



TÉCNICO
LISBOA

Ligação de Tubos de Parede Fina a Chapas
Tubular Sheet-bulk Forming

João de Sousa Gameiro

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Luís Manuel Mendonça Alves

Co-orientador: Prof. Paulo António Firme Martins

Júri

Presidente: Prof. Rui Manuel dos Santos Oliveira Baptista

Orientador: Prof. Luís Manuel Mendonça Alves

Vogal: Prof. Ivo Manuel Ferreira de Bragança

Outubro de 2016

Agradecimentos

Antes de mais gostaria de agradecer ao meu orientador, o Professor Luís Alves, com quem trabalhei ao longo destes oito meses. Sempre disponível, bem disposto e com uma enorme vontade de ensinar, que levou ao sucesso do meu trabalho e também ao meu crescente interesse na área da tecnologia mecânica.

Ao Professor Paulo Martins, o meu co-orientador, pelo seu apoio e por não deixar uma pergunta por responder. O seu vasto conhecimento, em especial na área da simulação numérica, permitiu que não surgisse qualquer problema para o qual não tivesse solução imediata.

Ao Professor Carlos Silva, pela ajuda fornecida durante todo o trabalho, assim como os incentivos. Ao Sr. Farinha pelo espírito de entreatajuda durante toda a componente experimental.

Aos meus colegas que deram significado a toda esta experiência académica.

À minha namorada, pela sua enorme paciência, amizade e motivação sem os quais esta etapa teria sido mais complicada.

Finalmente, aos meus pais e irmã, por me terem ajudado ao longo de todo este percurso, mostrando-me sempre o caminho a percorrer e sobretudo pela importância que tiveram na pessoa em que me transformei.

Resumo

A presente dissertação retrata o uso da tecnologia de Sheet-bulk forming-SBF para desenvolver um novo processo de ligação por deformação plástica, de tubos de parede fina a chapas, à temperatura ambiente.

A técnica consiste no aumento da espessura da extremidade do tubo, através da formação de uma bossa, por compressão parcial da parede do tubo, na direção longitudinal.

O principal objetivo desta investigação foi compreender os mecanismos de deformação associados à tecnologia de sheet-bulk forming e assim estabelecer os limites dos parâmetros que definem a janela de enformabilidade. Outro objectivo deste trabalho foi avaliar em que condições processuais era possível a união de tubos de parede fina a chapas utilizando uma matriz de inversão.

A avaliação do trabalho foi realizada pela correlação de resultados teórico-experimentais recorrendo ao método dos elementos finitos. Foi também realizado um ensaio de separação para a ligação em estudo.

O trabalho foi finalizado com a apresentação de alguns exemplos de uniões de materiais dissimilares.

Palavras-chave:

Tubos de parede fina

Enformação na direção perpendicular à espessura

Ligação por enformação

Experimentação

Método dos elementos finitos

Abstract

This present dissertation draws from the fundamentals of sheet-bulk forming of thin walled tubes to the proposal of a new joining process for fixing tubes to sheets by means of plastic deformation at room temperature.

The new work on sheet-bulk forming of tubes is focused on local thickening (boss forming) by partial compression of the wall thickness along the longitudinal direction. The main goals are the understanding of the deformation mechanics of sheet-bulk forming of thin walled tubes and the characterization of its formability limits in terms of the major process parameters.

The work on joining by forming investigates how local thickening can be successfully utilized for fixing tubes to sheets by mechanical locking with a flaring die.

The overall work is supported by a numerical and experimental investigation and has the objective to widen and enhance the previous research in the field. It includes a destructive test and examples of joints made from dissimilar materials.

Keywords:

Thin walled tubes

Sheet-bulk forming

Joining by forming

Experimentation

Finite element modelling

Conteúdo

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Figuras	xv
Lista de Símbolos	xix
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da Dissertação	2
2 Estado da Arte	5
2.1 Ligações Convencionais	6
2.1.1 Fixação Mecânica	6
2.1.2 Colagem com Adesivo	7
2.1.3 Soldadura e Brasagem	7
2.2 Enformação a frio	9
2.3 Processo de Produção Sustentável	9
2.4 Enformação Tubular por Compressão Axial	11
2.4.1 Instabilidade Tubular	12
2.4.2 Inversão Externa	13
2.4.3 Expansão e Redução	14
3 Teoria da Plasticidade	17
3.1 Introdução	17
3.2 Tensão, Extensão e Velocidade Deformação	17
3.3 Critérios de Plasticidade	19
3.4 Equações Constitutivas	21
4 Método dos Elementos Finitos	23
4.1 Introdução	23

4.2	Princípios Básicos	23
4.3	Equações Fundamentais	24
4.4	I-FORM	25
5	Desenvolvimento Experimental	27
5.1	Introdução	27
5.2	Descrição do Processo	27
5.3	Material Utilizado	28
5.3.1	Caraterização do material	28
5.3.2	Carga Crítica de Instabilidade	29
5.4	Equipamentos, Ferramentas e Pré-formas	30
5.4.1	Equipamentos, Ferramentas e Pré-formas	30
5.4.2	Ferramentas	31
5.4.3	Pré-formas	33
5.5	Procedimento Experimental	33
5.6	Ensaio Realizados	36
5.6.1	Processo de enformação do tubo	36
5.6.2	Processo de fecho de ligação	38
6	Desenvolvimento Numérico	41
6.1	Introdução	41
6.2	Refinamento da Malha	41
6.2.1	Pré-formas e Ferramentas	42
6.2.2	Chapa	43
6.3	Parâmetros do Processo	43
6.4	Simulações Numéricas Realizadas	44
6.4.1	Deformação pretendida	45
6.4.2	Instabilidade Local	45
6.4.3	Aparecimento de Fissura	46
6.4.4	Inversão Externa	47
7	Apresentação e Discussão de Resultados	51
7.1	Introdução	52
7.2	Tensão Efetiva, Extensão Efetiva e Dano Dúctil	52
7.2.1	Operação de SBF	52
7.2.2	Operação de Inversão Externa	55
7.3	Evolução dos Modos de Deformação	57
7.4	Evolução da Carga com o Deslocamento	59
7.5	Ensaio de Separação	63
7.6	Ligações dissimilares	64

8 Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuro	67
8.1 Conclusões	67
8.2 Perspetivas de Trabalho Futuro	68
Referências	69
A Anexos	73

Lista de Tabelas

5.1	A gama de valores dos parâmetros de processo utilizados nos ensaios em relação ao processo de SBF.	36
5.2	Sumário experimental dos modos de deformação observados em função do espaçamento inicial l_{gap} e da espessura da parede final t	36
5.3	Valores obtidos para alguns parâmetros importantes antes da realização da inversão externa.	38
6.1	Principais parâmetros da simulação de SBF realizada.	44
6.2	Principais parâmetros da simulação de inversão externa realizada.	44

Lista de Figuras

2.1	Processo convencional de ligação por fixação mecânica [7].	7
2.2	Processo convencional de ligação por colagem com adesivo [7].	8
2.3	Processo convencional de ligação. a) Soldadura. b) Brasagem [7].	9
2.4	Instabilidade em tubos de parede fina. a) Quantificação de cargas críticas [23]. b) Modelo que caracteriza o fenómeno de instabilidade [24]. c) Curvatura das instabilidades [25]. . .	12
2.5	Instabilidade em tubos sujeitos a compressão axial. a) Instabilidade global. b) Instabilidade local [29]. c) Efeito de engelhamento sucessivo [28].	13
2.6	Operação de inversão externa com uso de uma matriz [37].	14
2.7	Processos de enformação das extremidades do tubo. a) Expansão. b) Redução [37]. . .	15
3.1	Sólido infinitesimal num sistema de coordenadas fixas[18].	18
3.2	Critérios de Tresca e von Mises representados no plano das tensões principais.	21
4.1	Diferentes tipos de malhas [42].	24
5.1	Evolução do processo de ligação de tubos de parede fina a chapas. a) Pré-forma inicial. b) Tubo após enformação. c) Inversão externa da extremidade do tubo.	28
5.2	Ensaio de compressão uniaxial do alumínio AA6063T5. a) Discos cilíndricos obtidos por furação de um tubo. b) Provete deformado.	29
5.3	Curva extensão efetiva-tensão efetiva do alumínio AA6063T5.	29
5.4	Curva carga-deslocamento e carga crítica de instabilidade para a compressão axial de tubos de alumínio AA6063T5 entre pratos planos.	30
5.5	Máquina de ensaios INSTRON 1200 kN utilizada no procedimento experimental com aquisição de dados.	31
5.6	Ferramentas responsáveis pela Enformação. a) Matrizes e mandril utilizados no desenvolvimento experimental. b) Montagem.	32
5.7	Ferramentas responsáveis pela Inversão Externa. a) Matrizes utilizadas no desenvolvimento experimental. b) Montagem.	32
5.8	Pré-formas utilizadas nos ensaios de SBF. Valor crescente de l_0 da esquerda para a direita, com valor inicial de 60 e final de 65 mm.	33
5.9	Principais parâmetros do processo de SBF de tubos de parede fina através de uma compressão parcial perpendicular à espessura destes ao longo da direção longitudinal. . . .	34

5.10	Fixação de tubos a chapas através do processo de ligação proposto. a) Fecho mecânico através de compressão axial da extremidade do tubo através de uma matriz de inversão. b) Situação não desejada resultante de um raio da matriz de inversão r_c muito reduzido. c) Situação não desejada resultante de um raio da matriz de inversão r_c muito elevado.	35
5.11	Deformação plástica das pré-formas tubulares consoante a variação do espaçamento inicial entre matrizes l_{gap} . Valor crescente de l_{gap} da esquerda para a direita, com valor inicial de 5 e final de 16.	37
5.12	Modo de deformação I e I*. a) $l_{gap}=7$ mm e $t=1$ mm. b) $l_{gap}=5$ mm e $t=0.75$ mm.	37
5.13	Modo de deformação II e III. a) $l_{gap}=10$ mm e $t=1$ mm. b) $l_{gap}=12$ mm e $t=1.25$ mm.	38
5.14	Ligação mecânica entre diferentes tubos enformados de alumínio e iguais chapas de aço carbono. a) Ligação com l_{gap} de 10 e $t=1.25$ mm. b) Ligação com l_{gap} de 7 mm e $t=1.25$ mm.	39
5.15	Fotografia de corte de uma ligação realizada com uma matriz de inversão de raio de canto igual a 3 mm.	39
5.16	Fotografia de corte de uma ligação realizada com uma matriz de inversão de raio de canto igual a 0.3 mm.	40
5.17	Fotografia de corte de uma ligação realizada com uma matriz de inversão de raio de canto igual a 0 mm.	40
6.1	Esquema representativo da operação de SBF com ênfase na discretização da malha das pré-formas tubulares e ferramentas utilizadas nas simulações numéricas. Detalhe na zona mais discretizada da malha.	42
6.2	Esquema representativo da operação de fecho da ligação com ênfase na discretização da malha da chapa. Detalhe na zona mais discretizada da malha.	43
6.3	Simulação numérica do modo de deformação I para o caso com $l_{gap}=7$ mm e $t=1$ mm. a) Fotografia da pré-forma. b) Malha inicial e final com corte parcial das matrizes e mandril.	45
6.4	Simulação numérica do modo de deformação II para o caso com $l_{gap}=10$ mm e $t=1$ mm. a) Fotografia do ensaio. b) Malha inicial e final corte parcial das matrizes e mandril.	46
6.5	Simulação numérica do modo de deformação III para o caso com $l_{gap}=14$ mm e $t=1.25$ mm. a) Fotografia do ensaio. b) Malha inicial e final com acumulação do dano dúctil de acordo com o critério de Cockcroft-Latham com corte parcial das matrizes e mandril.	47
6.6	Simulação numérica da ligação de tubos deformados através de SBF a placas por inversão externa da extremidade do tubo com uma matriz de inversão com um raio de canto igual a 0 mm.	48
6.7	Simulação numérica da ligação de tubos deformados através de SBF a placas por inversão externa da extremidade do tubo com uma matriz de inversão com um raio de canto igual a 3 mm.	48

6.8	Simulação numérica da ligação de tubos deformados através de SBF a placas por inversão externa da extremidade do tubo com uma matriz de inversão com um raio de canto igual a 0.3 mm.	49
7.1	Principais parâmetros do processo de SBF de tubos de parede fina através de uma compressão parcial perpendicular à espessura destes ao longo da direção longitudinal. . . .	51
7.2	Distribuição da tensão efetiva (MPa) na fase final de enformação para $l_{gap}=7$ mm e $t=1$ mm.	53
7.3	Distribuição da extensão efetiva na fase final de deformação para $l_{gap}=7$ mm e $t=1$ mm.	54
7.4	Distribuição do valor de dano dúctil na fase final de deformação para $l_{gap}=7$ mm e $t=1$ mm.	54
7.5	Distribuição da tensão efetiva (MPa) na fase final de inversão externa para $l_{gap}=7$ mm e $t=1$ mm e $r_c=0.3$ mm.	55
7.6	Distribuição da extensão efetiva na fase final de inversão externa para $l_{gap}=7$ mm e $t=1$ mm e $r_c=0.3$ mm.	56
7.7	Distribuição do dano dúctil na fase final de inversão externa para $l_{gap}=7$ mm e $t=1$ mm e $r_c=0.3$ mm.	56
7.8	Modos de deformação para um conjunto de ensaios com uma espessura final de parede $t=1.25$ mm e um espaçamento inicial l_{gap} entre 5 e 16 mm (5,10,14,16 presentes na primeira coluna na Tabela 5.2).	57
7.9	Evolução experimental do raio da flange R_{fs} em função do espaçamento inicial l_{gap} em SBF de tubos de parede fina para diferentes espessuras de parede final t	58
7.10	Evolução experimental do comprimento final da extremidade reduzida h em função do espaçamento inicial l_{gap} em SBF de tubos de parede fina para diferentes espessuras de parede final t	58
7.11	Evolução experimental da força de compressão em função do deslocamento da matriz superior para os casos com uma espessura de parede $t=1.25$ mm.	59
7.12	Evolução numérico-experimental da força de compressão em função do deslocamento da matriz superior para os casos $t=1$ mm, $l_{gap}=5$ mm e $t=1.25$ mm, $l_{gap}=7$ mm.	60
7.13	Evolução numérico-experimental da força de compressão em função do deslocamento da matriz superior para os casos $t=1.25$ mm, $l_{gap}=10$ mm e $t=1.25$ mm, $l_{gap}=12$ mm.	60
7.14	Evolução numérico-experimental da força de compressão em função do deslocamento em SBF de tubos de parede fina.	61
7.15	Evolução numérica da força de compressão em função do deslocamento da matriz de inversão externa para os casos $t=1$ mm, $l_{gap}=7$ mm e $t=1.25$ mm, $l_{gap}=10$ mm com um raio de canto $r_c=0.3$ mm.	62
7.16	Evolução numérico-experimental da força de compressão em função do deslocamento da matriz de inversão externa para o caso $t=1.25$ mm, $l_{gap}=10$ mm.	63
7.17	Evolução numérica-experimental da carga em função do deslocamento da matriz superior no ensaio de separação por compressão o caso $t=1$ mm, $l_{gap}=7$ mm.	64

7.18 Fotografia de ligações dissimilares para casos de $t = 1$ mm. a) Tubo de alumínio com $l_{gap}=7$ mm e chapa de titânio. b) Tubo de alumínio com $l_{gap}=10$ mm e chapa de aço carbono. c) Tubo de alumínio com $l_{gap}=8$ mm e chapa de policarbonato.	65
7.19 Evolução experimental da força de compressão em função do deslocamento da matriz de inversão externa para os casos com $t=1$ mm e diferentes l_{gap} para as ligações de materiais dissimilares.	66
A.1 Certificado da liga de alumínio AA6063T5	73
A.2 Desenho Técnico 1. Matriz Inferior	74
A.3 Desenho Técnico 2. Matriz Superior	75
A.4 Desenho Técnico 3. Mandril	76
A.5 Desenho Técnico 4. Matriz de Inversão	77
A.6 Desenho Técnico 5. Matriz de Separação	78

Lista de Símbolos

$F(\sigma_{ij})$	Função limite de elasticidade
F_{crit}	Carga crítica
J	Invariante do tensor
R_{fs}	Raio da flange
$\bar{\varepsilon}$	Extensão efetiva
$\bar{\varepsilon}^e$	Extensão elástica efetiva
$\bar{\varepsilon}^p$	Extensão plástica efetiva
δl	Incremento instantâneo
δ_{ij}	Delta de Kronecker
$\frac{l_{gap}}{t}$	Racio de esbeltez
σ'_{ij}	Tensor desviador das tensões
σ_γ	Tensão de cedência
σ_{ij}	Tensor das tensões
σ_{kk}	Tensor hidrostático
σ_m	Tensão média
τ	Tensão de corte
ε	Extensão verdadeira
ε_{ij}	Tensor de extensão
$d\lambda$	Constante de proporcionalidade escalar
$d\varepsilon$	Incremento infinitesimal da extensão verdadeira
$d\varepsilon_{ij}^p$	Incremento de extensão plástica
h	Comprimento final da extremidade reduzida

h_i	Altura inicial do provete
k	Constante do critério de plasticidade
l	Comprimento referência
l_{gap}^f	Espaçamento final entre matrizes
l_0	Comprimento inicial
l_{gap}	Espaçamento inicial entre matrizes
r_0	Raio inicial exterior
r_c	Raio de canto
r_p	Raio de curvatura cônica
t	Espessura final da parede
t_0	Espessura inicial
ν	Coefficiente de Poisson
E	Módulo de Young

Capítulo 1

Introdução

Esta dissertação centra-se num novo tipo de ligação de tubos metálicos de parede fina a chapas, que é alternativo aos existentes. Esta nova ligação é essencial numa vasta gama de aplicações de engenharia, tal como, na indústria automóvel e transportes.

A ligação em questão utiliza uma enformação tubular metálica na direção perpendicular à espessura (*Sheet-bulk Forming*), que tem sido utilizada para produzir componentes com engrossamentos locais, reduções de espessura ou elementos funcionais de elevada complexidade, tal como dentes de engrenagens, nervuras ou bossas sólidas localizadas no exterior das superfícies das chapas ou tubos a partir das quais são formadas, sendo analisada em duas recentes revisões de estado da arte [1, 2].

A partir destas revisões de estado da arte, constata-se que a técnica de SBF é mais utilizada em placas metálicas do que em componentes tubulares. Na realidade, os componentes tubulares estão a ser fabricados por torneamento convencional ou através de *'friction spinning'* com geração de calor [3]. Outra conclusão que se pode retirar destas revisões é que a maioria da investigação nesta área está focada na produção de componentes por enformação plástica, apesar de existir a forte potencialidade de se poder ligar componentes da mesma forma [4].

1.1 Motivação

Atualmente, existem inúmeras técnicas disponíveis para se realizarem ligações na indústria, sendo que cada uma tem as suas vantagens e constrangimentos. O processo de montagem de diferentes componentes cria frequentemente uma situação complexa de escolha, onde é necessário preterir entre custos de produção e tempo de ciclo, requisitos mecânicos ou químicos, questões ambientais ou estéticas. De modo a ultrapassar algumas destas limitações, tem sido realizada uma vasta investigação e têm sido desenvolvidos métodos e *software* para facilitar a escolha da técnica de ligação a utilizar[5].

Esta dissertação tem em vista explorar a potencial aplicação de SBF em tubo de parede fina nas ligações a chapas. Este novo conceito é diferente dos desenvolvidos anteriormente na ligação de tubos [6] ou na ligação de tubos a chapas [7]. Em alternativa à realização de uma instabilidade local em tubos sujeitos a um carregamento axial, utilizou-se a técnica de SBF.

A ligação proposta é adequada para aplicações onde seja imperativo assegurar que o diâmetro interno da ligação é idêntico ao do tubo inicial. Este requisito é difícil de atingir em casos de ligações mecânicas obtidas por ligações aparafusadas ou por ondas de instabilidade plástica. Deste modo, esta ligação apresenta grande relevância em aplicações onde haja transferência de fluidos pois previne alterações no fluxo do fluido e variações de pressão.

1.2 Objetivos

Com base no estudo numérico e experimental objeto desta dissertação, o primeiro objetivo é avaliar os mecanismos de deformação através da técnica de SBF em tubos de parede fina, assim como, identificar e caracterizar os diferentes modos de deformação, e definir os limites da exequibilidade do processo face aos parâmetros variáveis do mesmo.

O segundo objetivo desta dissertação é aproveitar o engrossamento localizado na parede do tubo (bossa) para efetuar ligações por enformação plástica. Propõe-se um novo processo de ligação de fixação de tubos a chapas feitos de materiais similares ou dissimilares através de um fecho mecânico com uma matriz de inversão à temperatura ambiente. Contrariamente a outras soluções propostas [8, 9], onde se aumenta a espessura da parede do tubo face a uma compressão da totalidade da sua seção, neste caso, pretende-se agrupar material através de uma compressão parcial da seção do tubo para se obter um engrossamento local.

A componente experimental é efetuada nos laboratórios da Área Científica de Tecnologia Mecânica e Gestão Industrial no Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, numa máquina de ensaios que é assistida por computador, sendo as matrizes e pré-formas desenhadas e produzidas no Laboratório de Tecnologia Mecânica. Por sua vez, a componente numérica é realizada através do *software* de elementos finitos I-FORM, desenvolvido no Instituto Superior Técnico, com o intuito de compreender os mecanismos de deformação da nova ligação e avaliar o seu desempenho.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta tese está organizada em oito capítulos, onde o presente, “Introdução”, aborda a motivação que levou à realização desta dissertação, bem como os objetivos da mesma, de modo a desenvolver um novo processo de ligação com base na técnica de SBF.

No segundo capítulo, retrata-se o “Estado da Arte”, onde são apresentadas as técnicas de ligação mais comuns na Indústria, assim como alguns princípios de enformação tubular importantes para o presente trabalho.

No terceiro e quarto capítulos são descritas a “Teoria da Plasticidade” e o “Método dos Elementos Finitos”, introduzindo-se a fundamentação teórica que suporta tanto o trabalho experimental, como o numérico.

No capítulo cinco, “Desenvolvimento Experimental”, o procedimento e o método experimental são descritos e explicados com referência às várias etapas, material utilizado, equipamentos, ferramentas,

pré-formas e ensaios realizados.

No capítulo seis, “Desenvolvimento Numérico”, apresenta-se toda a simulação numérica, incluindo todo o processo de refinamento da malha, os seus parâmetros e por fim as simulações realizadas.

No capítulo sete, “Apresentação e Discussão de Resultados”, é feita a comparação numérico-experimental e são discutidos os resultados de modo a definir os principais parâmetros que controlam o processo.

No capítulo oito, “Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuro”, é avaliada a viabilidade do processo e são feitas algumas considerações para futuros estudos nesta área de conhecimento.

Capítulo 2

Estado da Arte

Este capítulo começa por abordar a história dos diferentes tipos de ligações existentes, desde a primeira realizada na Antiguidade, até às mais recentes. De seguida, é apresentada a liga de Alumínio A6063T5, as suas principais características e vantagens de utilização, visto ter sido este o material escolhido para realizar a ligação. De seguida, retrata-se a procura constante por um processo de produção cada vez mais sustentável. No final, são abordados alguns princípios de enformação tubular importantes para o presente estudo.

Se viajar até 6000 A.C., começavam a surgir as primeiras ligações efetuadas por seres humanos. Estas consistiam na junção de uma pedra afiada e de um pau de madeira através de restos de corpo animal (tendões), que depois de ligados serviam de utensílios tanto na caça como na agricultura [10].

Ao longo dos anos e à medida que as tecnologias na indústria, assim como os processos de fabricação avançavam, as ligações tornaram-se fundamentais. Ao se ultrapassar os limites da moldagem, quer em relação ao tamanho, complexidade, plasticidade, precisão ou qualidade do componente a produzir, a inevitabilidade de realizar ligações entre materiais tornou-se evidente. A necessidade de se ligar diferentes elementos ou materiais, quebrou a barreira delimitada anteriormente[11].

Ao se quebrar esta barreira, materiais que não eram usados e estavam de parte passaram a ser utilizados, permitindo uma pluralidade de aplicações. Deste modo, o processo de efetuar ligações, deixou de ser algo simples entre dois materiais e passou a ser algo mais sofisticado e concreto. Assim, puderam juntar-se os mais diversos componentes resultando em estruturas complexas.

Atualmente tudo ao nosso redor, desde edifícios, automóveis, até ao mais simples dispositivo eletrónico, resultam de inúmeras ligações de componentes. Apesar de à primeira vista e aos olhos da população em geral estas ligações não serem observadas, elas existem e aos milhares, originando as mais diversas estruturas [12]. Se pensar, por exemplo, no caso de um automóvel, este é composto por milhares de ligações através de parafusos. Já um avião, apresenta um número superior, vários milhões de rebites. Qualquer uma destas muitas ligações é importante e, em caso de falha ou falta da mesma, o avião ou o automóvel, podem perder alguma funcionalidade, levando a um possível acidente.

O projecto de conceção de um produto está geralmente dividido em quatro etapas distintas, desde a escolha da matéria-prima a ser utilizada até ao produto final obtido. As etapas são as seguintes: forma,

processos secundários, ligações e, por último, tratamento de superfície. A primeira etapa retrata os processos de fundição, moldagem ou enformação plástica que os materiais sofrem. Na etapa seguinte, refere-se os processos, como maquinação ou tratamentos térmicos que são realizados. Já a terceira etapa, consiste em todas as ligações efetuadas durante a produção do produto, sejam elas através de parafusos e rebites, adesivos, soldaduras ou brasagem. Na última etapa, retratam-se os diversos processos que a superfície do material sofre, de modo a proteger a mesma. [13].

Durante a concepção é muito importante pensar nas condições de trabalho a que o produto vai estar sujeito, como ciclos de carga ou ambiente de trabalho. Há que ter especial atenção à zona onde é efetuada a ligação, assim como, qual utilizar, porque frequentemente é a zona crítica que caracteriza o projeto [5]. Em relação ao tipo de ligação a ser aplicada, deve ser tida em consideração a compatibilidade dos materiais a ligar, caso sejam diferentes, assim como se interfere na funcionalidade da aplicação para o produto.

Por último, como cada empresa procura otimizar os processos de fabrico, ou seja, promover a redução de custos através da diminuição da energia, material desperdiçado e tempo de produção. Os processos de ligação têm um fator importante no projeto de um produto. Os vários tipos de ligações necessitam de investimentos diferentes, bem como de equipamento adequado. Deste modo, a escolha da ligação a usar não é uma decisão rápida, nem simples, podendo fazer a diferença entre o sucesso ou não de um produto e até de uma empresa.

2.1 Ligações Convencionais

Depois de terem sido abordados os fatores mais importantes numa ligação de componentes, são pormenorizadas as ligações convencionais mais comuns utilizadas na Indústria. Existem três métodos de efetuar ligações, sendo eles: a fixação mecânica, a colagem com adesivo e a soldadura ou brasagem. Cada uma destas ligações é possível de efetuar através de três forças fundamentais: a mecânica, a química e a física, respetivamente [14]. Seguidamente, cada uma irá ser individualizada.

2.1.1 Fixação Mecânica

A força mecânica é responsável pela fixação mecânica. Ao nível macroscópico através de engates e da interferência das partes mecânicas, criando-se atrito entre as partes em contato [14]. A fixação mecânica incorpora uma variedade de processos que utilizam porcas e parafusos, rebites, ou engates mecânicos que ligam os materiais sem que estes aqueçam.

A fixação mecânica é capaz de produzir ligações em ligas de elevada resistência sem danificar a resistência à corrosão. Permite com relativa simplicidade e utilizando ferramentas baratas e sem qualquer tipo de especialização efetuar ligações, particularmente em secções finas. Não é necessária nenhuma união, quer química ou física, de modo a executar a ligação, e caso seja preciso desmontar a ligação, não é preciso partir a mesma. Deste modo, é facilmente substituído um componente estragado ou efetuada a manutenção da ligação. Na medida em que o método é simplesmente mecânico, é

possível adicionar materiais dissimilares. Contudo, existem algumas desvantagens ao juntar materiais adicionais, como o aumento do peso da estrutura, tal como seria de esperar, concentração de tensões nos pontos da ligação que podem levar à aceleração da taxa de corrosão e à possibilidade de falha, através de aberturas em materiais frágeis e intrusão de líquidos [15].

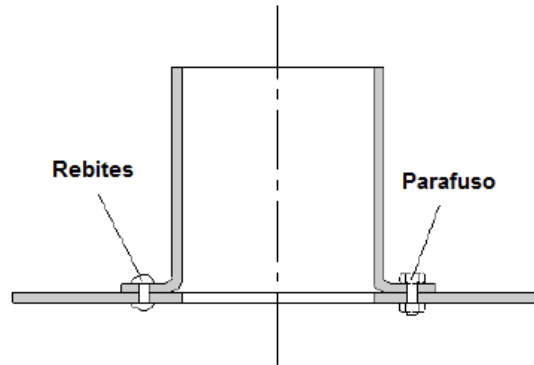


Figura 2.1: Processo convencional de ligação por fixação mecânica [7].

2.1.2 Colagem com Adesivo

A colagem com adesivo é realizada através de forças químicas originadas por reações químicas entre os materiais que estão ambos em estado sólido ou estado sólido-líquido. As reações onde os materiais estão em diferentes estados são normalmente mais rápidas e mais uniformes [14]. Este método necessita de um agente de união, um adesivo, mais conhecido por cola, epóxi, ou através de agentes plásticos que unem através da evaporação do solvente ou pela aplicação de calor ou pressão. O adesivo tem de ser quimicamente compatível com os materiais a ligar. Da mesma forma que na fixação mecânica, também é possível juntar materiais dissimilares, caso o adesivo consiga ativar a reação química. Uma das vantagens é que não são necessários componentes extra, a não ser o adesivo. Os pontos de concentração de tensões são evitáveis, visto que o adesivo constitui uma camada uniforme. Na medida em que este processo ocorre ao nível da superfície dos materiais, não existem mudanças na microestrutura dos materiais ligados. A colagem com adesivo é muito utilizada devido essencialmente ao aspeto estético, assim como à diversidade de materiais que podem ser ligados. Em termos de carga, quanto maior é a área onde o adesivo está aplicado, maior é o valor que a ligação suporta [16].

Todavia, existem algumas desvantagens, tal como o uso prolongado que pode levar a alterações nas propriedades da ligação, especialmente em ambientes de temperaturas elevadas. Assim, a estabilidade da ligação é limitada ao calor envolvente e é sempre necessária a limpeza da superfície onde o adesivo é colocado.

2.1.3 Soldadura e Brasagem

Efetuar ligações através de forças físicas surge como uma consequência natural de os átomos, os iões e as moléculas serem atraídos uns pelos outros. Para que a união atômica ocorra, as soldaduras

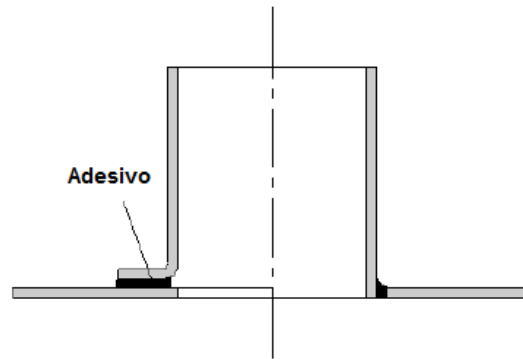


Figura 2.2: Processo convencional de ligação por colagem com adesivo [7].

necessitam que as superfícies dos materiais a ligar estejam suficientemente perto, como consequência natural dos átomos procurarem configurações eletrônicas estáveis [14].

O método de soldar é caracterizado pela aplicação de calor e/ou pressão na zona da ligação permitindo que as duas partes se unam. Existem as mais diversas técnicas de soldar, assim como diferentes métodos para aplicar energia, que são requeridos para ativar o processo de soldadura. Apesar de criar uma união ao nível atômico entre as superfícies a ligar, com resistências similares aos materiais envolvidos, este processo envolve apenas materiais similares. É possível soldar qualquer metal, cerâmico ou polímero (caso sejam do mesmo tipo). Contudo, é extremamente difícil ligar um metal com um polímero ou um alumínio com um cobre, por exemplo [17]. Os ciclos de aquecimento-arrefecimento na realização do processo, implicam tensões na ordem da tensão de cedência do material. Os arranjos da microestrutura também podem alterar a zona afetada pelo calor, de forma a que sejam necessários tratamentos térmicos posteriores para remover as tensões residuais, restaurando a microestrutura desejada e prevenindo contra desalinhamentos da estrutura e distorções [18].

Não obstante que o processo de soldar seja bastante flexível, existe a possibilidade de portabilidade ou de fácil automatização das técnicas. No entanto, os custos de produção e os tempos de ciclo podem aumentar marginalmente, preterindo-se outros processos em função deste. Para se soldar são necessários, frequentemente, tratamentos nas superfícies a ligar, como limpeza, de modo a prevenir que porosidades danifiquem a soldadura. Igualmente são também necessários, processos que utilizam elevada energia, de modo a eliminar camadas de óxidos, como alumina em ligações de alumínio, ou até o uso de gases protetores que previnem reações com o ambiente envolvente. Complementarmente, em muitas situações, são necessários trabalhadores com uma elevada especialização, de modo a não comprometer a qualidade da ligação.

Brasagem é uma subclassificação da soldadura, que é usada quando materiais dissimilares necessitam de ser ligados sem que as temperaturas de fundição sejam atingidas, ou quando a forma e tamanho da geometria da ligação não permite que o processo de soldadura seja aplicado. Quando se efetua uma brasagem de dois materiais, o material de enchimento que tem uma temperatura de fundição inferior aos dois a ligar, tal como já foi referido, é derretido e flui entre as duas partes. Deste modo, liga as mesmas através do agente de aderência, preservando a microestrutura dos materiais

base. Este processo é muito usado na ligação de tubos para gasodutos, canalizações, ar condicionado e sistemas de refrigeração, para ligar materiais dissimilares como aço carbono, aço inoxidável, cobre e alguns polímeros. Apesar de ser uma solução simples e de baixo custo, por outro lado, as ligações são limitadas pelos standards da indústria e pelas tolerâncias, sendo necessários cortes e inspeções de qualidade que aumentam os custos e os tempos de ciclo [6].

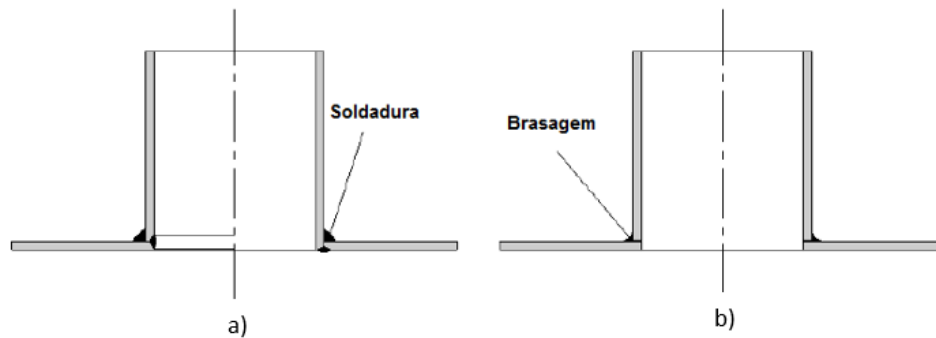


Figura 2.3: Processo convencional de ligação. a) Soldadura. b) Brasagem [7].

2.2 Enformação a frio

Atualmente, a evolução das ligações a partir do uso da enformação plástica pode ser constatada em comentários sobre o estado da arte por parte de Mori e Groche [4, 19]. Existem diversas razões para se utilizarem tecnologias de ligação no desenvolvimento e produção de componentes individuais e estruturas: i) o produto é demasiado grande para fabricar como uma peça unitária; ii) constrangimentos de entrega podem necessitar que o produto seja transportado em partes e montado no destino; iii) complexidade da forma e a necessidade de combinar diferentes materiais tornam vantajosa a montagem do produto através das partes individualmente criadas [15].

Ao longo dos últimos anos têm se realizado vários estudos no sentido de estudar a enformação tubular por ocorrência de instabilidade local [15, 16, 17]. No entanto, neste presente estudo e apesar de se dar continuidade à investigação da enformação plástica a frio de tubos, pretende-se que o mesmo seja focado noutra área da enformação tubular.

2.3 Processo de Produção Sustentável

É necessário realizarem-se esforços com o intuito de melhorar os métodos atuais utilizados, assim como a investigação de novos processos que ultrapassem os limites dos existentes. Um exemplo industrial é o caso dos chassis em alumínio dos automóveis que são realizados por técnicas de soldadura e onde o aparecimento de fendas é comum devido à permanente formação de contornos de grão e camadas de óxidos (requerendo elevados custos em equipamento de modo a efetuar técnicas de soldadura eficientes). Adicionalmente, o elevado tempo consumido para obter operários especializados,

necessidade de elevados stocks de materiais e consumíveis são alguns dos problemas existentes [20].

A utilização da fixação mecânica, onde as propriedades elásticas ou relacionadas com o atrito entre superfícies do material são exploradas para aguentar os componentes juntos, é relevante em casos de materiais diferentes. No entanto, não fornecem uma conexão contínua entre chapa e tubo, e normalmente sofrem de problemas estéticos, corrosão ou dificuldades funcionais relacionadas com o esforço máximo que rebites, parafusos e porcas podem suportar em segurança. A colagem onde uma camada de um adesivo é introduzida entre as superfícies das placas e tubos, e mais tarde solidifica para formar uma ligação sólida, resolve o problema estético através da não utilização de rebites e parafusos enquanto oferece a possibilidade de juntar diferentes tipos de materiais. Contudo, adesivos requerem uma preparação cuidada das superfícies onde vão ser aplicados e podem reduzir o seu desempenho ao longo do tempo ou na presença de ambientes hostis. A brasagem partilha similaridades com a colagem em relação à estrutura dos adesivos porque o material de enchimento, quando solidifica, também produz uma união sólida entre as superfícies da placa e o tubo a ligar. Tal como os adesivos, também é necessário garantir que as superfícies a ligar são química e mecanicamente limpas e que sejam utilizados utensílios especiais para segurar as partes juntas durante o aquecimento e arrefecimento até à temperatura ambiente. A soldadura assegura uma conexão contínua entre as superfícies da placa e tubo com uma resistência similar aos materiais a ligar. Todavia, podem surgir problemas similares aos mencionados na fixação mecânica e também dificuldades relacionadas com o ciclo de aquecimento-arrefecimento e com a soldabilidade de materiais dissimilares [15].

Tendo em conta as técnicas existentes para efetuar uma ligação de tubos-chapa, conclui-se que é necessário desenvolver um novo processo capaz de completar o desafio de conectar um tubo com uma chapa pelas suas extremidades através de uma solução simples, efetiva e amiga do ambiente. O processo desenvolvido neste trabalho propõe algumas vantagens que eliminam alguns dos problemas descritos, como a flexibilidade de manejar lotes de diferentes tamanhos e elevados níveis de repetibilidade, e também a possibilidade de ligar materiais dissimilares, apenas através da enformação a frio de tubos. Como não é necessário incluir material adicional, nem de fundir os materiais base, preserva-se a microestrutura e previnem-se passos extra na conceção da ligação.

As indústrias de fabrico e transformação desempenham um papel importante na economia global, e deste modo, influenciam todo o nosso ecossistema. Estas indústrias são responsáveis pelo consumo de uma grande quantidade de materiais, renováveis ou não, assim como de energia, e também de emissões de CO_2 . É importante referir, que grande parte do desperdício produzido nestas indústrias é descartado para o meio ambiente, poluindo-o[21].

Por um lado, face ao crescente número de regulamentos e restrições impostos às empresas, como níveis máximos de emissões de gases, níveis mínimos de segurança e saúde para os trabalhadores ou tempo de exposição máximo a materiais perigosos, as mentalidades destas indústrias começam a mudar. Por outro lado, é uma motivação extra para as empresas serem eficientes e eficazes, atingindo competitividade económica através da optimização dos seus sistemas de produção e implementando tecnologias inovadoras que permitem reduções de energia, matéria-prima e desperdício. Estas alterações funcionam também como uma estratégia de marketing, visto que o número de compradores

conscientes dos problemas ambientais é cada vez maior.

Devem-se realizar esforços com o intuito de reduzir: (i) o consumo de energia através da redução das cargas aplicadas, tempos de ciclo e processos de elevadas temperaturas; (ii) o desperdício de material através da criação de componentes mais leves, mantendo-se as propriedades de resistência e reduzindo-se as operações de maquinação; (iii) os gases de efeito estufa através da utilização de energias renováveis; (iv) o número de passos durante a produção de modo a evitar processos como a limpeza das ferramentas e peça, uso de lubrificantes ou tratamentos térmicos[22].

O processo de ligação que é o tema deste trabalho, está a um passo mais perto de alcançar os objetivos de sustentabilidade mencionados em cima, para o caso específico da ligação tubo-chapa através da enformação plástica. As vantagens deste processo em relação aos mais tradicionais são [17]:

- Processo flexível capaz de manusear pequenos, médios ou grandes lotes com diferentes geometrias e elevados níveis de repetibilidade na linha de produção;
- Processo amigo do ambiente que permite guardar matéria prima e eliminar material de enchimento e gases protetores;
- Processo economizador de energia que elimina ciclos de aquecimento-arrefecimento assim como zonas de calor e tensões residuais nas regiões das placas e tubos que vão ser ligados;
- Processo de valor acrescentado que é capaz de ligar chapas a tubos feitos de materiais dissimilares;
- Processo custo-eficiente que requer pouco investimento de capital porque é projetado para operar em máquinas ferramenta existentes.

Já em relação ao processo de ligação por instabilidade local que irá ser explicado mais à frente, apresenta a vantagem de manter o diâmetro interno inalterável na zona da ligação o que pode ser bastante importante quando se pretende a circulação de fluidos pois evita a concentração de resíduos em tubos. Como no novo processo o diâmetro interior do tubo se mantém constante, algo que não acontece no caso de instabilidade local, o problema deixa de existir.

2.4 Enformação Tubular por Compressão Axial

Embora exista uma enorme variedade de processos de enformação tubular disponíveis na indústria de fabrico, este capítulo retrata os mecanismos, assim como os principais parâmetros envolvidos no processo de enformação plástica de tubos que sofrem compressão axial. Incide nos casos de instabilidade tubular, inversão externa e expansão ou redução do tubo, que são operações de enformação fundamentais que sustentam o desenvolvimento deste trabalho.

2.4.1 Instabilidade Tubular

Desde o início do século XX, que Timoshenko [23] estudou o fenómeno da enformação plástica em corpos cilíndricos que sofrem cargas axiais de compressão e conduziu uma série de testes experimentais em diferentes condições e dimensões de corpos, quantificando cargas críticas e comprimentos de onda (Figura 2.4a). O colapso de diversos tubos foi considerado um excelente método para absorver energia, relevando-se uma aplicação útil no esmagamento de estruturas. Dependendo do seu diâmetro, espessura e material, um tubo que sofra uma carga axi simétrica pode colapsar de diferentes modos. Alexander deu o primeiro passo no estudo da cinemática do modo de deformação, propondo um modelo simples que caracteriza o fenómeno de instabilidade e determina a carga crítica de colapso (Figura 2.4b) [24]. Estudos posteriores ao efetuado por Alexander, levaram à introdução da curvatura das instabilidades e à consideração do encruamento, alcançando então modelos analíticos mais realistas, assim como atividades experimentais (Figura 2.4c) [25, 26].

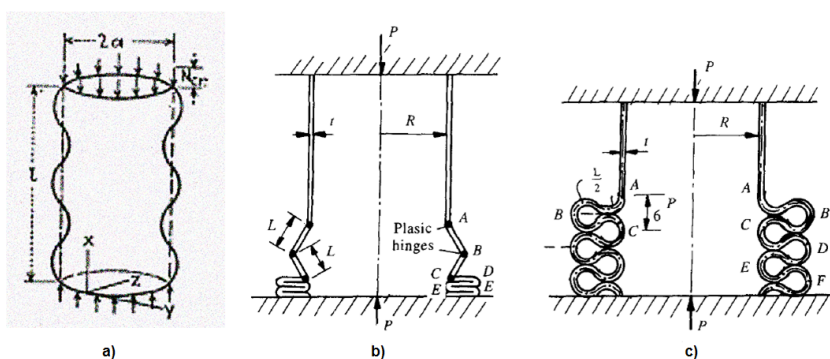


Figura 2.4: Instabilidade em tubos de parede fina. a) Quantificação de cargas críticas [23]. b) Modelo que caracteriza o fenómeno de instabilidade [24]. c) Curvatura das instabilidades [25].

O desenvolvimento de métodos numéricos, assim como de recursos computacionais, permitiu a primeira simulação através do método dos elementos finitos para se avaliar as distribuições de tensão e extensão, assim como os campos de velocidade para cada etapa do processo de instabilidade [27, 28].

A energia fornecida durante um ensaio de compressão uniaxial de tubos metálicos é essencialmente dissipada em enformação plástica do material e atrito. A enformação plástica pode ocorrer de forma simétrica ou assimétrica, consoante a geometria do tubo. Este género de enformação é alcançado quando se atinge uma determinada carga crítica F_{crit} , provocando uma instabilidade no material, tal como se pode verificar na figura seguinte (Figura 2.5). A instabilidade pode ser local ou global. Para tubos compridos e espessura de parede relativamente elevada, ocorre instabilidade global, dobrando todo o tubo de forma simétrica em relação ao meio do tubo (Figura 2.5a). Já no caso de tubos de parede fina, compridos ou curtos, esta instabilidade ocorre localmente, dando origem a uma dobra simétrica com o eixo do tubo (Figura 2.5b) [29]. Este fenómeno repete-se à medida que o material encontra espaço livre para escoar, dando origem a um efeito de engelhamento sucessivo, conforme se pode verificar em diversos estudos prévios (Figura 2.5c) [28, 30, 31, 32].

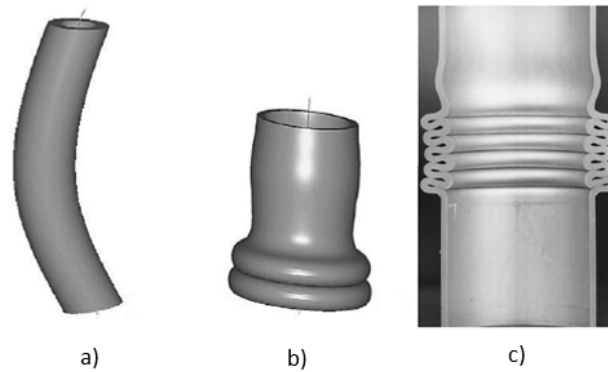


Figura 2.5: Instabilidade em tubos sujeitos a compressão axial. a) Instabilidade global. b) Instabilidade local [29]. c) Efeito de engelhamento sucessivo [28].

2.4.2 Inversão Externa

Normalmente, a inversão externa de tubos de parede fina através de uma matriz é usada para produzir componentes com dupla parede, preparação de preformes ou operações de acabamento. Também pode ser usada para ligar extremidades de tubos a outras partes, como placas. A inversão externa de um tubo é caracterizada pela compressão axial de um tubo contra um canto de punção.

Em 1996, Guist e Marble propuseram uma expressão analítica, acompanhada de dados experimentais, para prever as condições de carregamento que causam a inversão num tubo, motivados pelo elevado potencial deste processo de deformação em absorver energia [33]. Outros autores contribuíram neste tema através da classificação dos modos de deformação (inversão, instabilidade local e fratura), identificando os principais parâmetros do processo e características geométricas dos tubos e influência das matrizes no fluxo de material e prevendo curvas de tensão-extensão através de análise de elementos finitos [34, 35, 36]. Recentemente, com base em trabalho experimental e modelação numérica, as condições de atrito e de lubrificação no fluxo, fratura do material e trajeto da extensão ficaram melhor definidas, na tentativa de estabelecer parâmetros que permitam que o processo ocorra sem defeitos. O raio de curvatura da punção r_c influencia o modo de deformação no processo de inversão. Para pequenos valores de r_c , a instabilidade local é provável de acontecer, enquanto que para valores elevados de r_c , as paredes do tubo ficam muito finas e ocorre fratura. A produção de componentes tubulares de parede fina por inversão externa é limitada a determinadas características geométricas dentro de um intervalo onde nenhum dos defeitos acontece [29, 37, 38].

Através da figura seguinte, pode-se visualizar o desenvolvimento do processo para um tubo com raio r_0 , comprimento l_0 e espessura t_0 . A dobragem é iniciada no ponto B onde o tubo está em contacto com a matriz até que o ponto D é atingido e a desdobração ocorre. O alongamento ocorre progressivamente em torno do canto da punção entre os pontos B-D ao longo da direcção circunferencial. A interface de atrito ocorre entre B e C.

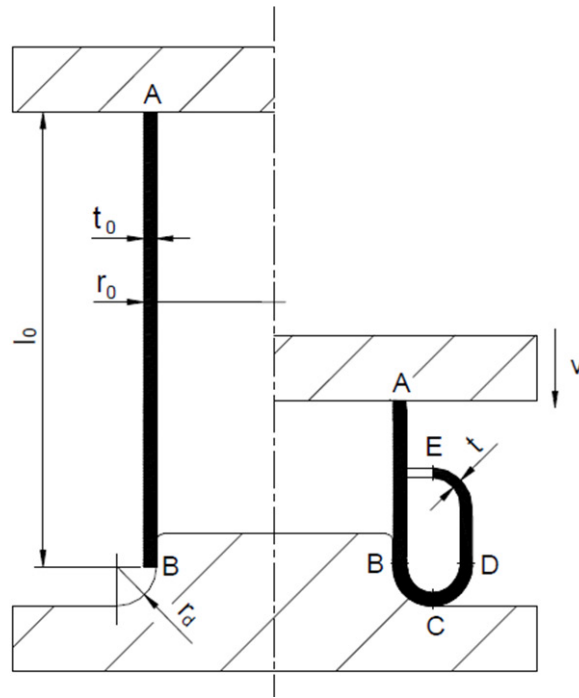


Figura 2.6: Operação de inversão externa com uso de uma matriz [37].

2.4.3 Expansão e Redução

Apesar dos processos de expansão e redução não estarem diretamente envolvidos no desenvolvimento experimental, a sua compreensão é essencial e podem ser efetuados antes ou depois nas pré-formas estudadas. A expansão é um processo de enformação que envolve a ampliação da extremidade de um tubo através da utilização de uma matriz cônica comprimida em relação ao tubo ou, vice-versa. Já a redução é um processo que envolve a limitação de uma extremidade de um tubo. A falta de conhecimento em relação a este processo levou a que fosse necessário um desenvolvimento de um modelo analítico e numérico assim como atividades experimentais para se compreender melhor a cinemática e os principais parâmetros envolvidos [39, 40]. A figura seguinte representa os fenômenos referidos num tubo de parede fina com um raio r_0 , um comprimento l_0 e uma espessura t_0 , um raio de curvatura cônica r_p , um ângulo β e um vetor de velocidade μ . No ponto B inicia-se a expansão ou redução (consoante o processo), originando uma dobragem até ao ponto C. Entre os pontos C e D, onde o atrito é predominante, a expansão/redução é radial e tangencial. No ponto D perde-se o contato do material com a matriz, dando-se a desdobragem deste até ao ponto E. Por último, o material comporta-se de forma rígida, deformando-se livremente entre os pontos E e F.

As variáveis mais relevantes nestes processos são a razão de deformação e o ângulo da ferramenta α , estando ambas relacionadas. Durante a expansão, se algum dos parâmetros for demasiado elevado, podem ocorrer situações de instabilidade local ou fratura dúctil, enquanto que na redução pode levar a engelhamento na direção tangencial e também a instabilidade [38].

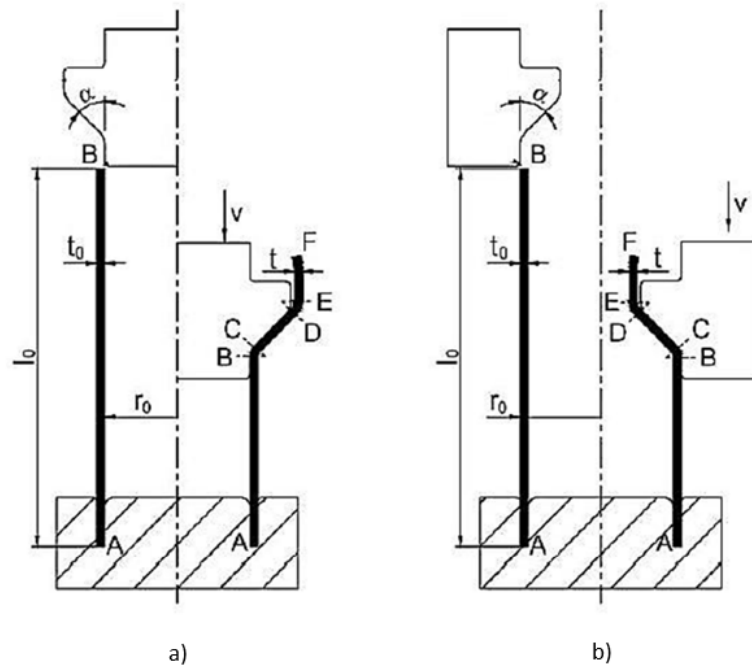


Figura 2.7: Processos de enformação das extremidades do tubo. a) Expansão. b) Redução [37].

Capítulo 3

Teoria da Plasticidade

3.1 Introdução

O processo que se está a estudar implica a deformação plástica de tubos metálicos, causando uma mudança nas suas propriedades mecânicas. Para se compreender os principais parâmetros e variáveis implicadas no processo, é essencial serem introduzidas todas as noções sobre a teoria matemática da plasticidade que regem todos os tipos de deformações em materiais metálicos.

Este capítulo faz um esforço nesse sentido, descrevendo de forma sucinta esta teoria.

3.2 Tensão, Extensão e Velocidade Deformação

Um material metálico deformado elasticamente recupera até à sua forma original quando as cargas externas são finalizadas. Pelo contrário, quando as cargas externas são suficientemente elevadas para se ultrapassar a tensão de cedência do material σ_y , a deformação plástica é iniciada, alterando-se permanentemente as propriedades do material e a sua forma original. Através da introdução de uma teoria para explicar os aspetos fenomenológicos da plasticidade, as condições de carga e de tensão que causam deformação plástica podem ser quantificadas.

Quando se projeta um processo de enformação, a teoria da plasticidade é fundamental, seja para estudar a mecânica da deformação durante este processo, dimensionar ferramentas ou peças, prevenir fraturas ou alcançar a forma desejada [18]. Segundo a teoria da plasticidade, as deformações num meio contínuo são avaliadas assumindo as coordenadas no estado deformado como variáveis independentes, o que impõe que as tensões, extensões e velocidades de deformação sejam expressas comparativamente a um sistema de coordenadas fixo ao material no estado deformado.

Caso um corpo seja sujeito a um conjunto de forças externas, forças internas correspondentes são produzidas de maneira que cada elemento do corpo esteja em estado de equilíbrio. Pode-se, então, introduzir o conceito de tensão como puramente matemático, por estar associado à noção de força aplicada por unidade de superfície. A figura seguinte representa um corpo sólido infinitesimal num sistema fixo de coordenadas definido por um conjunto retangular de eixos xyz , que formam três planos

perpendiculares com três componentes de tensão associados a cada plano, uma tensão normal e duas tensões de corte.

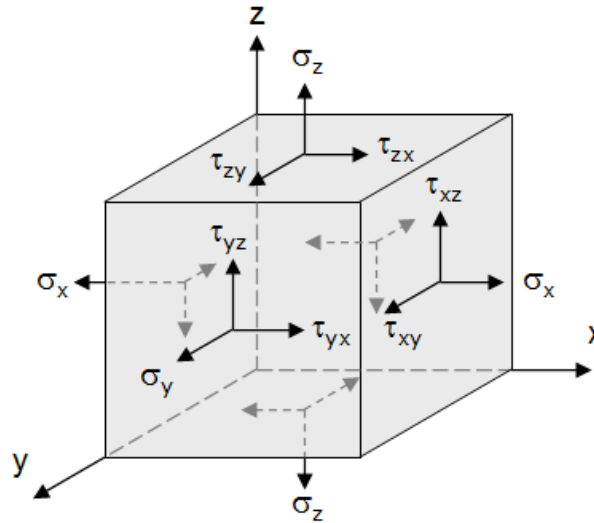


Figura 3.1: Sólido infinitesimal num sistema de coordenadas fixas[18].

O estado de tensão no interior do corpo pode ser definido matematicamente pelo tensor das tensões σ_{ij} numa matriz quadrada como a seguinte:

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

onde $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$, o que implica que o tensor é simétrico. O tensor total das tensões pode ser decomposto num tensor hidrostático ou de tensões médias, σ_{kk} , envolvendo somente estados puros de tração ou compressão, e num desviador σ'_{ij} , onde as componentes normais são o remanescente da tensão esférica para a total e as tensões de corte são as do tensor das tensões [18],

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

em que δ_{ij} é o delta de Kronecker e σ_m a tensão média. O conceito matemático de extensão é apresentado para descrever as deformações nos corpos sólidos. No caso de se tratar de grandes deformações, usa-se a extensão verdadeira ou logarítmica, ϵ , para medida das extensões, na qual se considera em cada instante o incremento (pequeno) de deformação relativamente ao comprimento instantâneo de referência, ou seja, usando a definição de pequenas deformações,

$$e = \frac{\delta l}{l} \quad (3.3)$$

Em que o incremento instantâneo, δl , é uma quantidade pequena comparada com o comprimento de

referência anterior, l . Nestas condições a deformação total será contabilizada através de,

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{\delta l}{l} \quad (3.4)$$

ou no limite, quando δl for infinitamente pequeno,

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (3.5)$$

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 [18].

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

O tensor das extensões é simétrico. ($\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$).

3.3 Critérios de Plasticidade

Os critérios de plasticidade são essencialmente relações empíricas comprovadas por um conjunto consistente de ensaios experimentais com o propósito de estabelecer a entrada no domínio plástico de um material sujeito a condições de tensão. Maioritariamente, um critério de plasticidade irá depender do completo estado de tensão de um ponto a considerar e será por isso, uma função dos nove componentes de tensão nesse ponto. Genericamente, qualquer critério de plasticidade pode ser expresso pela forma,

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

onde $F(\sigma_{ij})$ é uma função conhecida de estado de tensão, também designada por função limite de elasticidade, e K um parâmetro característico do material a ser determinado experimentalmente [18]. Se a superfície de cedência for representada no espaço das tensões principais, a relação pode ser simplificada,

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = K \quad (3.8)$$

onde que σ_1, σ_2 e σ_3 são as tensões principais. Se o material for considerado isotrópico, o critério de plasticidade pode também ser escrito como uma função dos três invariantes do tensor de tensão que são independentes do sistema de coordenadas [41],

$$F(I_1, I_2, I_3) = K \quad (3.9)$$

em que,

$$I_1 = \sigma_{ij} \quad (3.10)$$

$$I_2 = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ij} \quad (3.11)$$

$$I_3 = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \sigma_{jk} \sigma_{kl} \quad (3.12)$$

Como foi referido anteriormente, o estado de tensão é decomposto em duas partes, tensor hidrostático e tensor desviador. A tensão hidrostática ou média, obtém-se através de uma média aritmética das tensões normais:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3} = \frac{I_1}{3} \quad (3.13)$$

Uma vez que a deformação plástica dos materiais metálicos densos não é afetada pela tensão hidrostática, a função limite de elasticidade será somente em função dos invariantes do tensor desviador das tensões J_1, J_2, J_3 , e como $J_1=0$,

$$F(J_2, J_3) = K \quad (3.14)$$

em que J_2 e J_3 são respetivamente o segundo e o terceiro invariantes do tensor desviador das tensões [18].

$$J_2 = \frac{1}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} \quad (3.15)$$

$$J_3 = \frac{1}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{jk} \sigma'_{ij} \sigma'_{kl} \quad (3.16)$$

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

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \geq k \quad (3.17)$$

onde σ_1 e σ_3 são as tensões principais ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) e k é um valor crítico de tensão de corte obtido experimentalmente. No ensaio de tração uniaxial, k é relacionado com a tensão de cedência do material σ_γ por:

$$k = \frac{\sigma_\gamma}{2} \quad (3.18)$$

Já o segundo autor, von Mises, sugere que a deformação plástica começa quando a energia elástica de distorção atinge um valor crítico. O critério de von Mises é representado da seguinte forma:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = \sigma_\gamma \quad (3.19)$$

A relação entre σ_γ e k para von Mises é igual a:

$$k = \frac{\sigma_\gamma}{\sqrt{3}} \quad (3.20)$$

A representação gráfica destes critérios no espaço tridimensional de Haigh-Westergaard, define as designadas superfícies limite de elasticidade de Tresca e von Mises, sendo o primeiro representado por um prisma hexagonal e o segundo por um cilindro, ambos centrados no eixo $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. Como a superfície de plasticidade de Tresca é circunscrita pela de von Mises, diz-se que Tresca é mais conservativo

pois prevê comportamentos de plasticidade para tensões onde von Mises diz serem elásticos [18].

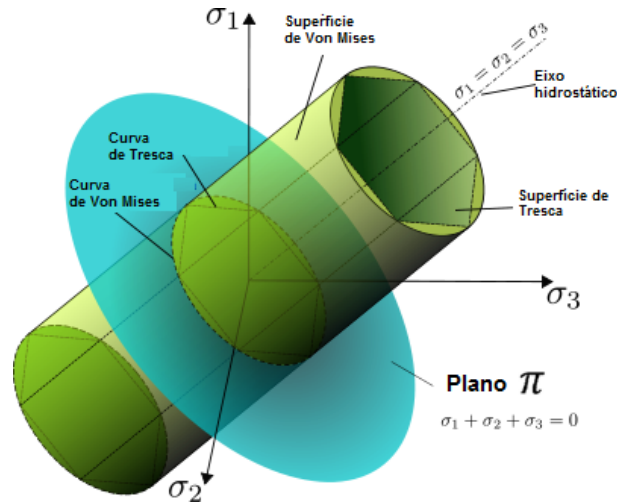


Figura 3.2: Critérios de Tresca e von Mises representados no plano das tensões principais.

Embora os processos de deformação envolvam tipicamente complexos estados de tensão multiaxial, a teoria da plasticidade desenvolve-se apoiada em ensaios simples uniaxiais ou, até, biaxiais. Deste modo, é necessário definir as variáveis capazes de relacionar os estados complexos de deformação e estados uniaxiais, surgindo os conceitos de tensão efetiva e extensão efetiva. Para o critério de von Mises, a tensão efetiva $\bar{\sigma}$ é dada por,

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (3.21)$$

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

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} [(d\bar{\varepsilon}_1 - d\bar{\varepsilon}_2)^2 + (d\bar{\varepsilon}_2 - d\bar{\varepsilon}_3)^2 + (d\bar{\varepsilon}_1 - d\bar{\varepsilon}_3)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (3.22)$$

assim,

$$\bar{\varepsilon} = \int d\bar{\varepsilon} \quad (3.23)$$

3.4 Equações Constitutivas

As equações constitutivas são as equações que relacionam as extensões com as tensões no domínio plástico. Levy em 1871 e von Mises 1913 propuseram que a relação entre os incrementos de extensão plástica, $d\varepsilon_{ij}^p$, e as tensões desviadoras, σ'_{ij} , deveriam relacionar-se do seguinte modo,

$$d\varepsilon_{ij}^p = \sigma'_{ij} d\lambda \quad (3.24)$$

Assim, apresenta-se σ'_{ij} e $d\varepsilon_{ij}^p$ como os incrementos da tensão desviadora e da extensão plástica, respetivamente, e $d\lambda$ como uma constante de proporcionalidade escalar e positiva que não é uma constante do material e que pode variar ao longo da história dos carregamentos [18]. Esta constante é

definida por uma relação de trabalho por unidade de volume que é a seguinte:

$$d\lambda = \frac{3d\bar{\varepsilon}^P}{2\bar{\sigma}} \quad (3.25)$$

onde $d\bar{\varepsilon}^P$ e $\bar{\sigma}$ são a extensão plástica efetiva e a tensão efetiva, respectivamente. Resolvendo em ordem a $d\lambda$, obtém-se a equação de Levy-Mises na seguinte forma:

$$d\varepsilon_{ij}^P = \frac{3d\bar{\varepsilon}^P}{2\bar{\sigma}} \sigma'_{ij} \quad (3.26)$$

Nesta equação, a componente elástica da deformação é desprezada sendo, portanto, só válida no regime plástico. No entanto, num caso mais geral, é usada a equação constitutiva mais ampla, que inclui a deformação elástica e é conhecida como equação de Prandtl-Reuss (Prandtl em 1925 e Reuss em 1930) e que não é, nada menos, que uma generalização da equação de *Levy-Mises*, onde se considera o incremento de extensão total como a soma das componentes dos incrementos das extensões elástica e plástica, sendo escrita da seguinte forma:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^P \quad (3.27)$$

onde o incremento de extensão plástica é obtido pela equação (3.27) e o incremento de extensão elástica é calculado a partir das relações tensão-extensão em domínio elástico também conhecidas por leis de Hooke:

$$d\varepsilon_{ij}^e = \frac{1+\nu}{E} d\sigma'_{ij} + \frac{(1-2\nu)}{E} \frac{d\sigma_{kk}}{3} \delta_{ij} \quad (3.28)$$

sendo E e ν , respectivamente, o módulo de Young e coeficiente de Poisson e, tal como já foi referido, δ_{ij} o delta de Kronecker [18].

Capítulo 4

Método dos Elementos Finitos

4.1 Introdução

Na presente dissertação, a análise numérica em que se aplica o método dos elementos finitos tem como principal objetivo o planeamento dos parâmetros a estudar, e, de forma complementar, os limites da ligação previamente à sua realização. Outra função, é permitir realizar gráficos de correlações entre os resultados obtidos experimentalmente e numericamente. Neste capítulo vai ser realizada uma breve introdução histórica, expondo os conceitos e princípios que se encontram na base deste método, assim como o *software* utilizado (I-FORM).

4.2 Princípios Básicos

O método dos elementos finitos começou a ser desenvolvido no início da década de 1940, sendo Courant o impulsionador através da introdução do conceito de funções contínuas por troços ou intervalos, num subdomínio específico. O progresso que estava a ser patente nos motores de propulsão a jato no final da década de 40, fez com que os engenheiros responsáveis necessitassem de meios de análise sofisticados de estruturas sujeitas a cargas elevadas, consequentes das velocidades superiores. Como nesta altura ainda não havia a computação atual, desenvolveram-se métodos matriciais de análise de força, em que as forças se apresentavam como incógnitas e os deslocamentos eram conhecidos. O método usado é geralmente denominado de método da flexibilidade. Por sua vez, o método dos elementos finitos corresponde ao método dos deslocamentos, em que as variáveis desconhecidas são os deslocamentos e as conhecidas são as cargas aplicadas no sistema. No presente método, o termo deslocamento apresenta um significado mais geral, pois pode representar um deslocamento físico, uma temperatura ou até uma velocidade de escoamento.

Os mais diversos problemas, desde a análise estrutural elástica até ao escoamento de fluidos e a transmissão de calor, aplicaram este método durante as décadas de 1960 até 1970 [42].

O que diferencia este método de outros é a divisão de um determinado domínio, num conjunto de subdomínios mais simples, denominados de elementos finitos [43]. A divisão retratada tem o nome de

discretização, em que qualquer geometria é dividida em componentes mais simples através de pontos nodais, localizados nos vértices destes elementos. As superfícies (2D) ou volumes (3D) originados são conhecidos por malhas, que são tanto mais refinadas quanto maior o número de divisões e conseqüente menor dimensão dos elementos finitos. Quanto maior a discretização, menor será o erro da solução aproximada obtida, face à solução exata. Deste modo, como se procura uma solução mais próxima da exata, são necessários um maior número de elementos e conseqüente dimensão das matrizes envolvidas. Assim, como o tempo de computação e a dimensão das matrizes estão diretamente relacionados, o tempo de execução aumenta. A Figura 4.1. demonstra o processo de discretização referido e a forma como a geometria se aproxima da real à medida que o número de elementos e divisões aumenta.

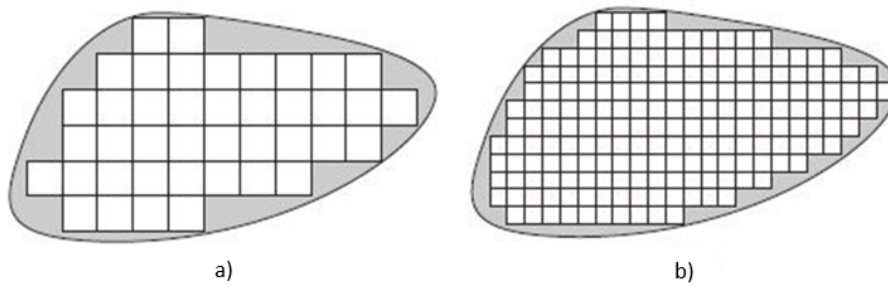


Figura 4.1: Diferentes tipos de malhas [42].

O caso a) representa uma malha grosseira, sendo o caso b) um refinamento, em que se pode claramente visualizar a redução do erro da geometria obtida face à geometria real. Podem ser efetuados outros refinamentos de modo a discretizar mais a malha. No entanto, é necessário encontrar um compromisso entre os requisitos de computação e o erro admissível a apresentar.

4.3 Equações Fundamentais

A simulação de todos os passos do processo ligação foram realizados no *software* I-FORM, onde a formulação do escoamento do método dos elementos finitos é baseada na seguinte função, que representa uma potência,

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

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 de superfície S_T , τ_f e u_r são as tensões de corte por atrito e a velocidade relativa na superfície de contato S_f entre os tubos e as ferramentas (matrizes e mandril).

Os últimos dois termos na equação 4.1 são meramente relevantes para o processo de ligação porque contabilizam o contato de fricção entre o tubo e a chapa a serem ligados. A interação entre estes

dois corpos deformáveis é definida por N_c pares de contato que são identificados por um algoritmo de duas passagens nó-a-segmenro, onde os segmentos são os lados lineares de um segmento quadrilateral. Os símbolos g_n^c e g_t^c representam as diferenças de velocidades normal e tangencial nos pares de contacto, que têm que ser penalizados por um elevado número P , de modo a evitar penetração e assegurar a aderência completa entre superfícies opostas dos tubos e chapas a serem ligados. A penalização da diferença da velocidade tangencial é omitida quando se simula sem atrito ou fricção deslizante. No caso de fricção deslizante, tensões de corte são aplicadas nas superfícies de contato através de um terceiro termo desta equação que envolve trações de superfície T_i [44]. A tensão efetiva $\bar{\sigma}$ e a extensão efetiva $\bar{\epsilon}$ são definidas por,

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}} \quad (4.2)$$

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}'_{ij} \dot{\epsilon}'_{ij}} \quad (4.3)$$

em que, σ'_{ij} , representa o tensor desviador de tensões e $\dot{\epsilon}'_{ij}$, o tensor desviador das velocidades de deformação [18].

4.4 I-FORM

O *software* I-FORM foi desenvolvido nos anos 80, na Secção de Tecnologia Mecânica do Instituto Superior Técnico, com o objetivo de fornecer uma solução quantitativa para problemas relacionados com a enformação plástica dos materiais.

Tal como já foi referido, a simulação efetuada no I-FORM é usada para comparação com os resultados obtidos experimentalmente. Permite verificar a evolução da geometria da peça a qualquer momento do processo, a evolução da carga aplicada com o deslocamento ou com a deformação e, por último, visualizar a distribuição de algumas variáveis de campo, tal como, a tensão, a extensão e a velocidade de deformação.

Devido à simplicidade do estudo a executar, recurso a pré-formas tubulares, onde a deformação é axissimétrica, não se alterando as condições segundo a direção tangencial (θ), optou-se então pelo uso da componente bidimensional do software (I-FORM 2). Este está dividido em três componentes, pré e pós-processamento de dados (Pre2D e Post2D), e uma outra que resolve o problema de forma iterativa (I-FORM 2D).

Aquando o pré-processamento, definem-se as condições iniciais do problema e as respetivas variáveis envolvidas. Em primeiro instante, importam-se as matrizes e a malha das pré-formas através de um *software* alternativo de CAD (Autocad, GID 7.2). Contudo, podiam ser geradas ambas neste componente. De seguida, escolhe-se o material desejado para a malha, os parâmetros de controlo das iterações e solução, as velocidades das matrizes, o atrito entre superfícies, entre outros. Todas estas informações são guardadas nos ficheiros *Die.dat*, *Fem.dat*, *Material.dat* e *Simulation.dat*.

No pós-processamento pode-se verificar toda a evolução do processo, no que diz respeito à ge-

ometria da peça, cargas e deslocamentos e outras variáveis de campo, tal como foi referido no início deste subcapítulo. Todas estas informações são guardadas em ficheiros *fem.neu* e extraídas do *software* como *fem.asc*, no que diz respeito a gráficos. Estes últimos ficheiros são visualizados através do *software* Excel.

Capítulo 5

Desenvolvimento Experimental

5.1 Introdução

Este capítulo visa descrever de uma forma detalhada, a componente experimental constituinte desta dissertação. O desenvolvimento experimental inclui o estudo efetuado sobre a técnica de SBF, o processo de ligação de tubos metálicos de parede fina a chapas por enformação plástica em duas operações, tal como, o projeto, desenvolvimento e fabrico de ferramentas e pré-formas tubulares. Todo a aquisição de dados referentes ao processo estudado foi realizada no Laboratório da Área Científica de Tecnologia Mecânica e Gestão Industrial, presente no Instituto Superior Técnico, sendo depois possível a comparação numérico-experimental.

5.2 Descrição do Processo

O processo proposto permite a ligação de tubos de parede fina a chapas, através da enformação plástica a frio do material. As chapas podem ter diferentes tipos de espessuras e materiais.

A ligação estudada requer duas operações independentes. Num primeiro instante, com recurso a duas matrizes e um mandril, a pré-forma tubular sofre um carregamento parcial segundo o seu próprio eixo, criando uma aglomeração de material na parte de fora da extremidade do tubo e uma redução da espessura do mesmo. Devido à acumulação de material cria-se uma bossa que gera um batente que irá, seguidamente, permitir a colocação da chapa, previamente furada. Para finalizar a ligação do tubo à chapa e com recurso a uma matriz de inversão externa, é efetuada uma inversão na extremidade do tubo que restringe o movimento, garantindo a fixação de ambos.

O caso apresentado na Figura 5.1. retrata a evolução do processo, com a criação da bossa e posterior inversão da extremidade do tubo para fixar o componente. Deve realçar-se que o comprimento final da extremidade reduzida do tubo é extremamente importante pois, caso seja inferior à espessura da chapa, a inversão não será possível.

O estudo experimental está dividido em duas etapas: a primeira, em que é executado o desenvolvimento e fabrico de ferramentas e pré-formas de modo a testar a viabilidade do processo; a segunda,

onde se efetua a aquisição de resultados carga-deslocamento, consoante se variam dois dos parâmetros fundamentais, espaçamento inicial entre matrizes l_{gap} e espessura final da parede do tubo t .

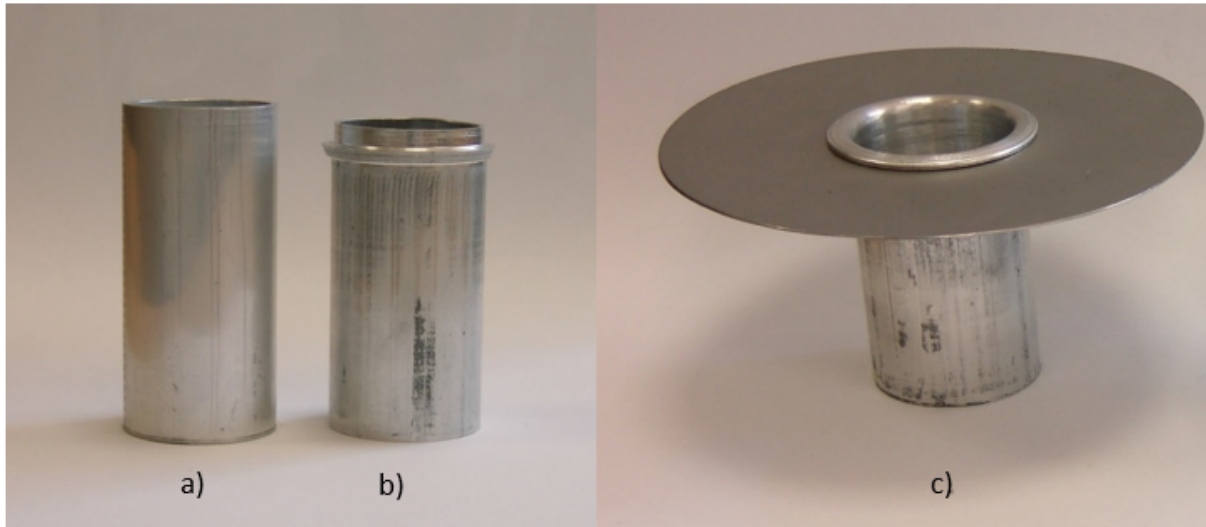


Figura 5.1: Evolução do processo de ligação de tubos de parede fina a chapas. a) Pré-forma inicial. b) Tubo após enformação. c) Inversão externa da extremidade do tubo.

5.3 Material Utilizado

Ao longo do trabalho experimental, optou-se por usar nos tubos de parede fina, a liga de alumínio AA6063T5 com 16 mm de raio exterior r_0 e 1.5 mm de espessura t_0 . Este material teve de ser caracterizado, pois é fundamental, no que diz respeito ao desenvolvimento numérico posterior, podendo comprometer a correlação numérico-experimental. Em relação às chapas usaram-se vários tipos de materiais, como aço carbono (DC04), titânio e policarbonato.

5.3.1 Caracterização do material

De modo a realizar a caracterização do material, foi efetuado um ensaio de compressão uniaxial com pequenos discos cilíndricos, empilhados de forma a criar um provete válido tal como se pode observar na Figura 5.2. Foram usados quatro discos de alumínio AA6063T5, com um diâmetro inicial d_0 de 17 mm e uma espessura aproximada de 1.5 mm, perfazendo uma altura inicial h_i do provete de 6 mm. Durante o ensaio, utilizou-se estearato de zinco, como lubrificante, nas superfícies em contacto com os pratos da prensa, de forma a minimizar o efeito de barril durante a compressão.

Este ensaio permitiu obter a lei aproximada de comportamento mecânico deste material, ou seja, a curva de tensão efetiva–extensão efetiva (Eq. 5.1)]. O ensaio foi realizado à temperatura ambiente numa máquina de ensaios (Instron SATEC 1200 kN) com uma velocidade de deslocamento de 10 mm/min. A curva de tensão-extensão está representada na Figura 5.3. e corresponde a uma aproximação de uma curva de Ludwik – Hollomon.

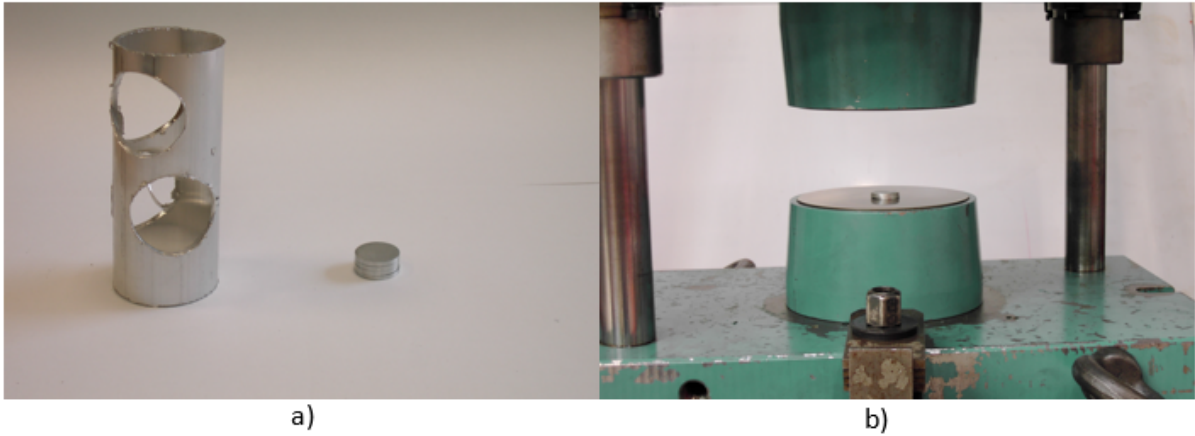


Figura 5.2: Ensaio de compressão uniaxial do alumínio AA6063T5. a) Discos cilíndricos obtidos por furação de um tubo. b) Provete deformado.

$$\bar{\sigma} = 340.2\bar{\epsilon}^{0.158} \quad (5.1)$$

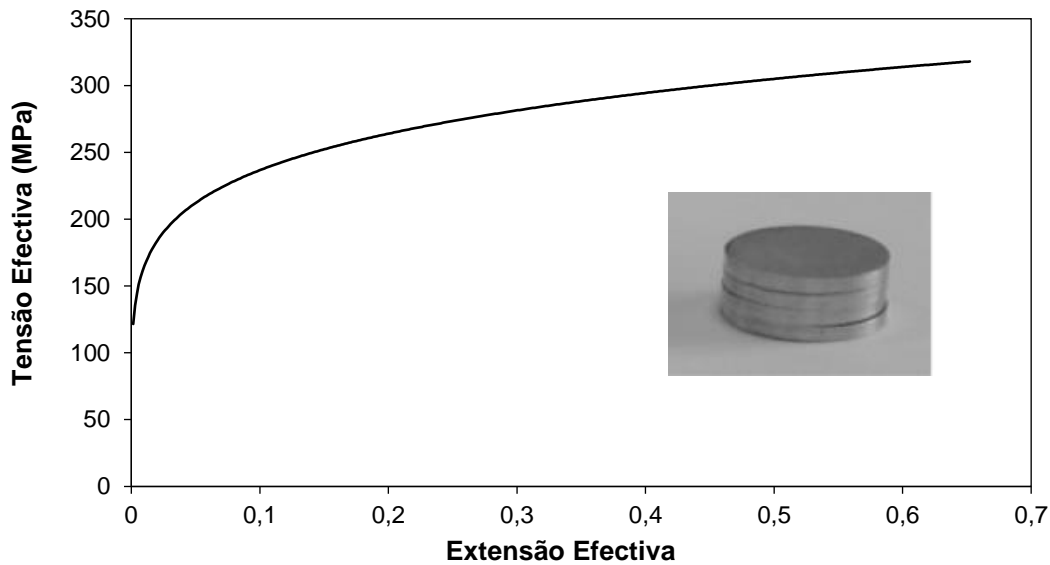


Figura 5.3: Curva extensão efetiva-tensão efetiva do alumínio AA6063T5.

5.3.2 Carga Crítica de Instabilidade

A carga crítica de instabilidade é o valor de carga a partir do qual ocorre instabilidade local nos tubos de alumínio utilizados. Para o estudo em causa e visto que se pretende evitar a ocorrência deste fenómeno, é muito importante conhecer o valor a partir do qual este sucede. De modo a obter este valor, efetua-se um ensaio de compressão axial numa pré-forma tubular, realizando-se uma aquisição

de dados relativos à evolução da carga em função do deslocamento.

Neste caso, foram efetuados dois ensaios através de duas pré-formas diferentes, com o comprimento inicial l_0 de 65 e 75 mm entre os pratos paralelos da máquina de ensaios anteriormente mencionada. Os testes foram realizados com uma velocidade de deslocamento de 10 mm/min, não havendo qualquer constrangimento lateral.

Com base na Figura 5.4 pode verificar-se que a carga sobe inicialmente até atingir um valor próximo de 25.5 kN, originando a primeira instabilidade. Depois deste ponto, onde o deslocamento corresponde a 0.5 mm, o fenómeno torna-se cíclico, com a ocorrência de mais instabilidades, representadas pelos picos existentes. A carga crítica de instabilidade F_{cr} tem o valor de cerca de 25.5 kN.

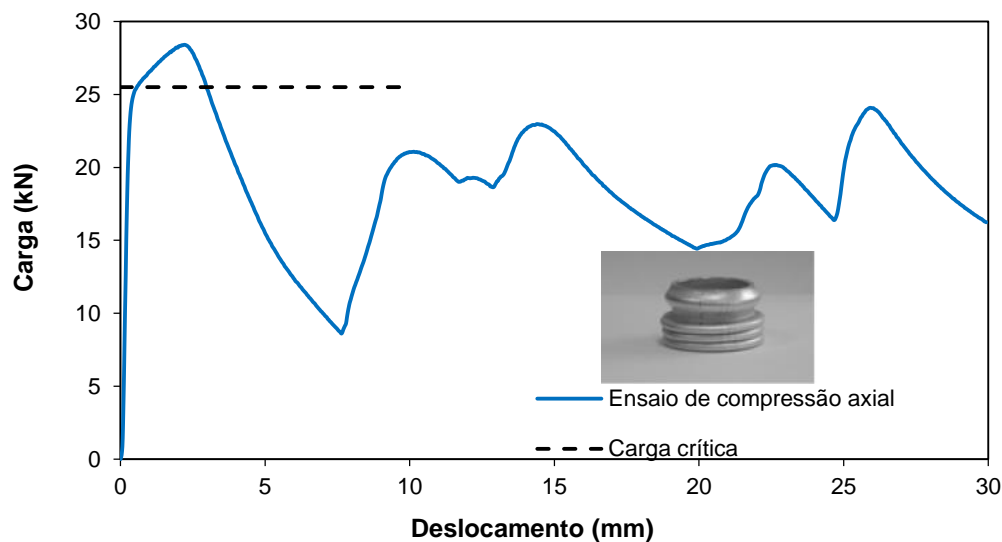


Figura 5.4: Curva carga-deslocamento e carga crítica de instabilidade para a compressão axial de tubos de alumínio AA6063T5 entre pratos planos.

5.4 Equipamentos, Ferramentas e Pré-formas

Neste subcapítulo é realizada uma breve apresentação de uma série de máquinas e ferramentas disponíveis no Laboratório da Área Científica de Tecnologia Mecânica e Gestão Industrial do Instituto Superior Técnico, fazendo-se referência a algumas especificações técnicas.

5.4.1 Equipamentos, Ferramentas e Pré-formas

De modo a alcançar as dimensões para as pré-formas desejadas utilizaram-se vários varões de alumínio AA6063T5 e duas máquinas distintas. Em primeiro instante, um serrote de fita, de marca alemã OPTIMUM e modelo S 181 g, que utiliza um motor elétrico de 750 W, possui três modos de velocidade (40 até 80 m/min) e um sistema de lubrificação integrado. Em segundo instante, um torno mecânico, de marca alemã QUANTUM e modelo D 320X920 SG, com uma potência de 1.1 KW, uma

velocidade variável entre 10 e 2500 rpm e um sistema central de guias de lubrificação. Em primeiro lugar, foi efetuado um corte de forma grosseira com o serrote de fita de modo a reduzir o comprimento do tubo, e depois, de forma mais precisa, no torno mecânico até se atingir a dimensão pretendida.

Ao longo dos ensaios, testes e outras aplicações realizadas, utilizou-se uma máquina de ensaios e uma prensa auxiliar. Uma prensa auxiliar de acionamento manual e com uma menor capacidade, destinada a retirar as pré-formas das matrizes depois de efetuada a ligação. E uma prensa principal, uma máquina de ensaios controlada por *software* e com uma capacidade superior, com o objetivo de aquisição e pós-processamento de dados.

A prensa auxiliar é de marca dinamarquesa STENHOJ modelo CP 40, com uma capacidade de 400 KN. A máquina de ensaios, que já tinha sido falada num sub-capítulo anterior sobre a caracterização do material é de marca americana INSTRON, da série SATEC modelo 1200 kN, com uma capacidade máxima de 1200 kN, velocidade até 200 mm/min e um sistema integrado de sensores de carga e deslocamento. O *software* informático Blue Hill permite a escolha dos parâmetros a usar durante os ensaios.



Figura 5.5: Máquina de ensaios INSTRON 1200 kN utilizada no procedimento experimental com aquisição de dados.

5.4.2 Ferramentas

Durante o desenvolvimento experimental, utilizaram-se as seguintes ferramentas: matriz superior, inferior e mandril num primeiro instante. Todos estas ferramentas são feitas de aço ferramenta. O

objetivo do mandril é manter inalterada a secção interior de cada um dos tubos, impedindo a enformação no sentido radial interior. As dimensões são apresentadas em anexo nos desenhos técnicos. A figura seguinte mostra todos os componentes envolvidos na primeira fase da ligação, a enformação plástica a frio através da técnica de SBF.

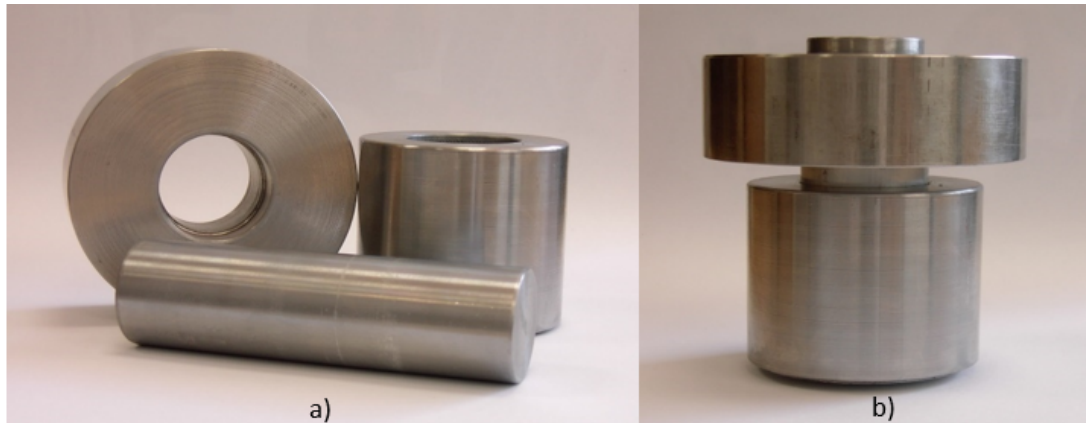


Figura 5.6: Ferramentas responsáveis pela Enformação. a) Matrizes e mandril utilizados no desenvolvimento experimental. b) Montagem.

Num segundo instante, é necessário trocar as ferramentas a usar, mais uma vez feitas de aço ferramenta. Neste caso, utiliza-se a matriz inferior anterior e uma matriz de inversão externa. A última fase da ligação representa a inversão externa da extremidade do tubo enformada de forma a fechar a ligação.

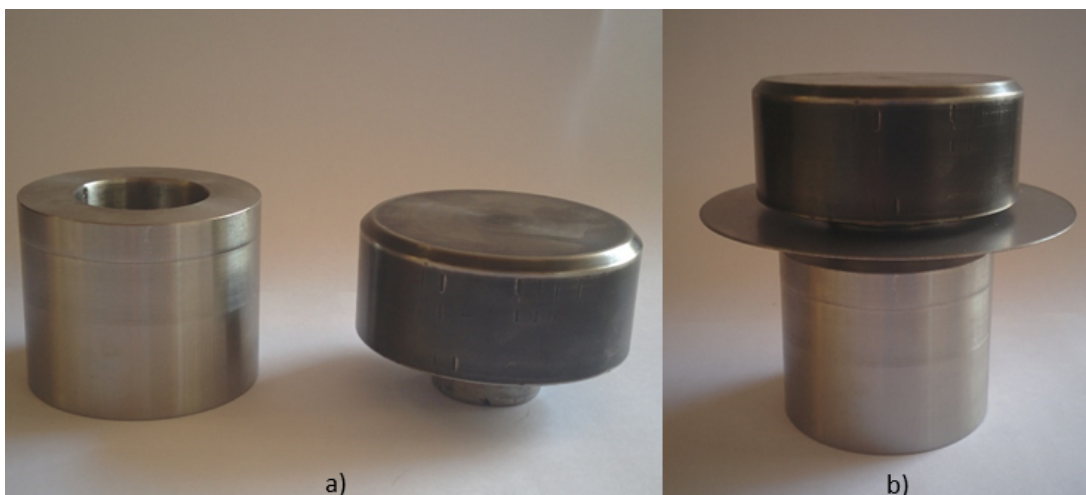


Figura 5.7: Ferramentas responsáveis pela Inversão Externa. a) Matrizes utilizadas no desenvolvimento experimental. b) Montagem.

5.4.3 Pré-formas

As pré-formas utilizadas foram cortadas a partir de um varão comercial da liga de alumínio AA6063T5 que é obtido por extrusão de material, apresentando um comprimento inicial de 5 m.



Figura 5.8: Pré-formas utilizadas nos ensaios de SBF. Valor crescente de l_0 da esquerda para a direita, com valor inicial de 60 e final de 65 mm.

5.5 Procedimento Experimental

A componente experimental está dividida em duas operações, tal como já foi referido, tendo cada uma destas um objetivo diferente. A primeira operação está exclusivamente focada na técnica de SBF de tubos de parede fina através de uma compressão parcial da espessura da parede ao longo da sua direção longitudinal. Todos os ensaios são efetuados à temperatura ambiente, com uma velocidade de deslocamento igual à dos ensaios de caracterização, ou seja, 10 mm/min. O procedimento desta operação é a seguinte:

1. Preparação das pré-formas, maquinadas a partir de varões até à dimensão desejada;
2. Montagem do conjunto:
 - i) Introdução do mandril no interior da pré-forma;
 - ii) Introdução da pré-forma no interior da matriz inferior e colocação da matriz superior no topo destas;
3. Posicionamento do prato superior da máquina de ensaios, até se obter o espaçamento necessário que permita a colocação do conjunto anteriormente montado;
4. Colocação do conjunto na máquina de ensaios, centrado em relação ao eixo de carga da mesma;
5. Reposicionamento do prato superior até que se verifique o contato com a matriz superior;
6. Programação dos parâmetros de ensaio no *software* informático;
7. Realização do ensaio;
8. Remoção do conjunto da matriz superior, mandril;

9. Pós-processamento dos dados adquiridos.

A Figura 5.9. apresenta uma representação esquemática da posição inicial e final das ferramentas com um detalhe que mostra o material a aglomerar e formar a bossa pretendida no final do processo, ou seja, no momento em que se alcança o espaçamento final entre matriz superior e inferior l_{gap}^f definido como constante e igual 2 mm. A matriz superior é desenhada e fabricada para um raio exterior r_0 e espessura de parede t_0 específicos das pré-formas.

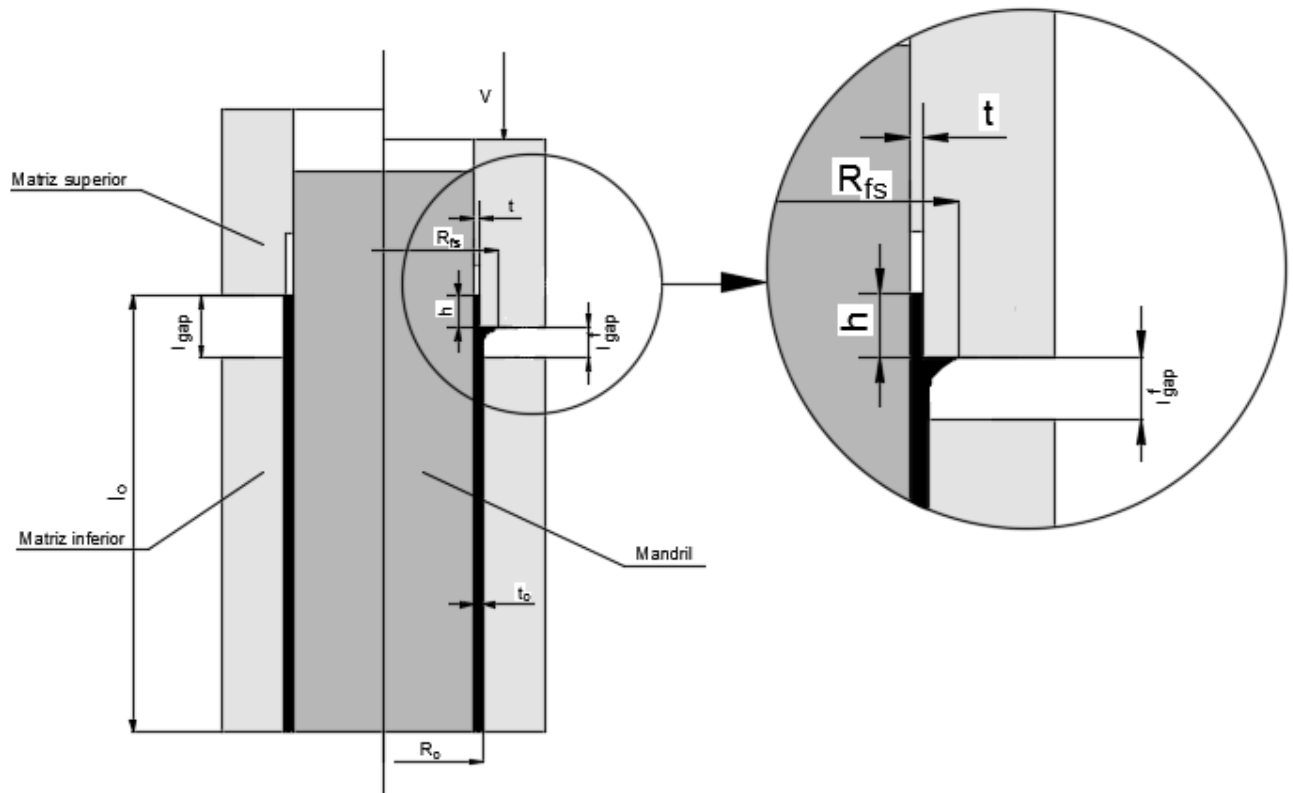


Figura 5.9: Principais parâmetros do processo de SBF de tubos de parede fina através de uma compressão parcial perpendicular à espessura destes ao longo da direção longitudinal.

Os principais parâmetros a estudar são então:

- I. O raio exterior da matriz superior r_0 e a espessura da parede t_0 dos tubos;
- II. O espaçamento inicial l_{gap} entre a matriz superior e inferior;
- III. O espaçamento final $l_{gap}^f = l_{gap} - h$, onde h é o comprimento final da extremidade reduzida;
- IV. A espessura final da parede t que resulta da compressão parcial da extremidade do tubo ao longo da direção longitudinal;
- V. O raio da flange R_{fs} que é criado à medida que o material se aglomera na bossa.

De modo a completar a ligação, falta agora realizar a segunda operação, a de inversão externa da extremidade do tubo enformada. Nesta operação, são necessárias duas matrizes, a matriz inferior da primeira operação e uma segunda que realiza a inversão. A velocidade de deslocamento mantém-se no mesmo valor.

O procedimento é o seguinte:

1. Montagem do conjunto:
 - i) Introdução da chapa na extremidade do tubo enformada;
 - ii) Introdução da matriz de inversão externa no topo da extremidade do tubo enformada.
2. Posicionamento do prato superior da máquina de ensaios, até se obter o espaçamento necessário, que permita a colocação do conjunto anteriormente montado;
3. Colocação do conjunto na máquina de ensaios, centrado em relação ao eixo de carga da mesma;
4. Reposicionamento do prato superior até que se verifique o contato com a matriz superior;
5. Programação dos parâmetros de ensaio no *software* informático;
6. Realização do ensaio;
7. Remoção do conjunto de matrizes;
8. Pós-processamento dos dados adquiridos.

A Figura 5.10 apresenta uma representação esquemática da posição inicial e final das ferramentas com um detalhe que mostra o fecho da ligação para três casos distintos. As variações entre cada caso devem-se à mudança do raio da matriz de inversão.

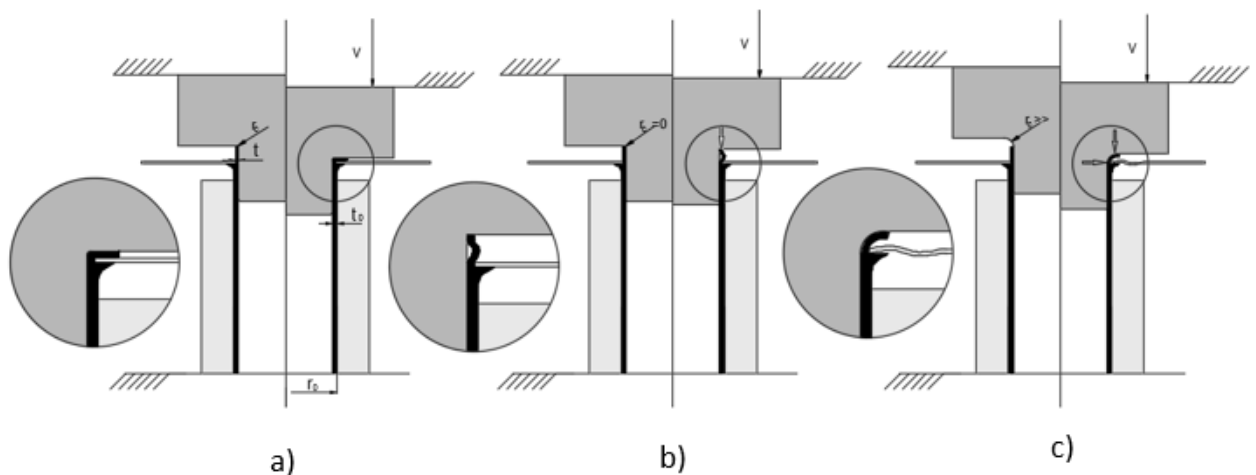


Figura 5.10: Fixação de tubos a chapas através do processo de ligação proposto. a) Fecho mecânico através de compressão axial da extremidade do tubo através de uma matriz de inversão. b) Situação não desejada resultante de um raio da matriz de inversão r_c muito reduzido. c) Situação não desejada resultante de um raio da matriz de inversão r_c muito elevado.

Neste processo de ligação, a variável chave para o seu funcionamento é o raio da matriz de inversão r_c ser igual a 0.3 mm (Figura 5.10a). Verificou-se que para valores muito reduzidos de r_c ($r_c \cong 0$ mm) surge uma instabilidade local na extremidade do tubo e para valores muito elevados de r_c ($r_c > t$) pode induzir empeno na placa que está ligada ao tubo. Ambas as situações não se enquadram no processo de ligação a estudar na presente dissertação e estão esquematizadas na Figura 5.10b e 5.10c.

5.6 Ensaios Realizados

5.6.1 Processo de enformação do tubo

Ao longo da componente experimental efetuaram-se inúmeros ensaios para determinar a influência do espaçamento inicial l_{gap} entre matriz superior e inferior, assim como a espessura final da parede t no processo de formação da bossa desejada e conseqüente ligação de tubo com chapa. Os ensaios foram realizados com aquisição de carga.


Tabela 5.1: A gama de valores dos parâmetros de processo utilizados nos ensaios em relação ao processo de SBF.

$r_0(mm)$	$t_0(mm)$	$l_{gap}^f(mm)$	$t(mm)$	$l_{gap}(mm)$	$l_0(mm)$
16	1.5	2	0.5-1.25	5-16	60-71

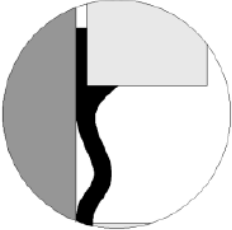
De modo a qualificar os resultados obtidos e criar uma gama de trabalho face à variação dos parâmetros do processo, criou-se uma tabela que apresenta os diferentes modos de deformação em função do espaçamento inicial l_{gap} entre matriz superior e inferior, e também, espessura final da parede t .

Tabela 5.2: Sumário experimental dos modos de deformação observados em função do espaçamento inicial l_{gap} e da espessura da parede final t .

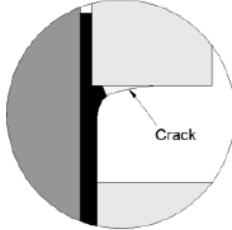
		l_{gap} (mm)								
		5	6	7	8	9	10	12	14	16
t (mm)	1.25	I	I	I	I	I	I	III	III	II
	1.0	I	I	I	I	I	II	II	II	II
	0.75	I*	I	I	II	II	II	II	II	II
	0.5	I*	I*	II	II	II	II	II	II	II



Modo I



Modo II



Modo III

A Figura 5.11 representa a evolução da deformação de um conjunto de tubos com a mesma espessura final de parede $t = 1.25$ mm, onde o parâmetro l_{gap} vai aumentando.



Figura 5.11: [Deformação plástica das pré-formas tubulares consoante a variação do espaçamento inicial entre matrizes l_{gap} . Valor crescente de l_{gap} da esquerda para a direita, com valor inicial de 5 e final de 16.

Como se pode visualizar na Tabela 5.2, existem três modos de deformação diferentes. O modo de deformação I é o ideal para a ligação a efetuar. Neste caso, é criada uma aglomeração de material formando uma bossa que será o batente onde se irá colocar a chapa e posteriormente fechar a ligação com a matriz de inversão. Existe também, um modo de deformação I* que corresponde a casos em que a aglomeração de material é insuficiente para a posterior ligação.

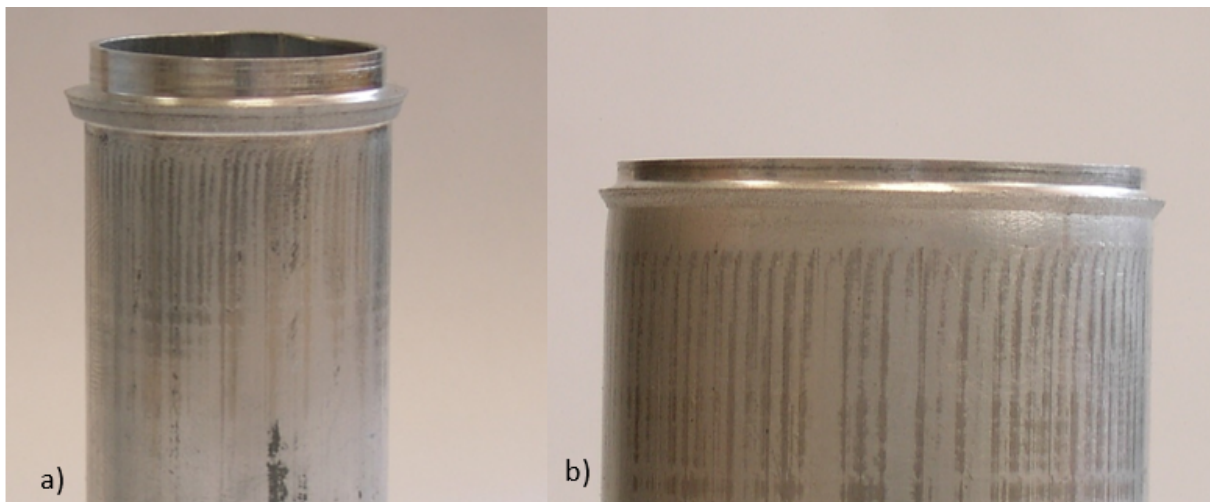


Figura 5.12: Modo de deformação I e I*. a) $l_{gap}=7$ mm e $t=1$ mm. b) $l_{gap}=5$ mm e $t=0.75$ mm.

Em relação ao modo de deformação II, pode-se visualizar o aparecimento de uma instabilidade local, o que não é o pretendido para o processo de ligação em estudo. Por fim, o modo de deformação III, surge unicamente em dois casos da espessura final da parede t igual a 1.25 mm e corresponde ao aparecimento de uma fissura na zona da aglomeração de material. Ainda com base na Tabela 5.2, pode-se identificar um padrão a partir do qual o processo de enformação passa do modo I para II, que corresponde ao rácio entre o espaçamento inicial l_{gap} e a espessura final do tubo t . De facto, para valores de $\frac{l_{gap}}{t} \geq 10$ o volume de material aglomerado é muito elevado e como a força de compressão aumenta e ultrapassa a força de instabilidade crítica $F_{cr}= 25.5$ kN, o fenómeno de instabilidade local é desencadeado.

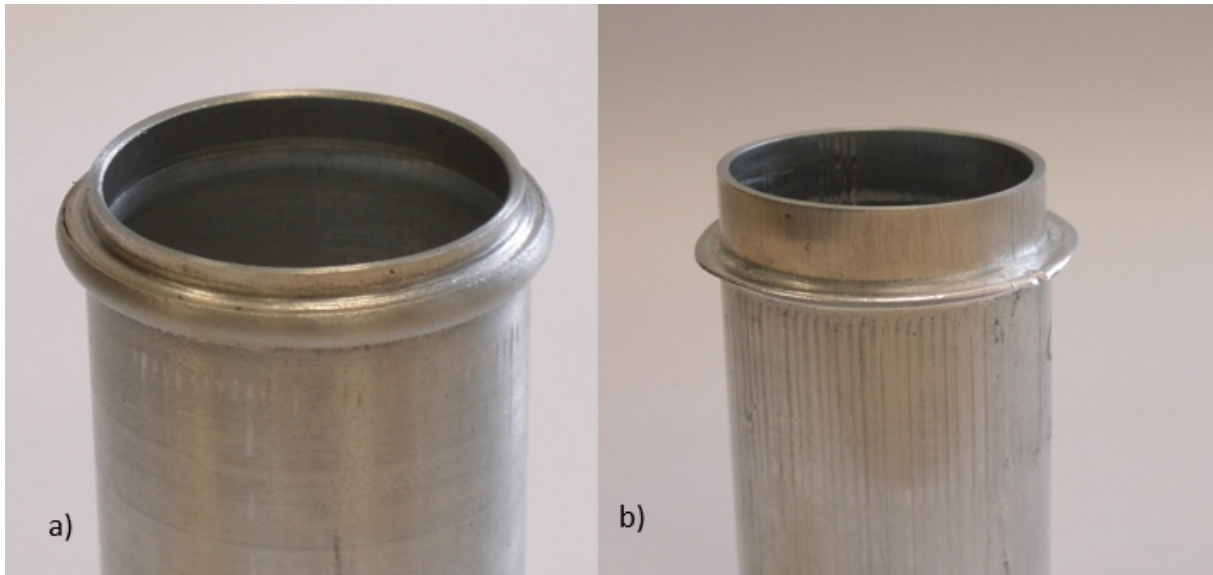


Figura 5.13: Modo de deformação II e III. a) $l_{gap}=10$ mm e $t=1$ mm. b) $l_{gap}=12$ mm e $t=1.25$ mm.

5.6.2 Processo de fecho de ligação

Depois de encontrada a gama de trabalho, escolheram-se os mais adequados para finalizar a ligação com a inversão da extremidade do tubo enformado. Foram efetuados vários ensaios onde se usaram diferentes tipos de chapas, assim como, tubos enformados com diferentes espaçamentos iniciais l_{gap} . A tabela seguinte representa os casos em foco, assim como, os parâmetros mais importantes para realizar o fecho da ligação.

Tabela 5.3: Valores obtidos para alguns parâmetros importantes antes da realização da inversão externa.

	$l_{gap}(t=1.25 \text{ mm})$			
	7	8	9	10
$h(\text{mm})$	3.2	4.15	4.6	5.3
$R_{fs}(\text{mm})$	17.25	17.55	17.9	18.15

Optou-se por estudar os extremos destes casos pois, apesar de haver uma discrepância de valores, todos permitem o fecho da ligação. O raio da flange R_{fs} apresenta valores superiores ao do raio inicial do tubo r_0 , permitindo assim servir de batente para efetuar o fecho da ligação. Já o comprimento final da extremidade reduzida é muito superior à espessura das chapas usadas (0.7-2.0 mm). Na figura seguinte, podemos visualizar duas ligações diferentes de tubos de alumínio com chapas de aço carbono, com uma espessura final da parede t diferentes, assim como espaçamentos iniciais l_{gap} .

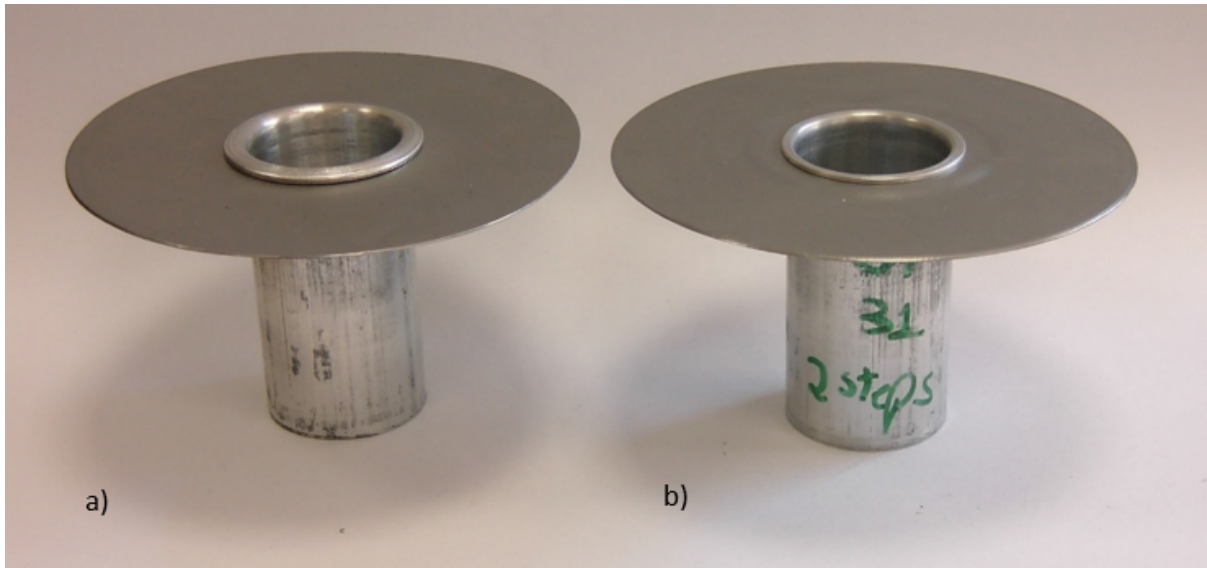


Figura 5.14: Ligação mecânica entre diferentes tubos enformados de alumínio e iguais chapas de aço carbono. a) Ligação com l_{gap} de 10 e $t=1.25$ mm. b) Ligação com l_{gap} de 7 mm e $t=1.25$ mm.

Previamente à realização das ligações, o tubo enformado que surge na Fig 5.14b) apresentava comprimento final da extremidade reduzida h inferior em relação ao tubo da Fig 5.14a). A discrepância de valores de h poderia levar ao empeno da chapa durante a inversão externa, caso este fosse inferior à espessura da chapa. Contudo, e visto os valores serem consideráveis, tal não sucedeu. As chapas apresentavam a mesma espessura (2 mm). Em termos visuais, a ligação a) na Figura 5.14, aparenta ser mais robusta que a b) devido à maior quantidade de material que é visível no zona do fecho mecânico depois de realizada a inversão externa.

De seguida são apresentados alguns cortes de ligações finalizadas de modo a exibir a influência do raio de canto na forma da chapa. Para o caso de raio de canto maior e igual a 3 mm é visível o empeno na chapa, já para o raio de canto inferior e igual a 0.3 mm é observável que a chapa está na horizontal e sem defeitos, tal como se pretende. Também é apresentado o caso para um raio de canto igual a 0 mm.

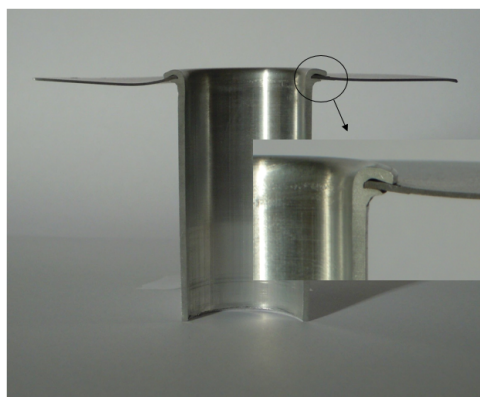


Figura 5.15: Fotografia de corte de uma ligação realizada com uma matriz de inversão de raio de canto igual a 3 mm.

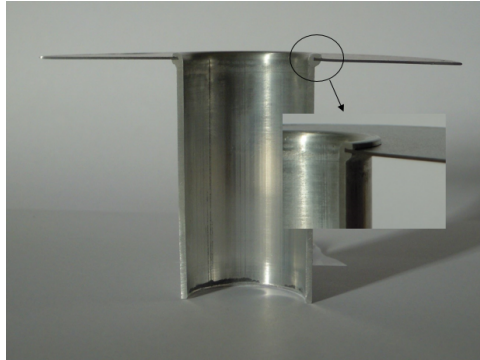


Figura 5.16: Fotografia de corte de uma ligação realizada com uma matriz de inversão de raio de canto igual a 0.3 mm.

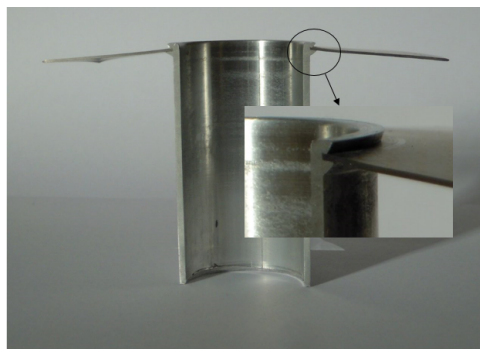


Figura 5.17: Fotografia de corte de uma ligação realizada com uma matriz de inversão de raio de canto igual a 0 mm.

Capítulo 6

Desenvolvimento Numérico

6.1 Introdução

O Desenvolvimento Numérico descreve o trabalho efetuado de simulação numérica através do método elementos finitos para a ligação em estudo. Com auxílio do software informático CAD e I-FORM recriou-se todo o processo de modo a simular as duas operações constituintes da ligação em causa. Esta análise é fundamental, pois permite, analisar as principais variáveis de campo, como tensão, extensão e velocidade de deformação, assim como identificar as zonas críticas. Posteriormente, é efetuada uma comparação numérico-experimental do processo. A simulação numérica desempenha um papel importante, não só pelo referido, mas também pelo fato de ser usada na conceção de qualquer projeto. Numa primeira abordagem utiliza-se para prever a viabilidade de um teste experimental, e, deste modo, economizar tempo e custo, quando as simulações revelam que o processo é inexecutável.

6.2 Refinamento da Malha

Num estudo numérico a discretização da malha apresenta uma enorme importância, onde a dimensão dos elementos define o refinamento da mesma e a sua aproximação à realidade. O software responsável pela simulação I-FORM recorre a um método iterativo, em que à medida que a complexidade da malha aumenta, o tempo de computação também cresce. O refinamento é extremamente importante no sucesso ou não da simulação. Uma malha muito refinada apesar de recriar uma geometria praticamente perfeita, dificulta a computação devido à maior complexidade das operações matriciais. Já uma malha com um refinamento grosseiro facilita a computação, mas devido às dimensões dos elementos proporciona o aparecimento de um erro associado ao baixo número de elementos. Deste modo, procurou-se uma solução de compromisso onde a malha recrie o melhor possível o caso em estudo e apresente tempos de computação e erros aceitáveis.

6.2.1 Pré-formas e Ferramentas

Inicialmente efetuou-se a malha das pré-formas no I-FORM 2, através da opção de criação da mesma com base em Templates. Esta opção apresenta inúmeras geometrias onde se seleciona uma e se introduz as coordenadas da peça em causa. Escolheu-se a geometria tubular e introduziram-se as coordenadas relativas à altura, raios interior e exterior e finalmente os raios das extremidades (H1,L1,L2,R1,R2). A malha criada era uniformemente distribuída ao longo da pré-forma, o que não se pretendia visto que a deformação é essencialmente na extremidade do tubo e não ao longo desta. Com esta primeira malha as deformações impostas não eram aceitáveis. Assim, houve necessidade de criar um refinamento personalizado, onde a zona sujeita a maiores deformações, a extremidade superior do tubo, era mais discretizada em relação às restantes. Deste modo, ao refinar a malha na zona critica também se aumentou o número de elementos envolvidos. A malha das pré-formas foi então personalizada no *software* GID 7.2 e introduzida posteriormente no I-FORM 2, apresentando 600 elementos tetraédricos. O estudo é efetuado em duas dimensões devido à existência de uma simetria em relação ao eixo do tubo.

Em relação às ferramentas, criaram-se as matrizes e mandril interno com as dimensões idênticas às utilizadas experimentalmente. Em contraste com as pré-formas tubulares, as ferramentas são consideradas rígidas, não se considerando qualquer deformação elástica. As ferramentas são geradas no *software* Autocad e depois importadas para o I-FORM. Com base na figura seguinte, podemos visualizar a malha e respetivas ferramentas. É visível a diferença na discretização da malha, onde a zona de maior refinamento apresenta 540 elementos e a zona mais grosseira apenas 60 elementos.

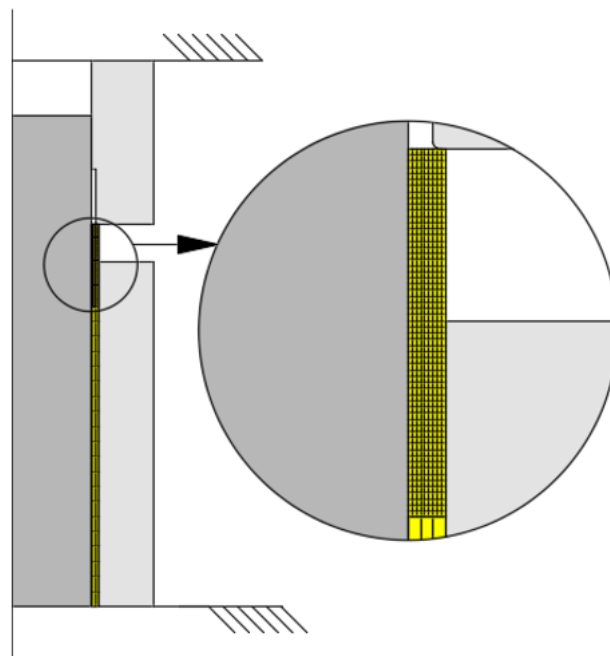


Figura 6.1: Esquema representativo da operação de SBF com ênfase na discretização da malha das pré-formas tubulares e ferramentas utilizadas nas simulações numéricas. Detalhe na zona mais discretizada da malha.

6.2.2 Chapa

Tal como nas pré-formas tubulares, a malha da chapa foi criada através do software GID 7.2 e depois importada para o I-FORM 2. A chapa apresenta diferentes discretizações ao longo do seu comprimento tal como nas pré-formas. A zona onde é efetuado o fecho da ligação é o local onde a malha é mais refinada devido às elevadas deformações sentidas. Esta malha é introduzida, tal como seria de esperar, depois da operação de SBF ser realizada, ou seja, quando a malha da pré-forma já esta deformada. A malha da pré-forma deixou de ter o número de elementos iniciais e, devido às diversas operações de *Remesh*, passou a ter 2000 elementos na zona mais discretizada. Neste caso e tal como podemos visualizar através da figura seguinte, a malha da chapa é definida por 416 elementos, sendo que 160 representam a parte mais discretizada e 246 a parte grosseira.

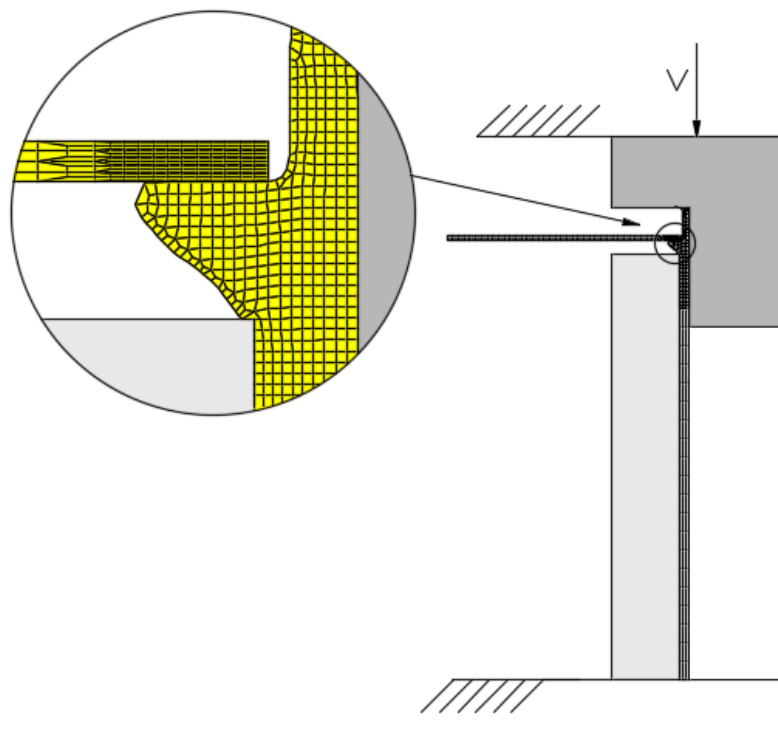


Figura 6.2: Esquema representativo da operação de fecho da ligação com ênfase na discretização da malha da chapa. Detalhe na zona mais discretizada da malha.

6.3 Parâmetros do Processo

A evolução da simulação é realizada de forma incremental, determinando-se o intervalo de tempo desejado para cada incremento (*Step*). Para uma correta simulação do processo a executar é necessário definir as variáveis no pré-processamento. Depois de introduzidas as malhas e ferramentas no I-FORM 2, com as respetivas condições de fronteira, são introduzidos os principais parâmetros como o tipo de geometria, o *Step* inicial e final, o incremento de tempo entre os *Steps*, o incremento para salvar ficheiros de *Restart*, entre outros. Normalmente, quanto menor o intervalo de tempo para cada *Step*,

mais demorada e precisa irá ser a deformação.

Depois de introduzidos estes parâmetros, caracteriza-se o material que se pretende usar na malha durante a simulação numérica. A caracterização do material é obtida através do estudo realizado no capítulo anterior, com base no ensaio de compressão uniaxial. Posteriormente, seleciona-se o modo de solução e iteração para o problema, onde se escolheu a opção de iteração direta com número máximo de iterações igual a cinquenta. Seguidamente, definem-se os parâmetros de contato e fricção, onde no contato entre ferramentas os nós podem ser libertados. No entanto, no caso do contato entre os objetos não é permitida a libertação entre nós e não existe escorregamento entre interfaces.

Por fim, não é selecionado qualquer parâmetro de refinamento de malha e é atribuído exclusivamente à matriz superior (tanto no caso da operação de SBF como da inversão externa) a velocidade de -1 mm/s ao longo do eixo ZZ. Todas as matrizes e o próprio mandril apresentam um fator de atrito de 0,3.

6.4 Simulações Numéricas Realizadas

No caso das simulações numéricas efetuadas, podem-se identificar nas tabelas seguintes todos os casos estudados, tanto para a operação de enformação, como para a operação de fecho da ligação, a inversão externa. Neste capítulo, apenas vão ser apresentadas algumas das simulações realizadas e não todas, em virtude de existirem três grupos distintos, tanto para a enformação plástica como para a inversão externa.

Tabela 6.1: Principais parâmetros da simulação de SBF realizada.

Operação	l_{gap} (mm)	t (mm)
Enformação Plástica	7	0.5
	7	0.75
	5,7,10,12	1
	7,10,12,14	1.25

Na operação de Inversão Externa apenas se realizarem as seguintes simulações pelo fato de serem as que apresentaram melhores condições para um fecho bem-sucedido da ligação.

Tabela 6.2: Principais parâmetros da simulação de inversão externa realizada.

Operação	r_c (mm)	$l_{gap}(t=1 \text{ mm})$	$l_{gap}(t=1.25 \text{ mm})$
Inversão Externa	0	7	10
	0.3		
	3		

Tal como foi retratado no capítulo do Desenvolvimento Experimental, também se visualizaram os mesmos três modos de deformações ao longo do processo de enformação tubular na simulação numérica.

6.4.1 Deformação pretendida

A Figura 6.3 é referente ao modo de deformação I que está representado pelo caso com um espaçamento inicial $l_{gap} = 7$ mm e uma espessura final de parede $t = 1$ mm. A fotografia do tubo enformado com a bossa obtida através da aglomeração de material surge na parte a) da figura e a evolução da malha ao longo do processo de enformação na parte b). O comprimento final da extremidade reduzida h é aceitável para a próxima fase da ligação, assim como o raio da flange R_{fs} . A enformação na malha é essencialmente entre a zona de contato com a matriz superior e inferior.

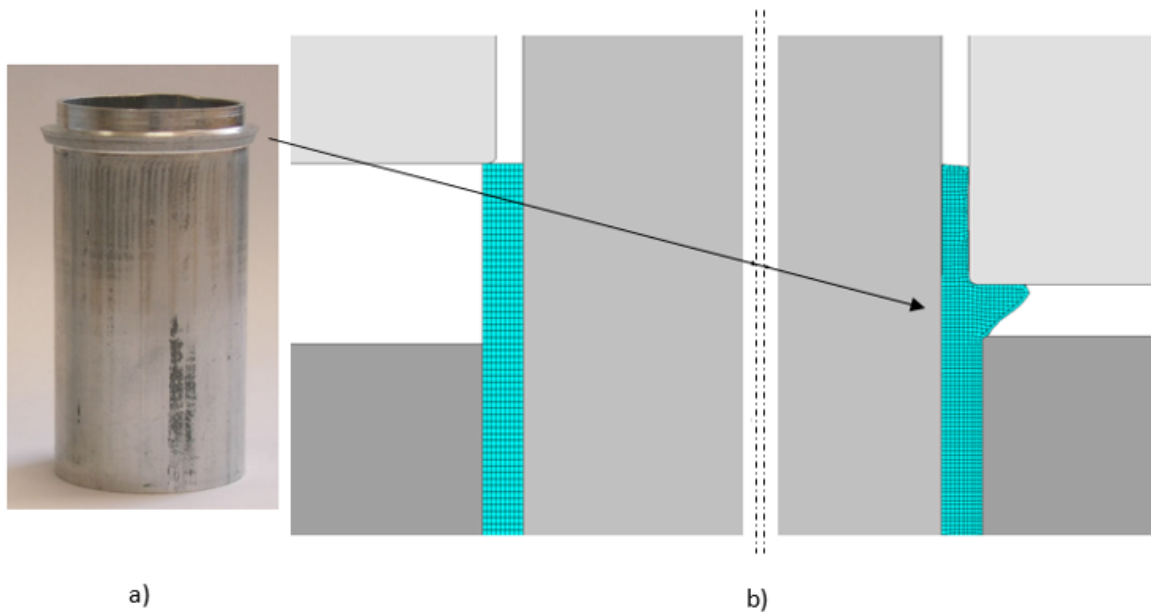


Figura 6.3: Simulação numérica do modo de deformação I para o caso com $l_{gap} = 7$ mm e $t = 1$ mm. a) Fotografia da pré-forma. b) Malha inicial e final com corte parcial das matrizes e mandril.

6.4.2 Instabilidade Local

Para o estudo em causa não se pretende que o fenómeno da Instabilidade Local seja utilizado neste novo tipo de ligação. Contudo, e tal como foi apresentado no Desenvolvimento Experimental, para valores superiores ou iguais a dez no rácio de $\frac{l_{gap}}{t}$, este acaba por acontecer.

Com base na Figura 6.4, pode-se visualizar uma fotografia do tubo instabilizado na parte a) e a evolução da malha na parte b) para o caso com um espaçamento $l_{gap} = 10$ mm e uma espessura final da parede do tubo $t = 1$ mm que representa o modo de deformação II. Esta simulação é representativa do primeiro caso de Instabilidade tendo em conta o rácio $\frac{l_{gap}}{t}$ retratado em cima. A zona onde a malha não está em contato com o mandril é visível, assim como a zona de aglomeração de material que forma uma dobra.

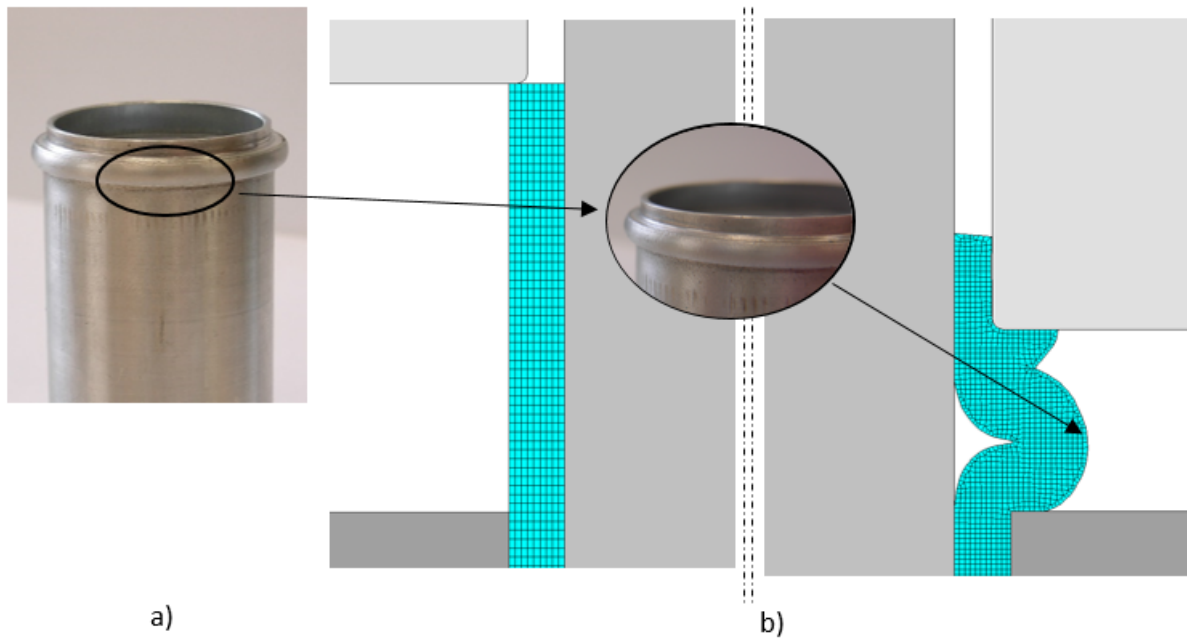


Figura 6.4: Simulação numérica do modo de deformação II para o caso com $l_{gap}=10$ mm e $t=1$ mm. a) Fotografia do ensaio. b) Malha inicial e final corte parcial das matrizes e mandril.

6.4.3 Aparecimento de Fissura

A Figura 6.5 identifica uma fotografia do ensaio realizada para o caso com um $l_{gap}=14$ mm e $t=1.25$ mm na parte a), onde surgem fissuras ao longo do raio da flange R_{fs} . E na parte b) é retratada a malha inicial e o dano acumulado ao longo da simulação. A este fenómeno chamou-se modo de deformação III, tal como tinha sido referido no capítulo anterior. As fissuras ao longo do R_{fs} abrem devido à tensão circunferencial σ_{θ} e são desencadeadas pela acumulação de dano que ultrapassa um valor crítico. O valor máximo de dano corresponde à zona de abertura de fissura, tal como seria expectável.

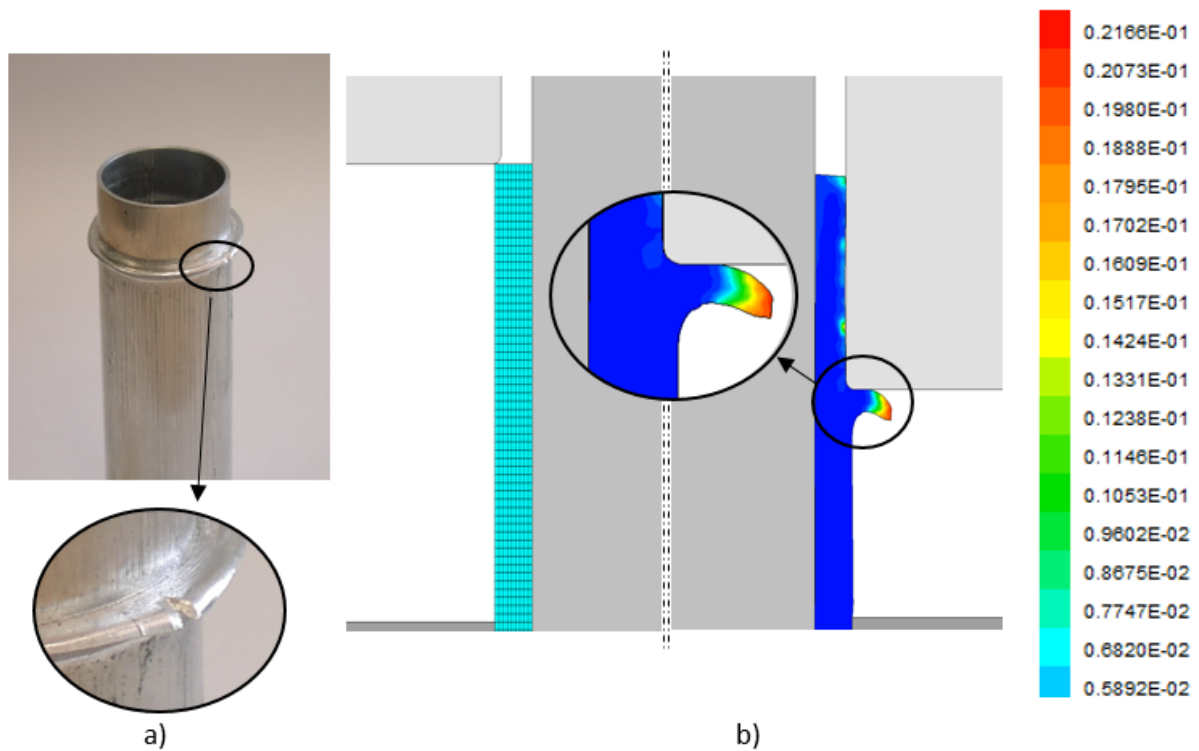


Figura 6.5: Simulação numérica do modo de deformação III para o caso com $l_{gap}=14$ mm e $t=1.25$ mm. a) Fotografia do ensaio. b) Malha inicial e final com acumulação do dano dúctil de acordo com o critério de Cockcroft-Latham com corte parcial das matrizes e mandril.

6.4.4 Inversão Externa

No caso da inversão externa e conseqüente fecho da ligação, foram realizados vários ensaios. Contudo, apenas vão ser focados três destes. Cada ensaio tem a particularidade de apresentar uma matriz de inversão externa diferente, com um raio de canto r_c distinto, assim como resultados díspares. Todas as simulações seguintes são efetuadas para o caso em que o tubo deformado apresenta as seguintes características: $l_{gap}=7$ mm e $t=1$ mm.

A Figura 6.6 apresenta o caso do raio de canto r_c igual a 0 mm, aresta viva. Durante o fecho da matriz surgiu um fenômeno já conhecido, uma instabilidade local na malha do tubo, assim como um empeno da chapa. Logo, concluiu-se, que este raio não seria de todo o ideal para o fecho da ligação.

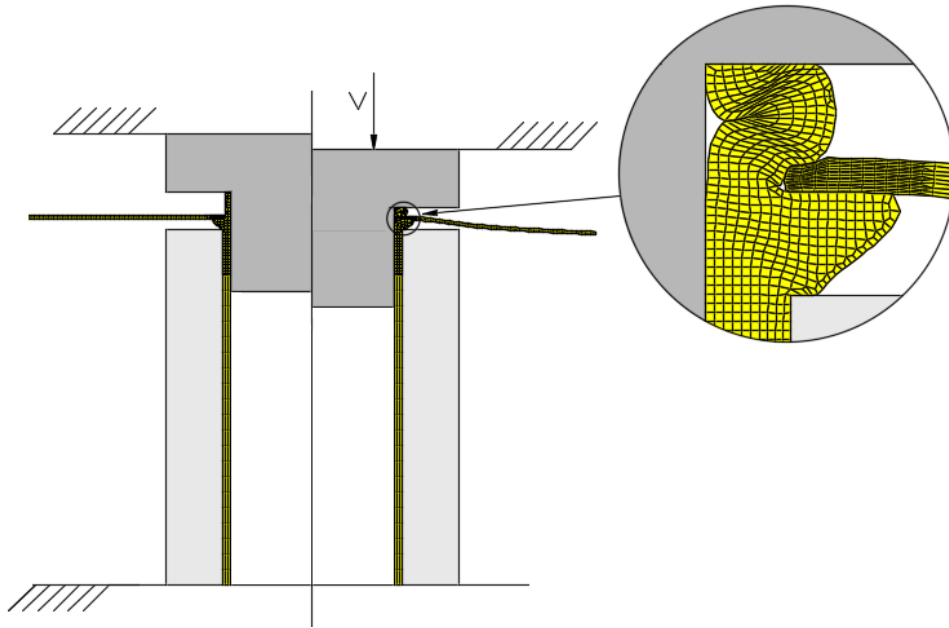


Figura 6.6: Simulação numérica da ligação de tubos deformados através de SBF a placas por inversão externa da extremidade do tubo com uma matriz de inversão com um raio de canto igual a 0 mm.

No caso do raio de canto r_c igual a 3 mm, Figura 6.7, sucedeu que ao fechar a ligação e devido à dimensão do raio da ferramenta foi aplicada força na chapa no sentido radial durante a inversão, fazendo com que a mesma empenasse. Deste modo, raios elevados também não são uma solução ideal para o fecho da ligação.

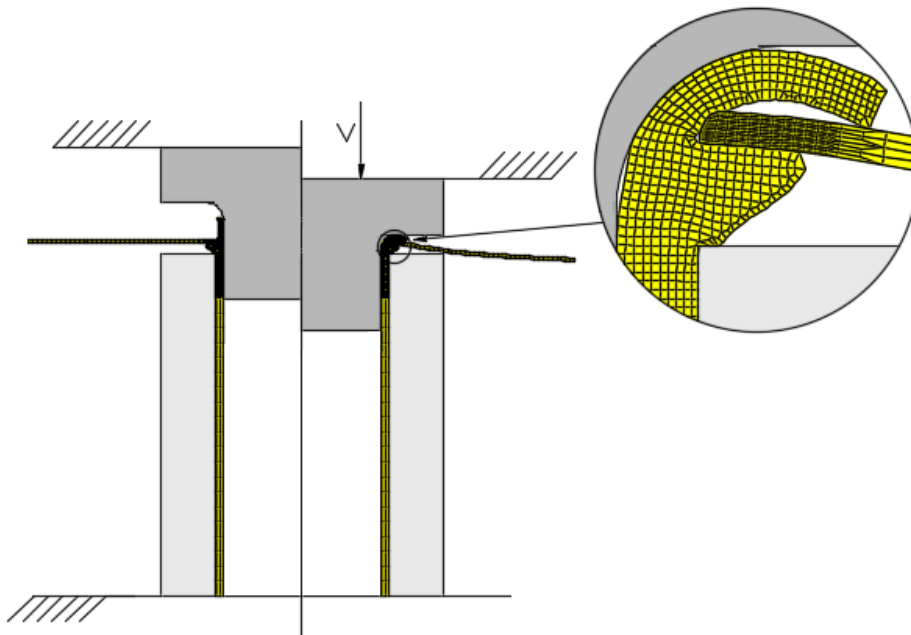


Figura 6.7: Simulação numérica da ligação de tubos deformados através de SBF a placas por inversão externa da extremidade do tubo com uma matriz de inversão com um raio de canto igual a 3 mm.

Na Figura 6.8, caso do raio de canto r_c igual a 0.3 mm, realizou-se o fecho da ligação e o resultado obtido foi o pretendido, sendo que a chapa não empenou. É visível que a malha do tubo fecha a ligação e não causa qualquer tipo de deformação na chapa.

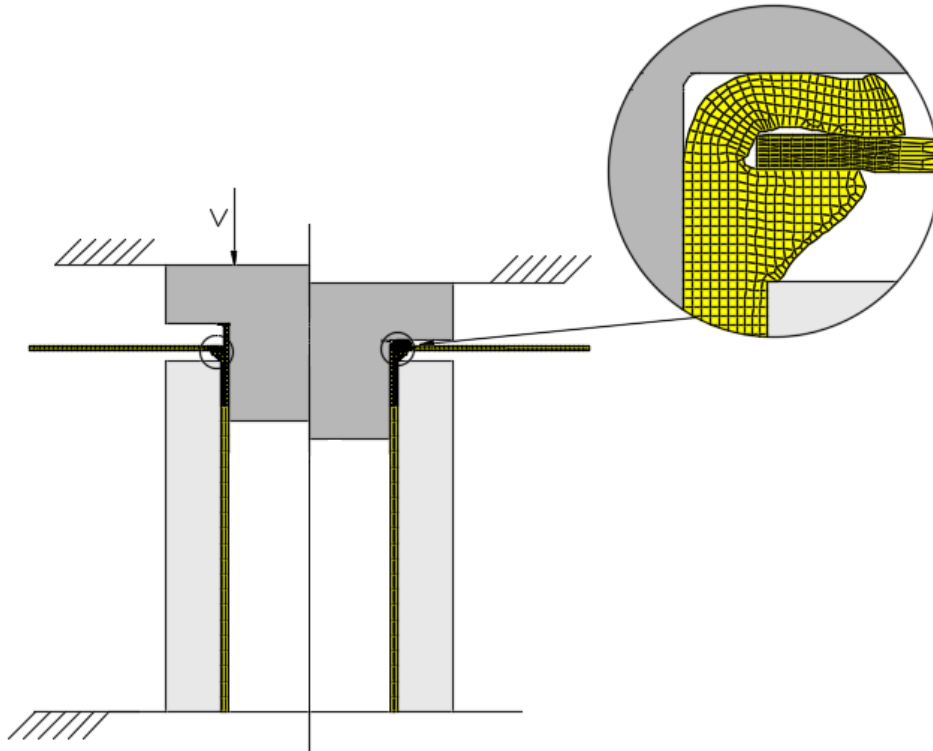


Figura 6.8: Simulação numérica da ligação de tubos deformados através de SBF a placas por inversão externa da extremidade do tubo com uma matriz de inversão com um raio de canto igual a 0.3 mm.

Capítulo 7

Apresentação e Discussão de Resultados

De modo a relembrar algumas variáveis importantes e em estudo neste capítulo, é de novo apresentada a figura referente aos principais parâmetros do processo de sbf.

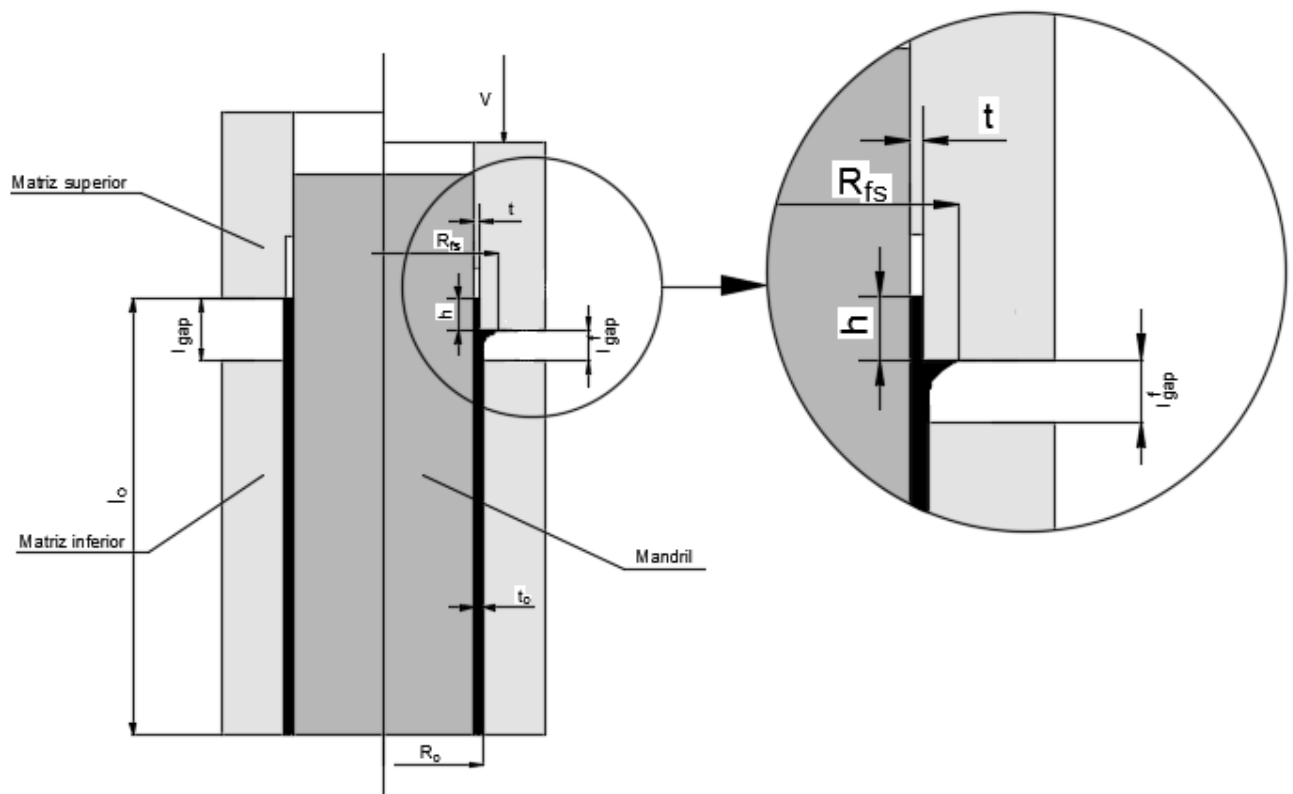


Figura 7.1: Principais parâmetros do processo de SBF de tubos de parede fina através de uma compressão parcial perpendicular à espessura destes ao longo da direção longitudinal.

7.1 Introdução

Após a conclusão dos capítulos de Desenvolvimento Experimental e Numérico, é necessário discutir os resultados obtidos. Com base na evolução das principais variáveis de campo e através de uma comparação numérico-experimental é possível compreender o processo estudado. Numa primeira fase, realiza-se uma análise de tensão efetiva, extensão efetiva e distribuição de dano crítico para o caso em estudo. Deste modo, reúne-se o conhecimento essencial para o sucesso deste processo, definindo-se os limites para a realização da ligação. Numa segunda fase, é efetuado um estudo sobre os diferentes modos de deformação consoante a variação do espaçamento inicial l_{gap} em função de dois parâmetros: raio da flange R_{fs} e comprimento final da extremidade reduzida h . Numa terceira fase, são comparados os resultados numéricos face aos experimentais, através de gráficos da evolução carga-deslocamento para o processo. Numa quarta fase, é realizado um ensaio de separação por compressão de modo a testar a resistência da nova ligação. Por fim, são apresentadas algumas ligações dissimilares realizadas.

7.2 Tensão Efetiva, Extensão Efetiva e Dano Dúctil

As variáveis de campo em estudo foram obtidas através da análise numérica realizada com o *software* I-FORM 2. Face à diversidade de ensaios realizados em termos de parâmetros, foram utilizados os que apresentavam as maiores deformações, ou seja, onde as variáveis de campo atingiam valores máximos e onde a enformação era a desejada. Deste modo, o caso em estudo pertence ao modo de deformação I (Tabela 5.2), apresenta um espaçamento inicial $l_{gap}=7$ mm e uma espessura final de parede $t=1$ mm. As figuras seguintes exibem a fase final de deformação permitindo, deste modo, apurar a evolução associada para o processo em estudo.

7.2.1 Operação de SBF

Com base na Figura 7.1 é possível observar que a tensão efetiva é máxima no local de contato entre tubo e matriz superior, zona vermelha, entre o raio da flange R_{fs} e do comprimento final da extremidade reduzida h . Como seria de esperar, apresenta o seu valor mínimo na zona de contato com o mandril e matriz inferior, zona azul, onde a deformação pode ser considerada inexistente. Deste modo, exhibe um valor máximo de tensão de 394 MPa e um valor mínimo de 35 MPa.

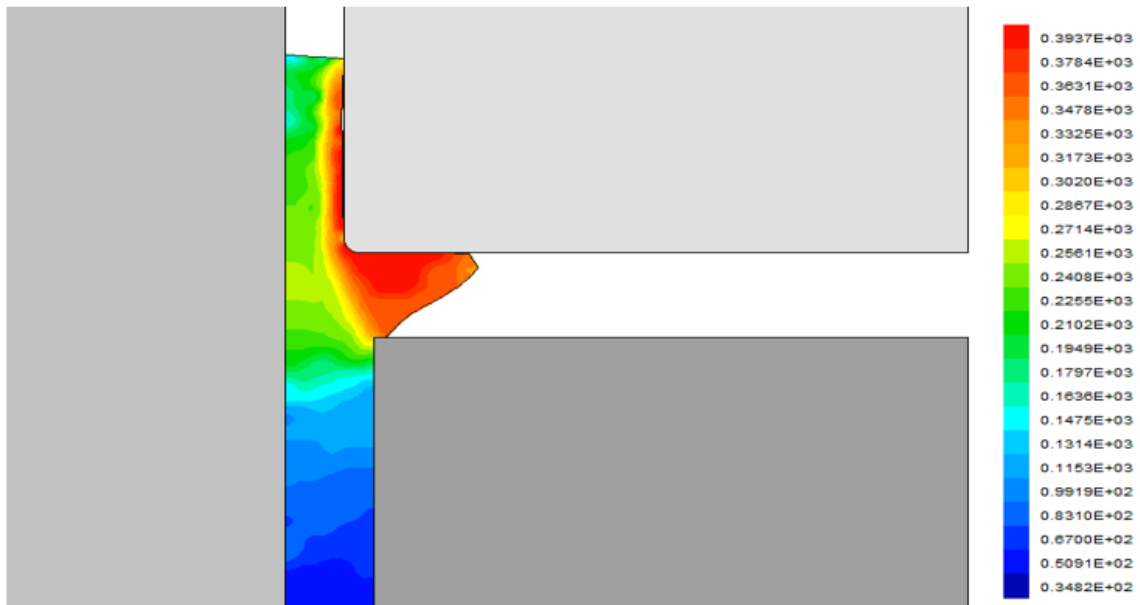


Figura 7.2: Distribuição da tensão efetiva (MPa) na fase final de deformação para $l_{gap}=7$ mm e $t=1$ mm.

A Figura 7.2 apresenta os resultados obtidos em relação à distribuição da extensão efetiva, onde o seu máximo surge na mesma zona que para a tensão efetiva, estando as variáveis de campo relacionadas. Este máximo deve-se à aglomeração de material que se vai manifestando ao longo da direção longitudinal do tubo e que gera a bossa. A extensão efetiva está presente essencialmente na zona referida anteriormente, com um máximo de 3.5, sendo que na restante parte do tubo é praticamente nula. Para este tipo de enformações o principal critério de falha é a fratura dúctil, algo que ocorreu nos ensaios experimentais para os casos de $l_{gap}=12,14$ mm e $t=1$ mm, com abertura de uma fissura, tal como se pode visualizar no capítulo do Desenvolvimento Experimental. Este fenómeno ocorre quando o dano ultrapassa um determinado valor crítico que pode ser calculado através do critério de Cockcroft-Latham [30]:

$$\int_0^{\epsilon_f} \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} = C_1 \quad (7.1)$$

A equação anterior permite atribuir valores adimensionais ao dano, sendo possível a determinação da zona onde a falha irá ocorrer, σ_1 é a maior tensão principal, $\bar{\sigma}$ e $\bar{\epsilon}$ são a tensão e extensão efetivas, e C_1 o valor de dano crítico. Na Figura 7.3 pode-se visualizar a zona crítica, que surge onde o canto da matriz e o tubo se intercetam.

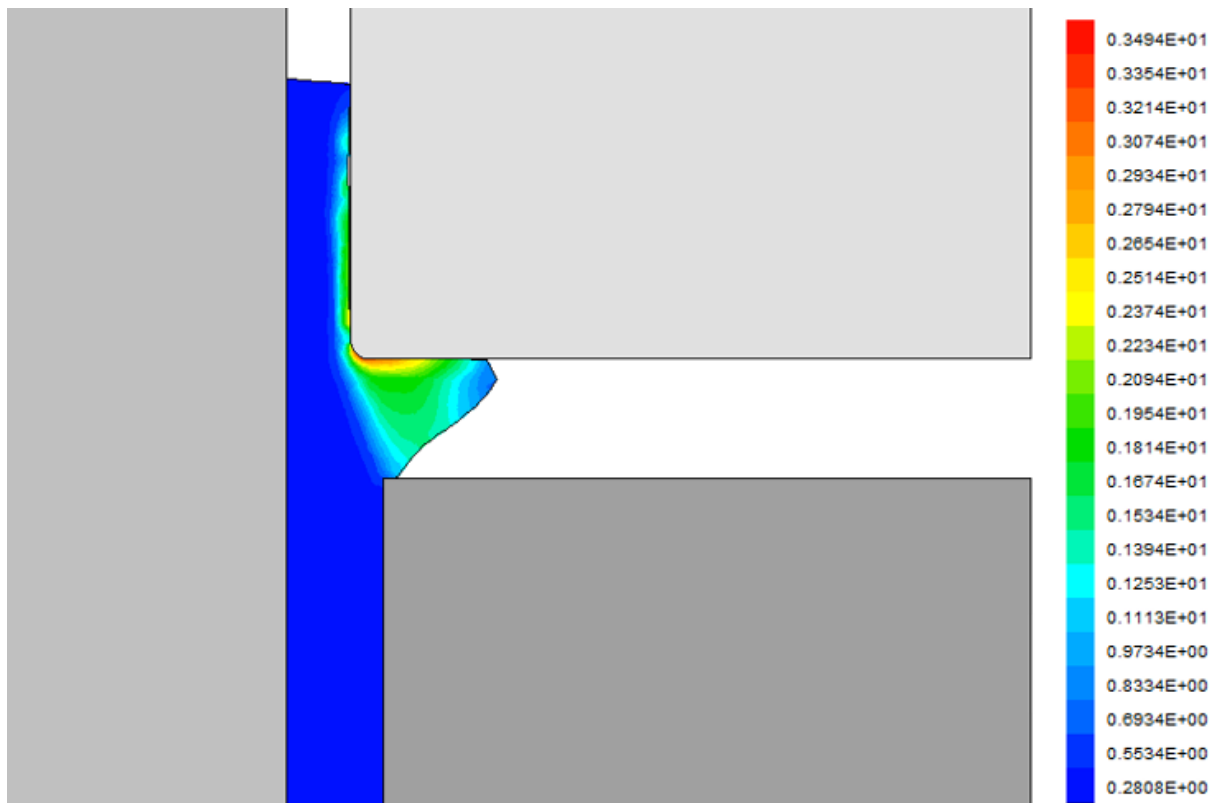


Figura 7.3: Distribuição da extensão efetiva na fase final de deformação para $l_{gap}=7$ mm e $t=1$ mm.

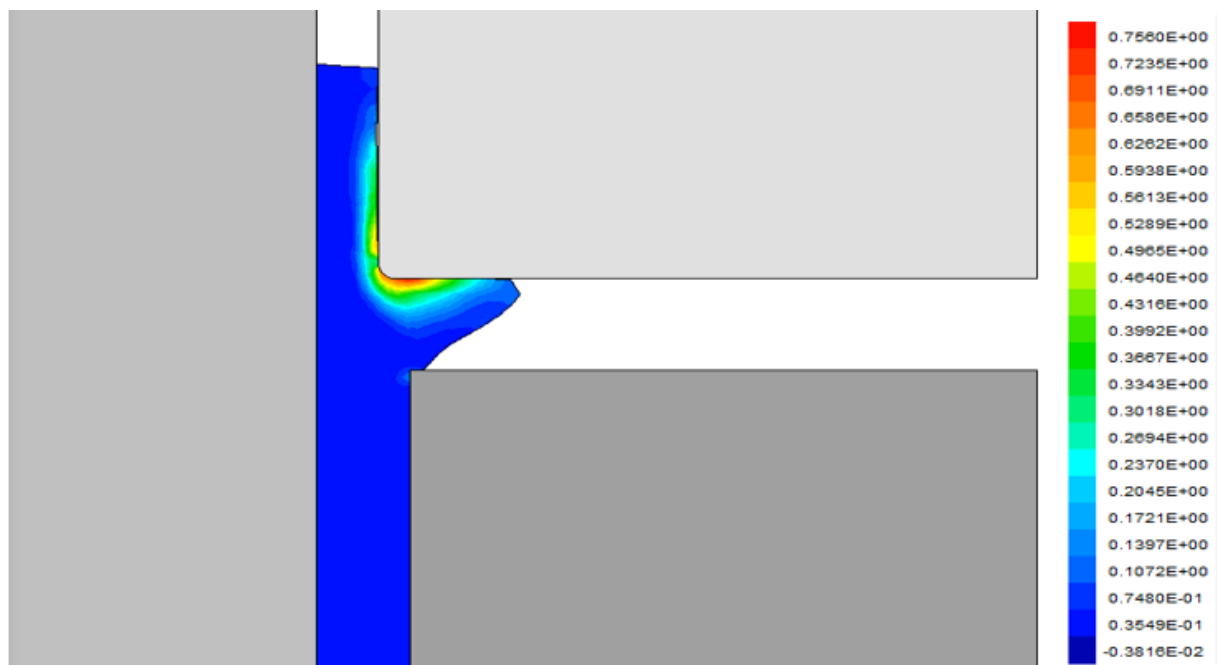


Figura 7.4: Distribuição do valor de dano dúctil na fase final de deformação para $l_{gap}=7$ mm e $t=1$ mm.

7.2.2 Operação de Inversão Externa

A Figura 7.4 apresenta a distribuição da tensão efetiva na fase final de inversão externa. Esta é máxima na zona do tubo que está em contato com a chapa, zona vermelha e mínima na maior parte da chapa, zona azul. Apresenta um valor máximo de 370 MPa e um mínimo de 34 MPa. Como seria de esperar a tensão efetiva é superior no tubo pois, é neste, que é aplicada uma carga de modo a inverter o mesmo e fechar a ligação. Caso a tensão efetiva sentida na chapa fosse superior, seria espectável um empeno da mesma, tal como surgiu para o caso de um raio de canto superior, devido a uma carga radial nas paredes do tubo.

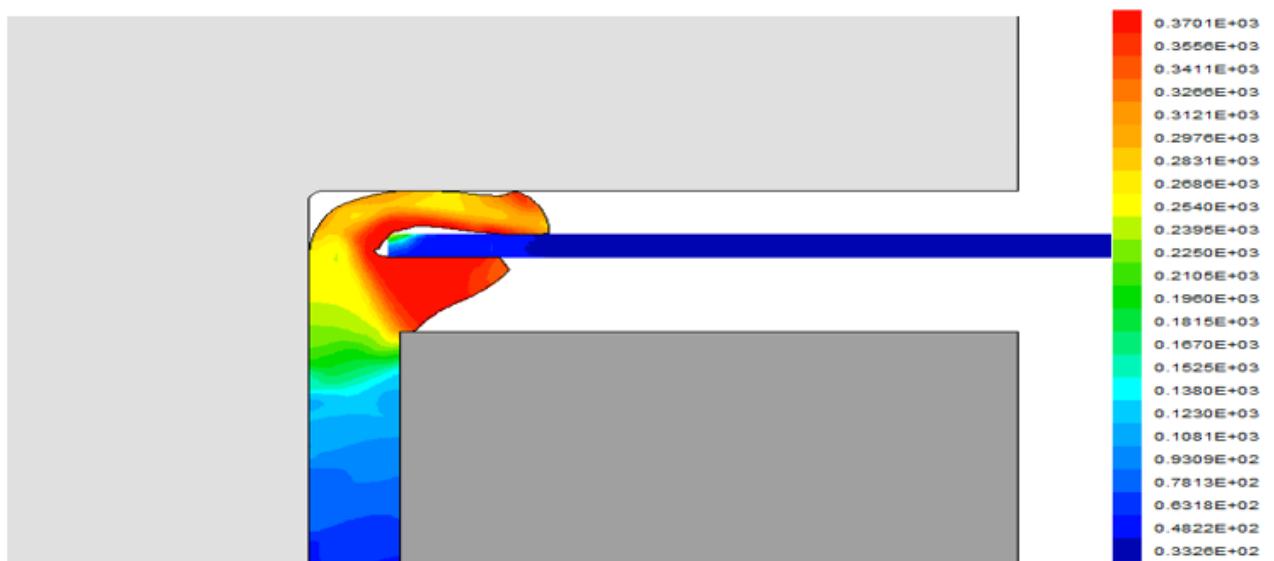


Figura 7.5: Distribuição da tensão efetiva (MPa) na fase final de inversão externa para $l_{gap}=7$ mm e $t=1$ mm e $r_c=0.3$ mm.

Por sua vez, a Figura 7.5 exibe a distribuição da extensão efetiva na fase final de inversão externa. O valor máximo para esta variável de campo mantém-se na mesma zona que na tensão efetiva. Ao longo da ligação, desde a operação de SBF até à operação de Inversão, as zonas de tensão e extensão efetivas máximas são essencialmente entre a zona do raio da flange R_{fs} e do comprimento final da extremidade reduzida h .

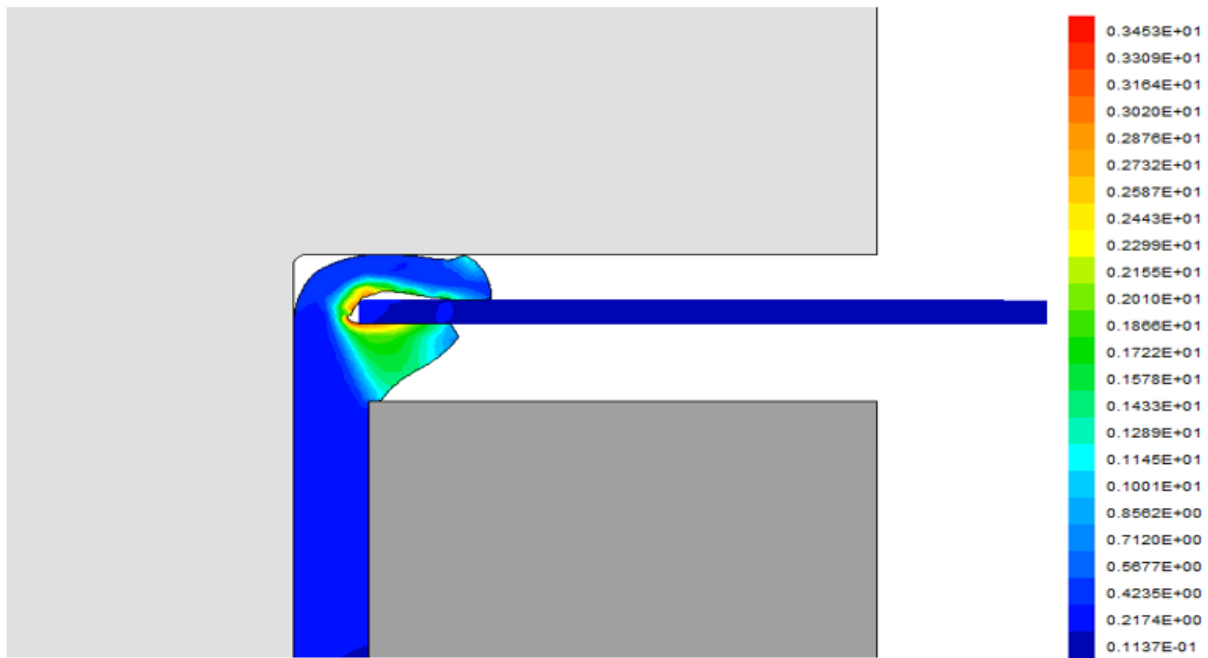


Figura 7.6: Distribuição da extensão efetiva na fase final de inversão externa para $l_{gap}=7$ mm e $t=1$ mm e $r_c=0.3$ mm.

Em relação ao dano dúctil, manteve-se a mesma gama de valores que os apresentados durante a operação de SBF, não se verificando qualquer fratura dúctil. Contudo, o dano dúctil deixou de surgir unicamente na zona enformada durante a operação de SBF, para aparecer também no local de contato com o canto da matriz de inversão.

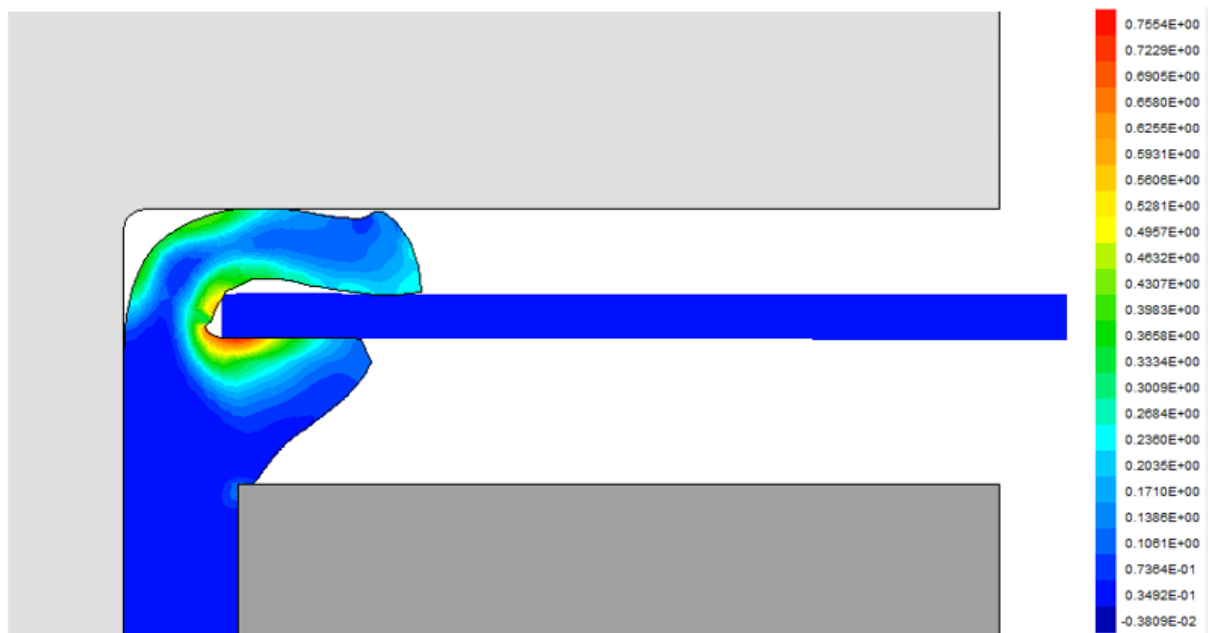


Figura 7.7: Distribuição do dano dúctil na fase final de inversão externa para $l_{gap}=7$ mm e $t=1$ mm e $r_c=0.3$ mm.

7.3 Evolução dos Modos de Deformação

A Figura 7.7 apresenta uma fotografia com alguns dos casos em estudo presentes na Tabela 5.2, em que se pode identificar os diferentes modos de deformação e a sua evolução com o aumento do espaçamento inicial l_{gap} . Tal como já foi referido no capítulo do Desenvolvimento Experimental, do ponto de vista da ligação é importante assegurar que o raio da flange R_{fs} e o comprimento final da extremidade reduzida h apresentam valores suficientes para que a fixação das chapas aos tubos seja exequível. Isto porque, pequenos valores para o R_{fs} não garantem uma superfície de apoio para a chapa e pequenos valores de h são inadequados para a operação de inversão externa, impedindo assim, o fecho mecânico do tubo com a chapa.



Figura 7.8: Modos de deformação para um conjunto de ensaios com uma espessura final de parede $t=1.25$ mm e um espaçamento inicial l_{gap} entre 5 e 16 mm (5,10,14,16 presentes na primeira coluna na Tabela 5.2).

A Figura 7.8 apresenta uma evolução experimental do raio da flange R_{fs} com o espaçamento inicial l_{gap} para um valor fixo de espaçamento final $l_{gap}^f=2$ mm. Como se pode verificar, R_{fs} aumenta de uma maneira quase linear com o l_{gap} como resultado de um aumento do volume de material aglomerado até se atingir um gap crítico onde ocorre instabilidade local (Modo II) em virtude da ocorrência de uma instabilidade plástica. A linha a tracejado corresponde aos ensaios onde o Modo III (fissura) ocorreu antes do Modo II.

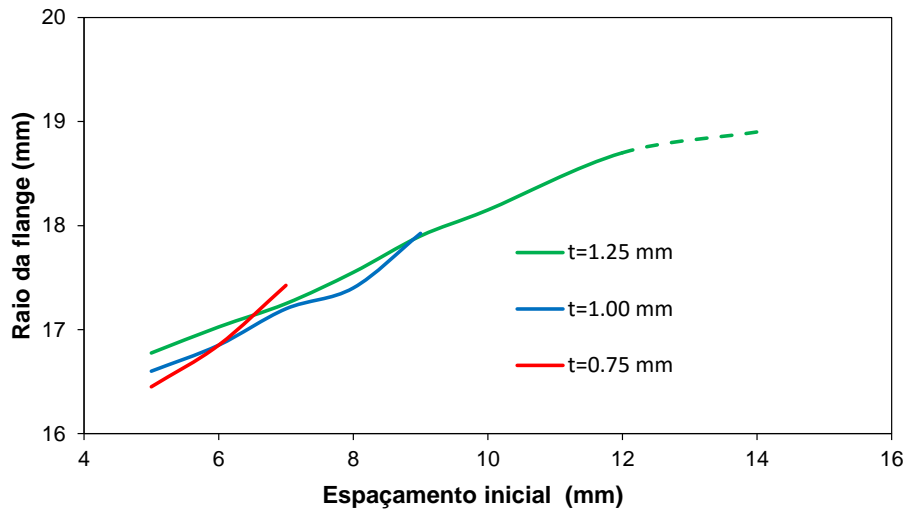


Figura 7.9: Evolução experimental do raio da flange R_{fs} em função do espaçamento inicial l_{gap} em SBF de tubos de parede fina para diferentes espessuras de parede final t .

A Figura 7.9 exibe a evolução do comprimento final da extremidade reduzida h com o espaçamento inicial l_{gap} para um valor fixo de espaçamento final $l_{gap}^f=2$ mm. Como é visível, h aumenta com o l_{gap} até atingir um valor máximo, que representa o momento a partir do qual o fenómeno de instabilidade local ocorre. Ao aumentar-se l_{gap} para um mesmo valor de t , acaba por ocorrer este fenómeno (Modo II), que está identificado por um círculo preenchido. A linha a tracejado corresponde ao Modo III, em que apesar do aparecimento de fissuras, se mantém o aumento do valor de h . O modo II e III não se pretendem usar para a ligação em estudo.

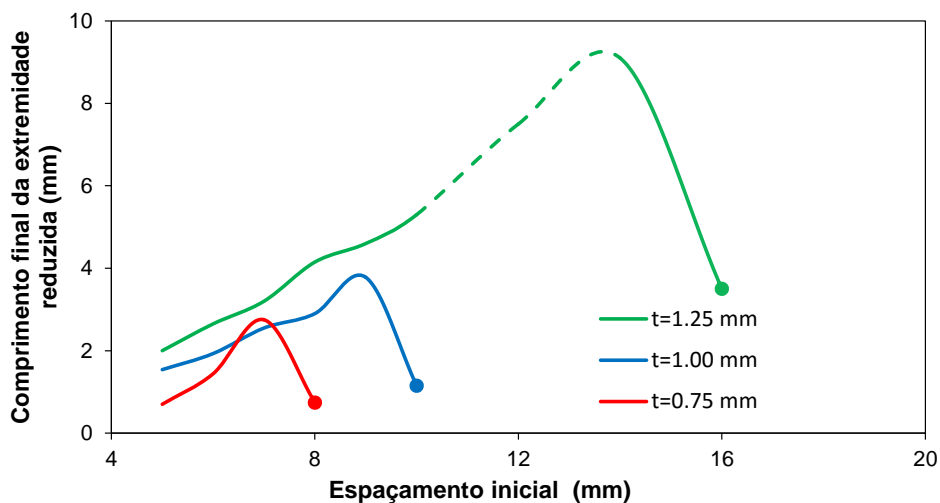


Figura 7.10: Evolução experimental do comprimento final da extremidade reduzida h em função do espaçamento inicial l_{gap} em SBF de tubos de parede fina para diferentes espessuras de parede final t .

7.4 Evolução da Carga com o Deslocamento

Na Figura 7.10 verifica-se a evolução experimental da carga em função do deslocamento no processo de enformação através de SBF para o caso de estudo com uma espessura final de parede $t=1.25$ mm, correspondente à primeira linha da Tabela 5.2. O gráfico evidencia o aumento da carga com o deslocamento, verificando-se também para valores superiores do espaçamento inicial l_{gap} . Nos casos de $l_{gap}=5,6,7,8,9,10$ mm, ou seja, Modo de deformação I, a carga vai aumentando à medida que o espaçamento inicial cresce, mantendo um comportamento idêntico para todos estes casos. Contudo para os casos de $l_{gap}=12,14,16$ mm, a evolução é diferente das anteriores. Para os dois primeiros valores de l_{gap} é visível uma diminuição da carga para os mesmos valores de deslocamento face aos casos de Modo I. Posteriormente, verifica-se um aumento de carga para deslocamentos superiores aos anteriores. Os valores máximos atingidos nestes dois ensaios levaram a que ocorresse um aumento do dano dúctil na zona do raio da flange e respetivo aparecimento de fissuras. Por último, a evolução da carga-deslocamento para o caso de $l_{gap}=16$ mm é explicado pela ocorrência de uma instabilidade local, onde depois de atingida a força crítica de 25.5 kN, a carga diminui ao longo do deslocamento.

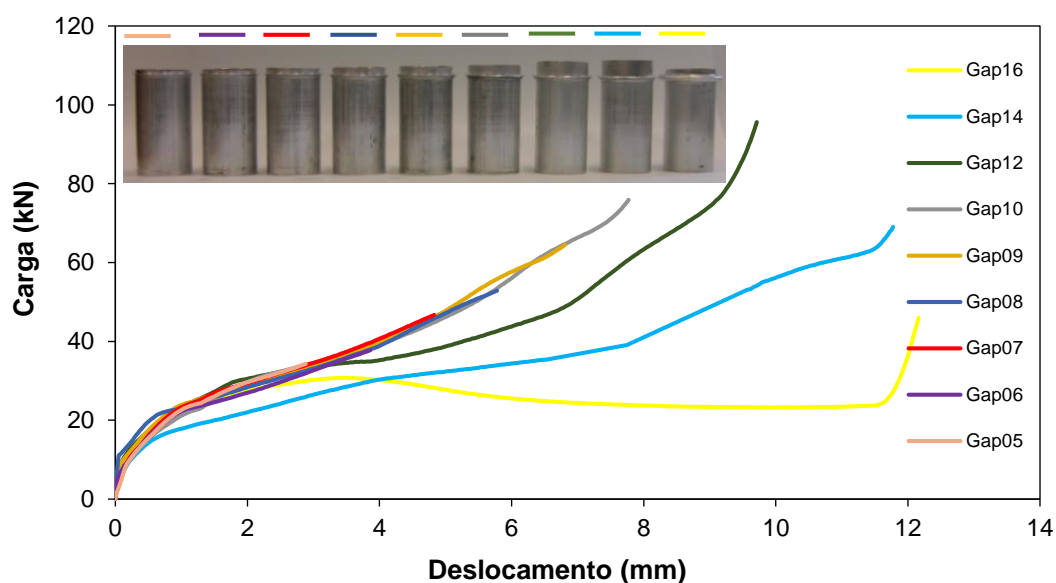


Figura 7.11: Evolução experimental da força de compressão em função do deslocamento da matriz superior para os casos com uma espessura de parede $t=1.25$ mm.

De modo a validar a análise dos elementos finitos desenvolvida no capítulo anterior, são apresentados vários casos presentes na Tabela 5.2, através da comparação numérico-experimental da evolução de carga em função do deslocamento. As evoluções numéricas exibem um desvio que varia entre 2-20% em relação à experimental, algo que é justificado pela anisotropia do material. Erros de medição na preparação das pré-formas, perdas inesperadas nas matrizes produzidas e a propagação de erro gerado pelos vários *Remesh's* durante a análise numérica podem também afetar a discrepância dos resultados. De modo a facilitar a leitura dos resultados das várias análises, dividiram-se os mesmos

em dois gráficos, respetivamente Figura 7.11 e 7.12. Nestes apresenta-se a comparação numérico-experimental de dois quatro mais significativos.

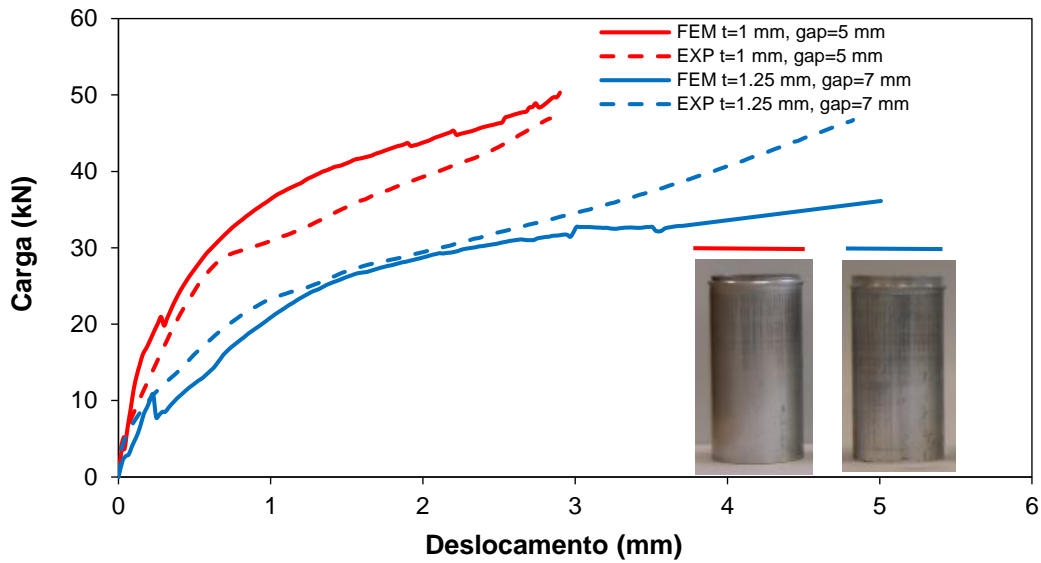


Figura 7.12: Evolução numérico-experimental da força de compressão em função do deslocamento da matriz superior para os casos $t=1$ mm, $l_{gap}=5$ mm e $t=1.25$ mm, $l_{gap}=7$ mm.

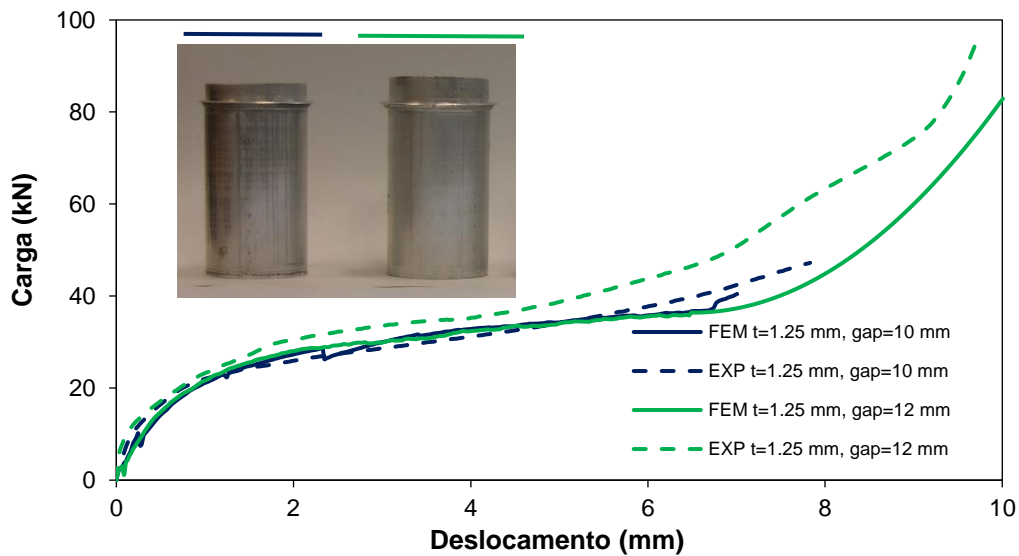


Figura 7.13: Evolução numérico-experimental da força de compressão em função do deslocamento da matriz superior para os casos $t=1.25$ mm, $l_{gap}=10$ mm e $t=1.25$ mm, $l_{gap}=12$ mm.

A Figura 7.13 exibe a evolução experimental e a previsão numérica da carga em função do deslocamento para SBF de tubos de parede fina através da compressão parcial da espessura da parede ao longo da sua direção longitudinal. Os ensaios incluídos na figura foram retirados da Tabela 2 e correspondem aos modos de deformação I ($l_{gap}=7$ mm e $t=0.75$ mm) e II ($l_{gap}=10$ mm e $t=1$ mm). Como se pode observar, a carga aumenta bruscamente de zero até um valor perto da força crítica de instabilidade $F_{cr}=25.5$ kN para o ensaio correspondente ao modo I e de forma mais gradual para o ensaio relativo ao modo II. A explicação para estes dois fenómenos tem a ver com a necessidade de se obter uma maior aglomeração de material para se atingir a mesma força quando a espessura final da parede t é superior.

Para além deste fato, existem outras diferenças significativas nas evoluções de carga-deslocamento. O ensaio correspondente ao modo I, representa um crescimento estável similar ao normalmente observado na transição entre a enformação e o corte em estado estacionário no corte metal ortogonal [45]. Em contraste, o ensaio correspondente ao modo II exibe uma evolução similar ao de uma força constante como resultado de uma instabilidade local, à medida que o espaço livre entre as matrizes vai diminuindo.

A força máxima em SBF no modo I pode ser comparada à força de corte depois de se atingirem as condições de estado estacionário (linha horizontal na Figura 7.13). Foi depois estimada como sendo 'equivalente' ao modelo do corte metálico ortogonal com uma apara de espessura não deformada $e=t_0-t$ e uma largura $w=2\pi r_0$, onde t_0 , t , r_0 são definidas de acordo com a figura da caracterização mecânica do material,

$$F_c = k_s e w = 2k_s \pi r_0 (t_0 - t) \quad (7.2)$$

O símbolo k_s representa a pressão específica de corte, que é igual a 750 MPa para ligas de alumínio comuns com uma apara não deformada de espessura igual a 0.75 mm/rev [46].

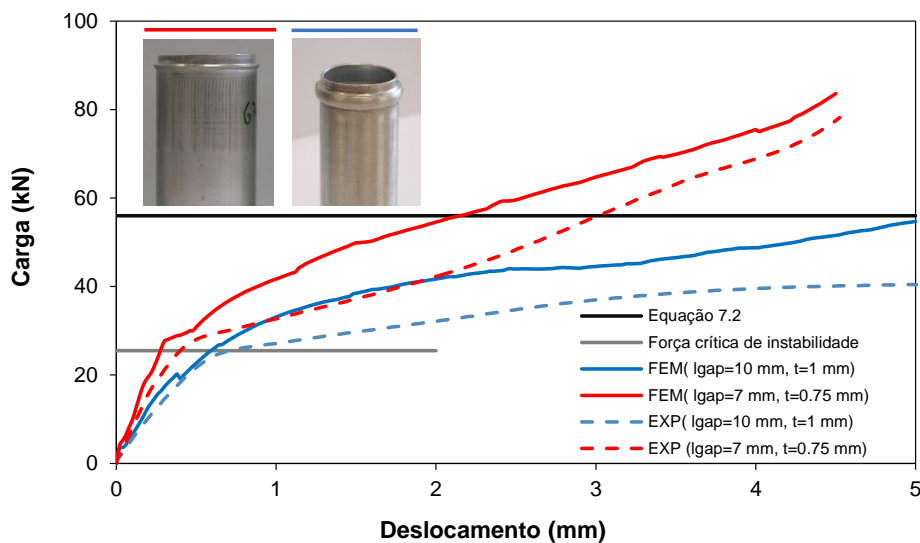


Figura 7.14: Evolução numérico-experimental da força de compressão em função do deslocamento em SBF de tubos de parede fina.

A principal razão pelo qual a força de compressão em SBF de tubos de parede fina é superior à 'equivalente' para o modelo ortogonal de corte metálico é devido à não existência de transição entre a enformação e o corte em virtude da ausência da separação de material na zona de contato com a matriz superior. Deste modo, o constrangimento axissimétrico circunferencial provocado pela aglomeração de material na flange previne a formação de apara. De igual modo, é a razão pela qual a acumulação crítica de dano, seja na zona do raio exterior da flange em vez de na zona de contato com o canto da matriz superior, o que também pode ser entendido como um modo de o material agir de forma a eliminar o constrangimento circunferencial que previne que a apara se forme.

Para se concluir a ligação é necessário efetuar o fecho desta através da realização da operação de Inversão Externa. A Figura 7.14 exibe a previsão numérica para a carga em função do deslocamento para os casos: $l_{gap}=7$ mm, $t=1$ mm e $l_{gap}=10$ mm, $t=1.25$ mm. O comportamento nos dois casos é idêntico. Inicialmente a carga cresce abruptamente até atingir o seu pico que corresponde ao momento em que o tubo enformado deixa de estar na posição vertical e começa a inverter. De seguida, a carga diminui até se atingir um valor mínimo que é representado pelo fecho da ligação, círculo preenchido. Por fim, existe um aumento da carga que corresponde ao momento em que devido à compressão para além do ponto de fecho da ligação se empena a chapa. Como seria de esperar o caso com a espessura final da parede t inferior apresenta uma menor carga devido à menor quantidade de material a ser necessário inverter.

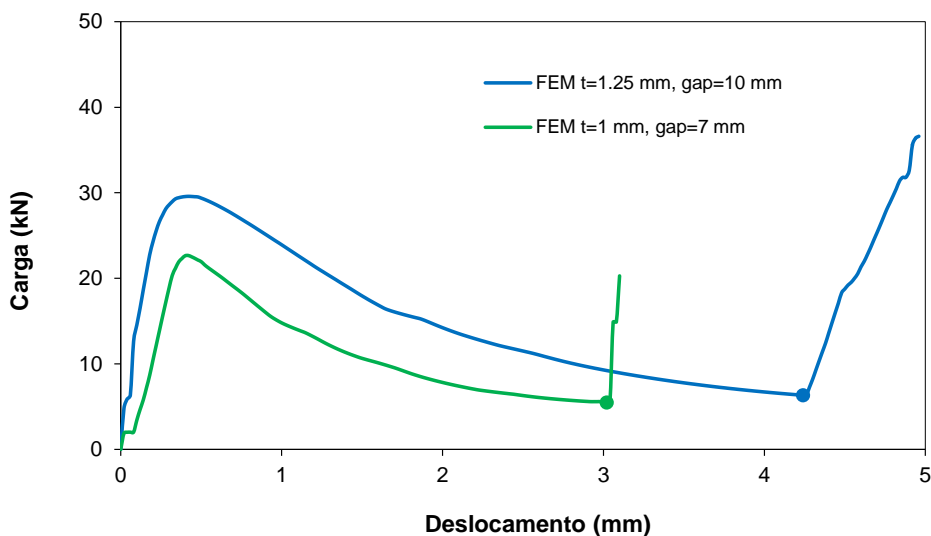


Figura 7.15: Evolução numérica da força de compressão em função do deslocamento da matriz de inversão externa para os casos $t=1$ mm, $l_{gap}=7$ mm e $t=1.25$ mm, $l_{gap}=10$ mm com um raio de canto $r_c=0.3$ mm.

Na Figura 7.15 é exibido a evolução numérico-experimental para o fecho da ligação através da operação de Inversão Externa para o caso com $t=1.25$ mm e $l_{gap}=10$ mm. O comportamento da análise experimental e numérica é similar, na medida em que ambas as cargas crescem até atingir um valor máximo e depois diminuem até ao ponto mínimo, fecho da ligação. Contudo para o caso numérico

a carga máxima é superior à obtida experimentalmente e é atingida num deslocamento inferior. A diferença apresentada deve-se ao fato de no caso numérico o raio de canto ser igual a 0.3 mm e no caso experimental o raio de canto usado ser igual a 2 mm. Assim, é normal que as cargas apresentadas sejam diferentes para os dois casos em questão.

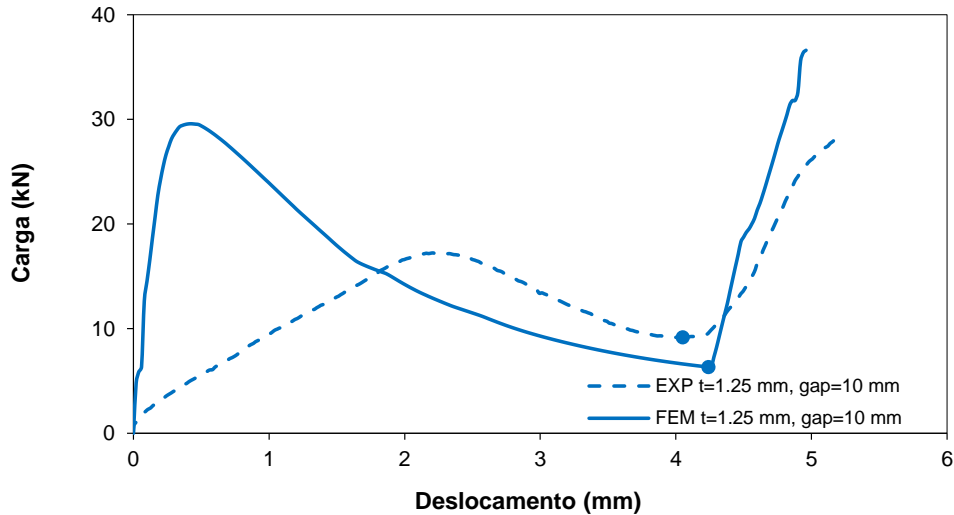


Figura 7.16: Evolução numérico-experimental da força de compressão em função do deslocamento da matriz de inversão externa para o caso $t=1.25$ mm, $l_{gap}=10$ mm

7.5 Ensaios de Separação

O ensaio de separação realizado consiste na aplicação de uma carga na chapa e conseqüentemente na zona onde se formou a bossa no tubo, com o intuito de estudar o seu comportamento face a este esforço e identificar desta forma a carga máxima suportada pelo fecho mecânico da ligação. A ligação tubo-chapa realizada está presa a uma placa na parte inferior do tubo e a chapa está bloqueada no topo por uma matriz circular com um furo no centro. A matriz circular realiza um movimento descendente de forma a destruir o fecho mecânico que liga tubo e chapa. Este ensaio é também realizado na máquina de ensaios Instron SATEC 1200 kN.

Para além deste ensaio de separação, também foram realizados outros dois de forma numérica. Em ambos os casos, aplicou-se uma carga no sentido ascendente de modo a abrir o fecho mecânico da ligação. Sendo que no primeiro, se utilizaram duas matrizes que bloqueavam a chapa, e no segundo, apenas uma matriz por baixo da chapa. Optou-se por não apresentar aqui os gráficos relativos a estes dois últimos, visto que para a ligação em causa, a carga máxima obtida era inferior face ao ensaio de separação retratado aqui.

A Fig.7.16 apresenta uma evolução numérico-experimental da carga em função de deslocamento da matriz durante a separação da ligação, com referência ao momento inicial e final do ensaio. É também visível em detalha dois momentos diferentes, o primeiro em que a partir do qual a ligação mecânica começa a ceder e se perde o fecho mecânico. O segundo, em que a chapa apenas está ligada ao

tubo pelo atrito entre as faces e que representa o momento em que a carga reduz bruscamente pois a separação está iminente. Até se atingir uma força de aproximadamente 2.5 kN a ligação mecânica mantém-se inalterada e a deformação é apenas sentida na chapa. Contudo, quando o fecho mecânico começa a ceder, existe uma força máxima de compressão de aproximadamente 3 kN a partir do qual a deformação é contínua mas com forças decrescentes até à falha devido à destruição do fecho mecânico entre o tubo e chapa.

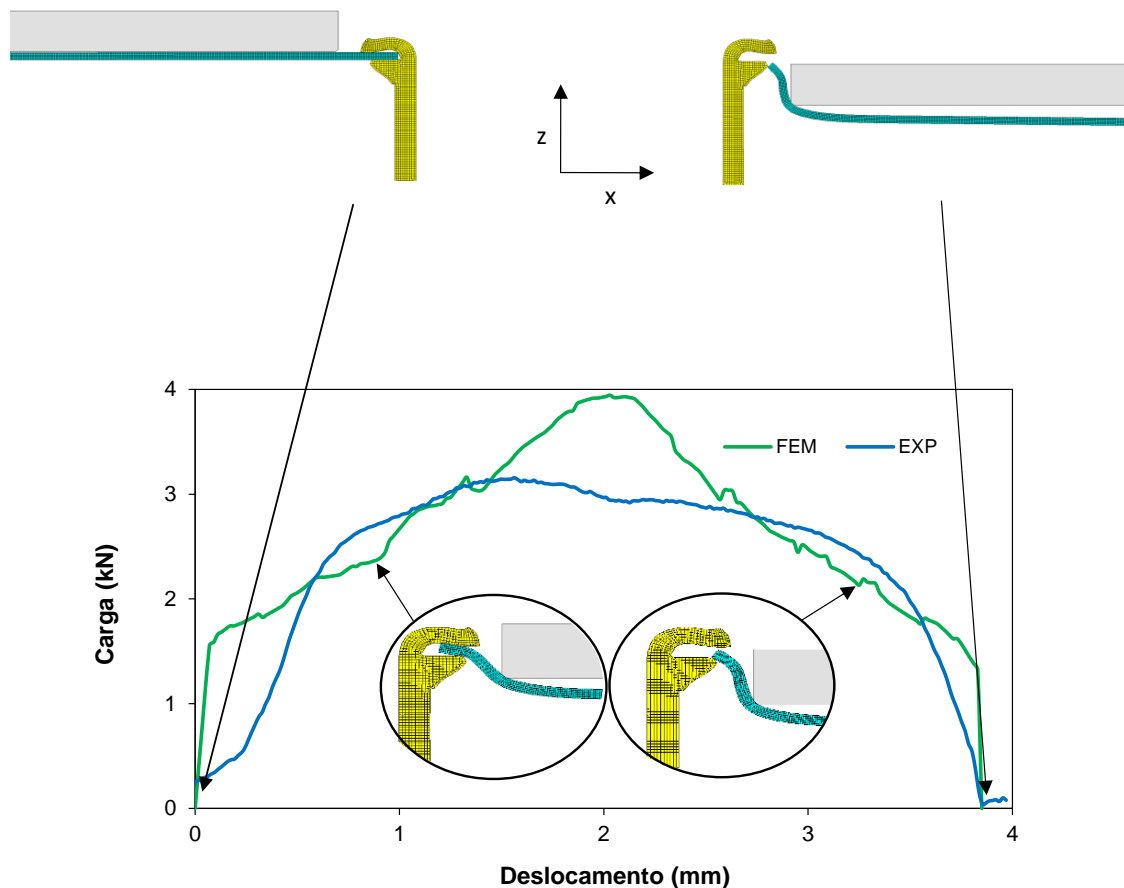


Figura 7.17: Evolução numérica-experimental da carga em função do deslocamento da matriz superior no ensaio de separação por compressão o caso $t=1$ mm, $l_{gap}=7$ mm.

7.6 Ligações dissimilares

A ligação tubo-chapa entre materiais dissimilares é uma das dificuldades para a maioria dos processos convencionais de ligação. Assim, é importante investigar novos processos que facilitem a ligação entre materiais diferentes. Deste modo e como já foi referido, pensa-se que o futuro desta tecnologia aqui estudada passa pela aplicação em ligações de materiais dissimilares. Realizaram-se então, várias ligações híbridas para este processo, sendo que a figura seguinte apresenta três ligações realizadas a partir de tubos de alumínio e chapas de diferentes ligas de materiais, como titânio, policarbonato e aço carbono. Juntamente com a fotografia das ligações de materiais dissimilares também é apresentado um

gráfico correspondente à evolução da carga em função do deslocamento da matriz para a operação de inversão externa. Optou-se por gerar experimentalmente as três ligações através de tubos enformados com diferentes parâmetros, ou seja, l_{gap} distintos. Deste modo para a ligação com a chapa de titânio, utilizou-se o caso com $t=1.25$ mm e $l_{gap}=7$ mm, no caso do aço carbono foi $t=1.25$ mm e $l_{gap}=10$ mm e, por fim, para o policarbonato o caso com $t=1.25$ mm e $l_{gap}=8$ mm.

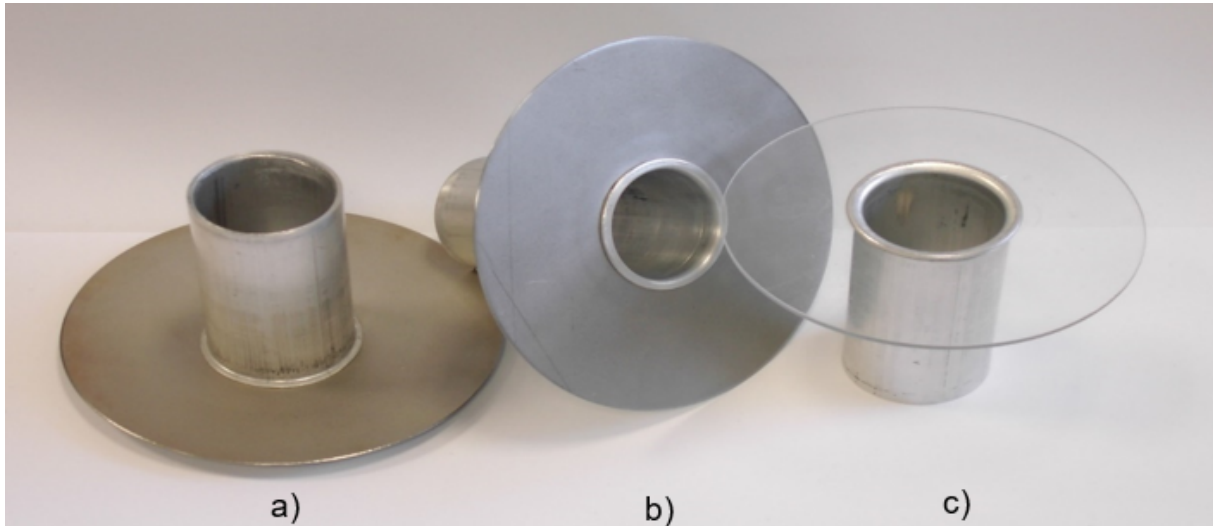


Figura 7.18: Fotografia de ligações dissimilares para casos de $t=1$ mm. a) Tubo de alumínio com $l_{gap}=7$ mm e chapa de titânio. b) Tubo de alumínio com $l_{gap}=10$ mm e chapa de aço carbono. c) Tubo de alumínio com $l_{gap}=8$ mm e chapa de policarbonato.

A Figura 7.18 apresenta as diferentes evoluções obtidas experimentalmente para a força de compressão em função do deslocamento da matriz de inversão para os casos de ligações realizadas com materiais dissimilares. Apesar dos diferentes materiais constituintes das chapas, a evolução da força em função do deslocamento durante a inversão é similar para todas pois o material enformado durante o fecho mecânico é o tubo de alumínio. Tal como já foi referido, a inversão é caracterizada por uma força crescente até à zona onde o tubo começa a inverter, círculo preenchido, sendo que depois a carga vai diminuindo até se fechar a ligação. As cargas máximas sentidas durante o fecho mecânico são iguais para todas as chapas pois o que influencia esse valor é o material constituinte do tubo enformado. O deslocamento necessário para se realizar a inversão depende do l_{gap} e do conseqüente comprimento final da extremidade reduzida h . Deste modo, os tubos com l_{gap} inferiores finalizam a inversão num menor deslocamento da matriz de inversão. De seguida, e caso se continue a inverter o tubo acaba por se empenar a chapa, zona a tracejado. A partir deste momento a rigidez do material é importante, pois consoante os constituintes da chapa são necessários diferentes valores para as cargas, de modo a deformar a mesma. Assim, o Titânio sendo o material com maior rigidez, apresenta um elevado aumento da carga durante o empeno. O Aço Carbono, um material com uma elevada rigidez também apresenta um aumento de carga muito significativo após o fecho da ligação. Por último, o Policarbonato e em virtude de ser um material com pouca rigidez apresenta um aumento de carga muito inferior aos restantes.

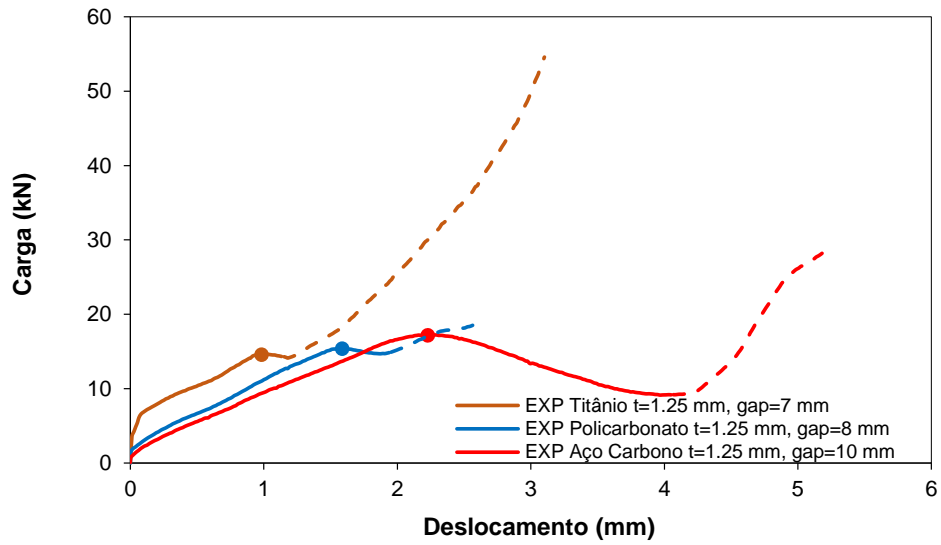


Figura 7.19: Evolução experimental da força de compressão em função do deslocamento da matriz de inversão externa para os casos com $t=1$ mm e diferentes l_{gap} para as ligações de materiais dissimilares.

Capítulo 8

Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuro

8.1 Conclusões

Tal como foi referido no capítulo do Estado da Arte, existe uma preocupação crescente em encontrar tecnologias mais limpas para a produção de ligações. O caso estudado é uma solução viável no âmbito dos processos de ligação para a união de um tubo a uma chapa. Os resultados experimentais viabilizaram o processo e mostraram que ao recorrer à enformação plástica do tubo, dispensou-se a adição de material, o que representa uma poupança face a outras tecnologias. Visto a enformação ser realizada a frio houve também uma poupança energética em relação a processos onde é necessário um aquecimento.

Os valores obtidos para as cargas requeridas para as ligações analisadas na liga de alumínio AA6063T6, mostram que o novo processo estudado pode ser realizado em prensas comuns com capacidade inferior a 300 kN. Com recurso a estas prensas comuns e ferramentas relativamente simples pode-se, então, implementar o processo de produção de pequenas a grandes séries, com uma produtividade elevada, sem a necessidade de operadores qualificados.

A comparação numérica-experimental mostrou um elevado grau de coerência, validando o estudo da enformação. Assim, é de admitir realizar estudos meramente numéricos, sem o desenvolvimento de ferramentas e pré-formas para um estudo experimental.

O SBF de tubos através da compressão parcial da espessura da parede é aplicado para a aglomeração de material ao longo da sua direção longitudinal. O processo pode ser utilizado para produzir peças tubulares funcionais com um espessamento circunferencial para várias aplicações tal como a fixação de tubos a placas por fecho mecânico.

Os mecanismos de deformação para esta técnica de SBF de tubos são limitados pela ocorrência de instabilidade local para rácios $\frac{l_{gap}}{t} \geq 10$ entre o espaçamento inicial entre matriz superior e inferior l_{gap} e a espessura final da parede t . Fissuras radiais ao longo do raio exterior da zona de aglomeração de material também podem ser desenvolvidas devido à acumulação de dano dúctil em casos de valores

superiores para o espaçamento inicial l_{gap} .

A combinação de SBF com a inversão da extremidade do tubo permite fixar tubos a chapas feitos de materiais dissimilares, à temperatura ambiente. O processo é maioritariamente limitado pelo raio de canto r_c da matriz de inversão em virtude de para um raio de canto inexistente ($r_c \cong 0$) se gerar uma instabilidade plástica na extremidade do tubo e para grandes valores de raio de canto ($r_c > t$) se fletir a chapa ao longo do seu raio. Entre estas duas condições limitantes é possível produzir boas ligações entre tubos a chapas para a técnica estudada.

8.2 Perspetivas de Trabalho Futuro

Aquando a realização de qualquer trabalho existe sempre uma aquisição de conhecimento que leva ao surgimento de novas dúvidas e ideias, que promovem o desenvolvimento de trabalho futuro. Esta dissertação não foi exceção à regra.

Num estudo futuro para o processo em causa, seria interessante realizar a mesma ligação, mas com alterações nas ferramentas, com o intuito de criar uma bossa calibrada em vez da obtida na atualidade. Esta mudança poderia otimizar a resistência mecânica da ligação, bem como garantir o mesmo aspeto em termos estéticos. Através de um estudo numérico seria também importante tentar transformar o processo atual numa única operação de modo a tornar o mesmo mais eficiente.

Outras sugestões para um trabalho futuro seria a realização de outras combinações de material a unir ou a conceção de máquinas ferramenta flexíveis e portáteis capazes de realizar as ligações pretendidas sem o constrangimento de terem de ser efetuadas em fábrica.

Referências

- [1] M. Merklein, J. Allwood, B.-A. Behrens, A. Brosius, H. Hagenah, K. Kuzman, K. Mori, A. Tekkaya, and A. Weckenmann. Bulk forming of sheet metal. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 61(2): 725–745, 2012.
- [2] K. Mori and T. Nakano. State-of-the-art of plate forging in japan. *Production Engineering*, 10(1): 81–91, 2016.
- [3] W. Homberg and D. Hornjak. Friction-spinning of tubular components—basic research on parameter influence and process design. In *Steel research international—Special Edition, 10th international conference on technology in plasticity*, pages 548–553, 2011.
- [4] K.-i. Mori, N. Bay, L. Fratini, F. Micari, and A. E. Tekkaya. Joining by plastic deformation. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 62(2):673–694, 2013.
- [5] C. LeBacq, Y. Brechet, H. Shercliff, T. Jeggy, and L. Salvo. Selection of joining methods in mechanical design. *Materials & design*, 23(4):405–416, 2002.
- [6] L. Alves and P. Martins. Tube branching by asymmetric compression beading. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(5):1200–1208, 2012.
- [7] A. Gonçalves, L. M. Alves, and P. A. Martins. Inclined tube-sheet plastically deformed joints. *steel research international*, 85(1):67–75, 2014.
- [8] P. Sieczkarek, L. Kwiatkowski, N. Ben Khalifa, and A. E. Tekkaya. Novel five-axis forming press for the incremental sheet-bulk metal forming. In *Key Engineering Materials*, volume 554, pages 1478–1483. Trans Tech Publ, 2013.
- [9] M. Merklein, A. E. Tekkaya, A. Brosius, S. Opel, L. Kwiatkowski, B. Plugge, and S. Schunk. Machines and tools for sheet-bulk metal forming. In *Key Engineering Materials*, volume 473, pages 91–98. Trans Tech Publ, 2011.
- [10] M. W. R. Robert J. Braidwood. *Stone Age*. Anthropology in Encyclopedia Britannica. School and Library Subscribers, 2016.
- [11] R. W. Messler. The challenges for joining to keep pace with advancing materials and designs. *Materials & Design*, 16(5):261–269, 1995.


- [12] R. Budynas and K. Nisbett. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. McGraw Hill, 2006.
- [13] M. F. Ashby, H. Shercliff, and D. Cebon. *Materials: engineering, science, processing and design*. Butterworth-Heinemann, 2013.
- [14] R. W. Messler. *Joining of materials and structures: from pragmatic process to enabling technology*. Butterworth-Heinemann, 2004.
- [15] L. Alves and P. Martins. Single-stroke mechanical joining of sheet panels to tubular profiles. *Journal of Manufacturing Processes*, 15(1):151–157, 2013.
- [16] L. M. Alves and P. A. Martins. Joining sheets to tubular profiles by tube forming. *Computational Methods for Optimizing Manufacturing Technology: Models and Techniques: Models and Techniques*, page 319, 2012.
- [17] L. M. Alves, E. J. Dias, and P. A. Martins. Joining sheet panels to thin-walled tubular profiles by tube end forming. *Journal of Cleaner Production*, 19(6):712–719, 2011.
- [18] P. Martins and J. Rodrigues. *Tecnologia mecânica – tecnologia da deformação plástica. Volumes I, Escolar Editora*, 2010.
- [19] P. Groche, S. Wohletz, M. Brenneis, C. Pabst, and F. Resch. Joining by forming—a review on joint mechanisms, applications and future trends. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(10):1972–1994, 2014.
- [20] T. Barnes and I. Pashby. Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles: Part i—solid and liquid phase welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 99(1):62–71, 2000.
- [21] J. R. Dufloy, J. W. Sutherland, D. Dornfeld, C. Herrmann, J. Jeswiet, S. Kara, M. Hauschild, and K. Kellens. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 61(2):587–609, 2012.
- [22] G. Ingarao, R. Di Lorenzo, and F. Micari. Sustainability issues in sheet metal forming processes: an overview. *Journal of Cleaner Production*, 19(4):337–347, 2011.
- [23] S. P. Timoshenko and J. M. Gere. *Theory of elastic stability*. Courier Corporation, 2009.
- [24] J. Alexander. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 13(1):10–15, 1960.
- [25] W. Abramowicz and N. Jones. Dynamic axial crushing of circular tubes. *International Journal of Impact Engineering*, 2(3):263–281, 1984.
- [26] R. Grzebieta. An alternative method for determining the behaviour of round stocky tubes subjected to an axial crush load. *Thin-walled structures*, 9(1):61–89, 1990.
- [27] N. Gupta, G. Sekhon, and P. Gupta. A study of fold formation in axisymmetric axial collapse of round tubes. *International journal of impact engineering*, 27(1):87–117, 2002.

- [28] F. Bardi, H. Yun, and S. Kyriakides. On the axisymmetric progressive crushing of circular tubes under axial compression. *International Journal of Solids and Structures*, 40(12):3137–3155, 2003.
- [29] P. Rosa, J. Rodrigues, and P. Martins. External inversion of thin-walled tubes using a die: experimental and theoretical investigation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(8):787–796, 2003.
- [30] B. Gouveia, M. Alves, P. Rosa, and P. Martins. Compression beading and nosing of thin-walled tubes using a die: experimental and theoretical investigation. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 3(1):7–16, 2006.
- [31] N. Gupta et al. Collapse mode transitions of thin tubes with wall thickness, end condition and shape eccentricity. *International journal of mechanical sciences*, 48(2):210–223, 2006.
- [32] N. Gupta et al. A study of the influence of diameter and wall thickness of cylindrical tubes on their axial collapse. *Thin-walled structures*, 44(3):290–300, 2006.
- [33] L. Guist and D. P. Marble. Prediction of the inversion load of a circular tube. 1966.
- [34] T. Reddy. Guist and marble revisited—on the natural knuckle radius in tube inversion. *International journal of mechanical sciences*, 34(10):761–768, 1992.
- [35] Z. Sun and H. Yang. Study on forming limit and feasibility of tube axial compressive process. *Journal of materials processing technology*, 187:292–295, 2007.
- [36] G. Sekhon, N. Gupta, and P. Gupta. An analysis of external inversion of round tubes. *Journal of Materials Processing Technology*, 133(3):243–256, 2003.
- [37] P. A. Rosa, R. M. Baptista, J. M. Rodrigues, and P. A. Martins. An investigation on the external inversion of thin-walled tubes using a die. *International Journal of Plasticity*, 20(10):1931–1946, 2004.
- [38] L. Alves, J. Medeiros, and P. Martins. Cold end forming of welded steel tubes. *Dynamic Methods and Process Advancements in Mechanical, Manufacturing, and Materials Engineering*, page 226, 2012.
- [39] Y.-H. Lu. Study of tube flaring ratio and strain rate in the tube flaring process. *Finite elements in analysis and design*, 40(3):305–318, 2004.
- [40] F. D. Fischer, F. G. Rammerstorfer, and T. Daxner. Flaring—an analytical approach. *International Journal of Mechanical Sciences*, 48(11):1246–1255, 2006.
- [41] N. Sá. Processo de enformação de cascas toroidais de parede fina: Análise numérica e experimental. *Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico*, 2010.
- [42] D. Hutton. *Fundamentals of finite element analysis*. McGraw-Hill, 2004.
- [43] J. N. Reddy. *An introduction to the finite element method*, volume 2. McGraw-Hill New York, 1993.

- [44] C. V. Nielsen, W. Zhang, L. Alves, N. Bay, and P. Martins. *Modeling of thermo-electro-mechanical manufacturing processes: applications in metal forming and resistance welding*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [45] P. Rosa, O. Kolednik, P. Martins, and A. Atkins. The transient beginning to machining and the transition to steady-state cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(12): 1904–1915, 2007.
- [46] Tungaloy. *Cutting Tools*. IMC Group. 2013. URL www.tungaloy.com.

Anexo A

Anexos



a marca do alumínio
the aluminium brand

FICHA TÉCNICA EXTRUSÃO
EXTRUSION TECHNICAL DATASHEET

LIGA EN AW 6063 (Al Mg0,7Si)
EN AW 6063 (Al Mg0,7Si) ALLOY

PRODUTO | PRODUCT

Ferrol de alumínio extrudado com EN AW 6063 (Al Mg0,7Si) [norma europeia].
Extruded aluminium profile EN AW 6063 (Al Mg0,7Si) alloy [EUROPEAN STANDARD].

EXTRUSÃO DE ACORDO COM A NORMA
EXTRUSION IN COMPLIANCE TO STANDARD


EN 12020-2
EN 12020-2

CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE ACORDO COM A NORMA EN 755-2
MECHANICAL PROPERTIES IN COMPLIANCE TO STANDARD EN 755-2

TEMPERATURE / TEMPERATURA	T4	T3	T5	T6
WALL THICKNESS (e)	e<25	e<3	3<e<25	e<10 10<e<25
Rm (MPa) Min.	130	175	160	215 195
Rp0,2 (MPa) Min.	65	130	110	170 160
A%	14	8	7	8 8

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ACORDO COM A NORMA EN 573-3
CHEMICAL COMPOSITION IN COMPLIANCE TO STANDARD EN 573-3

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	OTHER ELEMENTS OUTER ELEMENTS	TOTAL
MIN.	0,20	-	-	-	0,45	-	-	-	RESTANTE REMAINDER	-	-
MAX.	0,60	0,35	0,10	0,10	0,90	0,10	0,10	0,10		0,05	0,15



Este é a reprodução deste documento. O plano a agradecer.
Please, avoid reproducing this document. The plan will be grateful.

revisão: 2011/09/28 PG 02_24/02



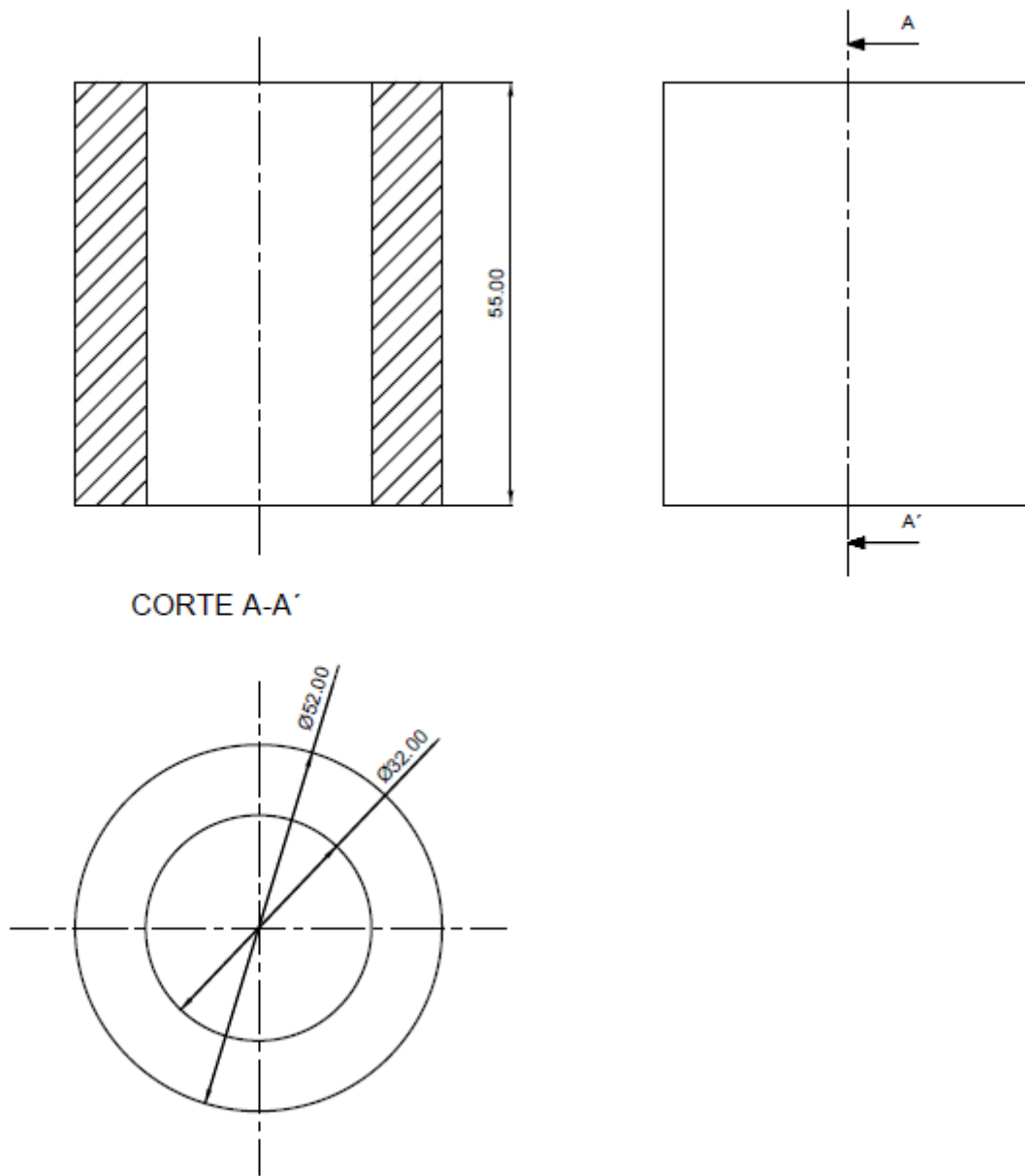
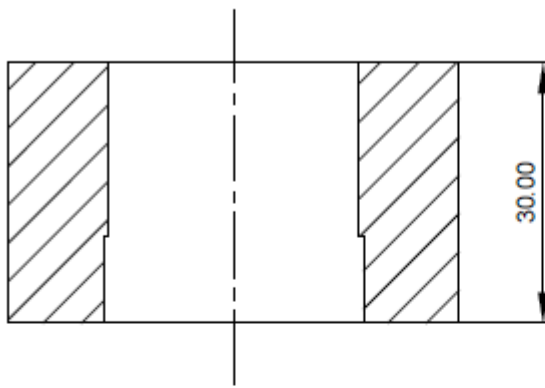



Figura A.1: Certificado da liga de alumínio AA6063T5



CORTE A-A'

Figura A.2: Desenho Técnico 1. Matriz Inferior



CORTE A-A'

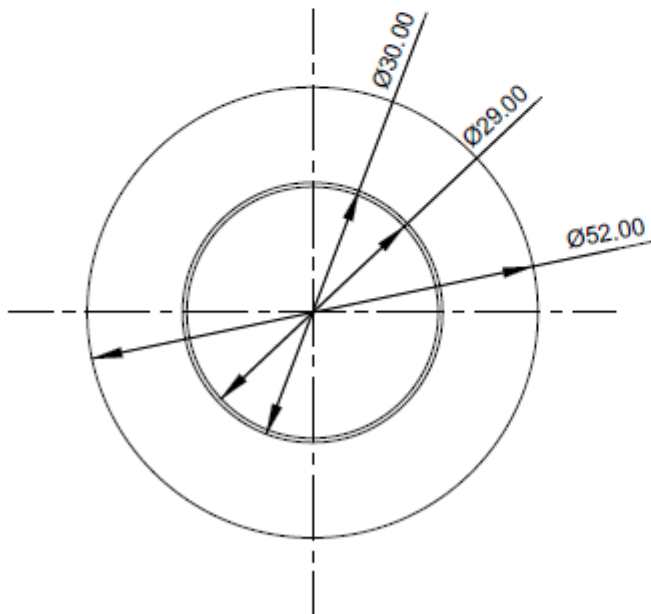
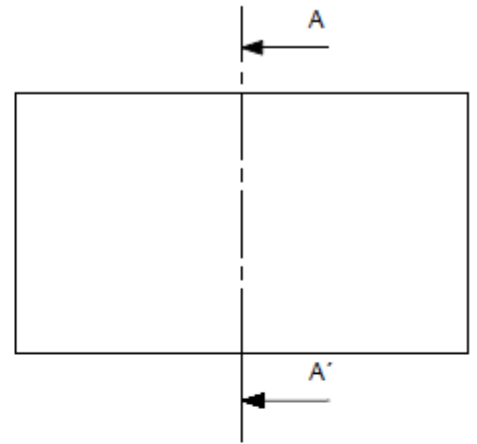


Figura A.3: Desenho Técnico 2. Matriz Superior

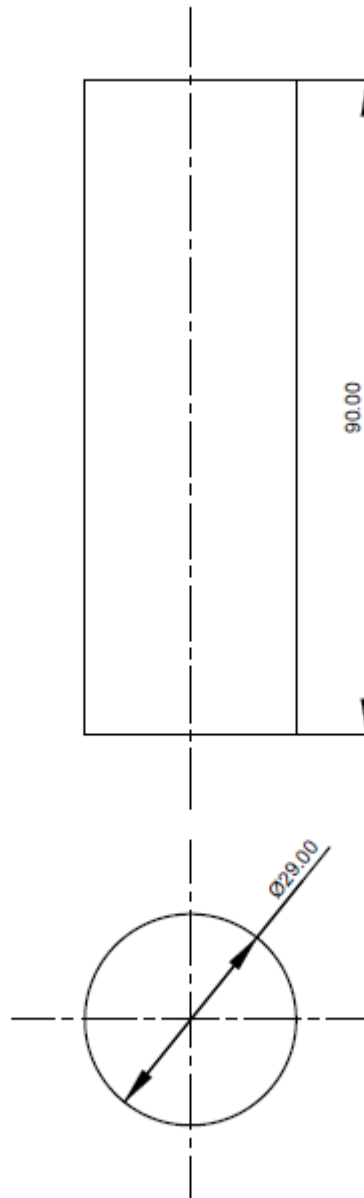


Figura A.4: Desenho Técnico 3. Mandril

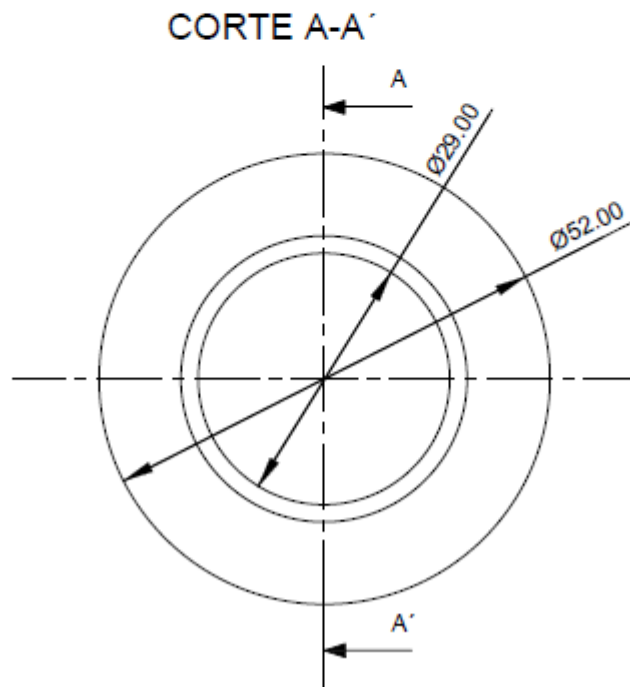
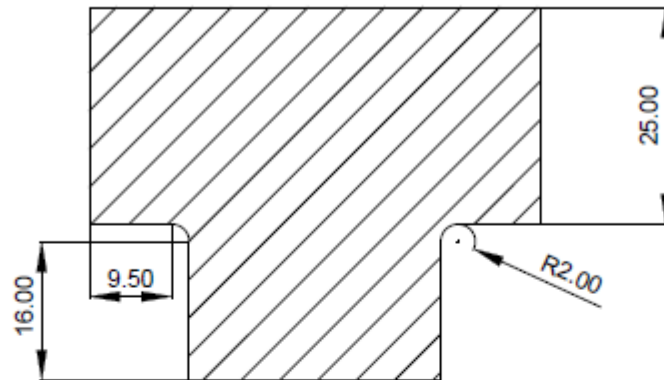


Figura A.5: Desenho Técnico 4. Matriz de Inversão

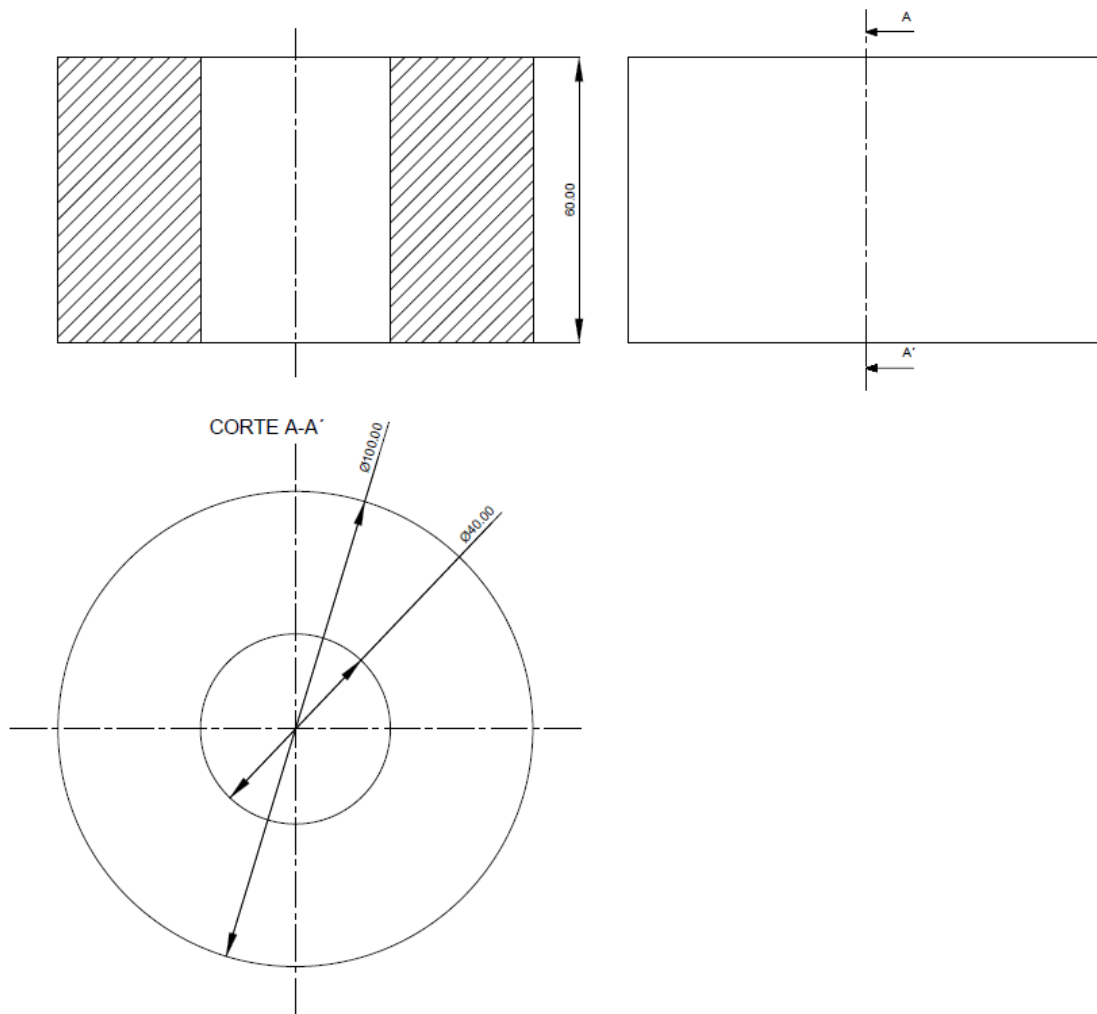


Figura A.6: Desenho Técnico 5. Matriz de Separação