

# **BOSS FORMING DE VARÕES**

Análise experimental e numérica

**André Filipe Sampaio Pires**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Mecânica**

Orientadores: Prof. Luís Manuel Mendonça Alves  
Eng. Rafael Augusto Nunes Miranda Malta Afonso

**Júri**

Presidente: Prof. Rui Manuel Dos Santos Oliveira Baptista  
Orientador: Eng. Rafael Augusto Nunes Miranda Malta Afonso  
Vogais: Eng. João Miguel Teixeira Monteiro  
Prof. Carlos Manuel Alves da Silva

**Novembro 2018**

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar, quero agradecer aos meus orientadores, Prof. Luís Alves e Mestre Rafael Afonso por todo o acompanhamento e apoio recebido ao longo desta etapa. Muito obrigado, não só pela compreensão e paciência mas também pelo tempo disponibilizado a esclarecer dúvidas e a ajudar a ultrapassar as dificuldades encontradas ao longo do trabalho.

Quero agradecer à minha família por todo o apoio que me deram durante o meu progresso académico.

Por último, mas não menos importante, quero agradecer à minha companheira Ana, pela extrema dedicação e apoio que me motiva a enfrentar qualquer obstáculo.



## **Abstract**

Recent trends in manufacturing industries drive the development and research for more flexible metal forming processes, capable of meeting new customer demands, such as joining dissimilar materials.

The new process for producing annular flanges on rods is based on a previous process of boss forming of tubes. The overall mechanism that controls the process is boss forming, that was utilized to produce the bottom annular flange on the rod, with a cross section that can provide an adequate surface for supporting a sheet, for example.

In addition, a brief study on the joining by forming of rods to sheets is presented where boss forming was utilized on the rod to produce not only the supporting annular flange but also the top annular flange that allows to mechanically lock the two components.

This dissertation combines experimental tests and finite element analysis in order to identify the modifications from the previous process of boss forming of tubes, that make possible to accomplish this new proposed boss forming process applied to rods, as well as the parameters that control its feasibility.

The results from this work are presented along the advantages and drawbacks of the new boss forming process. The efficiency of the new proposed mechanical joint is verified by a destructive pull-out test, which evaluates the force needed to separate the rod from the sheet.

**Keywords:** Boss Forming, Cold Forming, Joining, Rod, Sheet, Finite element modeling

## Resumo

As tendências recentes nas indústrias de fabrico têm levado ao desenvolvimento e procura de processos de ligação mais flexíveis e capazes de satisfazer as novas necessidades dos clientes, tais como ligar materiais dissimilares.

O novo processo proposto para a produção de flanges anelares em varão é baseado num processo anterior de *Boss Forming* de tubos. O mecanismo geral que controla o processo de *Boss Forming* foi utilizado para produzir a flange inferior no varão, produzindo-se uma secção que pode fornecer uma superfície adequada para suportar uma chapa, por exemplo.

Além disso, é apresentado um breve estudo da ligação por deformação de varões a chapas onde se utiliza uma operação de *Boss Forming* não só para produzir a flange anelar de suporte, mas também para produzir a flange superior que permite bloquear mecanicamente os dois componentes.

A presente dissertação conjuga ensaios experimentais e modelação em elementos finitos, com o propósito de identificar as alterações face ao processo anterior aplicado a tubos, que permitem agora aplicar este processo de *Boss Forming* a varões, analisando-se também os parâmetros que controlam a sua realização.

Os resultados deste trabalho são apresentados juntamente com as vantagens e limitações do processo desenvolvido. A eficiência da nova ligação mecânica proposta é verificada recorrendo a um ensaio destrutivo, que avalia a força necessária até à separação da chapa do varão.

**Palavras-chaves:** Enformação a frio, União, Interligação mecânica, Varão, Chapa, Modelação em elementos finitos

## Conteúdo

Agradecimentos.....	I
Abstract.....	III
Resumo .....	IV
Conteúdo .....	V
Lista de Figuras .....	VII
Lista de Tabelas .....	IX
Nomenclatura .....	IX
Símbolos Gregos.....	X
Capítulo 1 .....	1
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação .....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Estrutura da tese .....	3
Capítulo 2 .....	5
2. Estado da arte .....	5
2.1. Introdução.....	5
2.2. Produção de flanges anelares em varão por deformação plástica .....	6
2.3. Ligação Varão a chapa.....	7
2.3.1. Ligações por deformação plástica.....	9
2.4. Produção Sustentável .....	12
Capítulo 3 .....	14
3. Teoria da plasticidade .....	14
3.1. Introdução.....	14
3.2. Teoria da plasticidade .....	14
3.2.1. Conceito de Tensão e extensão.....	14
3.2.2. Critérios de plasticidade .....	16
3.2.3. Equações Constitutivas .....	18
Capítulo 4 .....	19
4. Método dos elementos finitos.....	19
4.1. Introdução.....	19
4.2. Equações fundamentais .....	20
4.3. I-FORM .....	21
Capítulo 5 .....	22
5. Desenvolvimento Experimental .....	22
5.1. Introdução.....	22
5.2. <i>Boss Forming</i> de varões.....	22

5.2.1.	Caracterização do material.....	22
5.2.2.	Descrição do processo de <i>Boss Forming</i> .....	24
5.2.3.	Equipamentos e Ferramentas .....	24
5.2.4.	Procedimento Experimental .....	26
5.3.	Aplicação do processo – Ligação varão a chapa.....	26
5.3.1.	Chapas utilizadas .....	26
5.3.2.	Descrição do processo de ligação.....	27
5.3.3.	Ferramentas – Segunda operação.....	28
5.3.4.	Procedimento experimental – segunda operação.....	29
5.4.	Ensaio realizados .....	30
5.4.1.	Análise do processo de <i>Boss Forming</i> .....	30
5.4.2.	Ligação a chapa – Aplicação do processo de <i>Boss Forming</i> .....	32
5.4.3.	Ensaio destrutivo de separação .....	35
Capítulo 6	.....	36
6.	Modelação em Elementos Finitos .....	36
6.1.	Introdução.....	36
6.2.	Refinamento da malha .....	36
6.3.	Parâmetros da Simulação Numérica.....	36
6.4.	Simulações Numéricas Realizadas .....	37
6.4.1.	Deformação pretendida e formação de apara.....	38
6.4.2.	Introdução do anel de pressão – Alteração do estado de tensão.....	40
6.4.3.	Aplicação do processo de <i>Boss Forming</i> em varão – Ligação varão a chapa .....	41
Capítulo 7	.....	43
7.	Apresentação de resultados e discussão.....	43
7.1.	Introdução.....	43
7.2.	Discussão dos resultados.....	43
7.2.1.	Operação de <i>Boss Forming</i> – Controlo dos modos de deformação.....	43
7.2.2.	Fissuração - Controlo do estado de tensão .....	45
7.2.3.	Aplicação do processo de <i>Boss Forming</i> - Ligação Varão a chapa.....	46
7.3.	Evolução da carga com o deslocamento .....	48
7.3.1.	Operação de <i>Boss Forming</i> .....	48
7.3.2.	Ensaio de separação.....	49
Capítulo 8	.....	50
8.	Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuro .....	50
8.1.	Conclusões .....	50
8.2.	Perspetivas de Trabalho Futuro .....	50
Referências	.....	52

## Lista de Figuras

Figura 1 – Representação esquemática do processo de produção de flanges anelares em tubos e varões. (a) Processo anterior (b) Novo processo proposto, que consiste numa matriz superior, móvel, que comprime o material para as matrizes fixas inferiores.....	3
Figura 2 – Representação esquemática do processo de produção de flanges anelares em tubos por <i>boss forming</i> em tubos (a) Primeiro processo de <i>boss forming</i> proposto com escoamento de material não restringido (b) Processo de <i>boss forming</i> melhorado onde o material é acumulado numa cavidade, adaptado de [7] .....	5
Figura 3 - Esquema do processo de extrusão radial[7] (a) compressão unilateral (b) compressão bilateral .....	6
Figura 4 - Fases do processo de ligação de varão a chapa por acumulação de material desenvolvido por Narayanan[11].....	7
Figura 5 - Ilustração de ligação aparafusada de varão a chapa. ....	8
Figura 6 - Ilustração de ligação soldada de varão a chapa .....	8
Figura 7 - Ilustração de ligação tubo a chapa por adesivo .....	9
Figura 8 - Ilustração dos mecanismos básicos de ligação por deformação plástica em varão. (a) Pressão de interferência através da contração térmica [16] (b) Bloqueio mecânico ( <i>Interlocking</i> ) por deformação plástica[11] .....	10
Figura 9 - Ligações tubo a chapa por processos de deformação plástica. (a) Primeira ligação tubo a chapa, por bloqueio mecânico com o processo de <i>flaring</i> [5]. (b) Ligação tubo a chapa por bloqueio mecânico com o processo de <i>upsetting</i> . (c) Processo de <i>Boss Forming</i> em tubo de parede fina[6] ...	11
Figura 10 - Estado de tensão tridimensional num elemento de volume .....	15
Figura 11 - Critério de Tresca e de von Mises representados no espaço das tensões principais, adaptado de Brotons et al.[20] .....	17
Figura 12 - Discretização de uma secção de varão por uma malha com 5360 elementos, $1 \times 1 \text{mm}^2$ por elemento na região azul e $0,1 \times 0,1 \text{mm}^2$ por elemento na região amarela.....	20
Figura 13 - Curva de temperatura do tratamento térmico com base nas recomendações ASM.....	23
Figura 14 - Curvas tensão efetiva-extensão efetiva dos materiais de varão caracterizados .....	23
Figura 15 – Representação esquemáticas de <i>Boss Forming</i> com a primeira geometria proposta .....	24
Figura 16 – Conjunto de ferramentas da primeira operação. Por ordem de montagem: 1- Matriz Inferior (com cavidade) 2- Matriz inferior (de guiamento) 3- Matriz superior .....	25
Figura 17 – Curva tensão efetiva-extensão efetiva do aço DC04.....	27
Figura 18 – Representação esquemática da segunda operação do processo de ligação por <i>Boss Forming</i> .....	28
Figura 19 - Conjunto de ferramentas da segunda operação. Por ordem de montagem: 1 – Matriz inferior, igual à primeira operação 2- Matriz de guiamento 3- Matriz superior.....	29
Figura 20 – Resultados dos primeiros ensaios experimentais (a) Varão deformado em condições do Caso A com $a=6\text{mm}$ b) Varão deformado em condições dos Caso B e C. ....	31



Figura 21 – Nova ferramenta do processo adaptado. a) Nova ferramenta com o anel de pressão b) representação esquemática do processo <i>Boss Forming</i> anterior (esquerda) e do processo modificado (direita).....	32
Figura 22 – Varão Enformado por o processo de <i>Boss Forming</i> com a nova ferramenta adaptada com o anel de pressão .....	32
Figura 23- Representação esquemática da ligação mecânica varão a chapa obtida por processo de <i>Boss Forming</i> .....	34
Figura 24 - Ligação mecânica por deformação plástica de varão a chapa. (a) Chapa de alumínio AA1050 AH14 $t_s=1\text{mm}$ (b) Chapa de aço DC04 $t_s=1,5\text{mm}$ (c) Perfil da secção da ligação varão a chapa de aço $t_s=1,5\text{mm}$ .....	35
Figura 25 - Representação esquemática do ensaio de separação .....	35
Figura 26 – Representação geral do processo de <i>Boss Forming</i> .....	39
Figura 27 – Ilustração da geometria da secção de varão do varão enformado por <i>Boss Forming</i> .....	40
Figura 28 – Representação esquemática do anel de pressão.....	40
Figura 29 – Distribuição da tensão média [MPa] na fase final da simulação numérica do processo de <i>Boss Forming</i> (a) Sem anel de pressão (b) com anel de pressão. As fotografias evidenciam a ocorrência e ausência de fissuras ao longo do comprimento de material acumulado $b$ .....	41
Figura 30 – Modos de deformação do processo de <i>Boss Forming</i> (a) Representação geral do processo de <i>Boss Forming</i> (b) Remoção de material $a=0,4\text{mm}$ c) Acumulação de material $a=1\text{mm}$ (d) Varão com ambos os modos de deformação, $a=0,6\text{mm}$ (e) Varão com acumulação de material pretendida $a=1\text{mm}$ . .....	44
Figura 31- Comparação do processo de <i>Boss Forming</i> sem anel de pressão e com anel de pressão. (a) Esquema do processo sem anel de pressão (esquerda) e com anel de pressão (direita) (b) Distribuição da tensão média [MPa] no final da operação sem anel de pressão (c) Distribuição da tensão média no final da operação com anel de pressão.....	46
Figura 32 – (a)Representação esquemática das operações de <i>Boss Forming</i> usadas para ligar varão a chapa. (b) Deformação em varão para pequenos deslocamentos. (c) Secção de corte da ligação varão a chapa de aço .....	47
Figura 33 – Comparação numérico-experimental da evolução da força com o deslocamento do processo de <i>Boss Forming</i> .....	48
Figura 34 – Ensaio destrutivo realizado (a) Representação esquemática do ensaio (b) Evolução da força com o deslocamento prevista pela simulação numérica e do ensaio experimental. ....	49

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Sumário das características dos processos de ligação mais usados, adaptado de Alves et al.[15].....	12
Tabela 2 – Diâmetro inicial $d_0$ e altura inicial $h_0$ dos provetes usados nos ensaios de caracterização do material dos varões e chapa .....	23
Tabela 3 – Sumário do primeiro grupo de ensaios da primeira operação e representação esquemática do processo. ....	30
Tabela 4 - Parâmetros utilizados nos ensaios com a ferramenta modificada .....	32
Tabela 5 - Resumo dos ensaios realizados da segunda operação de <i>Boss Forming</i> .....	33
Tabela 6 - Simulações numéricas realizadas.....	<b>Erro! Marcador não definido.</b>

## Nomenclatura

$F(\sigma_{ij})$	- Função limite de elasticidade
$k$	- Constante associada aos critérios de plasticidade dos metais
$E$	- Módulo de Young
$d_0$	- Diâmetro inicial do provete
$h_0$	- Altura inicial do provete
$a$	- Espessura de material acumulado
$b$	- Comprimento de material acumulado
$c$	- Largura da secção da cavidade da matriz inferior
$d$	- Altura da secção da cavidade da matriz superior
$r_{pr}^i$	- Raio interno do anel de pressão
$r_{pr}^o$	- Raio externo do anel de pressão
$t_s$	- Espessura da chapa

## Símbolos Gregos

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

# Capítulo 1

---

## 1. Introdução

Os valores e estrutura da sociedade estão em constante mudança, acompanhados por alterações na procura de produtos e serviços. Nas últimas décadas tem sido feito um esforço e investimento a nível global para tornar as indústrias mais ecológicas, reduzir gastos e diminuir o uso de substâncias tóxicas [1]. Esta tendência incita o desenvolvimento de novos processos e melhoria dos que já existem para satisfazer a necessidade de uma produção mais limpa, sem perda de qualidade e competitividade.

Segundo Messler [2], os processos de ligação são os mais presentes e menos entendidos dos processos de fabrico de um produto. De facto, unir vários componentes é fundamental para obter tanto produtos simples, como outros de elevada complexidade. Estes produtos são o resultado do uso de processos de ligação para unir vários componentes independentes num todo e cumprir um determinado objetivo, que não seria possível atingir satisfatoriamente ou de todo usando um único componente.

A elevada competitividade das indústrias de fabrico, apresenta a oportunidade de desenvolver métodos de ligação que sejam de fácil aplicação, com menos custos e reduzido desperdício de material. Pretende-se também que seja possível automatizar o processo para se obter elevados níveis de repetibilidade e maiores taxas de produção. Acrescentando a possibilidade de unir diferentes tipos de materiais sem limitações, obtém-se um processo que oferece uma maior versatilidade relativamente aos processos atuais.

O trabalho realizado consiste numa enformação tubular na direção da espessura, (ou *Boss Forming*), aplicada em varões de alumínio. A operação de *Boss Forming*, agora utilizada em varão resulta da adaptação de um conceito já existente em tubos para obter um engrossamento local na sua periferia através da redução de diâmetro. As flanges obtidas, neste processo servem de suporte a diferentes geometrias, como chapas, e neste trabalho serão apresentadas igualmente exemplos de ligações de chapas a varões utilizando também uma operação de *Boss Forming* semelhante à primeira operação.

### 1.1. Motivação

O alumínio é o segundo metal mais usado no mundo e existem variadas ligas de alumínio com propriedades distintas. Além disso, é um material com boa relação de peso e resistência mecânica. Em particular na indústria automóvel, o alumínio tem sido o material de eleição para produzir estruturas mais leves, de maneira a reduzir gastos energéticos e emissões de CO<sub>2</sub>. Com este objetivo, também são utilizados materiais dissimilares que se adequam melhor a cada função em proveito de avanços recentes na produção de materiais compósitos. Assim para ser possível produzir

estruturas mais leves de uma maneira sustentável é necessário haver desenvolvimento para encontrar os processos de ligação mais adequados.

Um dos processos de ligação mais usado para unir estruturas é a soldadura, no entanto, o alumínio possui elevada condutividade térmica, elevado coeficiente de expansão térmica e pouca solubilidade de hidrogénio que dificulta o processo de soldadura independentemente do método. Estas propriedades originam defeitos como fissuração a quente, porosidades e má geometria da soldadura e a sua causa ainda é pouco entendida no caso da porosidade. A produção de grandes volumes com elevada repetibilidade torna-se assim um desafio nestas condições [3].

O forjamento a frio é uma operação de deformação plástica realizada à temperatura ambiente, e é um processo bem conhecido pela sua elevada repetibilidade e fiabilidade, e que não sofre dos defeitos mencionados anteriormente. No entanto os processos de deformação plástica têm dificuldades em satisfazer as necessidades dos consumidores que estão em constante mudança. Por isso, é necessário encontrar novos métodos e aplicações que permitem expandir e aumentar a versatilidade dos processos de deformação plástica para satisfazer essas necessidades [4].

O trabalho anterior de Alves et al. [5] atingiu o objetivo de encontrar soluções para um novo processo de ligação de tubo a chapa através da produção de flanges anelares por deformação plástica a frio. Este processo, conhecido por *Boss Forming*, foi otimizado no trabalho de Alves et al.[6] onde algumas das suas limitações foram eliminadas além de mostrar o potencial deste processo para o unir tubos a chapas de materiais dissimilares. Considerando o potencial deste processo as vantagens do mesmo em relação as técnicas de ligação convencionais, este trabalho apresenta uma extensão do seu uso: *Boss Forming* de varões.

Aumentar a aplicabilidade do processo de *Boss Forming* a diferentes geometrias possibilita o desenvolvimento de uma alternativa aos processos de ligação convencionais, que seja inovadora, sustentável e mais universal. Assim, foi feita a escolha de aplicar o processo a varões, que é uma geometria amplamente utilizada em diversas estruturas. Nesta dissertação também é apresentado um exemplo de ligação que utiliza apenas operações de *Boss Forming*: uma para obter a flange no varão e outra para realizar o bloqueio mecânico do varão à chapa.

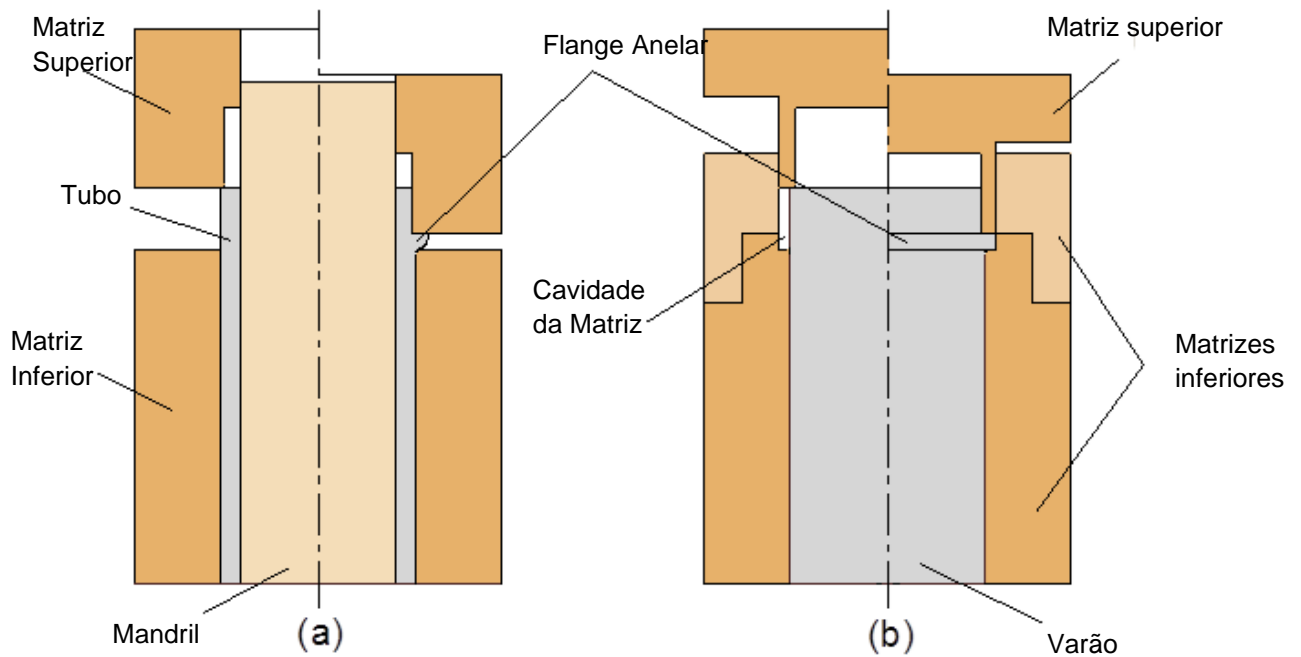


Figura 1 – Representação esquemática do processo de produção de flanges anelares em tubos e varões. (a) Processo anterior (b) Novo processo proposto, que consiste numa matriz superior, móvel, que comprime o material para as matrizes fixas inferiores.

## 1.2. Objetivos

Esta dissertação apresenta um novo processo de produção de flanges anelares em varão por deformação plástica, baseado no processo desenvolvido anteriormente para tubos de parede fina[7].

O novo processo desenvolvido é acompanhado de um estudo comparativo entre simulações numéricas e resultados experimentais. O estudo numérico assenta na utilização do método de elementos finitos através do programa I-FORM, para compreender e controlar as características do processo de deformação e o estudo experimental passou pelo projeto e desenvolvimento de novas ferramentas e verificar a validade das simulações numéricas.

Com este estudo foi possível mostrar uma aplicação do processo desenvolvido para unir varão a chapa por bloqueio mecânico utilizando apenas operações de *Boss Forming*.

## 1.3. Estrutura da tese

A presente dissertação está dividida em 8 capítulos. O primeiro capítulo aborda o contexto que motivou a realização desta dissertação e apresenta os objetivos da mesma.

No segundo capítulo é apresentado o “Estado da Arte” do processo de *Boss Forming* e produção de flanges anelares em varões por deformação plástica. Este capítulo inclui uma breve exposição sobre ligações de varão a chapa com ênfase nos processos de ligação por deformação plástica.

O terceiro capítulo “Teoria da Plasticidade” expõe os fundamentos teóricos da plasticidade que explicam e ajudam a deformação observada. O quarto capítulo, “Método dos Elementos Finitos”, descreve o modo como os conceitos teóricos são aplicados computacionalmente pelo *software I-FORM*.

No quinto capítulo, “Desenvolvimento Experimental”, são explicadas as etapas do processo, a metodologia, bem como as ferramentas e pré-formas que permitem a sua realização.

O sexto capítulo, “Desenvolvimento Numérico”, contém as simulações numéricas realizadas e os parâmetros e simplificações que permitem a análise do processo.

No sétimo capítulo, “Apresentação de Resultados e Discussão”, são apresentados os resultados experimentais e numéricos, com respectiva comparação e discussão dos resultados obtidos.

Por último, o oitavo capítulo “Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuro” conclui com uma consideração final do processo desenvolvida, apresentando as suas vantagens e limitações, bem como algumas considerações acerca dos trabalhos futuros a realizar nesta área de conhecimento.

## Capítulo 2

### 2. Estado da arte

#### 2.1. Introdução

O processo de *Boss Forming* surgiu como extensão do processo de *Sheet Bulk Forming* [8], primeiramente desenvolvido por Alves et. al[5], para produzir flanges anelares em tubos de parede fina. *Boss Forming* é um processo de deformação plástica que consiste na compressão parcial da espessura das paredes de tubos de forma a acumular material ao longo da direção axial, resultando um engrossamento local da parede do tubo.

A primeira iteração do processo (Figura 2a) apresentava as seguintes limitações: a quantidade de material acumulado é limitada, geração de fissuras na nova superfície de material acumulado e também, devido ao escoamento livre de material, esta apresentava um perfil irregular com variação de raio. O trabalho seguinte de Alves et al.[7] otimizou o processo de *Boss Forming* introduzindo uma cavidade na matriz superior para onde o material acumulado escoava (Figura 2b). Esta modificação permite controlar as dimensões da flange através da geometria da cavidade. As flanges resultantes do processo de *boss forming* melhorado são mais robustas, têm dimensões conhecidas e a nova superfície da flange é adequada para suportar uma chapa e realizar uma ligação.

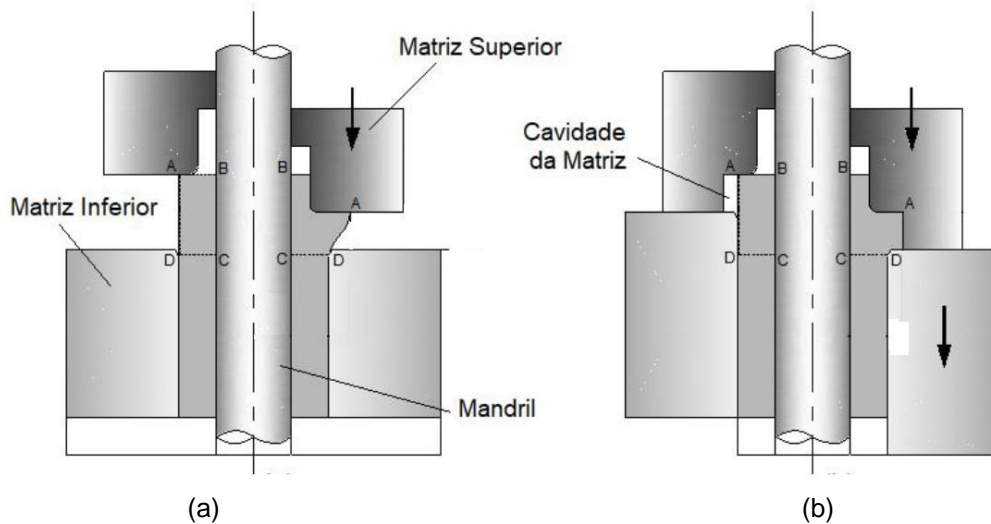


Figura 2 – Representação esquemática do processo de produção de flanges anelares em tubos por *boss forming* em tubos (a) Primeiro processo de *boss forming* proposto com escoamento de material não restringido (b) Processo de *boss forming* melhorado onde o material é acumulado numa cavidade, adaptado de [7].



## 2.2. Produção de flanges anelares em varão por deformação plástica

O processo de *Boss Forming* mostrou ser adequado para produzir flanges em tubos de parede fina, por conseguinte o foco deste estudo é a produção de flanges anelares em varão usando este processo.

Entre 1970 e 1990 Hendry[9] investigou a produção de flanges anelares em varões e tubos de aço num processo de extrusão radial. Este processo é uma variante do processo de extrusão onde o material preenche uma cavidade na matriz com escoamento na direção axial e radial. A análise do estado da arte de Balendra et al.[10] inclui uma discussão sobre o trabalho de investigação feito neste período e conclui que o processo de extrusão radial ilustrado na Figura 3 é adequado para produzir flanges anelares em varões.

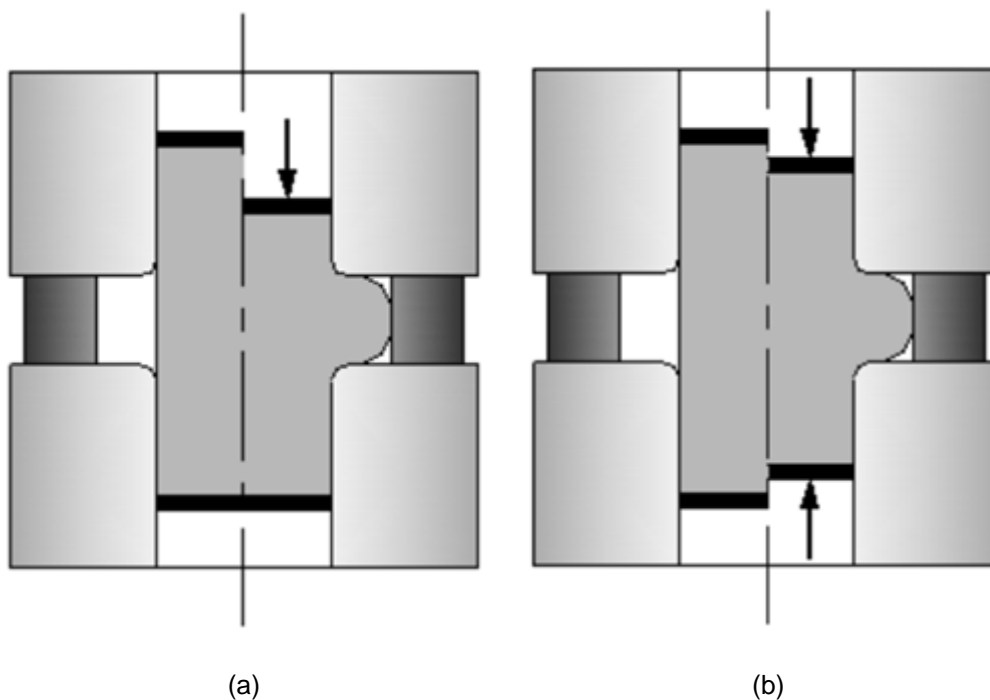


Figura 3 - Esquema do processo de extrusão radial[7] (a) compressão unilateral (b) compressão bilateral.

Neste processo de extrusão radial todo o varão é comprimido para formar a flange podendo ser realizado com compressão num só sentido, Figura 3a) ou em ambos, Figura 3 b). Em comparação com o novo processo de *Boss Forming* de varões, o varão é apenas parcialmente comprimido para formar a flange e como consequência a carga necessária ao processo é menor.

Um estudo experimental e pioneiro feito por Narayanan[11] mostra um processo para obter uma ligação de varão a chapa por bloqueio mecânico, usando operações incrementais de *boss forming*. Este processo consiste em fixar um varão a um torno e este é deformado plasticamente na extremidade livre durante a rotação por meio de uma ferramenta rígida que se movimenta na direção axial do varão. De seguida, a chapa é colocada junto ao material acumulado e é fixada temporariamente ao varão com um adesivo para se mover solidariamente a ele durante o segundo

processo de acumulação. No final é feito o segundo processo de acumulação de material, semelhante ao primeiro, que finaliza a ligação e o adesivo é removido. A Figura 4 ilustra o processo descrito:

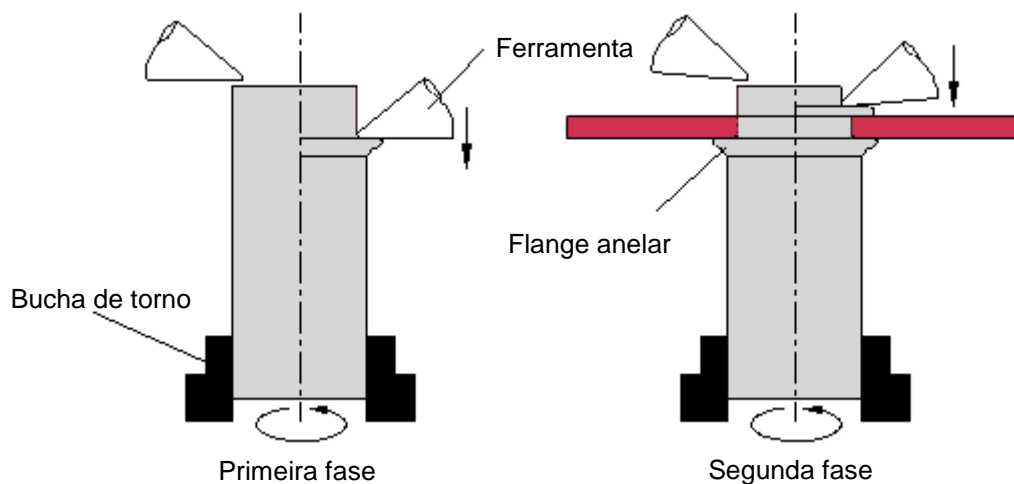


Figura 4 - Fases do processo de ligação de varão a chapa por acumulação de material desenvolvido por Narayanan[11].

Este processo é inovador a obter a ligação, e a formação de flanges incrementalmente é pertinente de um ponto de vista da força, no entanto, apresenta desvantagens que limitam a sua aplicação. O processo é demorado, existem problemas de fixação do varão e a falta de constrangimento circunferencial durante o processo conduz a mecanismos de deformação semelhante a um processo de corte por arranque de apra com uma ferramenta sem gume. A suscetibilidade de ocorrer defeitos resulta num intervalo limitado dos parâmetros do processo e em dificuldade em controlar a geometria final das flanges e obter uma ligação fiável e robusta.

No foco do estudo apresentado nesta dissertação está o processo de Boss Forming para produção de flanges anelares. Os estudos anteriores de *Boss Forming* [5], [7] mostram que a produção de flanges anelares pode ser usada para ligar tubos a chapa, do mesmo modo, uma possível aplicação do processo é a realização de ligações varão a chapa.

### 2.3. Ligação Varão a chapa

Atualmente existem vários processos de ligação possíveis de ligar varão a chapa, que serão abordados neste subcapítulo.

O processo mais simples e frequentemente utilizado é a fixação mecânica com recurso a elementos de ligação (parafusos, rebites, entre outros) [12]. Este é um processo de baixo custo, que produz ligações semipermanentes possíveis de serem montadas e desmontadas facilmente sem danificar o varão ou a chapa. No entanto, existe concentração de tensões nos pontos de ligação entre os

componentes e os elementos referidos que podem comprometer a ligação, requerendo por isso materiais com espessuras capazes de suportar essas condições. Além disso, em algumas aplicações (como no caso de chapas finas), o uso de elementos de ligação pode estar limitado por razões estéticas devido e estes ficarem acima da chapa, criando uma protuberância

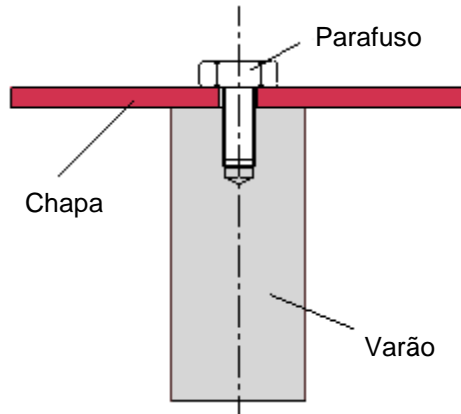


Figura 5 - Ilustração de ligação aparafusada de varão a chapa.

Outro processo também bastante utilizado é o processo de soldadura [13]. Ao contrário do anterior, este produz ligações permanentes que não são possíveis de desmontar sem danificar os componentes. As ligações soldadas também apresentam outras limitações que condicionam o seu uso na ligação de varão a chapa. Essas limitações incluem a espessura das chapas que podem ser utilizadas, os ciclos térmicos e as suas taxas de aquecimento e arrefecimento, que alteram a microestrutura dos materiais e causam distorções resultantes da expansão e compressão dos mesmos. Este último aspeto é particularmente importante no caso de materiais dissimilares em que a diferença dos pontos de fusão e a formação de compostos intermetálicos pode levar a uma ligação mais frágil.

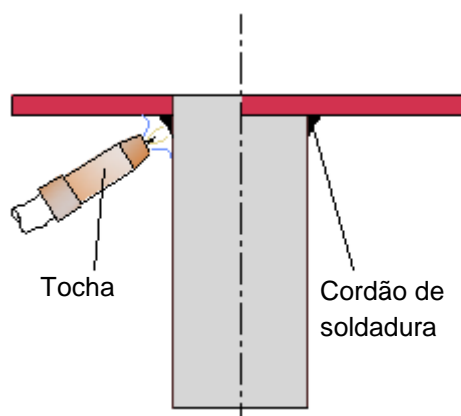


Figura 6 - Ilustração de ligação soldada de varão a chapa.

As dificuldades em soldar materiais dissimilares podem ser contornadas usando ligações adesivas, [14]. Este tipo de ligação não é influenciado pelas propriedades físicas e químicas dos componentes

a unir e ao contrário da fixação mecânica não existe concentração de tensões, visto que a tensão é distribuída uniformemente pela área de contacto do adesivo. No entanto, este processo está limitado pela temperatura de serviço, pela preparação das superfícies de contacto e pelo tempo de cura. O último aspeto enunciado requer o uso de estruturas de fixação temporária, para garantir uma distribuição uniforme de tensão na área de contacto, e todos eles condicionam a aplicação das ligações adesivas.

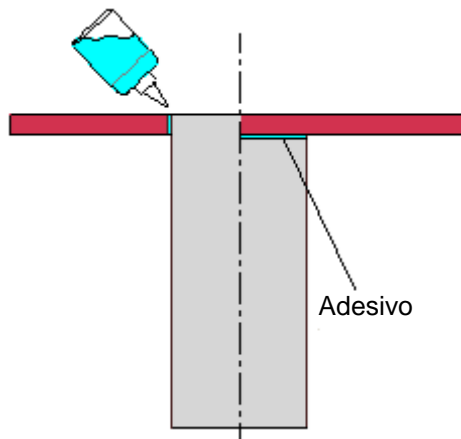


Figura 7 - Ilustração de ligação tubo a chapa por adesivo.

### 2.3.1. Ligações por deformação plástica

Atendendo ao que foi exposto, as ligações convencionais que se usam atualmente não são capazes de satisfazer todas as necessidades, nem a nível de desempenho, nem de um ponto de vista ambiental: redução uso de matérias-primas e libertação de gases, como no caso da soldadura. Neste sentido têm sido feitos estudos e desenvolvido novas ligações nos últimos anos usando processos de deformação plástica.

As ligações por deformação plástica recorrem ao uso de deformação plástica para alterar a geometria dos próprios componentes para criar constrangimentos ao movimento através de dois mecanismos básicos: bloqueio mecânico ou pressão de interferência. O uso de *boss forming* para ligar varão a chapa enquadra-se nesta subcategoria de ligações por deformação plástica. Este processo é de baixo custo, com elevada produtividade e não sofre das limitações referidas nos processos de ligação convencionais.

O primeiro tipo de mecanismo usa a pressão de contacto na interface entre os componentes a ser ligados. Esta pressão desenvolve-se quando as cargas ou pressões a que estavam sujeitos são removidas e os materiais recuperam elasticamente. O segundo tipo de mecanismo combina o escoamento do material com diferentes perfis geométricos como cavidades, contornos, dobras e saliências, para dar forma e forçar o material a realizar a ligação entre os componentes, Alves et al.[15].

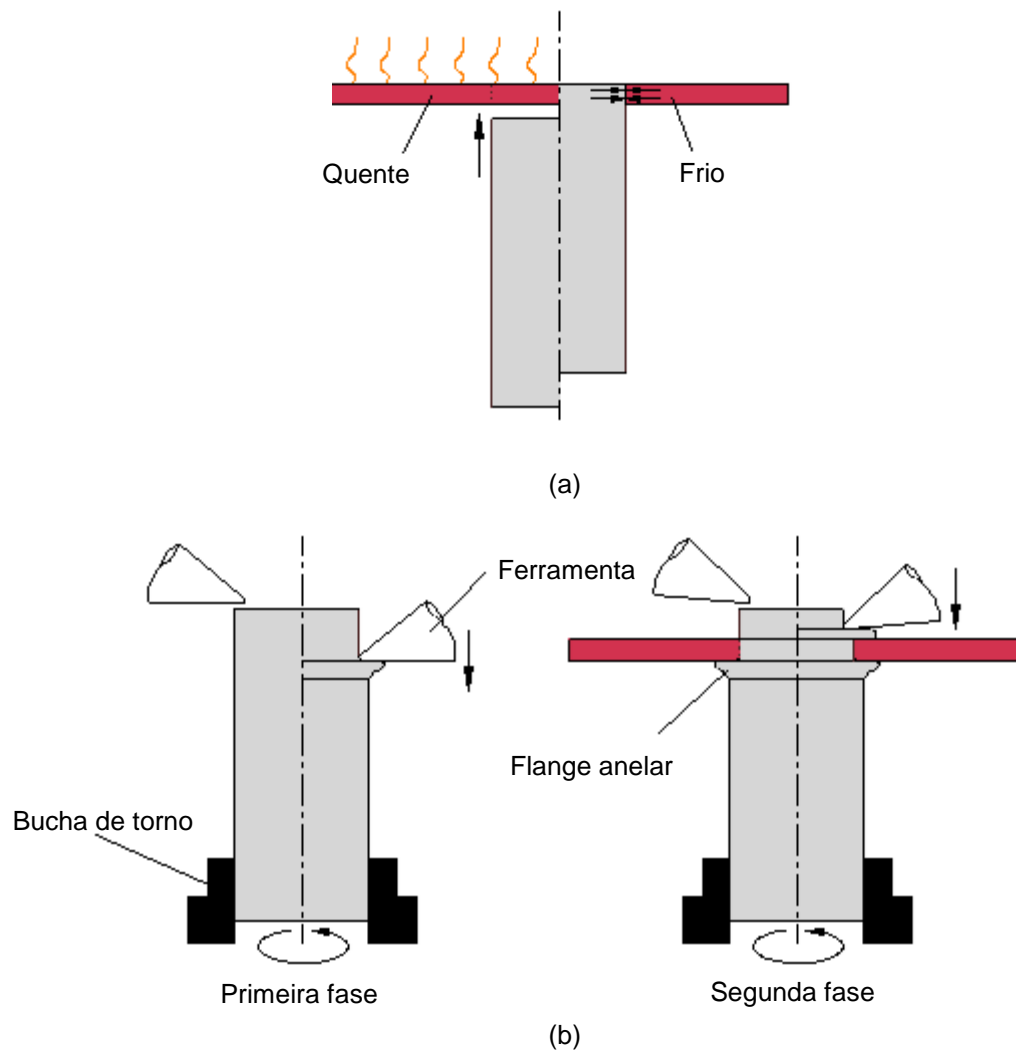


Figura 8 - Ilustração dos mecanismos básicos de ligação por deformação plástica em varão. (a) Pressão de interferência através da contração térmica [16] (b) Bloqueio mecânico (*Interlocking*) por deformação plástica[11].

Groche et al.[17] e Mori et al.[18] apresentam análises detalhadas dos processos de ligação por deformação plástica que foram desenvolvidos nos últimos anos. Alves et al.[15] dá uma visão geral desses mesmos processos e refere o desenvolvimento recente da ligação de tubo de parede fina a chapa desenvolvida por Alves et al.[6], na qual o desenvolvimento da ligação varão a chapa desta dissertação assenta.

Como já foi referido, as ligações de tubos de parede fina a chapa, desenvolvidas por Alves et al.[6], utilizam o processo de deformação plástica *Boss Forming*. A Figura 9a mostra uma ligação tubo a chapa onde a flange é obtida pelo processo original de *Boss Forming* de tubos. Nesta iteração do processo, o escoamento material não está constrangido e a flange resultante tem um perfil irregular. Deste trabalho, surgiu a modificação de conduzir o escoamento do material para uma cavidade, resultando numa flange mais robusta e com dimensões conhecidas (Figura 9c). A flange servirá de suporte à chapa e, sobre esta, será comprimida a extremidade livre do tubo para fazer a ligação num segundo processo de *upsetting* ou *flaring*.

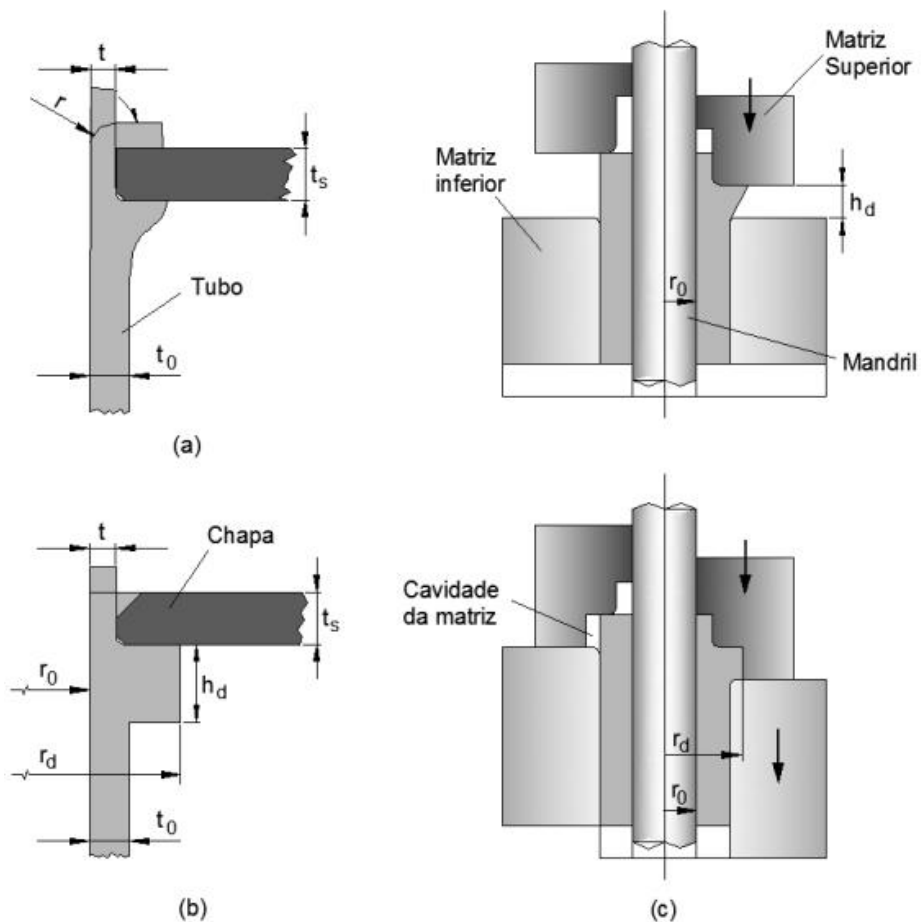


Figura 9 - Ligações tubo a chapa por processos de deformação plástica. (a) Primeira ligação tubo a chapa, por bloqueio mecânico com o processo de *flaring*[5]. (b) Ligação tubo a chapa por bloqueio mecânico com o processo de *upsetting*. (c) Processo de *Boss Forming* em tubo de parede fina[6].

O uso de enformação plástica a frio para obter a ligação apresenta vantagens tais como: flexibilidade no tamanho dos lotes produzidos e maior repetibilidade do processo que conduz a melhor controle de incertezas do mesmo. Também, face aos processos a quente, o consumo energético é mais reduzido e o processo em si é mais simples pois não é necessário equipamento especializado para o efeito. A ligação varão a chapa que surge da aplicação do processo desenvolvido nesta dissertação visa incorporar essas mesmas vantagens.

A Tabela 1 resume e compara as características dos processos de ligação convencionais com as ligações por deformação plásticas destacadas do outro tipo ligações mecânicas.

Atendendo ao que foi exposto, neste trabalho, pretende-se expandir o uso de *Boss Forming* e apresentar uma aplicação do mesmo na forma de uma ligação a chapa que beneficie das vantagens deste tipo de processo.

	<b>Soldadura</b>	<b>Ligação adesiva</b>	<b>Fixação com elementos de ligação</b>	<b>Deformação plástica</b>
<b>Mecanismo</b>	Fusão com uso de materiais de adição	Aderência e ligação química	Fixação mecânica de dois ou mais componentes com parafusos, cavilhas e rebites	Pressão por interferência e bloqueio mecânico ( <i>interlocking</i> )
<b>Configuração da ligação</b>	Juntas topo a topo, sobrepostas, de canto, em T, em ângulo	Componentes sobrepostos	Componentes sobrepostos ou ligações de bordo (outras configurações com acessórios)	Arbitrária
<b>Temperatura da ligação</b>	Temperatura de fusão	Temperatura ambiente ou temperatura de cura (<200°C)	Temperatura ambiente	Temperatura ambiente
<b>Zonas afetadas pelo calor</b>	Sim	Não	Não	Não
<b>Zonas em tensão</b>	Tensões residuais	Distribuição uniforme de tensão	Concentração de tensões nos elementos de ligação	Baixas tensões residuais
<b>Materiais</b>	Metais similares	Dissimilares	Dissimilares	Dissimilares
<b>Materiais com revestimento</b>	Muito difícil ou impossível	Não recomendado (compatibilidade e rugosidade das superfícies)	Possível	Possível
<b>Consumo energético</b>	Elevado	Médio	Reduzido	Médio
<b>Produtividade</b>	Média	Reduzida	Elevada	Elevada
<b>Custo</b>	Elevado (mão-de-obra, inspeção e equipamento)	Médio	Reduzido	Médio/reduzido
<b>Amigo do ambiente</b>	Pouco	Médio	Muito	Muito

Tabela 1 - Sumário das características dos processos de ligação mais usados, adaptado de Alves et al.[15]

#### 2.4. Produção Sustentável

O processo de enformação plástica a frio é uma tecnologia dos processos de produção que combina custo reduzido com uso mais eficiente de energia e materiais, comparado com outros processos de produção, especialmente em grandes quantidades. Os processos de enformação plástica permitem também novas conceções dado que resolvem algumas das limitações dos processos de ligação convencionais. Desta forma, é necessário desenvolver novos processos de enformação plástica com vista a satisfazer as novas necessidades.

O processo para produzir flanges anelares em varão a chapas, tal como foi desenvolvido nesta dissertação pretende responder às necessidades referidas e apresentar uma possível aplicação de ligação varão a chapa como alternativa aos processos convencionais.

Considerando as técnicas existentes, o processo desenvolvido apresenta as seguintes vantagens:

- Flexibilidade no tamanho dos lotes de produção, capaz de produzir grandes quantidades, bem como elevada repetibilidade.
- Flexibilidade no uso de equipamentos já existentes usando ferramentas simples de baixo custo.
- Processo amigo do ambiente com menos desperdício de material e que dispensa o uso de materiais de adição ou gases de proteção. A ligação é facilmente reciclável no fim de vida do produto.
- Maior eficiência energética dado que elimina ciclos de aquecimento-arrefecimento, zonas afetadas por calor e tensões residuais nas regiões das chapas e tubos a ser ligados.
- Permite a ligação entre tubos e chapas de materiais dissimilares.



## Capítulo 3

---

### 3. Teoria da plasticidade

#### 3.1. Introdução

O processo de deformação varões que é apresentado nesta dissertação utiliza métodos de deformação plástica, também chamado enformação plástica, a partir de pré-formas de varão de alumínio e de varão enformado na chapa. Apesar de não ser diretamente utilizada neste trabalho é importante ter presente os conceitos fundamentais desta teoria que, para além ser a base da análise numérica, permite interpretar os resultados obtidos adequadamente. Como tal, os conceitos são apresentados sucintamente neste capítulo.

#### 3.2. Teoria da plasticidade

Os corpos sólidos reagem a solicitações exteriores sofrendo deformações. As deformações podem ser de diferentes regimes consoante o tipo de solicitação: regime elástico ou regime plástico. O comportamento dos materiais sujeito a cargas difere de acordo com o regime das deformações. A transição entre os regimes de deformação é determinado usando critérios de plasticidade e o seu comportamento é descrito pelas equações constitutivas.

A teoria matemática infinitesimal da plasticidade permite quantificar as deformações e conhecer o estado de tensão de um corpo sujeito a cargas. Esta teoria tem particular relevância nos processos de enformação plástica, no dimensionamento de ferramentas e peças para prevenir fraturas ou alcançar a forma desejada [19].

##### 3.2.1. Conceito de Tensão e extensão

De acordo com a teoria, as deformações num meio contínuo são avaliadas num sistema de coordenadas fixo ao corpo no estado deformado. Um corpo sujeito a forças externas desenvolve forças internas correspondentes resultantes do equilíbrio de forças, como estabelecido pela 3ª Lei de Newton. O conceito de tensão pode ser introduzido como a noção de força aplicada por unidade de superfície. Este conceito, puramente matemático, pode ser generalizado ao domínio tridimensional dando origem à noção de estado de tensão num ponto.

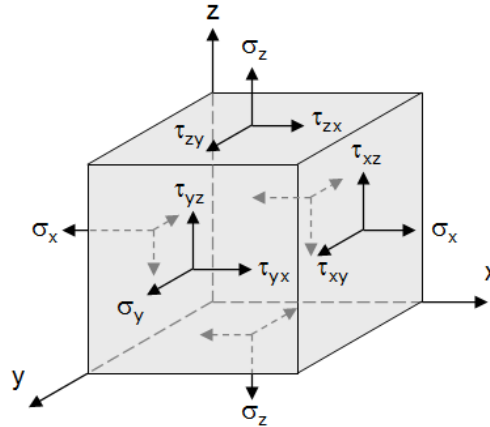


Figura 10 - Estado de tensão tridimensional num elemento de volume.

O estado de tensão tridimensional pode ser definido matematicamente pelo tensor das tensões,

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

A condição de equilíbrio do corpo implica que  $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ , ou seja, o tensor é simétrico.

O tensor total das tensões pode ser decomposto num tensor hidrostático ou de tensões médias ( $\sigma_{kk}$ ) envolvendo somente estados puros de tração e compressão e num tensor desviador ( $\sigma'_{ij}$ ), onde as componentes normais são o remanescente da tensão hidrostática para a total, [19],

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

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

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

O conceito matemático de extensão descreve e permite quantificar as deformações nos corpos sólidos. No caso de grandes deformações é habitual recorrer-se à extensão verdadeira ou logarítmica  $\varepsilon$ ,

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

A generalização do conceito de extensão ao domínio tridimensional permite, para incrementos de deslocamento pequenos, determinar o acréscimo de deformação num elemento de volume arbitrário através do tensor das extensões [19],

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.5)$$

em que o tensor das extensões é simétrico,  $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$ , e  $u$  corresponde ao deslocamento desde a posição inicial até à posição deformada para o eixo correspondente.

### 3.2.2. Critérios de plasticidade

Um dos aspetos mais importantes da teoria da plasticidade é o estabelecimento de relações que permitem conhecer as condições de entrada em domínio plástico de um material, quando sujeito a uma condição arbitrária de tensões. O critério de plasticidade será função das seis componentes independentes do tensor das tensões e pode ser escrito genericamente para qualquer estado de tensão na forma, [19],

$$F(\sigma_{ij}) = K \text{ para } i, j = 1, 2, 3 \quad (3.6)$$

onde  $F(\sigma_{ij})$  é uma função conhecida do estado de tensão, também designada função limite de elasticidade e  $K$  uma constante característica do material, determinada experimentalmente, [19].

No caso da superfície de cedência ser representada no espaço das direções principais a relação pode ser simplificada,

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = K \quad (3.7)$$

onde  $\sigma_1, \sigma_2$  e  $\sigma_3$  são as tensões principais.

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

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \geq k \quad (3.8)$$

onde  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  são as tensões principais ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ).

O critério de plasticidade de von Mises considera que a deformação plástica se inicia quando o valor da energia elástica de distorção atinge um valor crítico. O critério relaciona as tensões principais com a tensão de cedência do material através da seguinte expressão,

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = \sigma_y^2 \quad (3.9)$$

A tensão de cedência do material,  $\sigma_y$ , obtida experimentalmente, relaciona-se com  $k$  de acordo com o critério, atendendo às seguintes expressões,

Critério de Tresca:

$$k = \frac{\sigma_y}{2} \quad (3.10)$$

Critério de von Mises:

$$k = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (3.11)$$

A representação gráfica dos critérios no espaço tridimensional de Haig-Westergaard, ou espaço das tensões principais, delimita as superfícies limite de elasticidade de Tresca e de von Mises. A primeira representada por um prisma hexagonal e a segunda por um cilindro, ambas centradas no eixo hidrostático ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ),

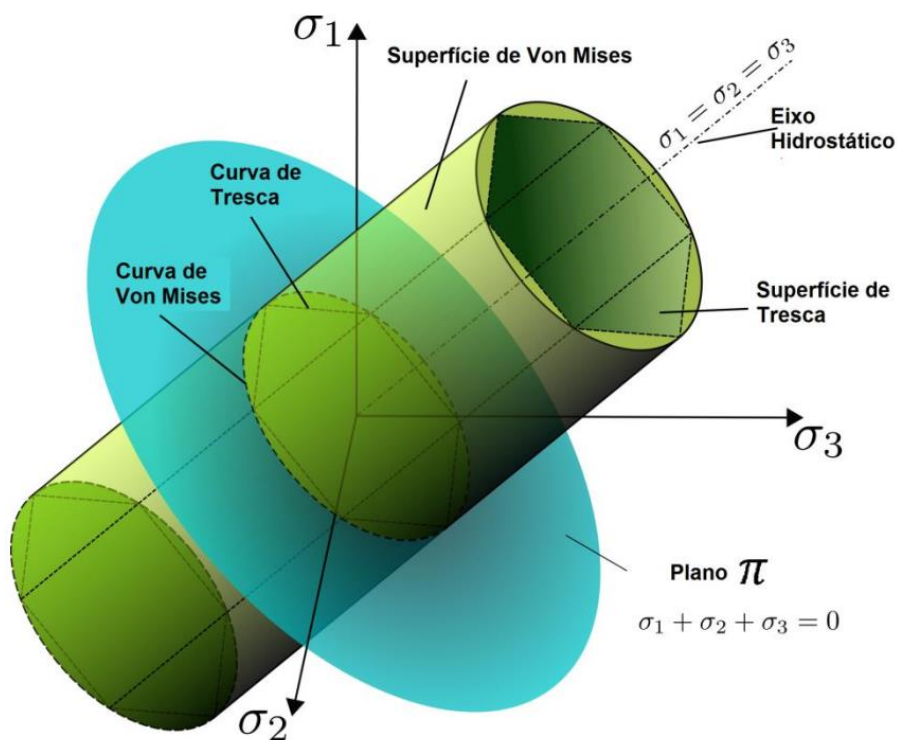


Figura 11 - Critério de Tresca e de von Mises representados no espaço das tensões principais, adaptado de Brotons et al.[20].

A teoria da plasticidade baseia-se em ensaios simples com estados de tensão uniaxiais ou até biaxiais para simplificar os complexos estados de tensão multiaxial e é necessário definir grandezas que fazem a transição entre os estados complexos de deformação e os estados uniaxiais. Para tal, surgem os conceitos de tensão e extensão efetiva.

Para o critério de von Mises a tensão efetiva,  $\bar{\sigma}$  é dada por,

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]^{1/2} \quad (3.12)$$

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

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} [(d\bar{\varepsilon}_1 - \bar{\varepsilon}_2)^2 + (\bar{\varepsilon}_2 - \bar{\varepsilon}_3)^2 + (\bar{\varepsilon}_1 - \bar{\varepsilon}_3)^2]^{1/2} \quad (3.13)$$

assim,

$$\bar{\varepsilon} = \int d\bar{\varepsilon} \quad (3.14)$$

### 3.2.3. Equações Constitutivas

As equações constitutivas estabelecem a relação entre as extensões e tensões no domínio plástico. A primeira equação a ser referida é a equação de Levy-Mises, que relaciona os incrementos da tensão desviadora  $\sigma'_{ij}$  com os incrementos de extensão plástica  $d\varepsilon_{ij}^p$  através de uma constante de proporcionalidade  $d\lambda$ , que pode variar com a história do carregamento. O cálculo da constante  $d\lambda$  pode ser calculado a partir do incremento de trabalho plástico por unidade de volume[19], e assim obtêm a equação de Levy-Mises na seguinte forma,

$$\frac{d\varepsilon_{ij}^p}{\sigma'_{ij}} = d\lambda = \frac{3 d\bar{\varepsilon}^p}{2 \bar{\sigma}} \Rightarrow d\varepsilon_{ij}^p = \frac{3 d\bar{\varepsilon}^p}{2 \bar{\sigma}} \sigma'_{ij} \quad (3.15)$$

onde  $d\bar{\varepsilon}$  e  $\bar{\sigma}$  representam um incremento infinitesimal de extensão efetiva e a tensão efetiva, respectivamente. Contudo, esta expressão não contabiliza a componente elástica da deformação, portanto, deve ser usada em casos onde as extensões elásticas sejam desprezadas face às extensões plásticas[19].

Para contabilizar a contribuição da componente elástica da deformação recorre-se à equação constitutiva de Prandtl-Reuss, que é uma generalização da equação de Levy-Mises, onde se considera o incremento de extensão total como a soma dos incrementos de extensão elástico e plástico,

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad (3.16)$$

O incremento de extensão elástica  $d\varepsilon_{ij}^e$  é obtido a partir das relações de tensão-extensão em domínio elástico ou Leis de Hooke;

$$d\varepsilon_{ij}^e = \frac{1 + \nu}{E} d\bar{\sigma}'_{ij} + \frac{(1 - 2\nu)}{E} \frac{d\sigma_{kk}}{3} \delta_{ij} \quad (3.17)$$

onde  $E$  representa o módulo de Young,  $\nu$  o coeficiente de Poisson e  $\delta_{ij}$  o delta de Kronecker[19].

## Capítulo 4

---

### 4. Método dos elementos finitos

#### 4.1. Introdução

A necessidade de analisar estruturas para além do nível macroscópico fez com que o método dos elementos finitos tivesse uma crescente presença na indústria e investigação. Presentemente, está bastante proliferado e é usado para prever o desempenho e execução de estruturas quando são perturbadas por cargas usando os conhecimentos da teoria da plasticidade como base para este método.

O método dos elementos finitos começou a ser desenvolvido no início da década de 1940, quando Courant [21] introduziu o conceito de funções contínuas por troços ou intervalos num subdomínio específico. No final da mesma década, foram desenvolvidos métodos matriciais de análise de força, onde os deslocamentos eram conhecidos e as forças eram as incógnitas a ser determinadas. Este método era executado manualmente por falta de poder de computação, que atualmente já existe, e era denominado por método da flexibilidade. Por sua vez, o método de elementos finitos é conhecido também como método dos deslocamentos, visto que as incógnitas a determinar são os deslocamentos provocados por forças conhecidas. Neste método os deslocamentos têm agora um significado mais geral pois podem representar deslocamentos físicos, temperaturas ou mesmo velocidades de escoamento.

A flexibilidade do método de elementos finitos permitiu a sua aplicação em problemas de análise estrutural elástica, escoamento de fluídos e transmissão de calor [22].

O presente método destaca-se dos outros métodos por fazer a divisão de um determinado domínio num conjunto de subdomínios mais simples, designados por elementos finitos [23]. O conjunto de subdomínios faz a discretização do domínio através dos pontos nodais localizados nos vértices dos elementos. Esses conjuntos de elementos geram superfícies (2D) ou volumes 3D, designados malhas, que serão mais refinadas quanto maior o número e, por consequência, menor o tamanho de cada elemento. Também é possível discretizar um objeto tridimensional usando malhas de superfície. Quanto maior o refinamento da malha menor será o erro da solução obtida face à solução real mas, em contrapartida, o tempo de computação será superior devido ao aumento da dimensão das matrizes envolvidas.

A Figura 12 apresenta uma ilustração de discretização numa secção de varão. A malha é composta por elementos grosseiros (azuis) de  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  e elementos de  $0,1 \times 0,1 \text{ mm}^2$  (amarelos) na zona sujeita a maior deformação. Esta última é uma solução possível para poupar recursos computacionais usando malhas com zonas mais ou menos refinadas.

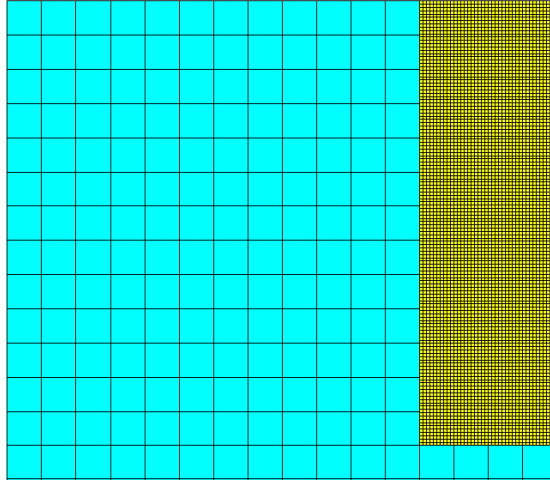


Figura 12 - Discretização de uma secção de varão por uma malha com 5360 elementos,  $1 \times 1 \text{mm}^2$  por elemento na região azul e  $0,1 \times 0,1 \text{mm}^2$  por elemento na região amarela.

#### 4.2. Equações fundamentais

Os programas de simulação do método de elementos finitos recorrem ao uso da fórmula irreduzível de elementos finitos que contabiliza o atrito entre corpos rígidos e corpos deformáveis,

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

onde  $\bar{\sigma}$  denota a tensão efectiva,  $\bar{\epsilon}$  a extensão efetiva,  $\dot{\epsilon}_V$  a taxa de extensão volumétrica,  $K$  uma constante de grande valor que exige a incompressibilidade do volume  $V$ ,  $T_i$  e  $u_i$  são as trações de superfície e velocidades na superfície  $S_T$ ,  $\tau_f$  e  $u_r$  são as tensões de corte por atrito e a velocidade relativa na superfície de contacto  $S_f$  entre ferramentas e materiais. O atrito  $\tau_f$  é modelado por uma lei de atrito constante  $\tau_f = mK$  onde o factor de atrito  $m$  foi definido com base em resultados experimentais.

Os últimos dois termos da expressão são referentes ao contacto e atrito entre corpos deformáveis, que é relevante para o processo de ligação entre varão e chapa. As suas fronteiras em contacto são definidas pelos pares de contacto  $N_c$  e no caso de modelos de elementos finitos que utilizam condições de simetria rotacional os símbolos  $g_n^c$  e  $g_t^c$  representam a componente normal e tangencial das velocidades de penetração nos pares de contacto, que têm de ser penalizadas, por um pénalti  $P$ , para evitar penetração do material noutros materiais ou em si mesmo.

No caso de atrito deslizante, a contribuição da velocidade de penalização tangencial  $g_t^c$  é omitida e as tensões de corte são aplicadas às superfícies de contacto através da tração de superfície  $T_i$ . Uma descrição mais detalhada da modelação de contacto com atrito entre objectos deformáveis e também outros aspetos do método de elementos finitos é dada por Nielsen et al.[24].

### 4.3. I-FORM

O *software* I-FORM começou a ser desenvolvido no final da década de 1980, na Secção de Tecnologia Mecânica do Instituto Superior Técnico e tem vindo a ser desenvolvido de acordo com as necessidades que têm surgido durante os trabalhos experimentais e os projetos desenvolvidos.

Atualmente, o *software* I-FORM simula e oferece soluções em problemas de enformação plástica e ligações mecânicas entre objetos, tendo sido usado na conceção e análise do processo de *boss forming* e da ligação de varão a chapa. O programa tem a capacidade de fazer análises bidimensionais (I-FORM 2D) ou tridimensionais (I-FORM 3D), sendo que no caso do estudo apresentado nesta dissertação foi usada uma análise bidimensional (I-FORM 2D). As condições de axissimetria permitem representar o problema numa seção bidimensional do varão e daí a razão de não ser necessário representar todo o espaço tridimensional para calcular a sua solução.

Assim, a escolha recaiu no *software* I-Form 2D, que foi utilizado para realizar o desenvolvimento numérico desta dissertação. Este *software* está dividido em quatro partes: pré-processador, processador de cálculo (*solver*), pós-processador e *remesh*. No pré-processador define-se as condições iniciais e despectivos parâmetros do problema que incluem a geometria de ferramentas e do material a deformar. A geometria das ferramentas e peça pode ser desenhada diretamente no programa ou também é possível importar as ferramentas e a malha das pré-formas usando *software* alternativo como o *AutoCAD* ou *GiD*. Seguidamente, escolhe-se o material da malha, velocidades das ferramentas, atrito entre superfícies, parâmetros de convergência das iterações, entre outros. As informações usadas pelo *solver* são guardadas nos ficheiros *Die.dat*, *Fem.dat*, *Material.dat* e *Simulation.dat*.

O *solver* faz a leitura dos ficheiros criados no pré-processador e executa o seu processamento e respetiva simulação numérica. Os resultados da computação ficam guardados em ficheiros *fem.neu*.

O pós-processador permite visualizar a evolução do processo através dos ficheiros *fem.neu* gerados pelo *solver*. É possível observar a geometria inicial e deformada, bem como examinar cargas, deslocamentos e outras variáveis do processo.

O *remesh* é usado para refinar e reestruturar a malha, através dos ficheiros *DIE.rst* e *FEM.rst*, para serem usados na continuação duma simulação. Esta funcionalidade é necessária pois podem ocorrer deformações na malha que impossibilitam a continuação da simulação.



## Capítulo 5

---

### 5. Desenvolvimento Experimental

#### 5.1. Introdução

Neste capítulo é apresentado o estudo experimental do novo processo de enformação de flanges anelares em varões de alumínio, que inclui, a caracterização do material utilizado, descrição do processo, equipamento utilizado e o desenvolvimento e fabrico das ferramentas. Por fim, é apresentada uma nova ligação utilizando o processo de enformação desenvolvido, à qual foi realizado um ensaio destrutivo para avaliar o seu desempenho. No desenvolvimento experimental identificaram-se os parâmetros principais do mecanismo de deformação do processo de *Boss Forming* em varão que permitiram desenvolver as adaptações necessárias ao processo anterior de *Boss Forming* em tubos. O controlo destes parâmetros permitiu aplicar o processo para ligar varões a chapas.

A aquisição de dados e desenvolvimento experimental, incluindo o fabrico de ferramentas foram realizados no laboratório da secção de Tecnologia Mecânica do Instituto Superior Técnico.

#### 5.2. *Boss Forming* de varões

##### 5.2.1. Caracterização do material

Nos ensaios experimentais e nos modelos de elementos finitos foram utilizados varões de dois tipos de alumínio diferentes: AW6082-T6 e AW6082-O. As pré-formas de varão partiram de varão de AW6082-T6 com 32mm de diâmetro no qual foram cortadas pequenas secções de varão com aproximadamente 68,5mm.

Os varões em AW6082-O partiram de varões de AW6082-T6 que foram sujeitos a um tratamento térmico de recozimento seguindo as recomendações da American Society of Metals (ASM), Figura 13. Uma análise feita por Torca [25] compara o comportamento mecânico de chapas de AW6082-T6 e de AW6082-O a diferentes velocidades de deformação e temperaturas. Os resultados mostram que, em todos os ensaios de tração uniaxial, o alumínio AW6082-O sustenta mais extensão do que o AW6082-T6 e, por isso, conclui que em processos que exigem grandes extensões é recomendável realizar o tratamento térmico de recozimento pois este aumenta a enformabilidade do material.

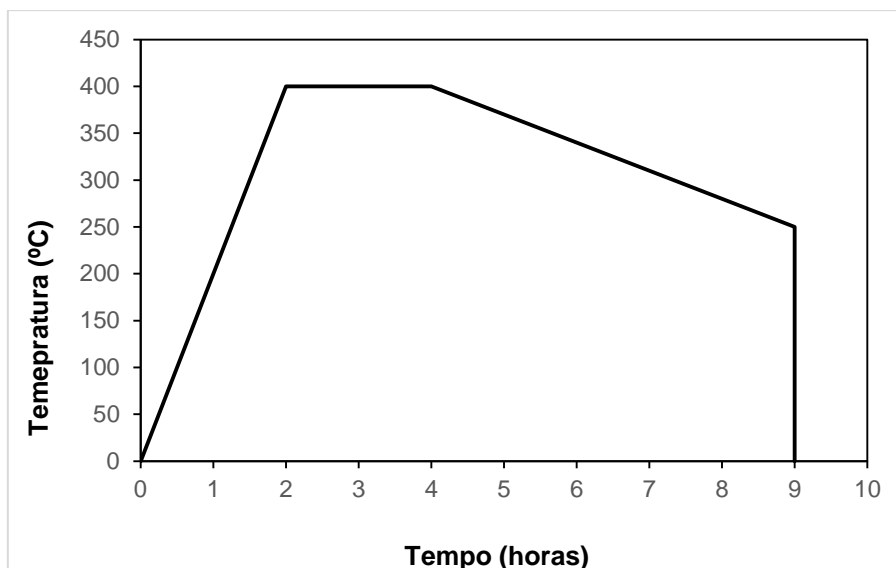


Figura 13 - Curva de temperatura do tratamento térmico com base nas recomendações ASM.

Para caracterizar o material dos varões foram realizados ensaios de compressão uniaxial à temperatura ambiente numa prensa hidráulica Instron SATEC 1200kN, com uma velocidade de 5mm/min, utilizando provetes cilíndricos de cada material. Para lubrificar as superfícies de contacto e reduzir o efeito de barril foi usado estearato de zinco. As dimensões dos provetes caracterizados estão resumidas na Tabela 2.

Tabela 2 – Diâmetro inicial  $d_0$  e altura inicial  $h_0$  dos provetes usados nos ensaios de caracterização do material dos varões e chapa

Material	$d_0$ (mm)	$h_0$ (mm)
AW6082-T6	32	40
AW6082-O	32	35,29

A partir dos ensaios de caracterização é possível obter uma curvas de tensão efetiva–extensão efetiva dos materiais. As curvas obtidas estão representadas na Figura 14,

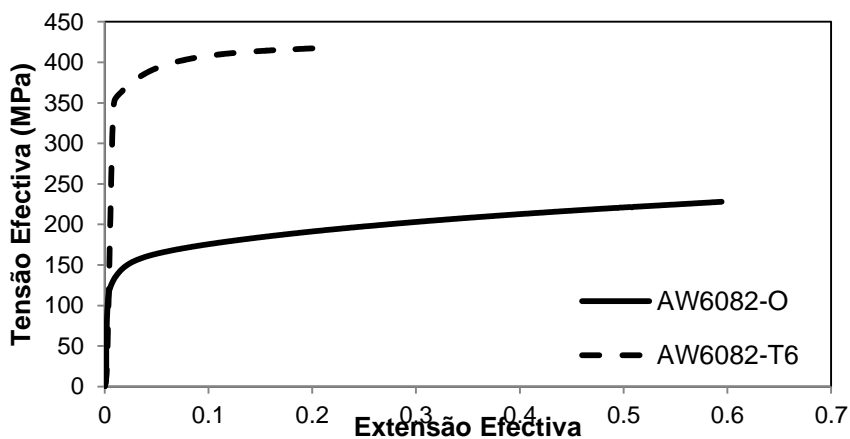


Figura 14 - Curvas tensão efetiva-extensão efetiva dos materiais de varão caracterizados.

### 5.2.2. Descrição do processo de *Boss Forming*

O uso de *Boss Forming* para unir varão a chapa requer duas operações independentes. No decorrer do trabalho experimental foram realizados ensaios com duas matrizes superiores diferentes.

Na operação de *Boss Forming*, utilizando a primeira geometria proposta da matriz superior, o material é comprimido parcialmente na direção axial por esta. O material enformado ao longo do processo é acumulado na cavidade da matriz inferior que estabelece as dimensões da flange. A matriz inferior está dividida em duas partes, uma que contém a cavidade da flange e outra responsável pelo guiamento da matriz superior. Esta divisão da matriz inferior serve para facilitar a remoção do varão enformado no final da operação de *Boss Forming*.

A matriz superior foi alterada depois de se concluir que os varões enformados com a primeira matriz tinham defeitos inadmissíveis. Estes defeitos serão explicados em detalhe no capítulo 7. Para corrigir os defeitos observados, a matriz superior foi modificada para conter um anel de pressão que induz estados de compressão no material adjacente àquele que está a ser acumulado e assegura o posicionamento dos varões durante o processo.

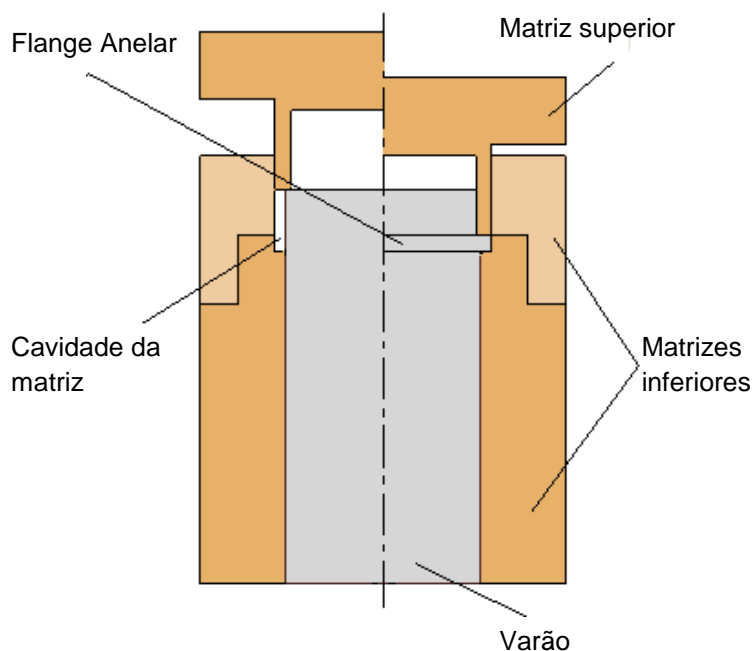


Figura 15 – Representação esquemáticas de *Boss Forming* com a primeira geometria proposta.

### 5.2.3. Equipamentos e Ferramentas

Neste subcapítulo são descritas as máquinas e as ferramentas do processo que permitiram a execução do desenvolvimento experimental.

Os ensaios experimentais foram realizados por controlo de deslocamento na mesma máquina onde se realizaram os ensaios de caracterização com uma velocidade constante de 5mm/min à temperatura ambiente.

Todas as ferramentas usadas foram maquinadas num torno de controlo numérico a partir de varões de aço ferramenta 120WV4 (WN 1.2516). Dadas as características do processo de forjamento em matrizes fechadas, é necessário rigor no fabrico das matrizes, nomeadamente no controlo dos raios destas. A matriz inferior é responsável pelo guiamento da matriz superior e por isso, a boa precisão do torno CNC, garante o correto posicionamento das ferramentas e assegura o mais possível as condições de deformação axissimétrica.

O conjunto de ferramentas da primeira operação é composto pela primeira parte da matriz inferior que contém a cavidade e define as dimensões da flange. A segunda parte da matriz inferior é responsável por restringir o escoamento de material e guiar a matriz superior garantindo assim condições de deformação axissimétrica. O conjunto de ferramentas está identificado por ordem de montagem na Figura 16.

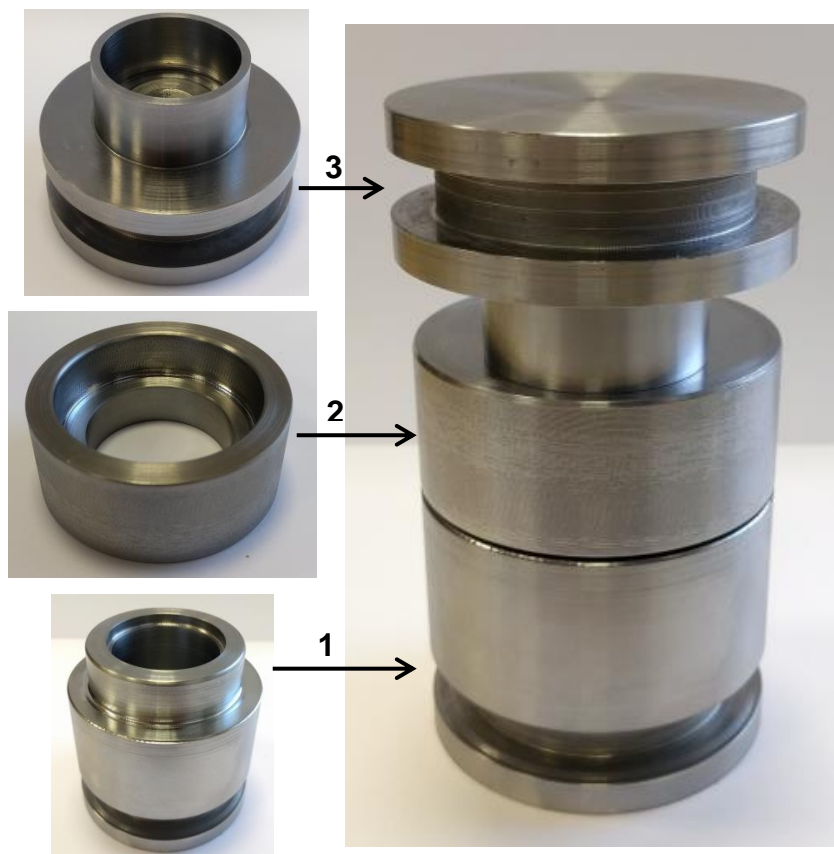


Figura 16 – Conjunto de ferramentas da primeira operação. Por ordem de montagem: 1- Matriz Inferior (com cavidade) 2- Matriz inferior (de guiamento) 3- Matriz superior.

#### 5.2.4.Procedimento Experimental

A primeira operação que, permite obter a flange enformada que servirá de suporte à chapa, tem o seguinte procedimento:

1. Preparar a pré-forma cilíndrica, cortada a partir de um dado comprimento de varão com as dimensões desejadas.
2. Lubrificar a pré-forma e as ferramentas.
3. Montagem e fixação do conjunto, de acordo com a Figura 16.
  - a. Posicionar o conjunto de ferramentas montado entre os pratos da prensa, em contacto e centrado com eles.
  - b. Fixar a matriz superior e a matriz inferior aos pratos superior e inferior da prensa.
4. Deslocar a matriz/prato superior até permitir a colocação da pré-forma.
5. Colocar a pré-forma na matriz inferior.
6. Configurar os parâmetros de ensaio desejados (velocidade e deslocamento) no *software* da prensa.
7. Realizar o ensaio.
8. Remover a fixação e o conjunto de ferramentas.
9. Processar os dados adquiridos

### 5.3. Aplicação do processo – Ligação varão a chapa

#### 5.3.1.Chapas utilizadas

No processo de ligação varão a chapa utilizaram-se chapas de aço DC04 com 1,5mm de espessura e uma chapa de alumínio AA1050 AH14 com 1mm de espessura.

Para realizar a simulação do ensaio de separação com rigor, o material da chapa de aço foi caracterizado com um ensaio de compressão uniaxial, conhecido como stack compression test. Neste ensaio, o provete do material resulta do empilhamento de discos com igual diâmetro, cortados da própria chapa, formando o perfil cilíndrico. Este cilindro composto por discos do material é de seguida ensaiado de igual modo a um teste de compressão uniaxial convencional. O provete ensaiado tem as seguintes dimensões:  $d_0=32\text{mm}$ ,  $h_0=35,30\text{mm}$ .

Na simulação numérica referente à ligação com chapa de alumínio recorreu-se à biblioteca de materiais, presente no *software* I-FORM, para definir o material da mesma.

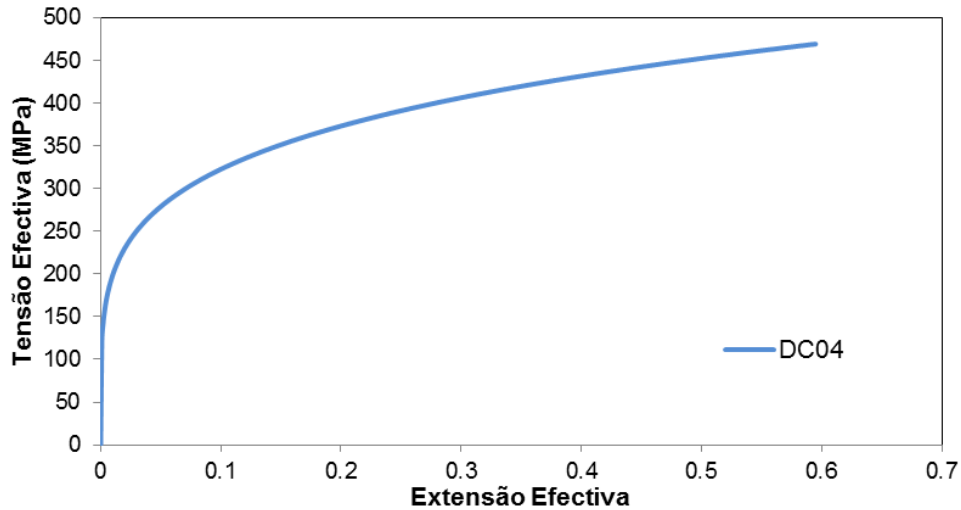


Figura 17 – Curva tensão efetiva-extensão efetiva do aço DC04.

### 5.3.2. Descrição do processo de ligação

A ligação varão a chapa é realizada bloqueando mecanicamente a chapa entre duas flanges obtidas por duas operações de *Boss Forming*. A flange inferior é obtida tal como foi descrito no subcapítulo anterior na primeira operação de ligação. A produção da flange superior requer um novo procedimento experimental e ferramentas.

A segunda operação de *Boss Forming* começa com a chapa, previamente furada, posicionada no varão sobre a flange, obtida na operação anterior. De seguida é possível finalizar a ligação, utilizando uma outra matriz superior que contém a cavidade que define a geometria da bossa de material acumulado. Do mesmo modo da primeira operação, o varão é comprimido parcialmente na direção axial e o material escoado é acumulado na cavidade da matriz superior, sobre a chapa. Com a chapa estrangida, pela bossa de material e a primeira flange, o processo está concluído e tem-se a ligação varão a chapa por deformação plástica a frio, através do mecanismo de bloqueio mecânico.

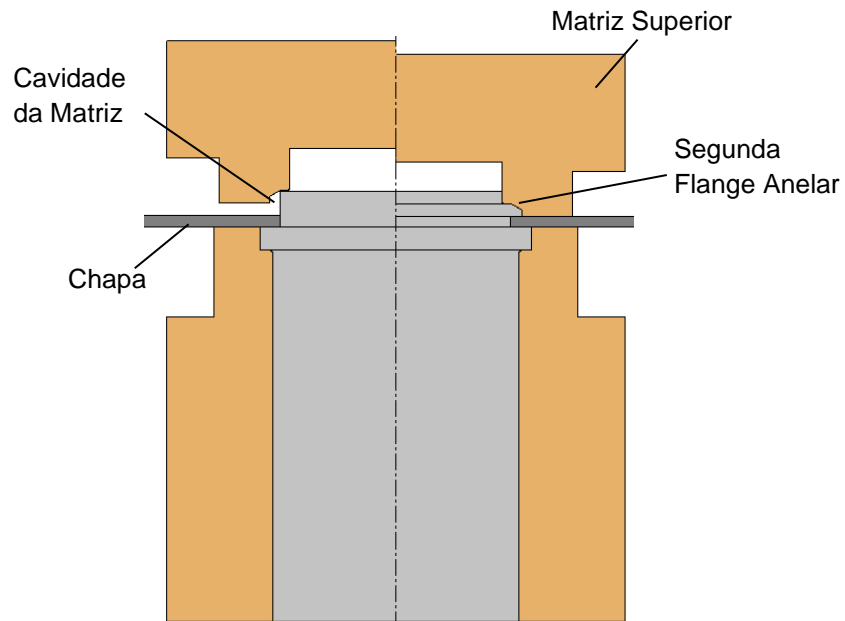


Figura 18 – Representação esquemática da segunda operação do processo de ligação por *Boss Forming*

### 5.3.3.Ferramentas – Segunda operação

A segunda operação do processo de ligação requer duas novas ferramentas: a matriz superior e a matriz de guiamento. Entre operações não é necessário remover o varão da matriz inferior. Com o varão colocado na matriz inferior da primeira operação, a segunda matriz de guiamento é montada nesta. Esta matriz de guiamento é usada para centrar a matriz superior da segunda operação. Nesta segunda operação, a matriz de guiamento é removida antes desta ser realizada e a matriz superior contém a cavidade onde o material é acumulado. Este conjunto de matrizes está identificado por ordem de montagem na figura 19.

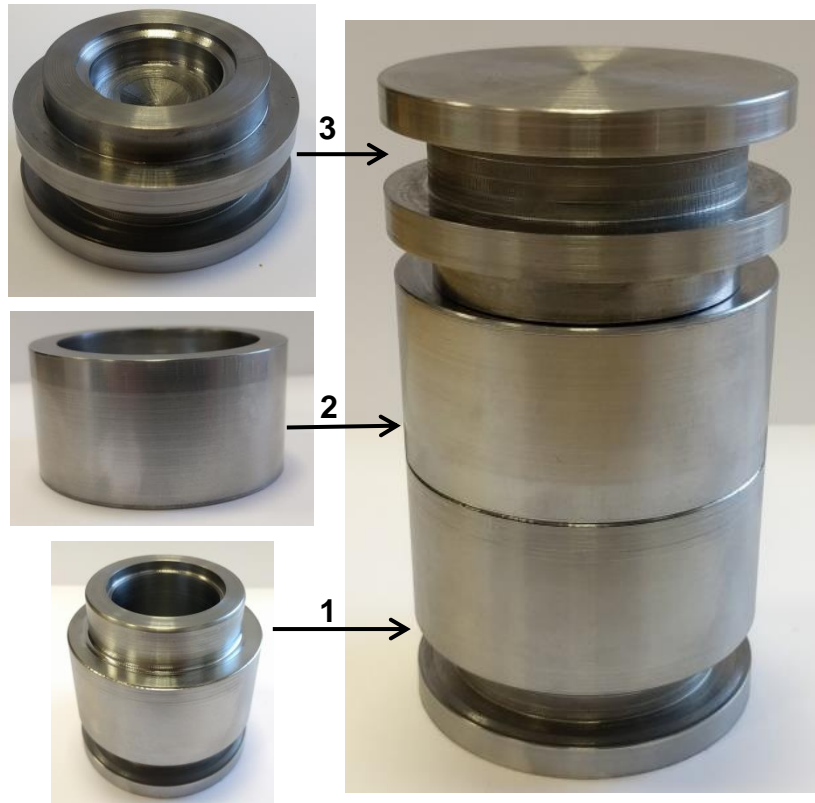


Figura 19 - Conjunto de ferramentas da segunda operação. Por ordem de montagem: 1 – Matriz inferior, igual à primeira operação 2- Matriz de guiamento 3- Matriz superior.

#### 5.3.4.Procedimento experimental – segunda operação

A segunda operação que consiste em comprimir o comprimento livre do varão (agora já com a primeira flange enformada) para cima da chapa, pode ser realizada imediatamente após a primeira sem ser necessário remover a matriz inferior com o varão enformado. Deste modo, a segunda operação consiste no seguinte procedimento:

1. Montar o setup como especificado na Figura 19;
2. Posicionar o prato superior da prensa em contacto com a matriz superior e fixá-la a este.
3. Subir o prato superior da prensa para remover a matriz de guiamento.
4. Colocar a chapa previamente furada sobre a flange do varão.
5. Realizar o ensaio.
6. Remover a fixação e o conjunto de ferramentas.
7. Processar os dados adquiridos.



## 5.4. Ensaio realizados

### 5.4.1. Análise do processo de *Boss Forming*

No desenvolvimento experimental foram realizadas três séries de ensaios. A primeira série de ensaios é focada em produzir varões enformados admissíveis e podem ser distinguidos em quatro casos de estudo A, B, C da Tabela 3 e D da Tabela 4. No caso D utilizou-se uma matriz superior diferente dos casos A, B, C onde se avaliou o efeito dos parâmetros do processo. A análise detalhada dos resultados referidos encontra-se no capítulo 7.

Nos ensaios dos casos A, B e C, utilizou-se a primeira matriz superior, Figura 16 - 3. Esta matriz resulta da aplicação direta em varão do processo anterior de *Boss Forming* usado em tubos. Com estes ensaios foram identificadas os seguintes parâmetros importantes para o processo de *Boss Forming* em varão:

- i) Espessura de material acumulado,  $a$
- ii) Comprimento de material acumulado,  $b$
- iii) A secção retangular,  $c \times d$  da cavidade da matriz inferior

Nos casos de estudo a espessura  $a$  é escolhida para se obter a deformação pretendida e o comprimento  $b$  é determinado, com base no conceito de conservação do volume de material e a geometria da seção de material acumulado, de modo a preencher a cavidade da matriz com secção retangular de  $c \times d = 3 \times 3\text{mm}^2$ ,

O plano de trabalhos começou por experimentar diferentes valores da espessura,  $a$  de material acumulado e os dois tipos de alumínio. A Tabela 3 sumariza os ensaios relevantes dos casos A, B e C, os seus parâmetros e as observações.

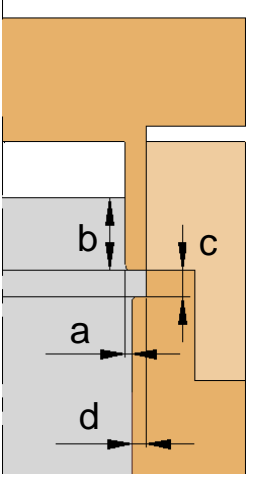
Caso de teste	Material	$a(\text{mm})$	$b(\text{mm})$	Observações	
A	AW6082-T6	0,6	8,0	Formação de apara, remoção de material por corte	
B	AW6082-T6	1,0	4,9	Fissuras	
C	AW6082-O	1,0	4,9	Fissuras	

Tabela 3 – Sumário do primeiro grupo de ensaios da primeira operação e representação esquemática do processo.

No primeiro caso A, com  $a=0,6\text{mm}$ , observou-se em vários ensaios deformação assimétrica. Nos varões com esta dimensão de material acumulado, identificaram-se duas zonas com condições de deformação extremas. Uma zona com acumulação de material e outra onde este é removido por corte, com formação e enrolamento de aparas. A flange resultante não é aceitável por falta de preenchimento da cavidade da matriz.

No sentido de corrigir o defeito observado no caso anterior, o caso B é realizado com uma espessura de material removido de  $a=1\text{mm}$ . Neste caso, não surgem condições de corte e a cavidade da matriz é totalmente preenchida. Este é o modo de deformação que se pretende para obter um flange robusta e capaz de suportar a chapa no processo de ligação. No entanto apesar de ocorrer o tipo de deformação pretendido, existe fissuração na direção do comprimento de material acumulado,  $b$ . As fissuras apresentam uma morfologia típica de fratura dúctil.

O caso C foi a primeira solução proposta para evitar o aparecimento de fissuras. Os ensaios foram realizados em varões de AW6082-O, que é o alumínio usado nos casos anteriores, sujeito a um tratamento térmico de recozimento. Apesar do novo material suportar extensões mais elevadas, como se constata pelas curvas de caracterização, os resultados do caso C são semelhantes ao caso B, com fissuração na direção do comprimento de material acumulado.

A Figura 20 apresenta os defeitos observados nos ensaios dos casos anteriores.



Figura 20 – Resultados dos primeiros ensaios experimentais (a) Varão deformado em condições do Caso A com  $a=6\text{mm}$  b) Varão deformado em condições dos Caso B e C.

Visto que nos ensaios realizados dos casos anteriores não se obteve um varão enformado em condições admissíveis propôs-se alterar a geometria das ferramentas. Com base nos resultados obtidos dos ensaios anteriores e também simulações numéricas realizadas, a matriz superior foi modificada para incluir um anel de pressão. Objetivo do anel de pressão é desenvolver estados de compressão na zona adjacente ao material a ser acumulado. Com esta nova modificação na ferramenta realizou-se o segundo grupo de ensaios da primeira operação de *Boss Forming* que se pode enquadrar no Caso D de ensaios da primeira operação.

A Tabela 4 resume os parâmetros dos ensaios realizados com a nova ferramenta e a Figura 21 mostra a nova matriz superior com o anel de pressão e a representação esquemática do novo processo modificado, onde  $r_{pr}^i$  e  $r_{pr}^o$  são, respectivamente, o raio interior e exterior do anel de pressão.

Caso de Teste	Material	$a$ (mm)	$b$ (mm)	$r_{pr}^i$ (mm)	$r_{pr}^o$ (mm)
D	AW6082-O	1,0	4,9	8,5	11,5

Tabela 4 - Parâmetros utilizados nos ensaios com a ferramenta modificada.

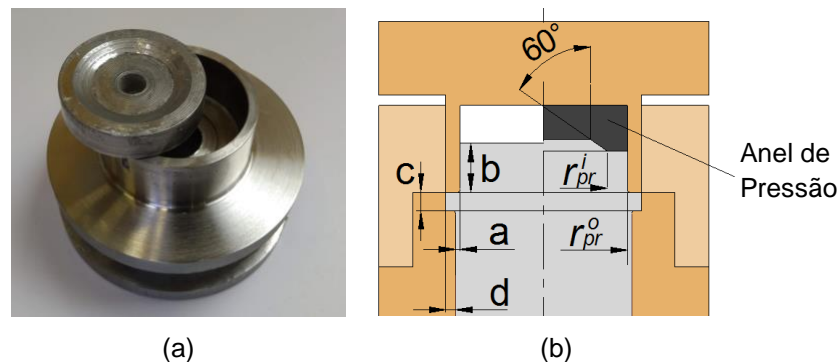


Figura 21 – Nova ferramenta do processo adaptado. a) Nova ferramenta com o anel de pressão b) representação esquemática do processo *Boss Forming* anterior (esquerda) e do processo modificado (direita).

Os ensaios do processo de *Boss Forming* com a matriz superior modificada com o anel de pressão produziram varões sem fissuras, adequado para realizar a segunda operação de *Boss Forming*.

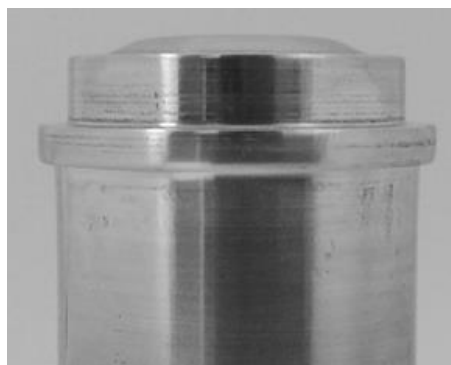


Figura 22 – Varão Enformado por o processo de *Boss Forming* com a nova ferramenta adaptada com o anel de pressão.

#### 5.4.2. Ligação a chapa – Aplicação do processo de *Boss Forming*

Depois de se conseguir produzir consistentemente flanges sem defeitos em varão foi possível aplicar o processo de *Boss Forming* para realizar ligações varão a chapa através de bloqueio mecânico.

Foram realizados três ensaios: um com chapa de alumínio com espessura  $t_s = 1\text{mm}$  e dois com chapa de aço DC04 com espessura  $t_s = 1,5\text{mm}$ . Uma das ligações com chapa de aço foi destruída num ensaio de separação e a segunda foi cortada para se analisar o perfil da seção do varão enformado.

Ligações obtidas	Material do varão	Material da chapa	$a(\text{mm})$	$b(\text{mm})$	$t_s(\text{mm})$
1	AW6082-O	Alumínio AA1050 AH14	1,0	2,5	1,0
2	AW6082-O	Aço DC04	1,0	2,1	1,5

Tabela 5 - Resumo dos ensaios realizados da segunda operação de *Boss Forming*.

Na segunda operação os mecanismos de deformação são idênticos à primeira operação, e assim, os parâmetros foram estabelecidos com base no Caso D da operação anterior, visto que se mostraram adequados para produzir flanges sem ocorrer formação de apara durante o processo de acumulação de material. Recorrendo a análises numéricas o comprimento  $b$  e a espessura  $a$  de material acumulado foram definidos para permitir fechar a ligação em ambas as espessuras de chapa utilizadas. A geometria da cavidade foi estabelecida para garantir um escoamento adequado do material com uma superfície de contacto aceitável.

A Figura 23 mostra uma representação esquemática do final da segunda operação de *Boss Forming* destacando a zona da ligação varão a chapa por bloqueio mecânico. A secção da cavidade da matriz superior está representada por duas figuras geométricas elementares com as suas dimensões [mm] na Figura 23.

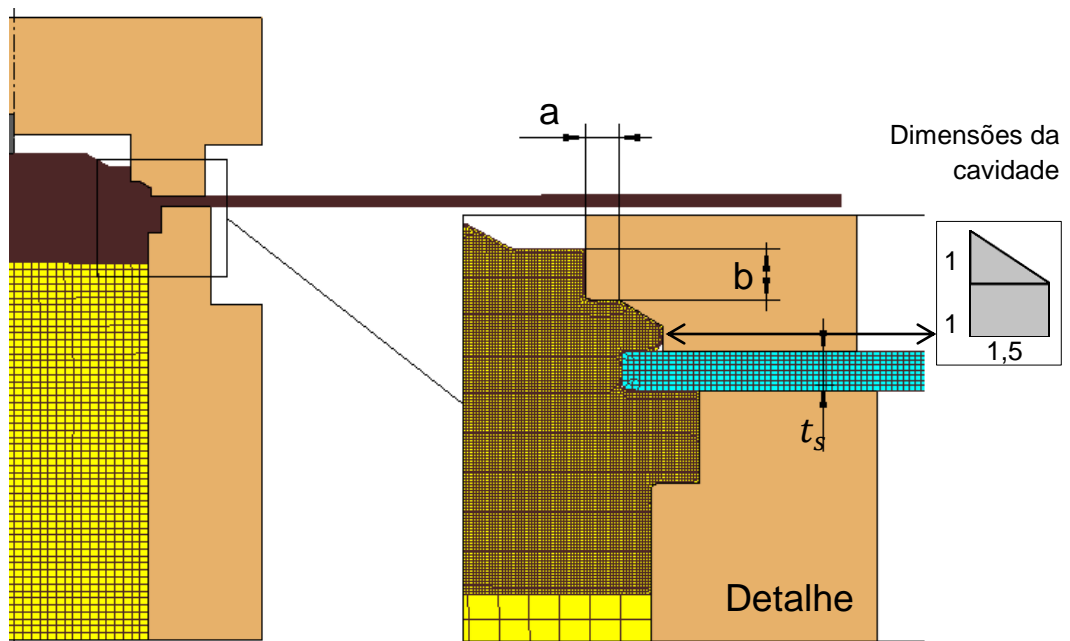


Figura 23- Representação esquemática da ligação mecânica varão a chapa obtida por processo de *Boss Forming*.

A Figura 24 mostra as ligações obtidas por *Boss Forming*. Os ensaios mostram ser possível ligar varão a chapas de diferentes materiais e espessuras, com elevada repetibilidade num processo de ligação por deformação plástica. A inspeção visual da secção da ligação, Figura 24 c), não apresenta defeitos visíveis resultantes da operação.

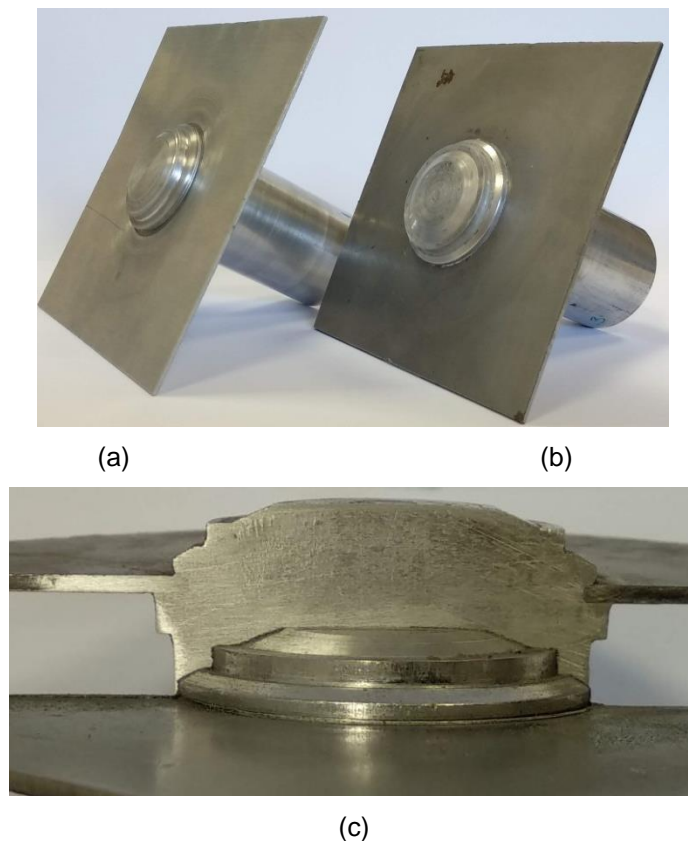


Figura 24 - Ligação mecânica por deformação plástica de varão a chapa. (a) Chapa de alumínio AA1050 AH14  $t_s=1\text{mm}$  (b) Chapa de aço DC04  $t_s=1,5\text{mm}$  (c) Perfil da secção da ligação varão a chapa de aço  $t_s=1,5\text{mm}$ .

#### 5.4.3. Ensaio destrutivo de separação

O último ensaio realizado tem o propósito de avaliar o desempenho da ligação, através da força máxima no sentido ascendente que é capaz de suportar, até à separação da chapa do varão, Figura 25. Este ensaio avalia a flange superior, responsável pelo bloqueio mecânico da ligação, replicando um cenário de um painel ancorado por varão, por exemplo. Este ensaio foi acompanhado com simulação numérica para analisar os pontos de falha da ligação e comparar com as ligações obtidas pelo processo anterior de *Boss Forming* em tubos. Os resultados do ensaio são apresentados no capítulo 7.

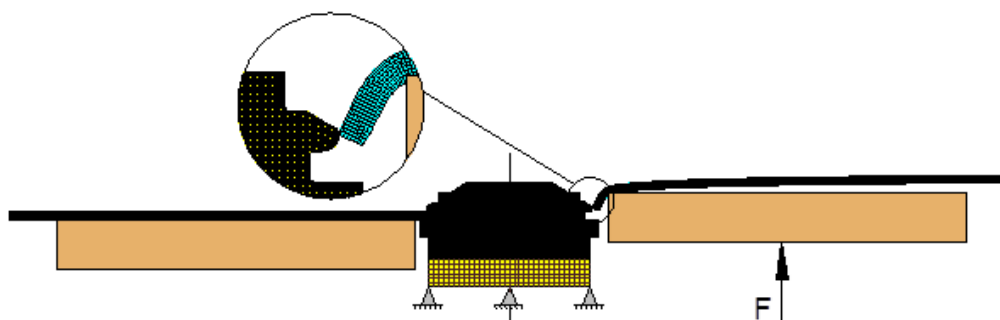


Figura 25 - Representação esquemática do ensaio de separação.

## Capítulo 6

---

### 6. Modelação em Elementos Finitos

#### 6.1. Introdução

O desenvolvimento do processo começou com o uso de *software* que simula, usando o método de elementos finitos, a deformação do material sujeito a cargas de compressão axial. A partir das simulações efetuadas foi possível obter dados como tensões, extensões e outras variáveis de interesse que ajudem a prever a viabilidade da ligação em estudo, economizando tempo e custos.

Numa primeira abordagem, os resultados das simulações para além de verificarem a possibilidade de realizar a ligação, permitiram fazer o dimensionamento das ferramentas para a realização dos ensaios experimentais. Simultaneamente à realização dos primeiros ensaios experimentais foram analisados casos limite do processo de *Boss Forming*, bem como efetuadas análises detalhadas do mesmo. Com estas análises foi possível identificar os pontos críticos do processo e aplicar as modificações necessárias para desenvolver um processo viável de *Boss Forming* em varão. Posteriormente é efetuada uma comparação numérico-experimental do processo recriado com dimensões idênticas às utilizadas nos ensaios experimentais.

Para realizar a análise numérica apresentada deste processo utilizou-se o *software* I-FORM referido no capítulo 4.

#### 6.2. Refinamento da malha

O refinamento da malha é um aspeto importante do método de elementos finitos, previamente abordado no capítulo 4. Na Figura 12 desse capítulo mostra a solução de compromisso, onde a malha está suficientemente refinada para se obter resultados e tempos de computação aceitáveis. As malhas utilizadas contêm mais ou menos elementos, onde as zonas críticas de deformação merecem mais discretização. Por outro lado as zonas com pouca deformação podem ser discretizadas com menos refinamento. Utilizando esta união de zonas com diferentes refinamentos é possível atingir o compromisso aceitável de tempo de processamento para o cálculo numérico.

#### 6.3. Parâmetros da Simulação Numérica

A malha das pré-formas de varão e da chapa foram desenhadas recorrendo ao *software* GID. A malha correspondente ao varão é composta por duas zonas, uma mais refinada e outra menos refinada. As ferramentas foram desenhadas no *software* AutoCAD e, juntamente com a malha gerada, foram importadas para o pré-processador do I-FORM2D (*Pre.exe*) onde foram definidos os parâmetros do processo. Com efeito, as ferramentas foram consideradas rígidas e à matriz superior, responsável por comprimir o varão em ambas as etapas (embora com geometrias diferentes), foi atribuída uma velocidade de 1mm/s. De seguida é necessário definir as condições de fronteira. No

caso do I-FORM2D, as condições axissimetria podem ser definidas automaticamente pelo programa no ato de importação das malhas, ou seja, os nós no eixo axial (raio = 0) só se podem mover ao longo desse mesmo eixo. Além desta condição é necessário fixar a peça, definindo os nós da base como nós fixos. Depois define-se intervalo de tempo entre cada incremento (*Step*). Quanto menor for o intervalo de tempo de cada *step* maior será o número de *steps* e tempo necessário para simular o processo, por outro lado permite um melhor seguimento da evolução do mesmo.

No pré-processador definem-se as propriedades do material e é até possível escolher um material pré-definido a partir da biblioteca de materiais, presente no I-FORM. O material utilizado para a chapa de alumínio (na simulação da segunda etapa do processo) foi escolhido a partir desta biblioteca, porém os materiais utilizado para o varão e para a chapa usada no ensaio destrutivo foram introduzidos com os dados obtidos através de ensaios de caracterização de material, especificados no capítulo anterior. Os parâmetros de contacto foram definidos com nós libertados no contacto entre ferramentas e nós fixos no contacto entre objetos, sem escorregamento entre interfaces, para as simulações do processo de *Boss Forming*. Na simulação do ensaio de separação utilizou-se nós libertados entre objetos. Em relação às configurações de iteração foi definido a opção de iteração direta com um número máximo de 50 iterações.

#### **6.4. Simulações Numéricas Realizadas**

O material do varão nestas simulações é o alumínio com tratamento térmico, AW6082-O. Nos ensaios experimentais correspondentes observou-se a ocorrência de fissuras que não foram previstas nas simulações porque não foi empregue nenhum critério de dano. Os resultados relevantes agrupados em 7 casos de estudos são apresentados na Tabela 6.

As primeiras simulações foram realizadas com o objetivo de aplicar o processo de *Boss Forming* a varão tal como era aplicado em tubos, identificadas por Caso II na Tabela 6. Como se verificou no desenvolvimento experimental o ensaio correspondente (Caso A) não obteve sucesso. Assim foi necessário analisar o mecanismo de formação de apara neste processo. O caso I corresponde ao caso limite de formação de apara. No caso IV analisou-se o efeito do anel de pressão o estado de tensão no varão durante o processo com e sem anel de pressão. Os casos V e VI correspondem às simulações da aplicação do processo de *Boss Forming* para a ligação de varão a chapa, que permitiram dimensionar a cavidade da matriz superior e ligar ambas a chapas com diferentes espessuras.



Operação	Caso de teste	$a$ (mm)	$b$ (mm)	$r_{pr}^i$	$r_{pr}^i$	Nº de elementos (varão)
<b>Boss Forming</b>	I	0,4	11,8	-	-	20000
	II	0,6	8			
	III	1	4,9			
<b>Boss Forming com anel de pressão</b>	IV	1	4,9	8,5	11,5	
<b>Ligação varão-chapa (Segunda operação de Boss Forming)</b>		$a$ (mm)	$b$ (mm)	$t_s$ (mm)		Nº de elementos (chapa)
	V	1	2,5	1		800
	VI		2,1	1,5		1200
<b>Ensaio destrutivo</b>	VII	-		1,5		5000

Tabela 6 - Simulações numéricas realizadas.

#### 6.4.1. Deformação pretendida e formação de apara

Como foi referido anteriormente, no ensaio experimental (Caso A da Tabela 3) correspondente à primeira solução proposta do processo de *Boss Forming* em varão (Caso II da Tabela 6), não foi possível obter uma flange aceitável. Assim foram realizadas simulações para analisar os mecanismos de deformação do processo variando, a espessura de material acumulado,  $a$ .

O caso I, com  $a = 0,4$ mm, corresponde ao caso limite para qual o material é removido por corte. Nas simulações com espessura superior a 0,4mm (caso II da Tabela 6) observa-se a deformação pretendida onde a flange é completamente preenchida, no entanto, para espessuras próximas do caso limite isto não se verifica experimentalmente. Nesta situação, se a condição de axissimetria se perder durante o processo ocorre transição entre os modos de deformação de acumulação e remoção de material por corte, como se observou no ensaio experimental com  $a = 0,6$ mm (Caso A da Tabela 3). No caso III com  $a = 1$ mm a deformação ocorre com acumulação de material e a flange é completamente preenchida como se pretende. Este caso corresponde às condições que permitem a produção de flanges anelares aceitáveis em varão. Estes resultados são apresentados em detalhe no capítulo 7.

A Figura 26 apresenta uma representação geral do processo de *boss forming* estudado em elementos finitos.

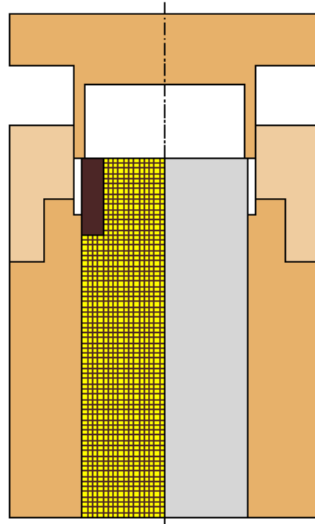


Figura 26 – Representação geral do processo de *Boss Forming*.

Perante o resultado experimental do caso A da Tabela 3, e a análise do mecanismo de remoção do material identificou-se uma limitação no uso de *Boss Forming* para produzir flanges anelares em varão. Com base no conceito de conservação de volume foi determinada a seguinte equação que relaciona o comprimento  $b$  com a espessura  $a$  de material acumulado e a secção  $c \times d$  da cavidade da matriz inferior, onde  $R$  é o raio do varão,

$$b = \frac{(2R + d) cd}{(2R - a) a} \quad (6.1)$$

Recorrendo à equação 6.1 é possível, do ponto de vista matemático, preencher uma cavidade  $c \times d = 3 \times 3\text{mm}^2$  com um comprimento arbitrário  $b$  através do controlo da espessura  $a$ , de material acumulado. Contudo, a remoção de material por corte, observada na simulação nas condições do caso I, e experimentalmente nas condições do caso II, impede a possibilidade de se obter uma flange numa posição arbitrária  $b$  ao longo do varão. Para o caso limite onde a espessura de material removido é  $a=0,4\text{mm}$  o comprimento necessário para preencher a cavidade seria de  $b=11,9\text{mm}$ .

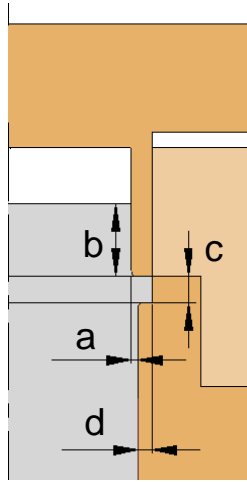


Figura 27 – Ilustração da geometria da secção de varão do varão enformado por *Boss Forming*.

#### 6.4.2. Introdução do anel de pressão – Alteração do estado de tensão

De acordo com os ensaios apresentados no capítulo 5, após a realização do ensaio com o modo de formação pretendido (Caso B da Tabela 3), observou-se a ocorrência de fissuras originadas por tração. Posto isto, efetuou-se uma análise detalhada da simulação numérica correspondente (Caso III da Tabela 6).

Recorrendo à variável de tensão média,  $\sigma_m$ , verifica-se a existência de tensão média de tração elevada ao longo do comprimento de material acumulado,  $b$ , onde ocorre a fissuração. Assim, a solução proposta para alterar o estado de tensão, e prevenir o aparecimento de fissuras, foi modificar a matriz superior. A modificação consiste na introdução de um anel de pressão na matriz que desenvolve estados de compressão durante o processo de *Boss Forming*. Os raios do anel (Figura 28) foram estabelecidos de acordo com a Tabela 4 para auxiliar o escoamento do material.

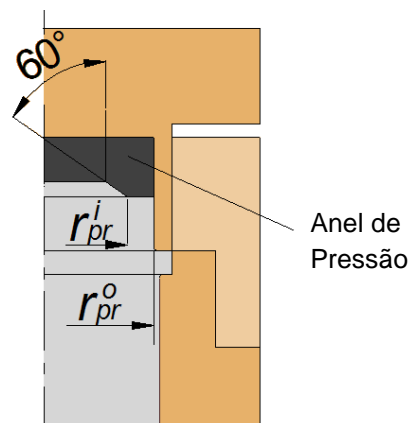


Figura 28 – Representação esquemática do anel de pressão.

A Figura 29 mostra a distribuição da tensão média [MPa] no varão, na fase final da operação, sem o anel de pressão (Figura 29a) e com anel de pressão (Figura 29b) verificando que o anel de

compressão evita tensões médias de tração. As fotografias incluídas na Figura 29 mostram os resultados experimentais do ensaio sem anel e do ensaio modificado, confirmando a influência do estado de tensão na formação de fissuras.

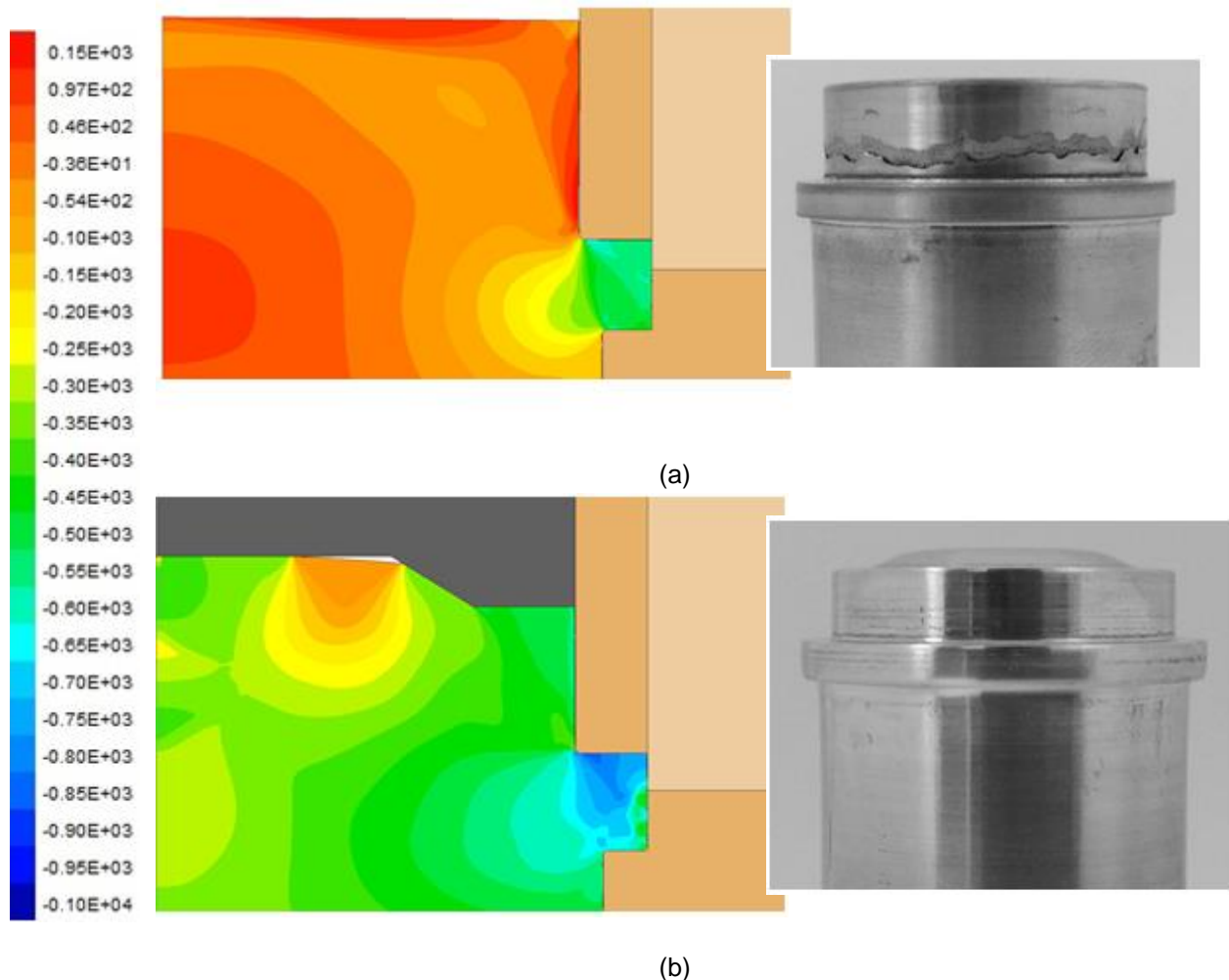


Figura 29 – Distribuição da tensão média [MPa] na fase final da simulação numérica do processo de *Boss Forming* (a) Sem anel de pressão (b) com anel de pressão. As fotografias evidenciam a ocorrência e ausência de fissuras ao longo do comprimento de material acumulado *b*.

#### 6.4.3. Aplicação do processo de *Boss Forming* em varão – Ligação varão a chapa

A ligação de varão a chapa surge como aplicação do novo processo de *Boss Forming* em varão. Após concluir-se a análise dos casos de estudo do processo e obter varões enformados aceitáveis foi possível repetir a operação de *Boss Forming* nos mesmos. Esta operação produz uma segunda flange que pode ser usada para realizar uma ligação varão a chapa por bloqueio mecânico, mostrando assim uma possível aplicação do novo processo.

Os casos de estudo V e VI foram realizados com objetivo de definir a geometria da matriz superior que permitisse ligar as chapas de alumínio e aço com espessuras diferentes de 1mm e 1,5mm respetivamente. O caso VII é o modelo numérico do ensaio de separação onde são analisados os

pontos de falha da ligação. Ilustrações das simulações numéricas foram previamente apresentadas no capítulo 5 juntamente com os ensaios experimentais correspondentes.

## Capítulo 7

---

### 7. Apresentação de resultados e discussão

#### 7.1. Introdução

Neste capítulo é feita uma comparação numérico-experimental dos resultados obtidos, começando com o processo protótipo até ao processo com as devidas adaptações, acompanhados por uma análise da evolução das principais variáveis do processo. De acordo com os resultados, são identificados os pontos críticos no processo que permitem compreender os fenómenos envolvidos durante a sua evolução e retirar as devidas conclusões.

No final do capítulo é apresentada uma avaliação do desempenho da ligação varão a chapa obtida por *Boss Forming* com recurso a um ensaio destrutivo.

#### 7.2. Discussão dos resultados

##### 7.2.1. Operação de *Boss Forming* – Controlo dos modos de deformação

A operação de *Boss Forming* desenvolvida por Alves et al.[6] para ligar tubo de parede fina a chapa foi modificada para ser aplicada em varão, numa operação de deformação na massa. Do mesmo modo que quando este processo é aplicado em tubos, pretende-se que o material flua para uma cavidade e que esta seja completamente preenchida para assegurar uma flange robusta.

No sentido de aplicar o processo desenvolvido na realização de uma ligação varão a chapa, também é necessário que a nova superfície tenha, após a primeira etapa do processo e com a flange enformada, um comprimento livre que possibilite uma segunda operação de *Boss Forming*. Esta segunda operação fará a ligação mecânica do varão a chapas com diferentes espessuras.

As primeiras análises numéricas, correspondentes ao caso II da Tabela 6, revelaram ser teoricamente possível produzir flanges em varão, de acordo com o pretendido, utilizando o processo de *Boss Forming* em varões de alumínio. A geometria das cavidades foi estabelecida de acordo com os parâmetros das variáveis analisadas nos trabalhos anteriores de ligação tubo a chapa[5,6,7]. Porém, os varões enformados nestas condições, ( $a=0,6$ ,mm, Caso A Tabela 3) não são aceitáveis. A deformação observada neste caso encontra-se entre dois casos extremos de deformação, do processo de *Boss Forming* em varão. Estes modos de deformação foram identificados variando o parâmetro de espessura de material acumulado,  $a$ .

Nas análises numéricas do caso I e III da Tabela 6 identificaram-se os dois modos de deformação do processo de *Boss Forming* em varão. O caso I, com espessura de material acumulado  $a=0,4$ mm (Figura 30a) corresponde ao caso extremo onde o material é removido por corte (Figura 30b). O caso III, com espessura de material acumulado  $a=1$ mm (Figura 30c) corresponde ao modo de deformação pretendido onde o material é acumulado e preenche completamente a cavidade da matriz. Com base

resultados destes casos verifica-se que não é adequado usar espessuras próximas de  $a=0,4\text{mm}$  (Figura 30d). A espessura deve ser elevada o suficiente para que durante a deformação não ocorra transição entre os modos de deformação devido à perda de simetria causada por desvios na montagem de ferramentas, folgas no conjunto ou outras irregularidades que alterem os parâmetros do processo. Com efeito, a espessura  $a=1\text{mm}$ , de material acumulado, é adequada para obter o modo de deformação pretendido de acumulação de material (Figura 30e).

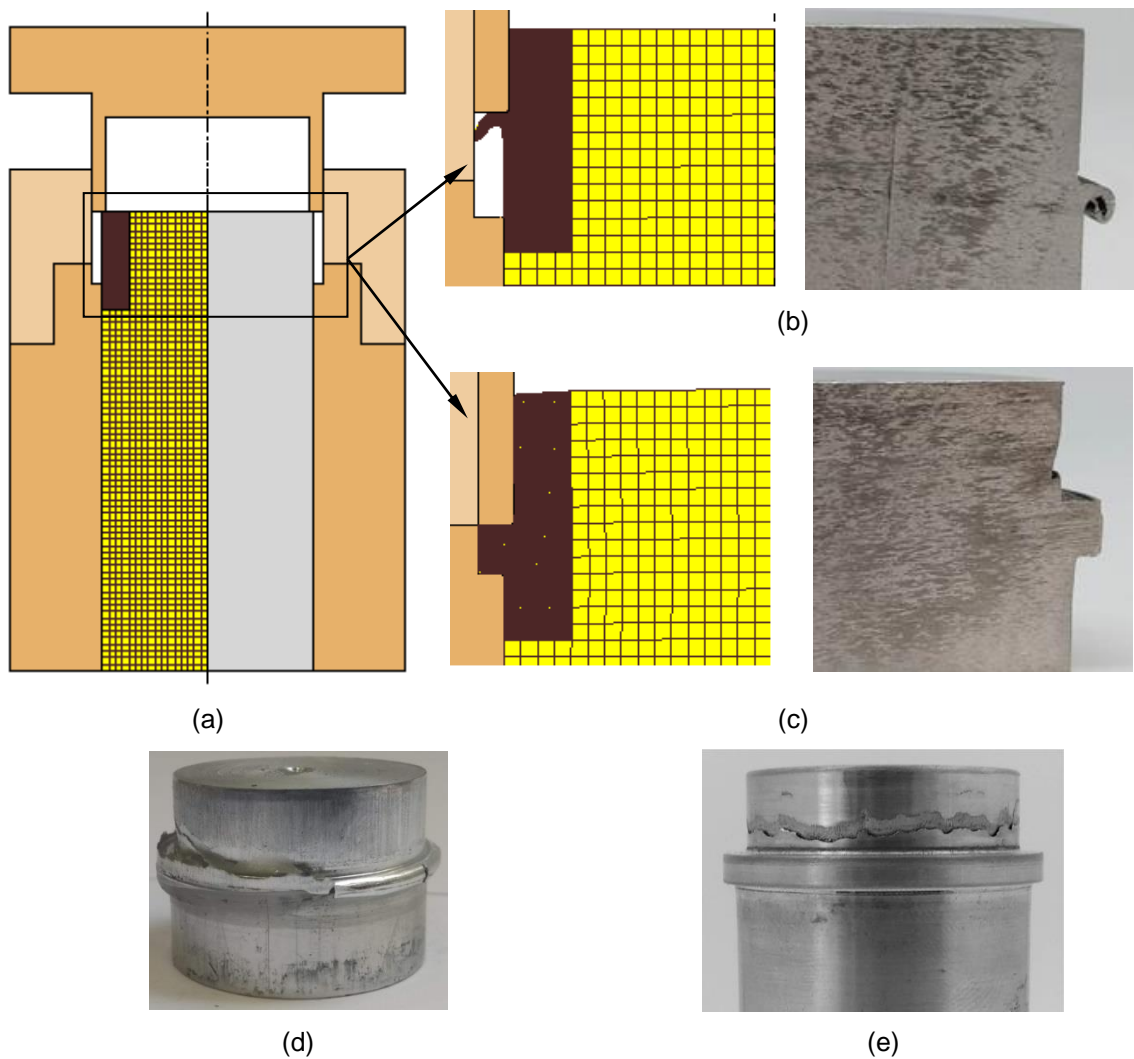


Figura 30 – Modos de deformação do processo de *Boss Forming* (a) Representação geral do processo de *Boss Forming* (b) Remoção de material  $a=0,4\text{mm}$  (c) Acumulação de material  $a=1\text{mm}$  (d) Varão com ambos os modos de deformação,  $a=0,6\text{mm}$  (e) Varão com acumulação de material pretendida  $a=1\text{mm}$ .

### 7.2.2.Fissuração - Controlo do estado de tensão

Como já foi brevemente abordado em capítulos anteriores, após serem estabelecidos os parâmetros adequados de acumulação de material, os varões enformados nessas condições apresentam fissuras. A ocorrência de fissuras pode ter várias causas e através da sua morfologia é possível determiná-las.

As fissuras observadas apresentam uma morfologia típica de fratura dúctil originada por tração. Este aspeto indica que localmente as tensões de tração atingem um valor crítico que leva à fratura do material. A primeira solução proposta para evitar o aparecimento de fissuras foi realizar um tratamento térmico de recozimento nos varões utilizados. Esta é uma solução simples, alterando a apenas a preparação das pré-formas. O recozimento visa aumentar a enformabilidade do material utilizado, através duma reestruturação ao nível cristalino dos elementos de liga, e assim ser sujeito a extensões mais elevadas sem ocorrer fratura do material. Apesar disso os varões de alumínio tratado termicamente apresentaram resultados idênticos aos ensaios anteriores sem sucesso a evitar o aparecimento de fissuras.

Analisando a simulação numérica com o novo material e  $a=1\text{mm}$  (Caso III Tabela 6), recorrendo à variável da tensão média identifica-se a zona crítica de tensão média à tração ao longo do comprimento de material acumulado,  $b$ , (zona A na Figura 31a) com um valor máximo de 150 MPa, compatível com o aparecimento de fissuras nos ensaios experimentais. Assim, para evitar o aparecimento de fissuras é necessário alterar o estado de tensão nessa zona, adjacente ao material que é acumulado durante o processo.

O estado de tensão foi alterado com uma modificação na matriz superior. A modificação consiste na introdução de um anel de pressão na matriz que desenvolve tensões de compressão na zona A (Figura 31b). Na simulação numérica (Caso IV Tabela6) verifica-se que o anel de pressão elimina as tensões médias de tração no varão. Os ensaios experimentais realizados com a nova ferramenta produzem consistentemente flanges anelares em varão sem defeitos.



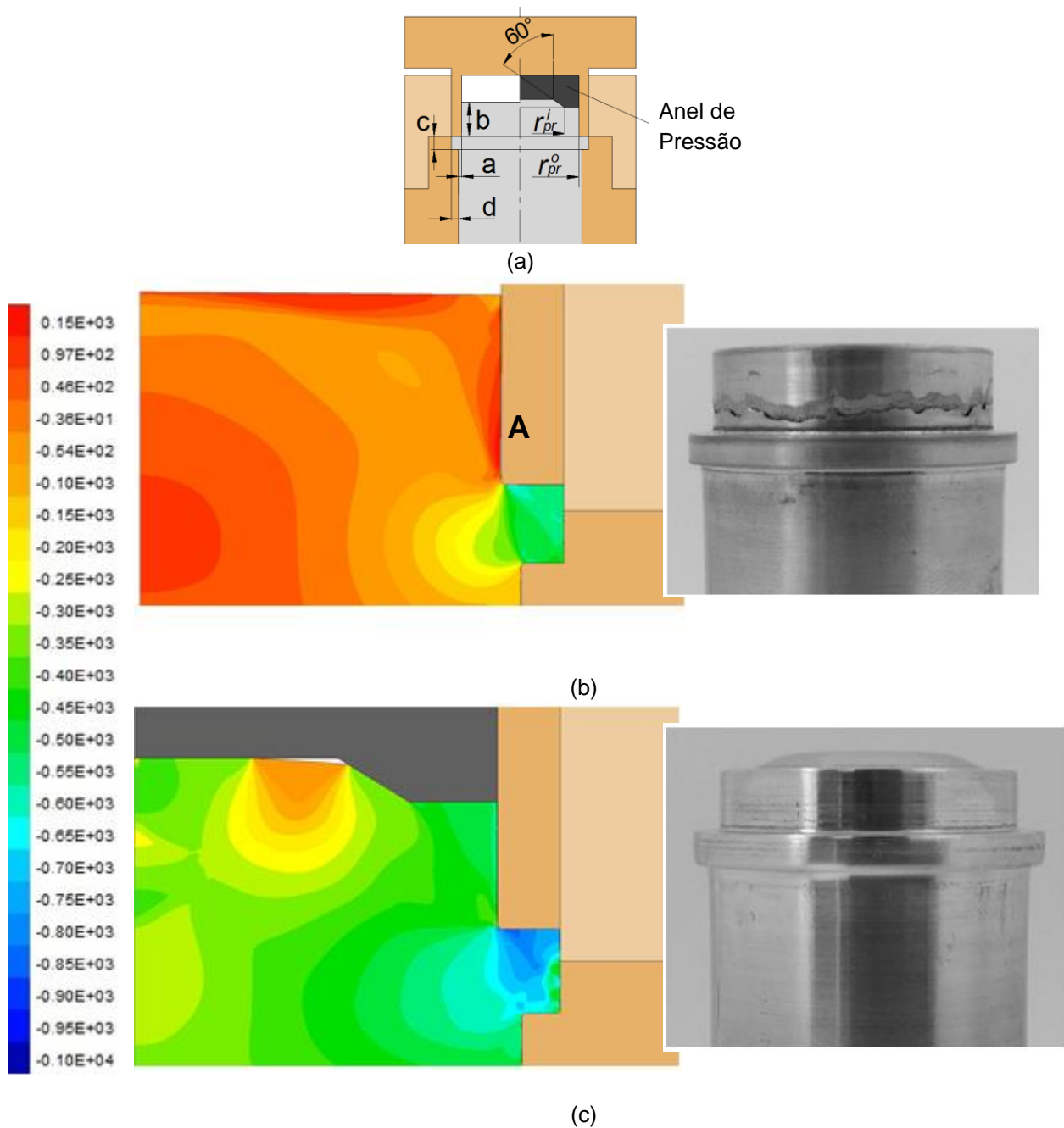


Figura 31- Comparação do processo de *Boss Forming* sem anel de pressão e com anel de pressão. (a) Esquema do processo sem anel de pressão (esquerda) e com anel de pressão (direita) (b) Distribuição da tensão média [MPa] no final da operação sem anel de pressão (c) Distribuição da tensão média no final da operação com anel de pressão.

### 7.2.3. Aplicação do processo de *Boss Forming* - Ligação Varão a chapa

Depois de ser possível obter varões sem defeitos utilizaram-se os varões enformados por *Boss Forming* com anel de pressão para realizar uma segunda operação. Os parâmetros da segunda operação, (caso V e caso VI da Tabela 6) foram definidos com base nos parâmetros do caso IV da Tabela 6 para produzir uma segunda flange com uma secção capaz de realizar o bloqueio mecânico de chapas adequadamente.

A Figura 32a apresenta o esquema das duas operações de *Boss Forming* para ligar varão a chapa, com detalhe no final da segunda operação. A segunda operação está representada utilizando o caso VI da Tabela 6 e, tratando-se de um processo de *Boss Forming*, deve-se considerar as condições que causam defeitos no varão, em particular a ocorrência de fissuras, observada em ensaios anteriores. Como já foi discutido, prevenir a ocorrência de fissuras requer alteração do estado de tensão no varão, no entanto, um teste preliminar, realizado para analisar os modos de deformação do processo, mostra que para pequenos deslocamentos o defeito não se observa (Figura 32b). O comprimento  $b$ , necessário para realizar o bloqueio mecânico da chapa de aço, é de 2,5mm e inferior ao deslocamento realizado no teste preliminar e por isso prevê-se que a segunda operação dispensa do uso do anel de pressão. Os ensaios experimentais são compatíveis com o que era previsto, onde não ocorreu fissuração ou outro defeito visível (Figura 32c).

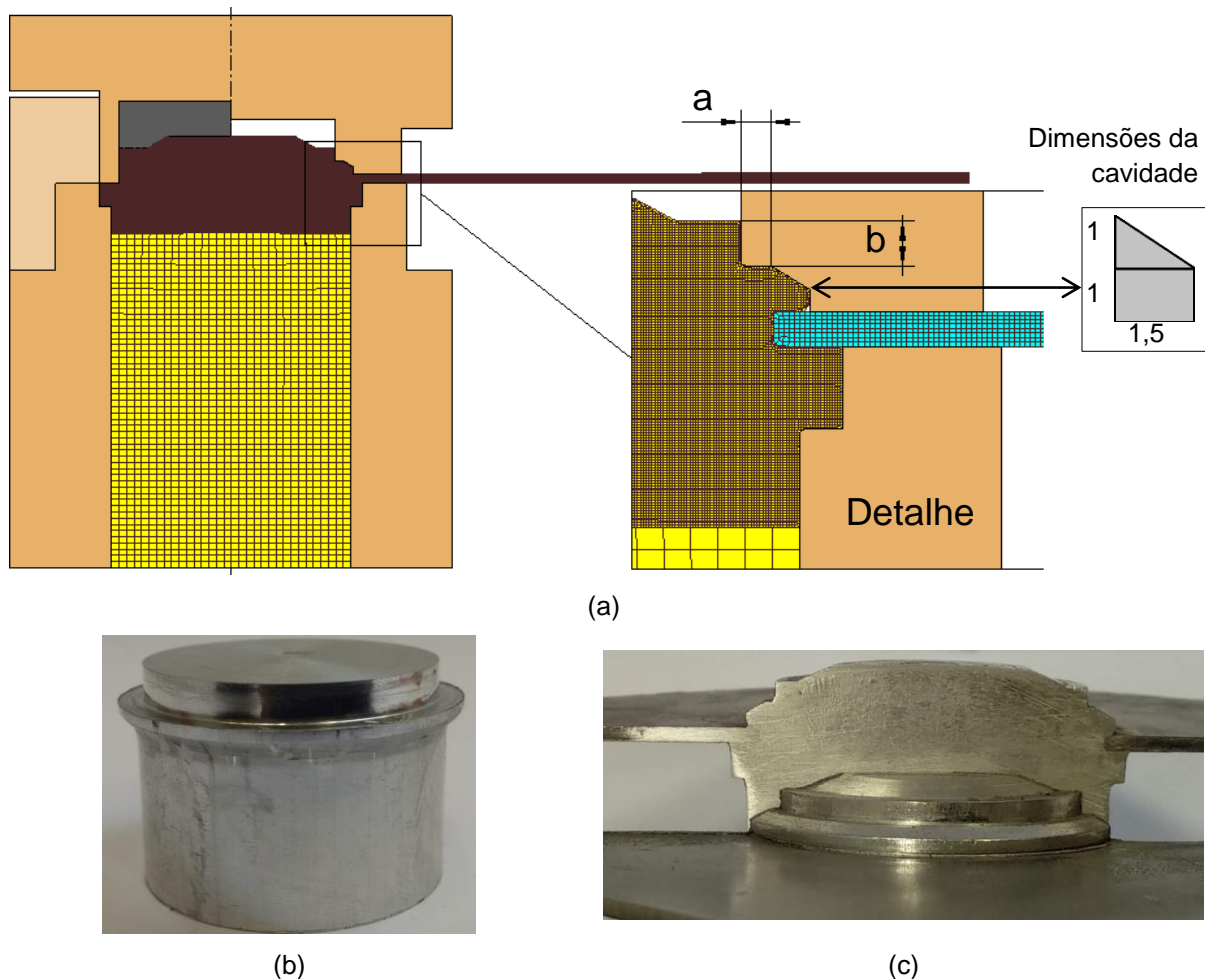


Figura 32 – (a) Representação esquemática das operações de *Boss Forming* usadas para ligar varão a chapa. (b) Deformação em varão para pequenos deslocamentos. (c) Secção de corte da ligação varão a chapa de aço.

Com esta configuração é possível continuar a deslocar a matriz de compressão no final da operação e como consequência deformar a chapa e inviabilizar a ligação. Para assegurar a execução correta

da operação é necessário controlar o limite e deslocamento da ferramenta. Este limite pode ser previsto a partir das simulações numéricas e está indicado nos casos V e VI da Tabela 6.

### 7.3. Evolução da carga com o deslocamento

#### 7.3.1. Operação de *Boss Forming*

A Figura 33 mostra a evolução do ensaio experimental e a prevista pela simulação numérica da operação feita com e sem o anel de pressão em varões de alumínio tratado, AW6082-O. Estas curvas experimentais correspondem aos casos C da Tabela 3 e D da Tabela 4 e as curvas previstas numericamente são o resultado das simulações dos casos III e IV da Tabela 6.

A introdução no anel de pressão influencia a evolução da força com o deslocamento do processo de *Boss Forming*, contudo apenas altera a fase final da operação. Ambas as curvas mostram um crescimento uniforme da força até um ponto a partir do qual a força aumenta significativamente na operação com anel de pressão, devido às tensões de compressão introduzidas pelo mesmo. Ainda assim a carga máxima necessária na operação de *Boss Forming* com anel de pressão é inferior a 200 kN. Nota-se que a ocorrência de fissuras, na operação sem anel de pressão, não é aparente na curva de força-deslocamento sendo apenas observada visualmente no varão após o ensaio.

As curvas apresentam uma tendência típica de um ensaio de forjamento em matrizes fechadas e os ensaios foram realizados em controlo de movimento com um limite de carga máxima admissível, para evitar sobrecarregar e danificar o conjunto de ferramentas.

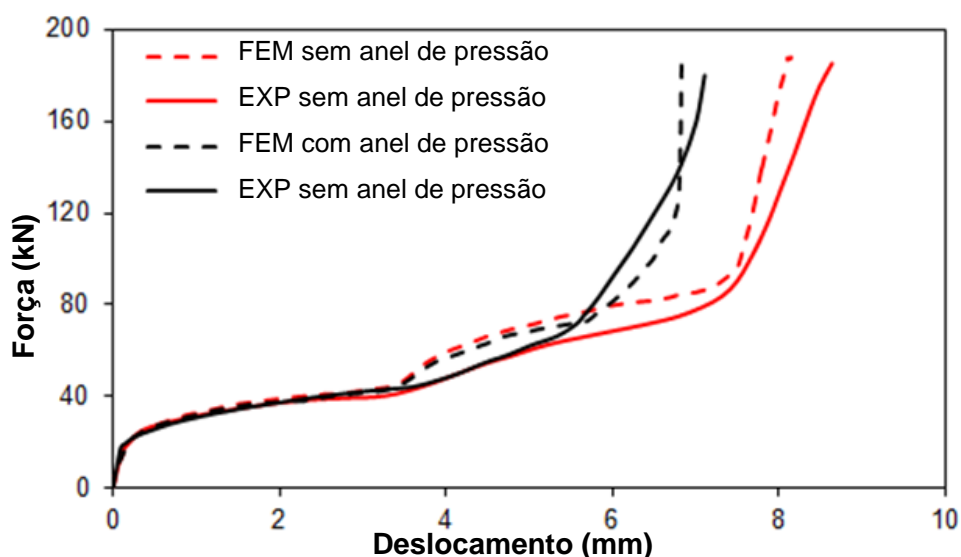


Figura 33 – Comparação numérico-experimental da evolução da força com o deslocamento do processo de *Boss Forming*.

### 7.3.2. Ensaio de separação

O último ensaio realizado foi o ensaio de separação de uma ligação varão a chapa de aço para analisar os seus pontos de falha e avaliar o seu desempenho. A Figura 34 apresenta a evolução da carga com o deslocamento do ensaio destrutivo experimental e da simulação numérica (caso VII da Tabela 6).

Através da simulação numérica observa-se que o bloqueio mecânico mantém-se praticamente inalterado até uma força de 7kN. Para cargas inferiores a esta a deformação ocorre maioritariamente na chapa. Acima desta carga o bloqueio mecânico começa a deformar e é alcançada uma carga máxima de 11,8 kN. A chapa é removida enquanto se deforma levando à falha da ligação.

Os resultados deste ensaio mostram que o processo de *Boss Forming* pode ser aplicado com sucesso para ligar varão a chapa de materiais dissimilares. Atendendo que a falha da ligação ocorreu maioritariamente com deformação da chapa pode-se considerar que o bloqueio mecânico é robusto e viável como um novo processo de ligação. Além disso, depois da falha da ligação os componentes podem ser facilmente reciclados individualmente.

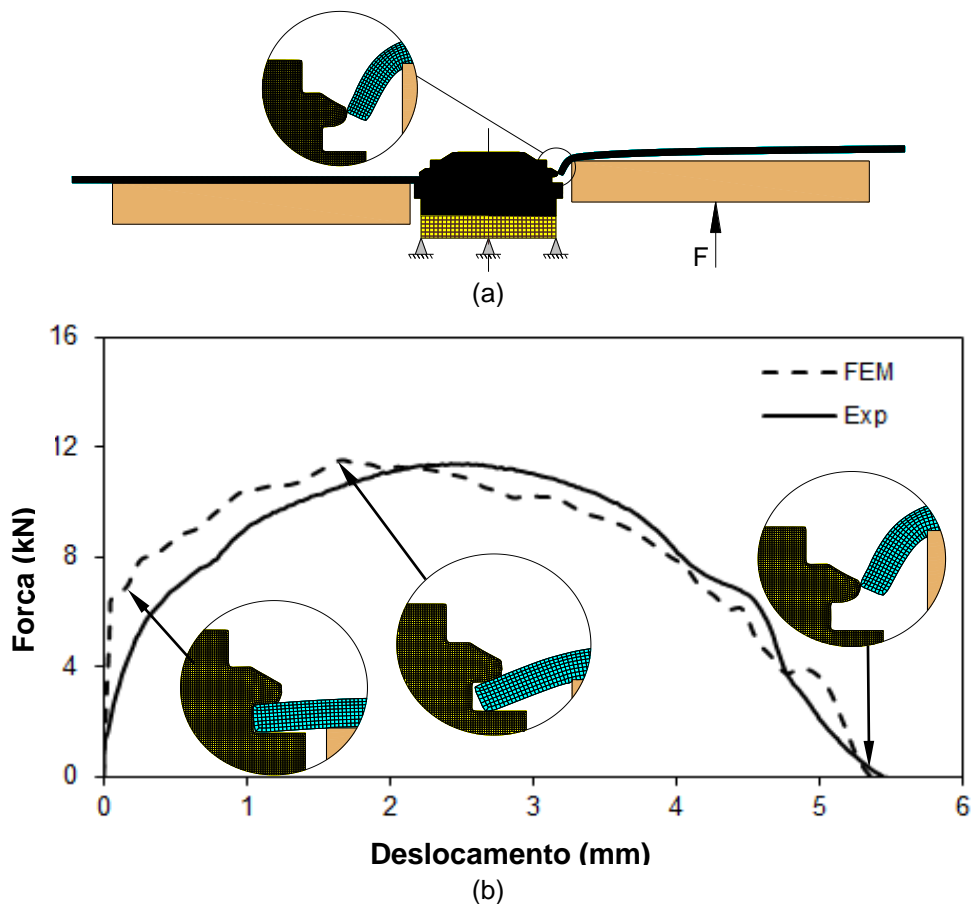


Figura 34 – Ensaio destrutivo realizado (a) Representação esquemática do ensaio (b) Evolução da força com o deslocamento prevista pela simulação numérica e do ensaio experimental.

## Capítulo 8

---

### 8. Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuro

#### 8.1. Conclusões

O novo processo de ligação surgiu da necessidade criar alternativas aos processos convencionais e expandir a aplicabilidade dos processos de deformação plástica. Com base num processo desenvolvido anteriormente para ligar tubos de parede fina a chapas foi possível desenvolver um novo processo de enformação de varão e aplicá-lo para realizar ligações de varão a chapa. O resultado é um processo de enformação capaz produzir flanges anelares em varão com elevada repetibilidade e baixo custo.

O processo de *Boss Forming* em tubos de parede fina pode ser estendido ao perfil varão. Para isso é necessário alterar a geometria da matriz superior para incluir um anel de pressão e dividir a matriz inferior em duas partes para incluir uma cavidade. Com processo antigo, sem anel, os varões enformados não são viáveis devido a ocorrência de fissuras. A inclusão do anel de pressão previne o aparecimento de fissuras no varão. A utilização de pequenos valores de espessura de material acumulado mostrou-se não ser adequada por ocorrer remoção de material por corte.

As forças máximas necessárias para realizar as operações mostram que uma prensa com 200 kN é suficiente para realizar o processo utilizando ferramentas relativamente simples à temperatura ambiente. Estes aspetos oferecem maior versatilidade ao processo desenvolvido podendo ser aplicado no terreno com baixo custo.

Como já foi mostrado ao longo desta dissertação, com o novo processo é possível ligar varões a chapas de materiais dissimilares, mostrando o potencial do mesmo como alternativa aos processos convencionais.

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

Em conclusão, conseguiu-se expandir o uso do processo de *Boss Forming* a varão e obtiveram-se desenvolvimentos que permitem desenvolver novas aplicações, eliminando a necessidade do uso dos processos de ligação convencionais num futuro próximo.

#### 8.2. Perspetivas de Trabalho Futuro

O processo de *Boss Forming* pode continuar a ser desenvolvido e a sua aplicação como processo de ligação de tubo a chapa pode ser melhorado. Contudo, por limitações temporais não foi possível estender a investigação para além do que foi desenvolvido nesta dissertação.

De todos os modos, seria interessante analisar diferentes geometrias das flanges e em particular, a da segunda operação, procurando uma geometria que otimizasse o volume de material disponível de forma a aumentar a resistência mecânica da ligação.

Também teria interesse aplicar este processo a varões de outros materiais como o aço ou o PVC, analisando o eventual uso da adaptação proposta que elimina as fissuras.

Além disso, também seria interessante desenvolver o processo para remover as limitações encontradas. Em particular poder-se produzir uma flange anelar calibrada numa posição arbitrária do varão.

Deste modo, os trabalhos futuros continuarão a evoluir e desenvolver estes processos como alternativa aos processos convencionais na ligação de materiais dissimilares, que, de outro modo, requer ultrapassar grandes dificuldades.

## Referências

- [1] W. J. Stevenson, *Operations Management*, Seventh Ed. McGraw-Hill School Education, 2001.
- [2] J. Robert, W. Messler, *Joining of Materials and Structures: From Pragmatic Process to Enabling Technology*. Elsevier Butterworth–Heinemann, 2004.
- [3] D. Löveborn, J. K. Larsson, and K.-A. Persson, “Weldability of aluminium, alloys for automotive applications,” *Phys. Procedia*, vol. 89, pp. 89–99, 2017.
- [4] D. Y. Yang, M. Bambach, J. Cao, J. R. Du, P. Groche, T. Kuboki, A. Sterzing, A. E. Tekkaya, and C. W. Lee, “Flexibility in metal forming,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, 2018.
- [5] L. M. Alves, J. Gameiro, C. M. A. Silva, and P. A. F. Martins, “Sheet-bulk forming of tubes for joining applications,” *J. Mater. Process. Tech.*, 2016.
- [6] L. M. Alves, R. M. Afonso, C. M. A. Silva, and P. A. F. Martins, “Joining tubes to sheets by boss forming and upsetting,” *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 252, pp. 773–781, 2018.
- [7] L. M. Alves, R. M. Afonso, C. M. A. Silva, and P. A. F. Martins, “Boss forming of annular flanges in thin-walled tubes,” *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 250, pp. 182–189, 2017.
- [8] M. Merklein, J. M. Allwood, B. Behrens, A. Brosius, H. Hagenah, K. Kuzman, K. Mori, A. E. Tekkaya, and A. Weckenmann, “Bulk forming of sheet metal,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 61, no. 2, pp. 725–745, 2012.
- [9] J. C. Hendry, “An investigation of the injection upsetting of six steels,” *Natl. Eng. Lab.*, 1971.
- [10] R. Balendra and Y. Qin, “Injection forging: engineering and research,” vol. 145, pp. 189–206, 2004.
- [11] R. G. Narayanan, “A Novel Method of Joining a Rod to a Sheet by End Deformation: A Preliminary Experimental Study,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 19, no. 5, pp. 773–779, 2018.
- [12] R. O. Parmley, *Standard hand of fastening and joining*. New York, USA: McGraw-Hill, 1996.
- [13] D. L. Olson, T. A. Siewert, S. Liu, and G. R. Edwards, *ASM handbook: Welding, brazing and soldering*. Ohio, USA: ASM International, 1993.
- [14] L. F. M. Silva, A. Öchsner, and R. Adams, *Handbook of adhesion technology*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2013.
- [15] L. M. Alves, C. M. A. Silva, and P. A. F. Martins, “Joining by Plastic Deformation,” *Key Eng. Mater.*, vol. 767, 2018.
- [16] R. Matsumoto, S. Hanami, A. Ogura, H. Yoshimura, and K. Osakada, “New Plastic Joining Method Using Indentation of Cold Bar to Hot Forged Part,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol.

57, pp. 279–282, 2008.

- [17] P. Groche, S. Wohletz, M. Brenneis, C. Pabst, and F. Resch, “Joining by forming—A review on joint mechanisms, applications and future trends,” *J. Mater. Process. Tech.*, 2014.
- [18] K. Mori, N. Bay, L. Fratini, F. Micari, and A. E. Tekkaya, “Joining by plastic deformation,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, 2013.
- [19] J. Rodrigues and P. Martins, *Tecnologia Mecânica - Tecnologia da Deformação Plástica - Vol. I Fundamentos Teóricos*, 2<sup>a</sup> edição. Escolar Editora, 2010.
- [20] V. Brotons, S. Ivorra, and R. Irlés, “Using Mathematic Applets Made for the Education on Failure Criteria for Metallic and Geological Geotechnical Materials,” 2012, no. July.
- [21] R. Courant, “Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations,” *Bull. Am. Math. Soc.*, vol. 49, 1943.
- [22] D. V. Hutton, *Fundamentals of Finite Element Analysis*. McGraw-Hill, 2004.
- [23] J. N. Reddy, *An Introduction to The Finite Element Method*, Third Edit. McGraw-Hill, 2005.
- [24] C. V. Nielsen, W. Zhang, L. M. Alves, N. Bay, and P. A. F. Martins, *Modeling of Thermo-Electro-Mechanical Manufacturing Processes - Applications in Metal Forming and Resistance Welding*, 1st ed. Springer-Verlag London, 2013.
- [25] I. Torca, A. Aginagalde, J. A. Esnaola, L. Galdos, Z. Azpilgain, and C. Garcia, “Tensile Behaviour of 6082 Aluminium Alloy Sheet under Different Conditions of Heat Treatment , Temperature and Strain Rate,” *Key Eng. Mater.*, vol. 423, no. December, 2009.