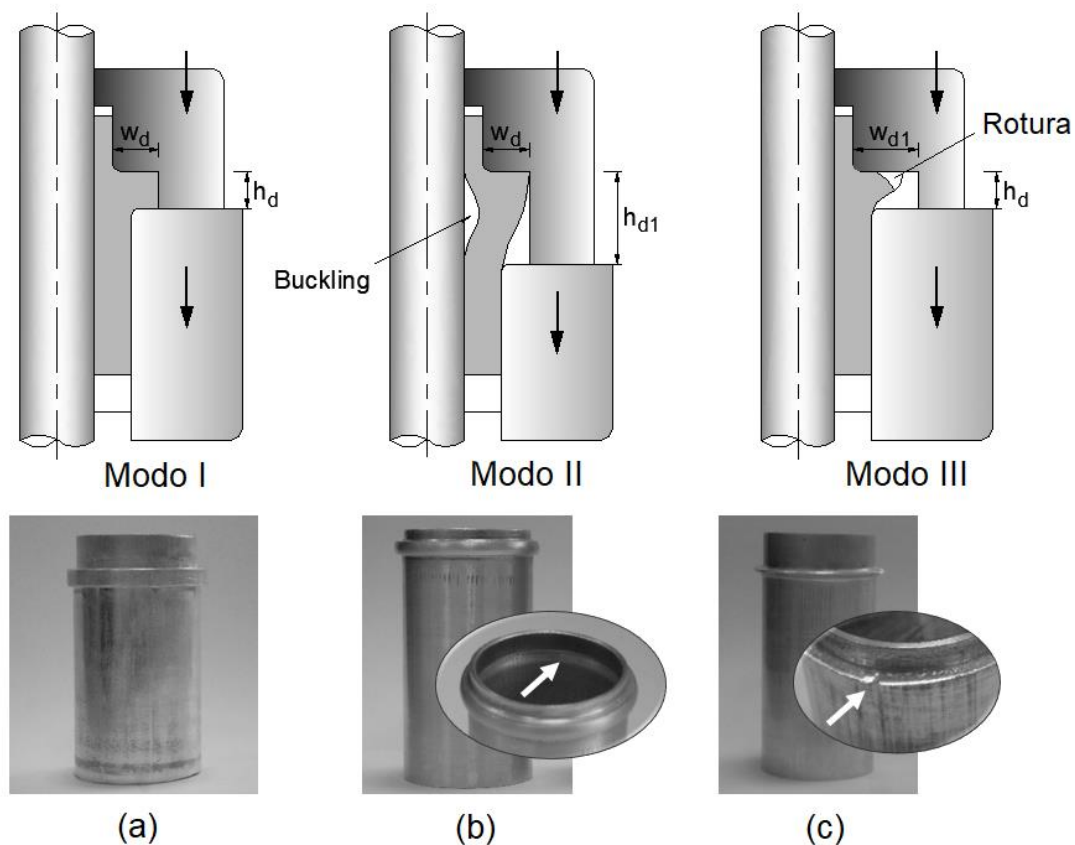


Figura 18- Influência da seção transversal das flanges anelares. a) Flange anelar livre de defeitos (modo de deformação I). b) Buckling da flange anelar quando a altura  $h_d$  é muito grande (modo de deformação II). c) Rotura da flange anelar quando a largura  $w_d$  é muito grande (modo de deformação III).

A influência da geometria da seção transversal das flanges calibradas a serem formadas é mostrado na Figura 18.

O modo de deformação I que se traduz numa bossa livre de defeitos é representado na Figura 18 a). Na Figura 18 b) observa-se que o tubo instabiliza por *buckling* durante o empilhamento do material e por isso tem-se o modo de deformação II. Isto acontece quando a altura  $h_d$  é muito elevada (por exemplo,  $h_d > 5\text{mm}$ ), pois o comprimento livre entre as superfícies paralelas planas das matrizes superior e

inferior torna o tubo muito frágil. Por outro lado, o mesmo modo de deformação pode ocorrer quando a espessura final  $t$  do tubo é muito pequena, tal como mostra a Figura 19 b).

Quando a largura  $w_d$  é grande ( $w_d > 2.5$  mm, por exemplo) ocorre a rotura da superfície livre da flange. O modo de deformação plástica associado a este defeito é designado modo III e pode ser observado na Figura 18 c).

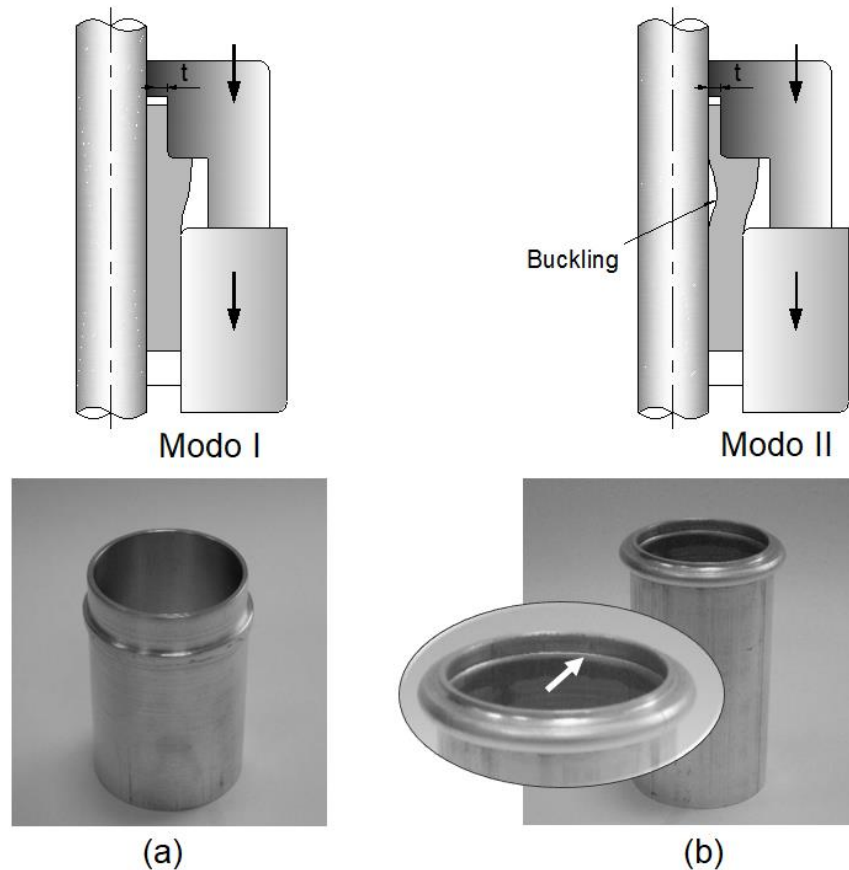


Figura 19- Influência da espessura final  $t$  do tubo após compressão parcial da espessura da parede do tubo ao longo da direção longitudinal. a) Flange anelar sem defeitos (modo de deformação I). b) Buckling da flange anelar devido à espessura final  $t$  do tubo a ser enformado ser muito pequena (modo de deformação II).

Estes resultados estão de acordo com a caracterização da instabilidade plástica de anéis de parede fina sujeitos a compressão axial que é realizada ao longo deste capítulo. Uma vez que se determinou a relação de esbeltez crítica  $h_d/t_0 < 3.3$  mm, é possível determinar a altura  $h_d$  para a qual não ocorre *buckling* bastando apenas saber a espessura inicial do tubo  $t_0$ .

Para além dos modos de deformação acima mencionados e que foram observados durante os ensaios experimentais, também é possível obter outros que estão associados à formação da apara ou *folding*. Espera-se que estes modos ocorram em condições extremas relacionadas com alturas  $h_d$  e larguras  $w_d$  elevadas (no caso do *folding*), e também nos casos onde se utiliza uma espessura final  $t$  do tubo muito próxima da espessura inicial  $t_0$  (no caso da formação da apara).

### 5.6.2. Obtenção da Ligação Tubo-Chapa

Para o novo processo de ligação de tubo a chapa apresentado neste estudo podem ocorrer quatro modos de deformação plástica, dependendo do comprimento da extremidade superior livre do tubo enformado. Esses casos estão representados na figura seguinte assim como as variáveis deste processo que permitem o bloqueio mecânico da flange do tubo enformado contra a chapa. De notar que essas variáveis podem ser estabelecidas a partir de conceitos básicos que envolvem a geometria do furo chanfrado, a incompressibilidade de volume e a instabilidade plástica (*buckling*) de anéis de parede fina sob compressão axial.

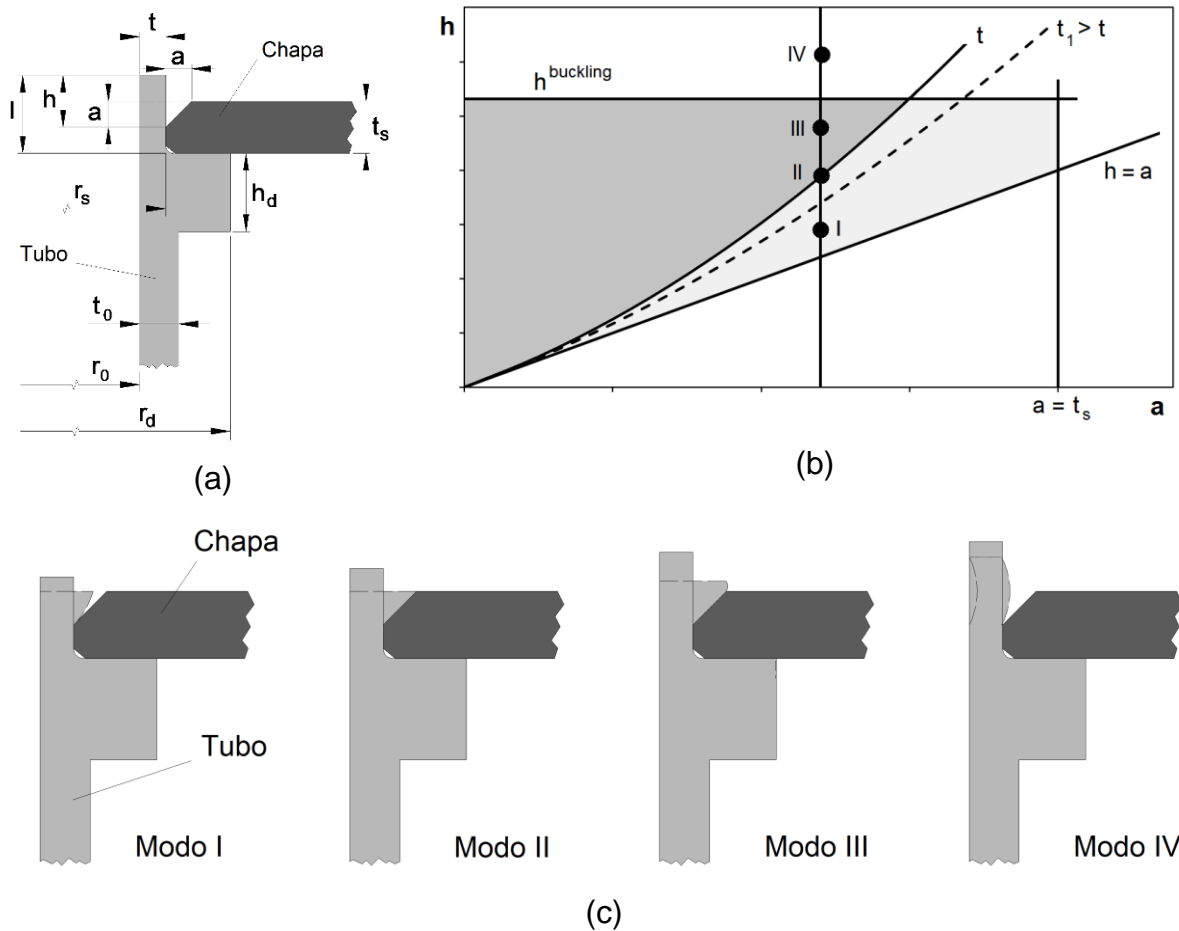


Figura 20- Representação esquemática do novo processo de ligação de tubo a chapa. a) Variáveis principais. b) Domínio de admissibilidade do novo processo associado às dimensões do chanfro maquinado na chapa e localização dos modos de deformação plástica. c) Representação esquemática dos modos de deformação plástica associados ao domínio de admissibilidade do novo processo.

A figura 20 a) apresenta as variáveis relacionadas com a nova ligação, imediatamente após se colocar a chapa no topo da flange anelar produzida pelo novo processo de enformação acima mencionado. Na figura 20 c) podemos observar os quatro modos de deformação plástica que ocorrem consoante a altura da extremidade superior livre do tubo enformado representada pela variável  $h$ .



No Modo I, como a altura da extremidade superior livre do tubo não é suficiente para preencher a cavidade, temos uma ligação com falta de material. O Modo II é o caso perfeito, uma vez que a altura  $h$  permite preencher a cavidade totalmente, bloqueando o tubo à chapa.

Se no Modo II não sobrava material e se obtinha uma superfície sem saliências, já no Modo III a altura  $h$  preenche excessivamente a cavidade e por isso sobra material do tubo acima da espessura da chapa. Por último, no Modo IV como a altura  $h$  é muito superior à necessária para preencher a cavidade e à altura para a qual ocorre o fenómeno de *buckling* ( $h^{buckling}$ ), tem-se a instabilidade da extremidade superior livre do tubo. Uma análise mais detalhada destes modos de deformação plástica será realizada no Capítulo 7.

Tal como no processo de dobragem do tubo para cima da chapa (Alves et al., 2017) onde o comprimento da extremidade livre do tubo tem de ser superior à espessura da chapa, de forma análoga também neste novo processo necessita que a altura  $h$  seja superior à dimensão da aresta da seção triangular do chanfro  $a$  que deve ser inferior à espessura da chapa  $t_s$ .

Existem assim alguns limites no domínio onde os casos anteriores podem surgir. Uma representação gráfica desses limites e da localização de cada caso pode ser analisada no gráfico  $h$ - $a$  da Figura 20 b).

Para se conhecer qual o valor de  $h$  que permite completar a cavidade utilizou-se o conceito de incompressibilidade de volume. Este conceito determina que a altura livre  $h$  do tubo para preencher um furo com um chanfro de 45° de inclinação é dada por,

$$h = a + \frac{a^2(a + 3(r_0 + t))}{3t(2r_0 + t)} \quad (5.3)$$

Onde  $t$  é a espessura da parede da extremidade superior do tubo enformado,  $r_0$  é o raio interior do tubo e  $a$  é o comprimento da aresta da seção triangular do chanfro. A equação acima pressupõe que o furo chanfrado se comporta como um objeto rígido durante a compressão da extremidade superior do tubo e é representada no gráfico Figura 20 b). O limite da altura  $h$  a partir da qual o tubo instabiliza plasticamente é representado na mesma figura pela linha horizontal de coordenada  $h = h^{buckling}$ .

Os outros dois limites de admissibilidade da equação de incompressibilidade de volume apresentada são dados pelas linha vertical e inclinada, que se relacionam com a geometria do chanfro maquinado no furo realizado na chapa. O limite representado pela linha vertical define que a dimensão da aresta da seção triangular  $a$  não seja superior à espessura da chapa  $t_s$ , pois dependendo destas dimensões podem ocorrer casos onde a inclinação do ângulo do chanfro é diferente de 45°, invalidando a utilização da equação de incompressibilidade do volume que foi deduzida para esta inclinação.

O último limite do gráfico representado na Figura 20 b) corresponde a exigir que a altura livre  $h$  do tubo seja maior que a aresta da seção triangular  $a$  do chanfro, dado que se assim não for, nenhum dos

casos referidos anteriormente tem lugar pois para  $h=a$ , a extremidade superior do tubo é coplanar com a superfície da chapa.

A partir dos conhecimentos anteriores realizou-se uma tabela de ensaios (Tabela 4) para selecionar os casos de teste a investigar, de modo a compreender a influência das diferentes variáveis envolvidas nos modos de deformação plástica, e também para validar a análise teórica feita anteriormente. Com efeito, utilizaram-se tubos com bossas de igual diâmetro e comprimentos da extremidade livre superior diferentes, para além de chapas com várias dimensões de chanfro, algumas iguais e outras diferentes.

Caso de Teste	Tubo				Chapa		
	$r_o$ (mm)	$t_0$ (mm)	$h$ (mm)	$t$ (mm)	$r_s$ (mm)	$t_s$ (mm)	$a$ (mm)
1	14.5	1.5	2.00	1.25	15.75	3	1.5
2			2.43	1.25			1.5
3			3.00	1.25			1.5
4			4.00	1.25			1.5

Tabela 4- Tabela de ensaios para avaliar os modos de deformação plástica

### 5.6.3. Ensaios Destrutivos

O último ensaio realizado teve como propósito avaliar o comportamento da ligação à tração e à compressão até à separação do tubo da chapa, determinando-se a força máxima que o novo processo de ligação é capaz de suportar. Os seus resultados são apresentados no Capítulo 7.

## Capítulo 6

---

### 6. Desenvolvimento Numérico

#### 6.1. Introdução

De forma a melhor caracterizar os fenómenos que ocorrem durante a deformação do tubo e da chapa torna-se necessário recorrer a *softwares* que simulem através do método dos elementos finitos, a deformação do material quando sujeito a cargas de compressão axial e extrapolando assim dados como as tensões, extensões e velocidades de deformação ao longo do processo, para além de outras variáveis de campo que permitem identificar as zonas críticas de deformação do material.

Outra das vantagens do uso destes *softwares* é que não só permitem analisar o que acontece a um nível microscópico, mas também permitem validar os resultados obtidos experimentalmente e até verificar a viabilidade de um projeto antes de os testes experimentais terem sido realizados. Representa assim uma solução económica e fundamental na conceção de qualquer projeto.

Deste modo, para a análise numérica deste novo processo que agora se introduz, recorreu-se ao software I-FORM referido no Capítulo 4 desta dissertação.

#### 6.2. Refinamento da Malha

A dimensão da malha é fundamental para o estudo numérico, já que influencia a dimensão dos elementos finitos e a sua aproximação à realidade. Convém existir um equilíbrio entre o refinamento da malha, pois malhas muito refinadas exigem mais poder de computação devido à complexidade das operações matriciais e nem sempre representam resultados mais precisos.

Uma malha muito grosseira também não é aconselhável devido ao reduzido número de elementos finitos que se traduz no aparecimento de um erro associado. Assim é fundamental encontrar uma solução de compromisso. A forma mais correta é fazer um estudo de sensibilidade de malha onde começamos com uma malha grosseira e vamos aumentando o número de elementos até que os resultados obtidos não sofram mais alterações com o número de elementos.

#### 6.3. Parâmetros do Processo

Através do pré-processador do I-FORM 2D (*Pre.exe*) que foi a vertente do software escolhida devido à simplicidade da geometria que se pretendia simular, é possível definir as geometrias e variáveis que comandam o processo. As malhas são desenhadas no pré-processador onde também são definidas as condições fronteira e as velocidades de deslocamento das matrizes (-1 mm/s, no caso em estudo), assim como os incrementos de tempo entre cada step, entre outros. Quanto menor for o intervalo de tempo para cada step e quanto maior for o número de steps, mais precisa será a simulação e os resultados que dela se conseguem extrair.

Também no pré-processador se definem as propriedades do material que se pretendem utilizar na malha durante a simulação numérica. Essas propriedades são obtidas através da caracterização do material referida no capítulo anterior. Definidos estes parâmetros, selecionaram-se as configurações de iteração do problema definindo-se a opção de iteração direta com um número máximo de 50 iterações. Os parâmetros de contato e fricção foram definidos em seguida, com nós libertados no contato entre ferramentas e nós fixos no contato entre os objetos. Também se definiu não existir escorregamento entre as interfaces e o fator de atrito escolhido foi de 0.13 depois de analisada a forma da deformação e comparada a carga com os ensaios experimentais.

#### 6.4. Simulações Numéricas Realizadas

Os casos estudados na enformação do tubo e no fecho da ligação são os apresentados na Tabela 5 onde  $d_f$  é o diâmetro final do tubo enformado,  $t$  a espessura final da parede do tubo e  $t_s$  a espessura da chapa.

Operação	$d_f$ (mm)	$t$ (mm)	
Enformação do tubo	34	1	
		1.25	
	35	1.25	
	36	1.25	
Ligação Tubo-Chapa	$h$ (mm)	$t$ (mm)	$a$ (mm)
	2	1.25	1.5
	2.43		1.5
	3		1.5
	4		1.5
	3.3		1.7

Tabela 5- Principais parâmetros das simulações numéricas realizadas.

##### 6.4.1. Deformação Pretendida

A Figura 21 mostra as condições iniciais da simulação da enformação do tubo (parte esquerda do eixo de simetria) e o resultado final dessa simulação para  $d_f = 34$  mm,  $t = 1.25$  mm e  $h_d = 3$  mm. A deformação dá-se segundo o Modo I e na parte esquerda do eixo de simetria é possível ver a pré-forma tubular simulada tal como o refinamento inicial da mesma.

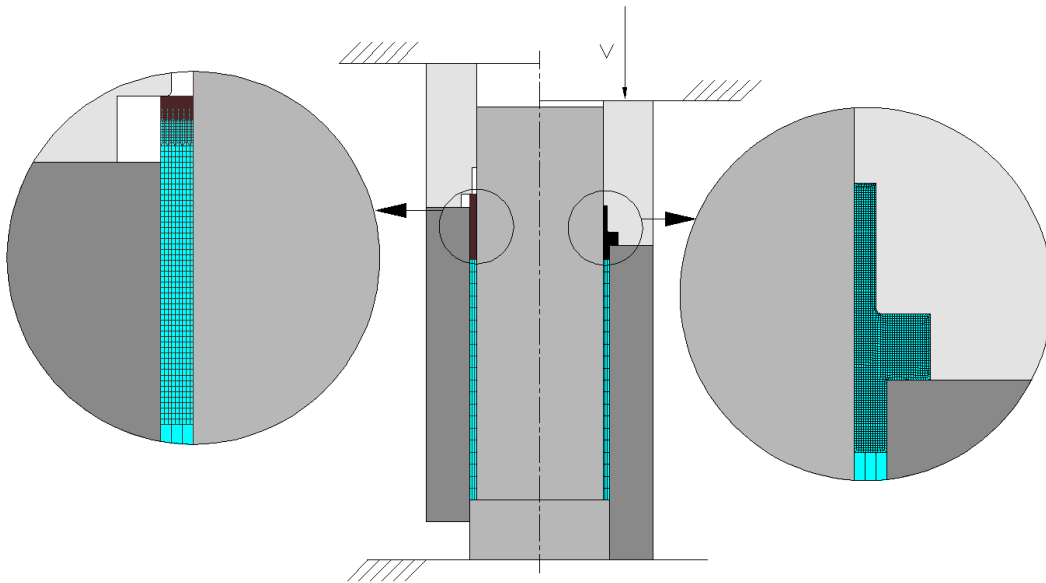


Figura 21- Simulação numérica do novo processo de enformação do tubo com  $d_f = 34$  mm,  $t = 1.25$  mm e  $h_d = 3$  mm.

#### 6.4.2. Surgimento da Fissura

A fissura surge na flange anelar enformada quando os diâmetros desta flange começam a ser superiores a 38 mm para tubos com uma espessura final de 1.25 mm, ou seja, quando existe muito espaço para o material fluir e este acaba por não ter material suficiente para preencher a cavidade da matriz. Isto acontece devido à tensão circunferencial  $\sigma_\theta$  que desencadeia a abertura de fissuras ao longo de  $r_f$  devido à acumulação de dano que ultrapassa um valor crítico. Na zona onde esse valor é atingido dá-se a abertura da fissura no material como se observa na Figura 22.

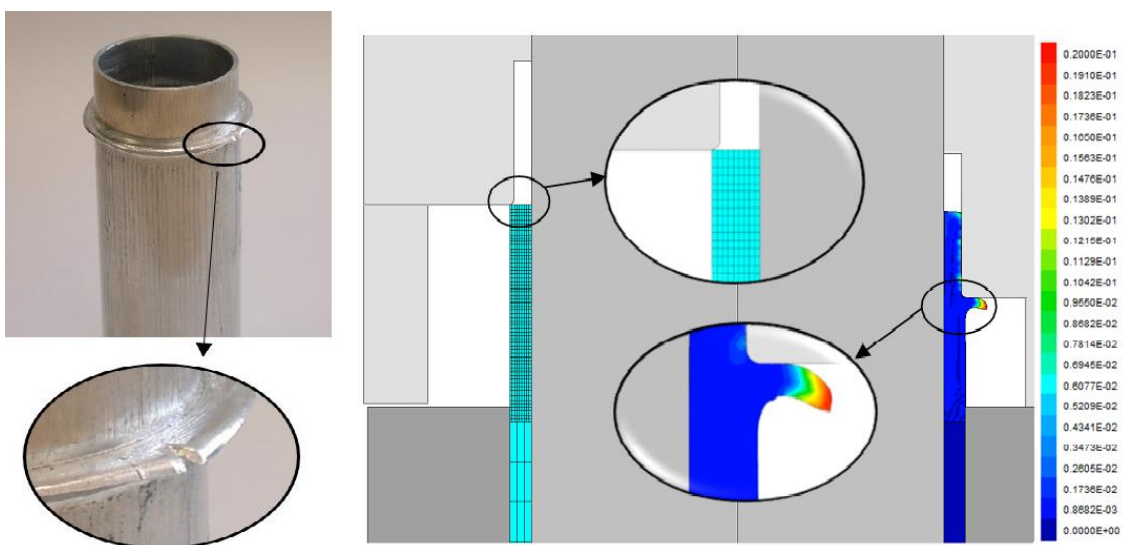


Figura 22- Representação da fissura no tubo e respetiva simulação numérica do modo de deformação IV para  $d_f = 42$  mm,  $t = 1.25$  mm e  $h_d = 3$  mm.

#### 6.4.3. Processo de Inversão Externa

Este é o processo que já havia sido estudado por Alves et al. (2017) e que pode ser combinado com este novo processo de *Boss Forming* de flanges anelares, em chapas finas ou espessas. O novo processo de união apresentado nesta dissertação (que consiste na compressão axial das paredes do tubo) está dependente da altura da extremidade superior livre do tubo, tal como o processo anterior de inversão externa para dobragem da extremidade livre do tubo para cima da chapa. Na figura seguinte, pode-se observar um exemplo de modelação em elementos finitos de união a partir deste processo.

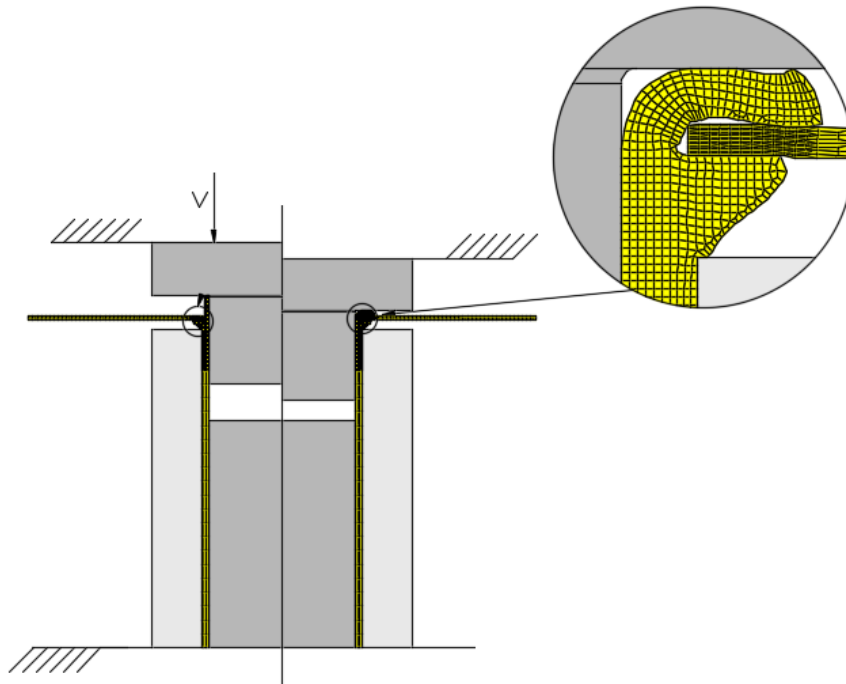


Figura 23- Simulação numérica do processo de ligação anteriormente introduzido.

Existem situações em que ocorre a instabilidade do tubo quando a altura da extremidade livre atinge o valor crítico  $h = h^{buckling}$ , sendo necessário escolher alturas inferiores à altura crítica. Deve-se igualmente ter em atenção à força que é aplicada na matriz de inversão, pois para chapas finas facilmente ocorre o empeno da chapa quando sujeita a esforços radiais grandes (devido ao raio da matriz).

#### 6.4.4. Processo de *Sheet Bulk Forming*

O novo processo de unir o tubo à chapa consiste na compressão axial da parede superior livre do tubo (*upsetting*) ao longo da direção longitudinal. Este processo tem muitas semelhanças com o novo processo de enformação do tubo (também introduzido nesta dissertação) e tal como esse processo também consiste em empurrar material para uma cavidade, cavidade essa que neste caso está maquinada na chapa. Quando essa cavidade estiver preenchida, a ligação está terminada.

Os parâmetros que controlam este processo e outros detalhes são discutidos na análise de resultados e discussão da presente dissertação.

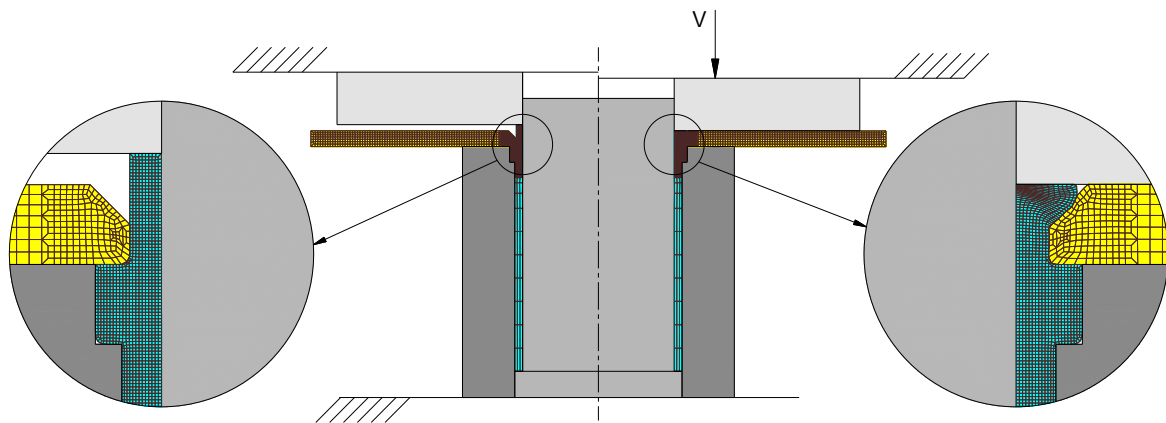


Figura 24- Simulação numérica do novo processo de ligação introduzido com a cavidade totalmente preenchida e sem excesso de material.

## Capítulo 7

---

### 7. Apresentação de Resultados e Discussão

#### 7.1. Introdução

Neste capítulo pretende-se, essencialmente, fazer uma comparação numérico-experimental dos resultados obtidos e analisar a evolução das principais variáveis de campo.

Aproveitando esta comparação, verificar-se-á a compatibilidade entre os resultados obtidos nas duas componentes e serão identificados os pontos críticos na evolução das variáveis estudadas, algo fundamental para a compreensão dos fenómenos desenvolvidos ao longo deste processo de ligação.

Para finalizar o capítulo será avaliado o desempenho e a qualidade da ligação proposta quando sujeita a esforços de tração e compressão.

#### 7.2. Análise das Variáveis de Campo

##### 7.2.1. Operação de *Boss Forming* no tubo

A comparação entre este novo processo de enformação do tubo que permite a produção de flanges anelares em tubos de parede fina e o processo desenvolvido anteriormente por Alves et al. (2017) pode ser observada na próxima figura. O tempo de computação (também chamado de tempo de CPU) para a análise da enformação do tubo mostrada na Figura 25, com 15 operações de refinamento da malha até se obter a geometria final da flange anelar pretendida foi de 20 minutos num computador com processador Intel Core i7.

Conclui-se que este novo conceito permite ter a capacidade de suportar um grande comprimento  $l_c$  de material empilhado, produzindo flanges anelares mais espessas (com maior  $w_d$ ) para a mesma altura final  $h_d$ .

Como a cavidade da matriz confina e controla o material empilhado, torna-se possível produzir flanges anelares com geometrias e tamanhos customizados em tubos de parede fina, sem que ocorram defeitos por *buckling* ou rotura. A relação e dependência entre a altura  $h_d$  e o raio  $r_d$  das flanges anelares que existia no processo previamente proposto por Alves et al. (2017) é assim eliminada.

A observação combinada da simulação numérica e dos provetes experimentais permite afirmar que o novo processo proposto se apresenta como uma boa otimização do processo anteriormente desenvolvido.



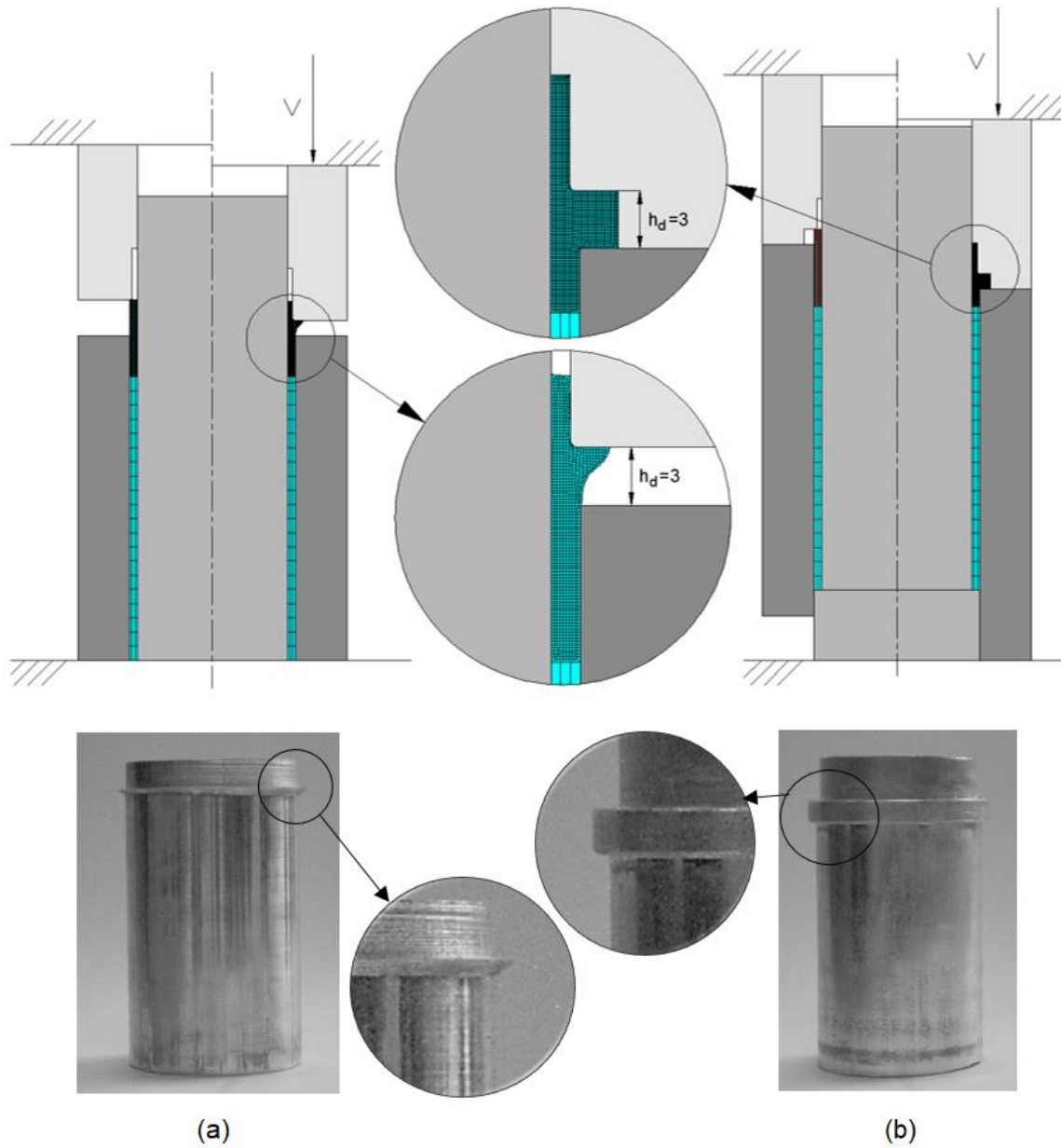


Figura 25- Resultados numéricos e experimentais para o novo processo de formação de flanges anelares em tubos de parede fina. a) Processo anterior apresentado por Alves et al. (2017) b) Novo processo que consiste de duas matrizes móveis e uma cavidade que restringe o fluxo de material (Alves et al., 2017 (a)).

Na figura seguinte estão representados os vetores da velocidade total e a respetiva evolução experimental ao longo do deslocamento das matrizes, dos três estados de empilhamento de material do tubo devido à compressão parcial da espessura da parede do tubo ao longo da direção longitudinal.

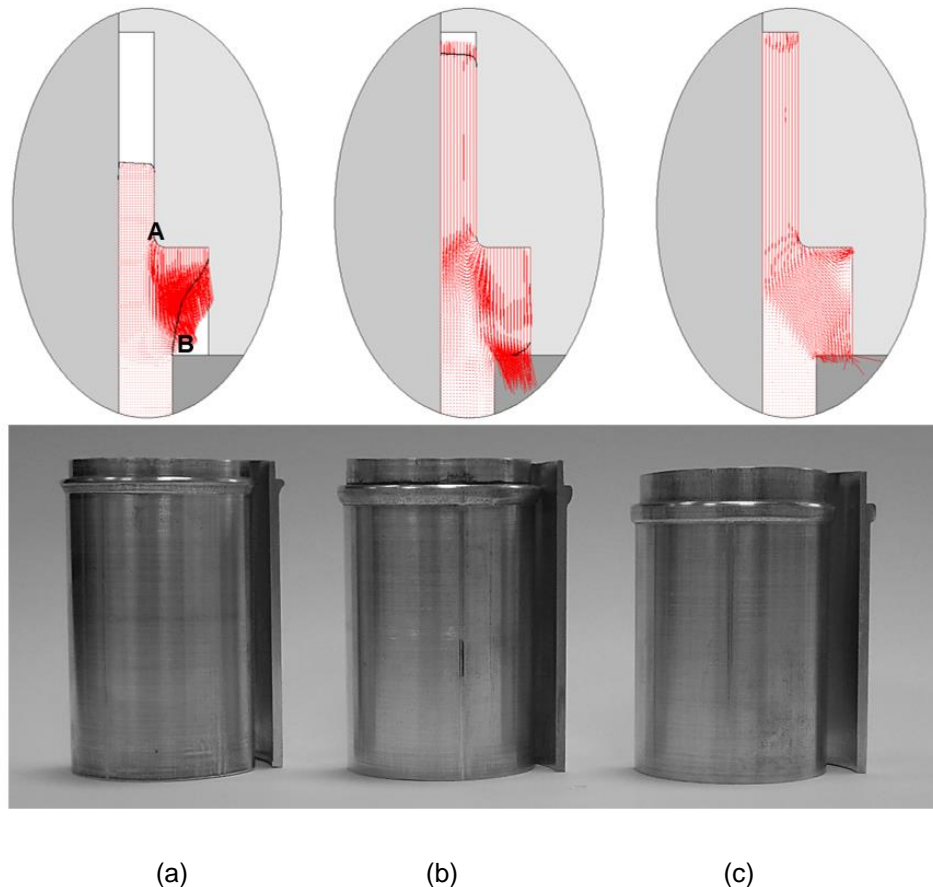


Figura 26- Vetores da velocidade total e respectiva evolução experimental ao longo do deslocamento das matrizes. a) Compressão (Upsetting). b) Extrusão inversa de material para a cavidade da matriz. c) Injeção de material na cavidade da matriz para completar a flange anelar.

A primeira fase da deformação é o *upsetting*, no qual o material começa a fluir para a cavidade da matriz. A maior parte do material do tubo permanece estacionário e um plano de corte (designado por AB na Figura 26 a)) desenvolve-se entre as regiões estacionária e de deformação plástica, em analogia ao que acontece na fase inicial do corte ortogonal.

A segunda fase deste novo processo é a extrusão inversa que termina quando a cavidade da matriz está quase toda preenchida, faltando apenas a pequena porção no raio exterior que é visível na Figura 26 b). A cinemática desta fase é a consequência de ser energeticamente mais fácil extrair inversamente o material do que preencher a cavidade totalmente.

A terceira e última fase inicia-se imediatamente após o comprimento  $l_d$  estar completamente preenchido (existem casos onde dependendo da quantidade de material, este comprimento  $l_d$  pode não ficar totalmente preenchido) e caracteriza-se pelo material ser injetado na cavidade da matriz muito rapidamente, completando a formação da flange anelar (Figura 26 c)). O principal risco de não parar o processo depois desta fase e uma das razões porque já são admissíveis os resultados obtidos na segunda fase, é que podemos sobrecarregar e danificar o sistema de ferramentas se prosseguirmos

com o processo. Por conseguinte, teve-se a preocupação durante os ensaios experimentais em interromper o processo numa zona onde se desenrolava o final da segunda fase expressa (Figura 26 b)), evitando assim a inutilização do conjunto de ferramentas.

### 7.2.2. Ligação do Tubo à Chapa

A execução deste novo processo de ligação de tubo a chapa começa com a enformação do tubo cujos modos de deformação já foram anteriormente analisados. Neste subcapítulo analisa-se agora os modos de deformação resultantes da operação de *upsetting*.

A chapa de alumínio AA5754-H111 que foi utilizada neste estudo permitiu graças à sua espessura considerável, avaliar com precisão os modos de deformação plástica associados a cada espessura  $h$  e dimensão dos chanfros estudados. Os casos analisados estão representados na Figura 27. Os tubos utilizados tinham uma espessura final igual a  $t = 1.25$  mm e foram unidos a chapas com espessura  $t_s = 3$  mm.

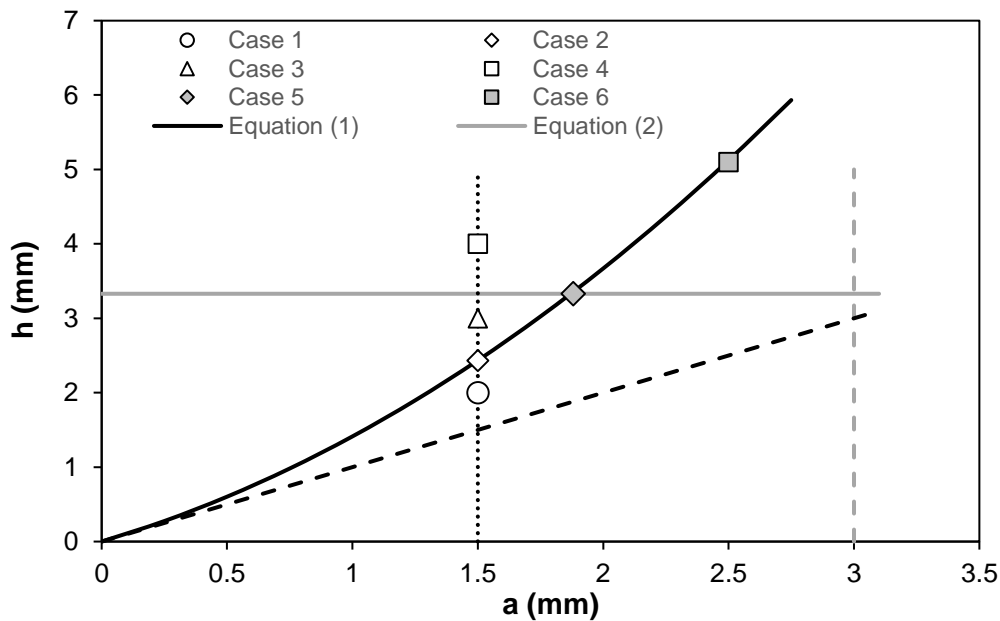
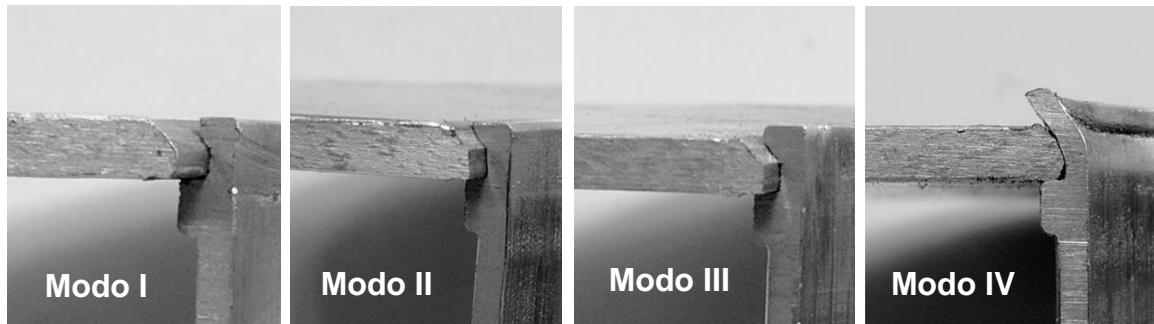
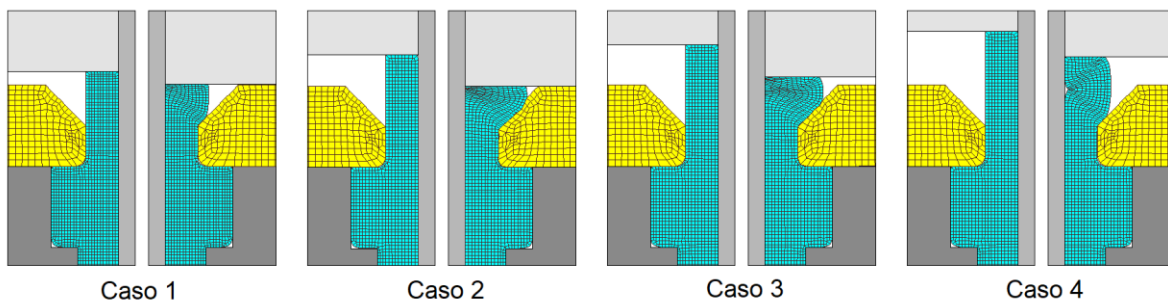


Figura 27- Casos de estudo e equações dos parâmetros avaliados no novo processo de união de tubos a chapas.

Analisando a linha vertical  $a = 1.5$  mm tem-se que os casos 1 a 4 correspondem aos modos de deformação I a IV, respetivamente. A representação desses modos de deformação é feita na Figura 28 a) em comparação com a Figura 28 b) que mostra a simulação em elementos finitos correspondente.



(a)



(b)

Figura 28- Comparação entre os resultados experimentais e numéricos obtidos para o novo processo de ligação. a) Ligações obtidas experimentalmente para os Modos I a IV (Casos 1 a 4 representados na Figura 27). b) Evolução prevista pela análise de elementos finitos para os modos de deformação plástica apresentados.

Para a análise numérica das ligações apresentadas na Figura 28 b) foram necessários, em média, 10 minutos para o preenchimento completo num computador com as especificações referidas anteriormente.

Os resultados obtidos são compatíveis com aqueles que eram previstos. Com efeito, quando a altura da extremidade superior livre do tubo  $h$  não é suficientemente grande para preencher a cavidade, não existe preenchimento e essa situação corresponde ao modo de deformação I. Em contraste, quando a altura da extremidade  $h$  é superior àquela que é necessária para preencher a cavidade, sobra material

do tubo que provoca uma protuberância acima da superfície da chapa. Esta situação corresponde ao Modo III.

Destas conclusões simples de extrair, retira-se também que embora a ligação do modo de deformação I seja inadmissível, já a ligação do modo de deformação III pode ser considerada válida caso a protuberância formada não cause inconvenientes na sua utilização em serviço. Contudo, importa referir que o tamanho máximo desta protuberância é limitado porque as extremidades finas do tubo irão falhar por *buckling* durante a compressão das paredes do tubo, dando origem a uma ligação inadmissível (modo de deformação IV).

Com a análise das Figuras 28 a) e b) conclui-se que existe um bom compromisso entre os procedimentos analíticos, as observações experimentais e as estimativas de elementos finitos das ligações produzidas nos modos de deformação I, III e IV. O modo de deformação II é caracterizado por ligações com volumes totalmente preenchidos e sem protuberâncias acima da superfície das chapas, e corresponde aos casos que se processam abaixo do limite de trabalho  $h = h^{buckling}$  e ao longo da linha curva (cuja equação foi deduzida anteriormente e representa a incompressibilidade de volume).

No entanto, uma observação mais atenta tanto do resultado experimental como da análise em elementos finitos do Caso 2 (Figuras 28 a) e b)) permite concluir que o furo realizado na chapa se deforma plasticamente durante a compressão da extremidade do tubo. Como consequência tem-se o aumento do volume da cavidade a preencher com material do tubo, o que explica algum do volume que fica por preencher no canto superior direito da ligação durante a simulação numérica (ver Figura 28 b) para o Caso 2), ao contrário do que era previsto pelo modelo analítico.

O mesmo acontece pois o modelo analítico assume que os furos maquinados na chapa não alteram a sua geometria após serem comprimidos pela extremidade superior deformada do tubo, considerando os furos como objetos rígidos, o que acontece como se observa na Figura 28 b). Já o modelo de elementos finitos trata os furos chanfrados e a extremidade superior dos tubos, como objetos que se deformam plasticamente e que interagem entre si. Deste modo, existe alguma deformação plástica das paredes laterais dos furos chanfrados nas chapas durante o seu preenchimento pela extremidade do tubo que está a ser deformada plasticamente para dentro desse chanfro. Isto implica um aumento do volume de material necessário para preencher completamente o furo e explica porque as condições analíticas para produzir uma ligação totalmente preenchida em modo de deformação II dão origem a uma ligeira falta de material, visível no Caso 2 da Figura 27 b).

Para além do que foi referido acima, é também importante notar que o modelo analítico não assume nenhuma folga entre o tubo e o furo da chapa durante o início da segunda etapa do processo, apesar de existirem folgas radiais entre o tubo e a chapa de aproximadamente 0.05 mm. Esta folga também contribui para a pequena falta de volume preenchido.

Em termos práticos, a deformação das cavidades maquinadas nos furos da chapa leva a um aumento do comprimento lateral  $a$  da seção triangular do chanfro, sendo necessário recorrer a uma altura livre do tubo  $h$  ligeiramente superior à dada pela equação de incompressibilidade de volume que é

representada pela linha curva da Figura 27. Este problema não aconteceria se a resistência mecânica da chapa fosse significativamente maior que a do tubo, pois a chapa comportar-se-ia como se fosse um objeto rígido.

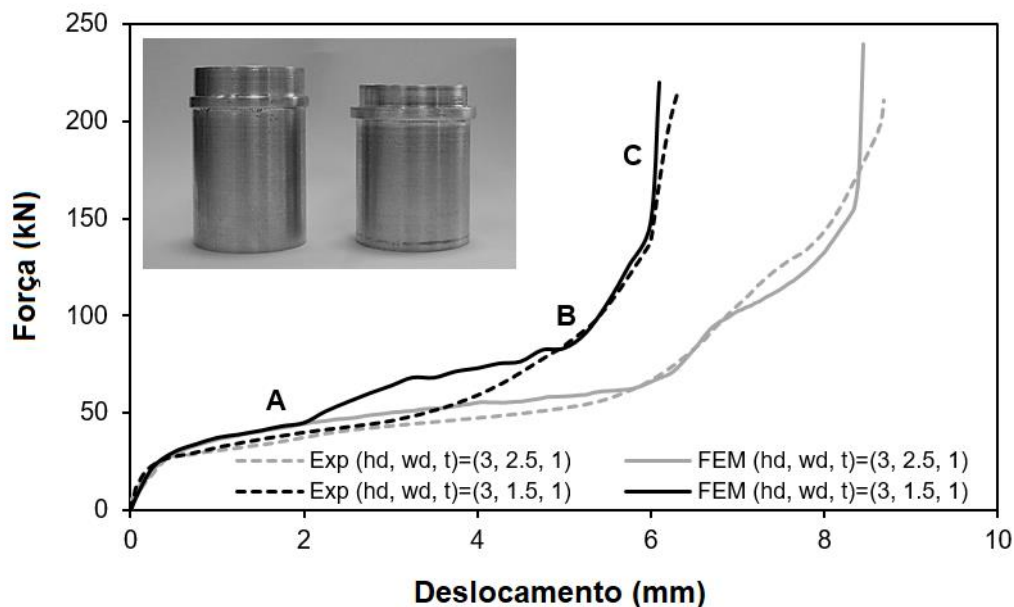
### 7.3. Evolução da Carga com o Deslocamento

#### 7.3.1. Enformação do Tubo

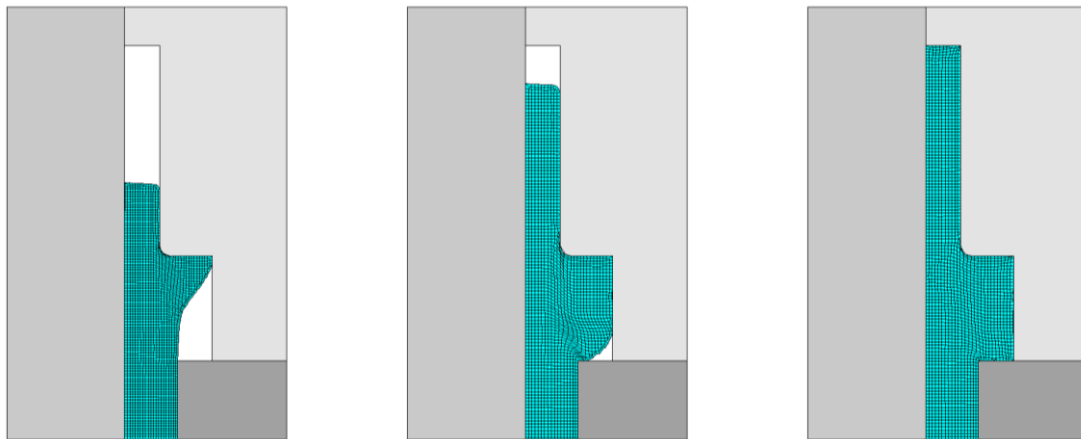
A Figura 29 a) mostra a evolução experimental e a evolução prevista pela análise em elementos finitos, da força com o deslocamento neste novo processo de produção de flanges anelares em tubos de parede fina por *Boss Forming*.

Como se observa, a linha de tendência é semelhante àquela normalmente observada em operações de forjamento em matrizes fechadas, onde o ponto A corresponde à fase inicial de *upsetting*, o ponto B está relacionado com a fase de transição da extrusão inversa e por fim o ponto C indica a fase final, na qual a cavidade da matriz fica totalmente preenchida. A Figura 29 b) faz a correspondência entre os pontos da Figura 29 a), mostrando as malhas deformadas em elementos finitos ao longo dos deslocamentos nos pontos A, B e C.

Com o aumento do deslocamento vai aumentando a quantidade de material empilhado, e por isso a força também aumenta ao longo do processo. O aumento significativo da força na transição do ponto B para o ponto C é atribuída ao rápido aumento da pressão dentro da cavidade da matriz, causado pelas restrições na propagação do material na última etapa da deformação.



(a)



(b)

Figura 29- Evolução da força e deslocamento ao longo da enformação do tubo por este novo processo. a) Resultados numéricos-experimentais da evolução da força com o deslocamento para dois tipos diferentes de flanges. b) Malhas deformadas ao longo dos deslocamentos nos pontos A, B e C.

### 7.3.2. Ligação Tubo-Chapa

A Figura 29 mostra agora a evolução numérico-experimental prevista para as forças de compressão com o deslocamento, dos modos de deformação II e IV. As curvas observadas são comparáveis e permitem identificar dois tipos de padrões que ocorrem quando se tenta juntar tubos a chapas por este novo processo proposto de SBF.

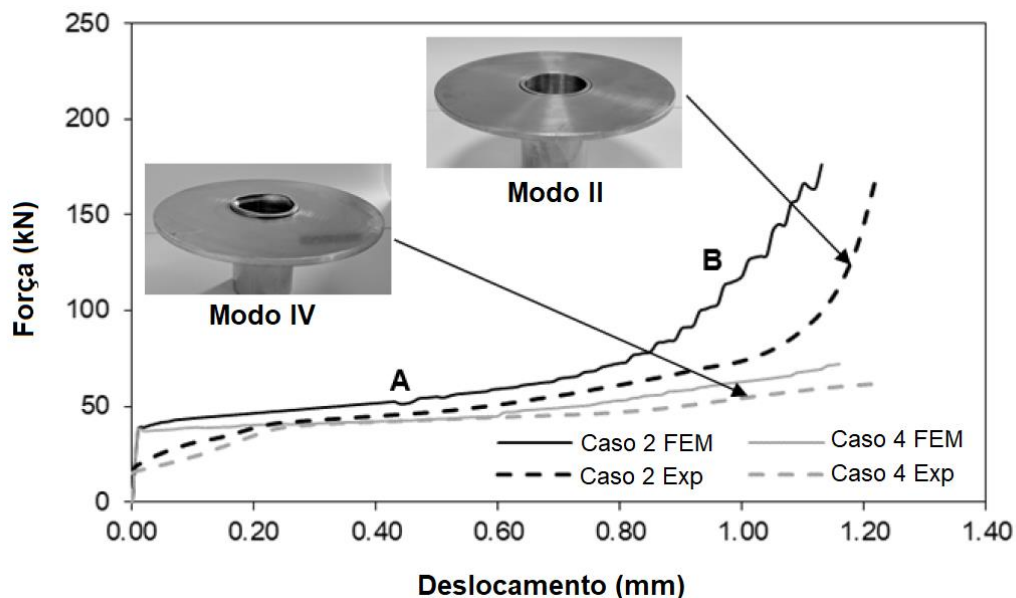


Figura 30- Evolução numérico-experimental da força e deslocamento ao longo da união do tubo à chapa por este novo processo.

O modo de deformação II mostra na região do ponto A, um crescimento uniforme da força com a progressiva compressão da extremidade do tubo ao longo da direção axial (longitudinal), seguido de um crescimento acentuado da força com o deslocamento que corresponde ao bloqueio mecânico do tubo à chapa, durante o qual a extremidade do tubo tenta preencher o furo maquinado na chapa (região marcada pelo ponto B). A força máxima requerida para o modo de deformação II situa-se na gama dos 200 kN e a diferença entre os deslocamentos experimentais e os previstos numericamente pelos elementos finitos é inferior a 15% do deslocamento total. Estas diferenças no deslocamento são causadas pela modelação numérica da interação entre os dois objetos deformáveis (tubo e chapa) no fim do processo de união, pois o modelo de elementos finitos prevê que a deformação do chanfro realizado no furo da chapa é menor que a deformação que acontece na realidade.

As curvas numérico-experimentais para o modo de deformação IV revelam apenas um pequeno crescimento da força ao longo de todo o deslocamento. A sua magnitude em geral é menor que aquela do modo de deformação II devido ao desenvolvimento de *buckling* local na extremidade do tubo.

Analisemos agora os resultados numéricos do programa de elementos finitos representados na Figuras 31 e 32. Dado que a tensão efetiva é função da extensão efetiva optou-se por analisar apenas uma destas variáveis. A variável escolhida foi a extensão efetiva que permite retirar algumas conclusões do processo nas suas duas fases.

Para a primeira fase observa-se na Figura 31 que o material está mais encruado na parede exterior e na flange enformada, o que é favorável para eventuais ligações estruturais. Por outro lado, no interior do tubo já não se verifica este encruamento, o que significa que na próxima fase que completa a ligação quer pelo novo processo, quer pelo processo anteriormente estudado em Alves et al. (2017), não aparecem fissuras na parede interior do tubo durante a operação de *upsetting* ou *flaring*, que podiam comprometer o sucesso da ligação.

Na segunda fase verifica-se uma falta de preenchimento do material como tinha sido observado e discutido anteriormente, devido à tensão de elasticidade do material da chapa ser da mesma ordem de grandeza do tubo, o que leva a que esta se deforme ligeiramente no sentido radial não permitindo o preenchimento total da cavidade cónica. Por outro lado, podemos concluir que a ligação é robusta devido ao encruamento considerável que existe no topo da ligação e no topo da flange anelar, tal como se observa na Figura 32. Esta afirmação pode ser comprovada na Figura 33 do próximo subcapítulo referente aos Ensaio Destrutivos.



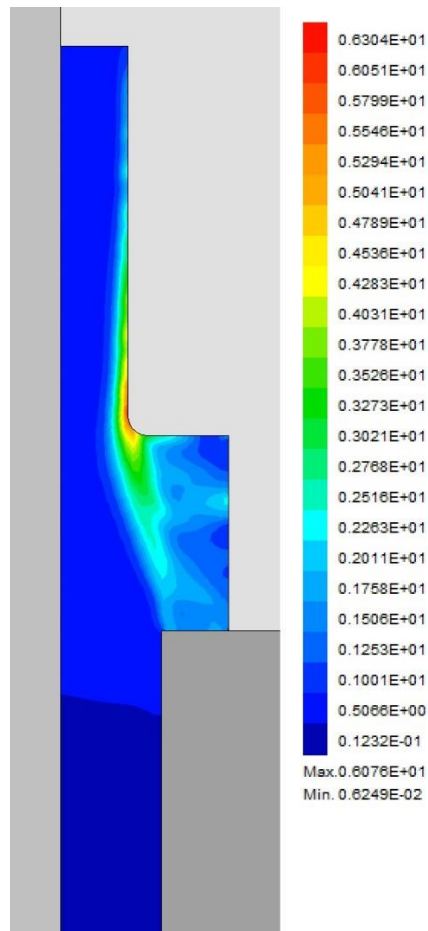


Figura 31- Distribuição da extensão efetiva (MPa) na fase final da deformação do tubo de  $t = 1.25$  mm,  $h_d = 3$  mm e  $d_f = 34$  mm.



Figura 32- Distribuição da extensão efetiva (MPa) na fase final da deformação (Modo II).

### 7.3.3. Ensaios Destrutivos

Os ensaios destrutivos foram os últimos ensaios a serem realizados e tiveram como objetivo avaliar o desempenho da nova ligação proposta, quando sujeita a esforços que visam separar a chapa do tubo. A Figura 33 a) mostra uma representação esquemática dos testes realizados incluindo a disposição das ferramentas e da ligação formada anteriormente, e a Figura 33 b) mostra a curva força-deslocamento correspondente.

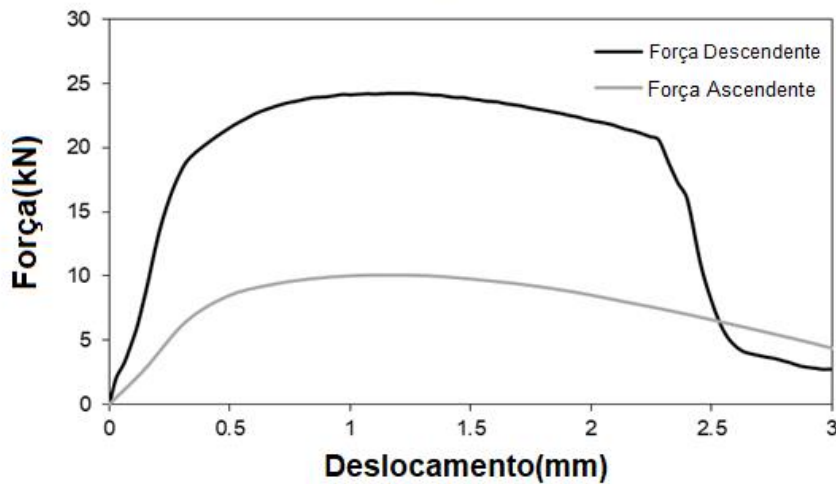
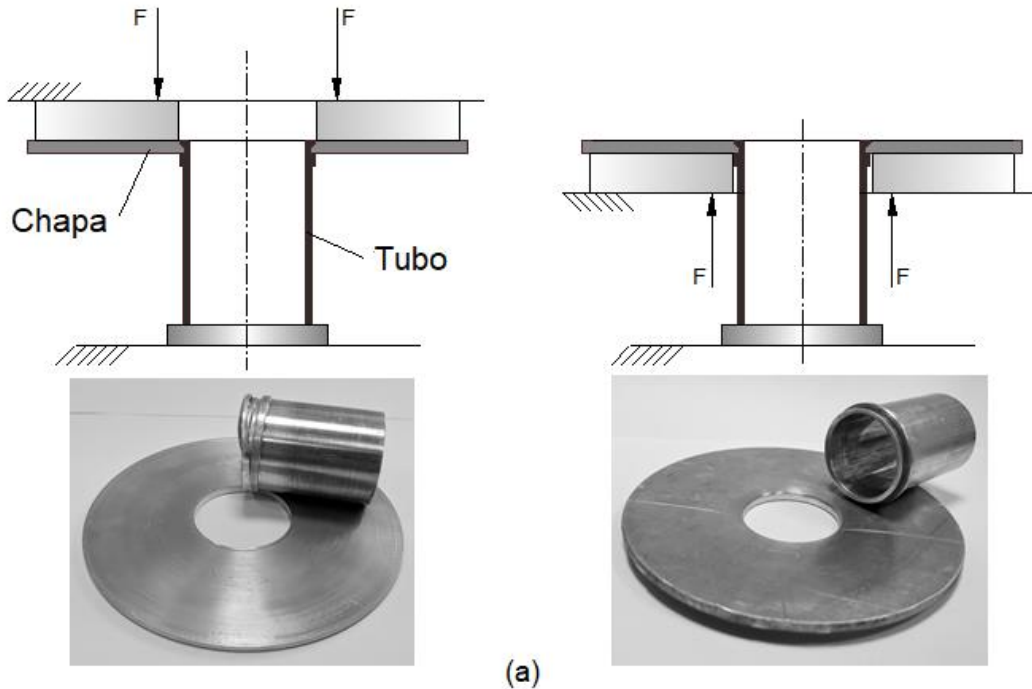


Figura 33- Ensaios destrutivos de uma ligação sem saliências acima da superfície da chapa (modo de deformação II). a) Representação esquemática das duas disposições experimentais (força aplicada no sentido descendente e ascendente) com fotografias das uniões depois do ensaio destrutivo. b) Evolução experimental da força com o deslocamento para os dois ensaios destrutivos realizados.

Os testes foram realizados para o caso onde o material preenche totalmente a cavidade do chanfro na chapa e que se desenvolve em modo de deformação II. Os resultados mostram que esta nova ligação é capaz de suportar 24 kN de força descendente e 10 kN de força ascendente, antes de ocorrer a separação da ligação.

No caso do ensaio destrutivo com força descendente, a rotura dá-se através do corte do material da chapa que está localizado abaixo da seção de corte transversal do furo chanfrado, ao longo das bordas internas retas da flange do tubo que atuam como uma matriz de corte devido ao encruamento que sofreram após o primeiro processo de enformação do tubo. Por outro lado, no ensaio destrutivo com força ascendente, a rotura ocorre por flexão (*bending*) e extração da extremidade superior do tubo através do raio interno do furo aberto na chapa.

Ambos os valores das forças destrutivas são consideravelmente maiores que aqueles obtidos para a solução anterior proposta por Alves et al. (2017) e que se situavam na gama dos 4 kN para um engate entre o tubo e a chapa obtido através da dobragem da extremidade do tubo para cima da chapa, processo esse que também pode ser utilizado com este novo processo de *Boss Forming*, tal como foi referido ao longo desta dissertação.

## Capítulo 8

### 8. Adaptações e aplicações dos novos processos

#### 8.1. Ligação de Tubo a Chapa com Seção Quadrada

Para além das ligações apresentadas e utilizando os processos mencionados nesta dissertação, desenvolveram-se outros tipos de ligação. Começando pelo novo processo de ligação proposto, experimentou-se com sucesso, uma seção quadrada em vez do chanfro de seção triangular que foi apresentado nesta dissertação.

O objetivo desta modificação é maximizar o volume de material no engate mecânico entre o tubo e a chapa, aumentando a resistência mecânica da conexão entre os dois materiais. A Figura 34 a) apresenta um detalhe esquemático do tubo e da chapa imediatamente após a chapa ser colocada em cima da flange calibrada do tubo, no início do processo de ligação de ambos os componentes. Em contraste com as variáveis do processo e o estudo analítico que foi realizado nesta dissertação, a Figura 34 b) mostra as principais variáveis do processo que compreendem as variáveis aqui já estudadas, à exceção da seção quadrada  $ab$  que é a principal diferença desta nova aplicação.

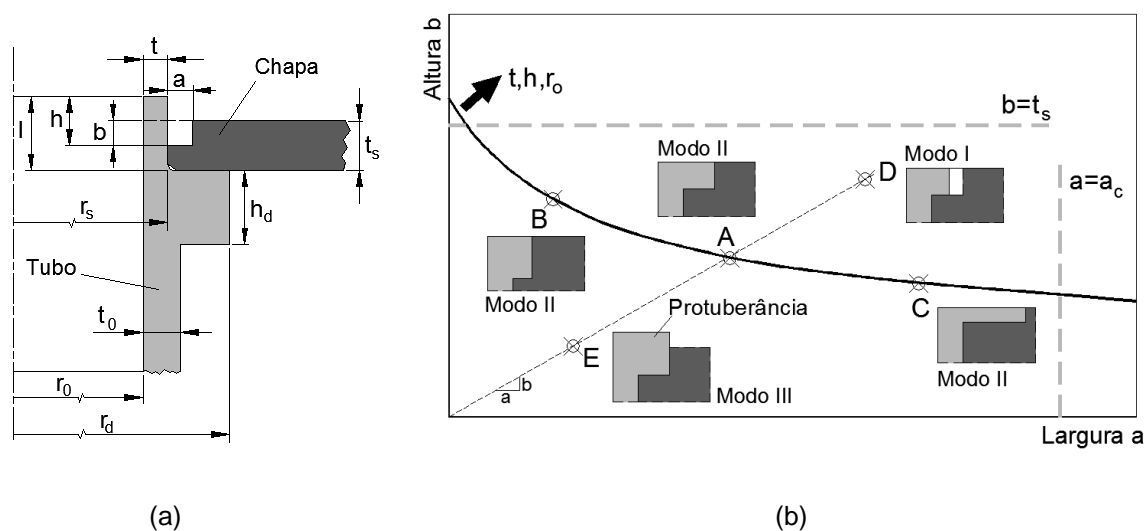


Figura 34- Desenho da nova aplicação. a) Variáveis principais e notação. b) Curva do processo e modos de deformação associados a diferentes condições definidas de 'A' a 'E'.

À semelhança do processo abordado nesta dissertação, também para esta nova aplicação foi necessário definir uma equação que relacionasse as variáveis envolvidas tendo agora em conta que se trata de uma seção quadrada  $axb$ . Desta forma, foi determinada a seguinte equação entre a altura  $b$  e a largura  $a$  da seção,

$$b = \frac{ht(2r_0 + t)}{(a+t)(a+2r_0+t)} \quad (8.1)$$

A equação 8.1 permite obter para as condições em estudo, a linha curva ao longo da qual são definidos os conjuntos de dimensões  $a$  e  $b$  que permitem o preenchimento total da cavidade quadrada aberta na chapa. Tal como no processo estudado nesta dissertação, existem alguns limites de admissibilidade desta equação que são representados pelas linhas cinzentas horizontal e vertical da Figura 34 b).

Os casos apresentados na Figura 34 estão sumarizados na Tabela 6, onde também são apresentadas fotografias do tubo e da chapa antes e depois da união.

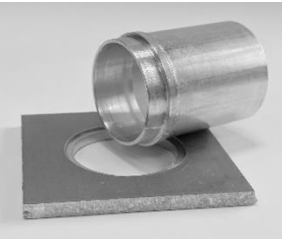

Caso	Tubo				Chapa				
	$r_0$ (mm)	$t_0$ (mm)	$h$ (mm)	$t$ (mm)	$t_s$ (mm)	$a$ (mm)	$b$ (mm)		
A	14.5	1.5	3.0	1.2	4	1.4	1.4		
B						1	1.6		
C						2.3	1		
D						2	2		
E						1	1		

Tabela 6- Sumário do plano de trabalhos experimentais para unir tubos a chapas com furos de seção quadrada por Sheet Bulk Forming e upsetting, e fotografias dos componentes antes e após as ligações.

A Figura 35 mostra a malha inicial e final de elementos finitos no engate mecânico conseguido através da compressão da extremidade superior livre do tubo contra a chapa.

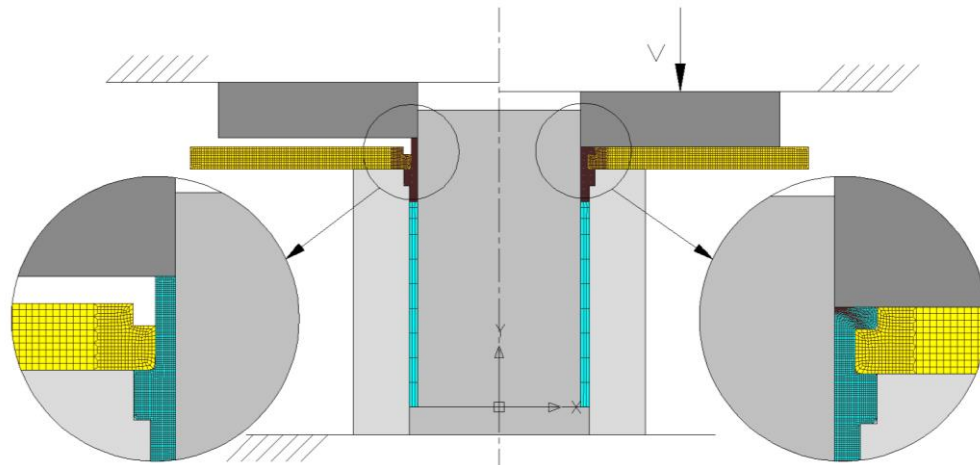


Figura 35- Modelação em elementos finitos da ligação do tubo à chapa com a nova seção quadrada desenhada no furo da chapa para os instantes inicial (lado esquerdo) e final (lado direito).

Em seguida, analisam-se os resultados numérico-experimentais obtidos para cada um dos casos da Tabela 6 e que estão representados na Figura 36. Daqui conclui-se que existe uma boa correlação entre o procedimento analítico, a previsão feita pelo modelo numérico de elementos finitos e os resultados que foram obtidos experimentalmente. Por conseguinte, os casos 'D', 'A' e 'E' da Tabela 6 foram produzidos nos modos de deformação plástica I, II e III, respetivamente. Também o caso 'C' é obtido sob o modo de deformação II sem despoletar fissuras na superfície exterior, algo que poderia acontecer dado o considerável rácio  $b/a$  que esse caso apresenta. O caso B não foi analisado, mas supõe-se que o seu resultado será favorável tal como todos os casos analisados cuja deformação ocorreu em Modo II. Em nenhum dos casos estudados foram produzidas ligações inadmissíveis com rotura e por isso não foi possível produzir uma ligação em modo de deformação IV.

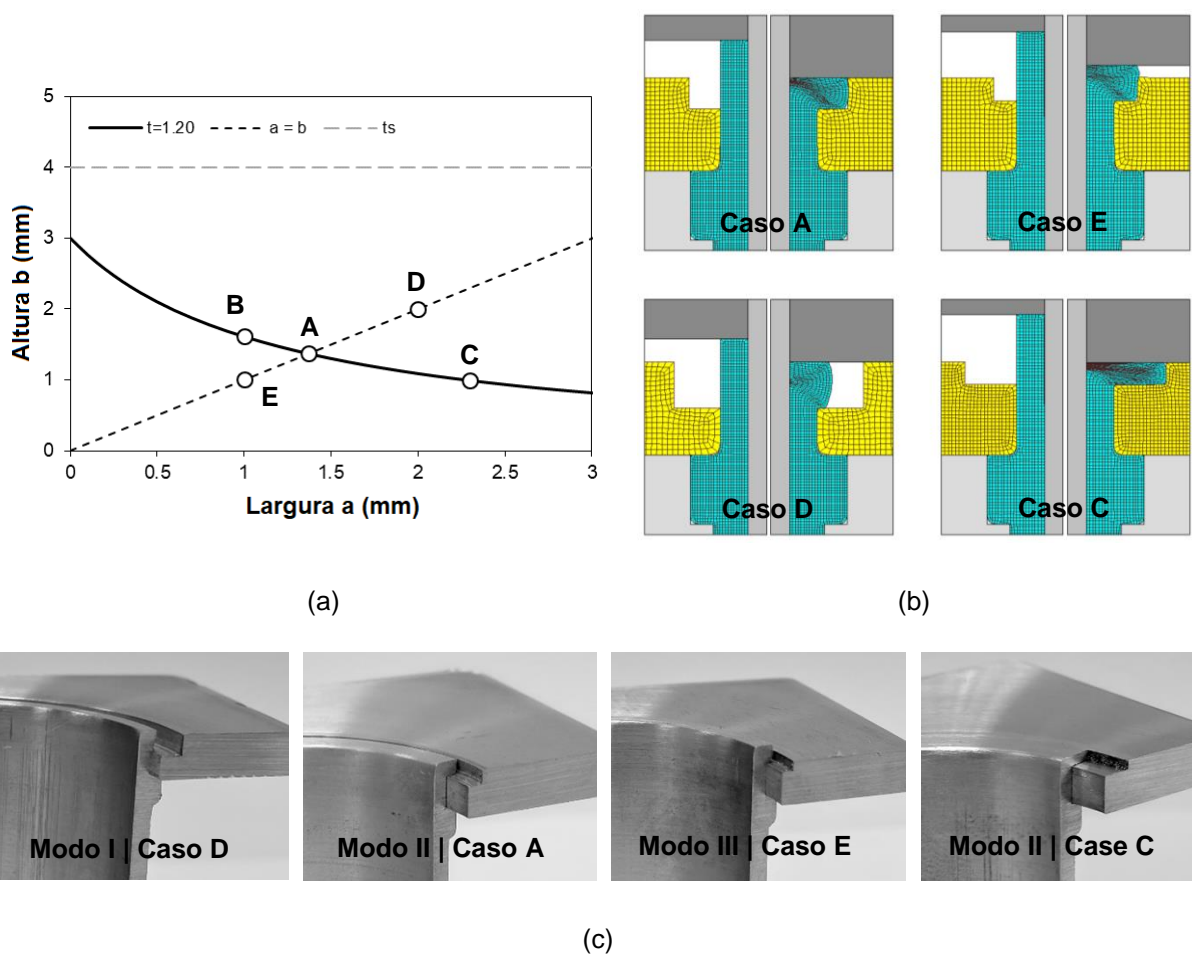


Figura 36- União de tubos a chapas com furos de seção quadrada. a) Curva do processo  $b = f(a)$  para tubos enformados por Sheet Bulk Forming com dimensões  $r_0 = 14.5$  mm,  $t = 1.2$  mm e  $h = 3.2$  mm. b) Estado inicial (lado esquerdo) e previsão de deformação em modelo de elementos finitos (lado direito) para os casos 'D', 'A', 'E' e 'C' da Tabela 6.

A evolução da força com o deslocamento obtida experimentalmente e prevista pelo modelo numérico para os modos de deformação I, II e III da Figura 37, a que correspondem os casos 'D', 'A' e 'E' da Tabela 6 é apresentada na Figura 37.

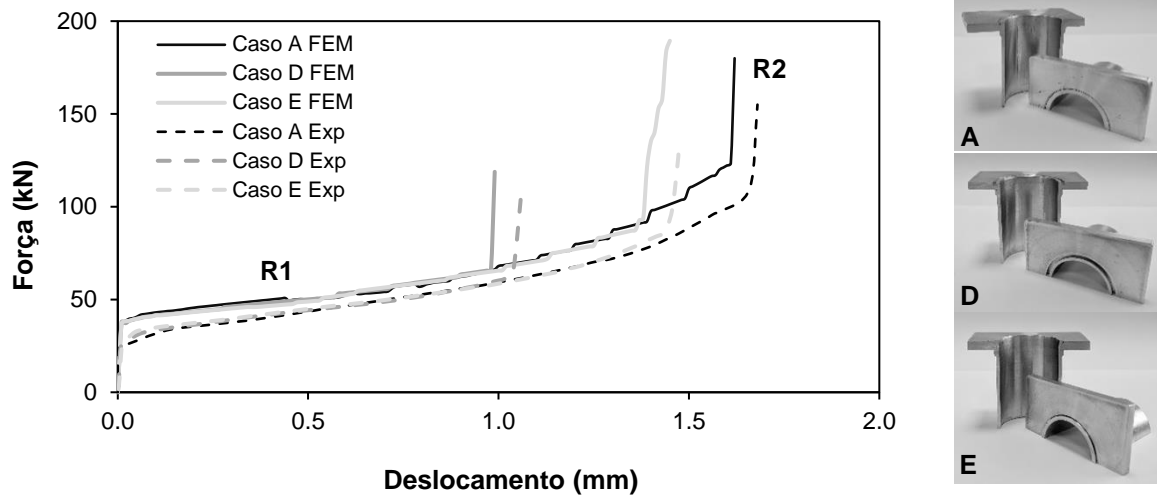


Figura 37- Previsão experimental e em elementos finitos das curvas de força-deslocamento para os casos A, D e E da Tabela 6 durante o processo de união.

Como visto na Figura 37, os resultados numérico-experimentais são comparáveis. A ligeira diferença entre as intensidades de cada par de curvas atribui-se ao facto de que o modelo numérico não tem em conta a ligeira folga que existe entre o tubo e a chapa, quer no encosto da chapa à flange do tubo, quer no interior do furo.

Nessa mesma figura, identificam-se duas regiões R1 e R2. A primeira é idêntica para os três modos de deformação em análise e corresponde a um crescimento monótono da força à medida que o tubo é progressivamente comprimido ao longo da direção axial. A segunda região identificada R2, corresponde a um crescimento acentuado da força com o deslocamento que ocorre quando a extremidade livre do tubo está totalmente dentro da seção quadrada do furo da chapa. Esta região é particularmente visível nos Modos I e II (casos D e A) e esse crescimento acentuado ocorre primeiro no Modo I, pois a altura livre da extremidade do tubo é menor que aquela necessário para preencher a caixa quadrada. Analisando a mesma região R2 mas agora para o Modo III (caso E), observa-se um crescimento da força com o deslocamento inferior ao do Modo I e II, dado que a saliência e deformação da extremidade do tubo acima da superfície da chapa atrasa o preenchimento completo da ligação.

A adaptação dos novos processos propostos em chapas de seção quadrada pode ser consultada com maior detalhe em Alves et al. (2017) (c).

## 8.2. Outras aplicações

Analisando agora outras possíveis aplicações e tendo em conta que o objetivo destes novos processos introduzidos, quer do processo de enformação do tubo, quer do processo de ligação é permitir a ligação entre materiais dissimilares e que de outra forma não poderiam ser unidos, testou-se também com sucesso, ligações do tubo enformado a PVC, Policarbonato e Laminados.

Todas estas ligações estão representadas na figura seguinte e na última fotografia é possível observar a utilização combinada do processo de ligação anteriormente estudado por Alves et al. (2017) com o novo processo de enformação do tubo proposto nesta dissertação.

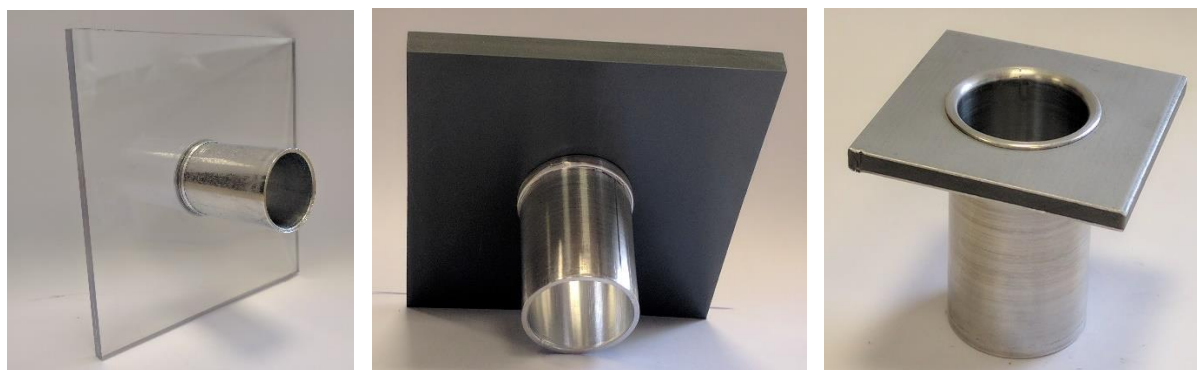


Figura 38- Outras adaptações e aplicações dos novos processos introduzidos: Ligações de tubos de alumínio a policarbonato, PVC e laminado, respetivamente.



## Capítulo 9

---

### 9. Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuro

#### 9.1. Conclusões

Os novos processos apresentados surgiram motivados pela necessidade de controlar a flange que era obtida no tubo, de forma a criar um batente sólido onde a chapa pudesse encostar e ser suportada, criando uma ligação única, inamovível e sem protuberâncias na superfície da chapa. O resultado foi uma ligação sólida com boa resistência mecânica e com características que permitirão a sua ampla utilização em diversas aplicações.

O material que se escolheu para o tubo revelou-se uma boa opção, já que graças ao modo como se deforma e ao encruamento que sofre depois de terminado o processo, consegue-se obter um tubo enformado bastante sólido e com bom acabamento.

As cargas requeridas para realizar as duas operações mostram que uma prensa com 150 kN é suficiente para conseguir obter a ligação. Isto aliado ao facto de se conseguirem obter as geometrias requeridas utilizando ferramentas relativamente simples, vem aumentar a versatilidade dos processos introduzidos e reduzir os custos na sua produção e nas estruturas necessárias para o fabrico.

Tal como foi referido ao longo desta dissertação, os processos mencionados não só permitem a ligação de tubos a chapas, como também permitem inúmeras aplicações tais como ligações de tubo a diferentes materiais e com diferentes geometrias.

Os resultados numéricos obtidos com o *software* I-FORM apresentam uma boa correlação com os resultados que se obtiveram experimentalmente, validando o estudo efetuado nesta dissertação.

Convém referir que um eventual projetista deverá ter atenção que o tubo instabiliza para uma altura  $h_{buckling}$  igual a 3.3 mm (no caso do tubo escolhido, cuja espessura final era  $t = 1.25$  mm) e que se devem controlar as alturas  $h_d$ , as larguras  $w_d$  e a espessura final  $t$  da cavidade da matriz porque como se observou no Capítulo 5, existem valores para estes parâmetros a partir dos quais começam a surgir defeitos na flange enformada.

O novo processo apresentado para a ligação do tubo à chapa é também limitado pelos parâmetros mencionados no desenvolvimento experimental, sendo necessário respeitar estes parâmetros para garantir o sucesso da ligação. As ligações resultantes são relativamente fáceis de desmontar e reciclar no fim do ciclo de vida do produto.

Em conclusão, conseguiu-se otimizar o processo anteriormente apresentado por Alves et al. (2017) e obtiveram-se desenvolvimentos que permitirão eliminar a necessidade do uso de outros processos de ligação convencionais num futuro próximo.

## 9.2. Perspetivas de Trabalho Futuro

Ao longo do trabalho desenvolvido e observando as ligações obtidas surgiu o interesse em aplicar os novos processos criados a novas aplicações. Contudo, por limitações temporais não foi possível alargar a investigação para além do que foi desenvolvido no capítulo anterior.

Caso contrário, o estudo de novas geometrias e dimensões da cavidade do furo da chapa permitiria analisar qual delas maximizaria a resistência mecânica da ligação.

Também teria sido interessante estudar a aplicação do novo processo de enformação a tubos ou varões de outras séries de alumínio, aços e materiais poliméricos.

Dado que os processos estudados permitem a ligação a materiais dissimilares, seria relevante expandir os conceitos do processo de *Sheet Bulk Forming* a outras ligações, procurando por exemplo uma forma de ligar tubo a tubo axialmente, com tubos de materiais diferentes e impossíveis de ligar por outro processo. Uma possibilidade para realizar esta tarefa seria abrir uma caixa na flange de um dos tubos, para onde se comprimiria o comprimento livre do outro tubo de forma semelhante ao processo de ligação do tubo à chapa que é apresentado nesta dissertação.

Deste modo, os estudos futuros passarão por evoluir e desenvolver estes processos, estudando novas formas de unir os componentes e de aumentar a resistência mecânica da ligação obtida. Pretende-se que o campo de aplicação destes processos inclua situações que exijam condições de esforços elevadas.

O trabalho futuro incluirá também o desenvolvimento e criação de ferramentas flexíveis e portáteis, que permitam realizar estas ligações no terreno.

## Referências

- Alves, L. M., Martins, P.A.F. (2010).** Forming of thin-walled tubes into toroidal shells. *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 689-695.
- Alves, L.M., Dias, E.J., Martins, P.A.F. (2011).** Joining sheet panels to thin-walled tubular profiles by tube end forming. *Journal of Cleaner Production*, 19, 712-719.
- Alves, L.M. Martins P.A.F., (2012).** Tube branching by asymmetric compression beading. *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 1200-1208.
- Alves L.M., Gameiro J., Silva C.M.A., Martins P.A.F., (2017).** Sheet-bulk forming of tubes for joining applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 240, 154-161.
- Alves L.M., Afonso R.M., Silva C.M.A., Martins P.A.F., (2017) (a).** Boss forming of annular flanges in thin-walled tubes. *Journal of Materials Processing Technology* (aceite para publicação).
- Alves L.M., Afonso R.M., Silva C.M.A., Martins P.A.F., (2017) (b).** Joining tubes to sheets by boss forming and upsetting, *Journal of Materials Processing Technology* (submetido).
- Alves L.M., Afonso R.M., Silva C.M.A., Martins P.A.F., (2017) (c).** Joining by forming of tubes to sheets with counterbored holes, *Artigo de Conferência* (submetido).
- Bardi, F.C., Yun, H.D., Kyriakides, S. (2003).** On the axisymmetric progressive crushing of circular tubes under axial compression. *International Journal of Solids and Structures*, 40, 3137-3155.
- Gouveia, B.P.P., Alves, M.L., Rosa, P.A.R., Martins, P.A.F. (2006).** Compression beading and nosing of thin-walled tubes using a die: experimental and theoretical investigation. *Int J Mech Mater Des*, 3, 7-16.
- Groche, P., Wohletz, S., Brenneis, M., Pabst, C., Resch, F. (2014).** Joining by forming- a review on joint mechanisms, applications and future trends. *Journal of Materials Processing Technology*, 214, 1972-1994.
- Gupta, N.K., Nagesh. (2006) (a).** Collapse mode transitions of thin tubes with Wall thickness, end condition and shape eccentricity. *International Journal of Mechanical Sciences*, 48, 210-223.
- Gupta, N.K., Venkatesh. (2006) (b).** A study of the influence of diameter and wall thickness of cylindrical tubes on their axial colapse. *Thin-Walled Structures*, 44, 290-300.
- Hutton, D.V. (2004).** Fundamentals of finite elements analysis. *McGraw-Hill*.
- Merklein M, Allwood JM, Behrens BA, Brosius A, Hagenah H, Kuzman K, Mori K, Tekkaya AE, Weckenmann A. (2012).** Bulk forming of sheet metal. *CIRP Annual Manufacturing Technology*, 61, 725–745.

- Messler**, R.W.Jr. (2004). Joining of materials and structures: from pragmatic process to enabling technology, *Elsevier Butterworth-Heinemann*, ISBN 0-7506-7757-0.
- Miller**, G. (2003). Tube forming processes: a comprehensive guide. *SME-Society of Manufacturing Engineers*, Dearborn
- Mori**, K.I., Bay, N., Fratini, L., Micari, F., Tekkaya, A.E. (2014). Joining by plastic deformation. *CIRP Annual Manufacturing Technology*, 62, 673-694.
- Nielsen** C.V., Zhang W., Alves L.M., Bay N., Martins P.A.F. (2013). Modelling of thermo-electro-mechanical manufacturing processes with applications in metal forming and resistance welding, Springer-Verlag, London, UK.
- Reddy**, T.Y. (1992). Guist and marble revisited: on the natural knuckle radius in tube inversion. *International Journal of Mechanical Sciences*, 34, 761-768.
- Rodrigues**, J., Martins, P. (2005). Tecnologia Mecânica – Tecnologia da Deformação Plástica – Vol.I Fundamentos Teóricos. *Escolar Editora*, ISBN 972-592-184-4
- Rosa**, P.A.R., Rodrigues, J.M.C., Martins, P.A.F. (2003). External inversion of thin-walled tubes using a die: experimental and theoretical investigation. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 787-796.
- Rosa**, P.A.R., Baptista, R.M.O., Rodrigues, J.M.C., Martins, P.A.F. (2004)(a). An investigation on the external inversion of thin-walled tubes using a die. *Internal Journal of Plasticity*, 20, 1931-1946.
- Rosa**, P.A., Rodrigues, J.M.C., Martins, P.A.F. (2004)(b). Internal inversion of thin-walled tubes using a die: experimental and theoretical investigation. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44, 775-784.
- Sekhon**, G.S., Gupta, N.K., Gupta, P.K. (2003). An analysis of external inversion of round tubes. *Journal of Materials Processing Technology*, 133, 243-256.
- Sieczkarek** P., Kwiatkowski L., Ben Khalifa N., Tekkaya A.E., (2013). Novel five axis forming press for the incremental sheet-bulk metal forming. *Key Engineering Materials*, 554-557, 1478-1483.
- Sun**, Z., Yang, H. (2006). Failure mechanism and forming limit of tube axial compressive process. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 16, 785-790.
- Yang**, H., Zhichao, S., Yingjun, J. (2001). FEM analysis of mechanism of free deformation under dieless constraint in axial compressive forming process of tube. *Journal of Materials Processing Technology*, 115, 367-372.