

**Ligação de chapas sobrepostas através da tecnologia de  
deformação plástica de chapa na massa**

**João Pedro da Fonseca Matos Pragana**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Mecânica**

Orientadores: Prof. Carlos Manuel Alves da Silva  
Prof. Ivo Manuel Ferreira de Bragança

**Júri**

Presidente: Prof. Rui Manuel dos Santos Oliveira Baptista  
Orientador: Prof. Carlos Manuel Alves da Silva  
Vogais: Prof. Paulo António Firme Martins  
Prof. Luís Manuel Mendonça Alves

**Novembro 2017**



# Agradecimentos

Desejo apresentar os meus agradecimentos a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização da presente dissertação.

Ao Professor Carlos Silva e Professor Ivo Bragança pela disponibilidade, forte apoio durante todo o trabalho e por todas oportunidades de aprendizagem.

À Área Científica de Tecnologia Mecânica e Gestão Industrial do Instituto Superior Técnico pelas facilidades e meios concedidos que tornaram possível a realização desta tese.

Ao Sr. Carlos Farinha e ao Diogo Silva pela ajuda e disponibilidade no decorrer do desenvolvimento experimental realizado.

Por fim agradecer à minha família e amigos por todo o apoio e carinho.



# Resumo

Os diversos setores da indústria, nomeadamente automóvel e aeronáutico, têm promovido o desenvolvimento de novos processos tecnológicos mais eficientes. Uma das novas tecnologias que segue esta tendência é a Deformação Plástica de Chapa na Massa (DPCM), a qual permite o fabrico de peças complexas recorrendo a um número reduzido de operações. No entanto, a sua utilização na ligação de componentes é uma vertente ainda pouco explorada.

Esta dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de um novo processo de ligação entre chapas sobrepostas por DPCM. O processo combina um corte parcial e dobragem com uma operação de compressão na direção perpendicular à espessura da chapa.

A viabilidade da ligação foi avaliada através de um modelo teórico e o conceito geral foi comprovado através de ensaios numéricos e experimentais. Os resultados obtidos de ensaios destrutivos demonstraram um bom desempenho mecânico da junta.

## Palavras Chave:

Juntas sobrepostas; Ligação por deformação plástica; Forjamento de chapa; Modelação numérica; Análise experimental;

# **Abstract**

Several industry sectors, mainly automotive and aeronautic, have been promoting the development of new technological processes that provide high efficiency. Sheet Bulk Metal Forming (SBMF) follows this trend, being able to produce complex parts with less manufacturing stages. However, its applicability to join parts is not yet fully explored.

The research work aims to develop a new lap joint by plastic deformation (SBMF). The process combines a partial cut and bending with an upset compression in direction perpendicular to thickness.

The viability of the joint was evaluated through a theoretical model and the overall concept was validated by means of numerical and experimental tests. The destructive tests demonstrate a good mechanical performance of the lap joint.

## **Keywords:**

Overlap joint; Joining by forming; Sheet Forging; Numerical analysis; Experimental analysis

# Índice

Agradecimentos.....	I
Resumo .....	III
Abstract.....	IV
Índice .....	V
Índice de figuras .....	VII
Índice de tabelas .....	XI
Nomenclatura .....	XIII
Símbolos.....	XIII
Acrónimos.....	XIV
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da dissertação.....	2
2 Estado da Arte .....	3
2.1 Deformação plástica de chapa na massa .....	3
2.1.1 Forjamento de chapa.....	4
2.1.2 Limitações nos processos de DPCM.....	5
2.1.3 Condições tribológicas .....	6
2.2 Processos de Ligação para chapas sobrepostas.....	7
2.2.1 Tecnologia de adesivos .....	8
2.2.2 Soldadura por pontos (RSW) .....	9
2.2.3 Soldadura por fricção linear (FSW) .....	10
2.2.4 Ligações com componentes mecânicos .....	12
2.2.5 <i>Clinching</i> .....	14
2.2.6 <i>Hemming</i> .....	15
2.2.7 Visão Geral dos processos descritos .....	17
2.3 Contexto histórico .....	18
3 Desenvolvimento Teórico .....	20

3.1	O Processo .....	20
3.2	Modelação Teórica .....	22
3.2.1	Representação gráfica .....	26
3.3	Modelação Numérica.....	33
3.3.1	Procedimento.....	34
3.3.2	Modelação do Processo .....	34
4	Desenvolvimento experimental .....	37
4.1	Equipamentos.....	37
4.2	Ferramenta .....	38
4.3	Procedimento experimental.....	40
4.3.1	Processos de corte .....	42
4.3.2	Quinagem .....	44
4.3.3	1º Forjamento .....	47
4.3.4	2º Forjamento .....	49
4.4	Ensaio destrutivo .....	51
5	Resultados e Discussão .....	52
5.1	Juntas obtidas.....	52
5.1.1	Representação gráfica .....	53
5.2	Fases do processo .....	56
5.2.1	Quinagem .....	57
5.2.2	1º Forjamento .....	60
5.3	Ensaio destrutivo .....	68
6	Considerações Finais .....	70
6.1	Conclusões .....	70
6.2	Trabalhos Futuros .....	71
	Referências .....	73



# Índice de figuras

Figura 2.1–Organização proposta para processos de DPCM[7]. .....	4
Figura 2.2 - Comparação entre etapas no forjamento em massa e forjamento de chapa para o mesmo componente final [9]. .....	5
Figura 2.3 - a) Anel sincronizador produzido por DPCM; b) Análise FEM com evidência nas extensões plásticas existentes nos detalhes geométricos do mesmo anel [11]. .....	6
Figura 2.4– Processos atualmente utilizados na obtenção de juntas entre chapas sobrepostas: a) Tecnologia de adesivos; b) Soldadura por pontos (RSW); c) Soldura por fricção linear por pontos (FSSW); d) Self-pierce Riveting (SPR); e) Clinching; f) Hemming.....	7
Figura 2.5– Otimização na configuração de juntas adesivas [17]. .....	8
Figura 2.6– a) Representação esquemática simplificada de uma operação RSW [20]; b) Ciclo de intensidade de corrente e força típico no decorrer de uma ligação obtida por RSW [21]. .....	9
Figura 2.7 - a) Representação esquemática do escoamento do material resultante do avanço da ferramenta em FSW [23]; b) Configurações de junta convencionais numa operação de FSW [24]. ...	10
Figura 2.8– Modo de interação da ferramenta com os materiais a unir nas suas três diferentes fases no decorrer de uma operação de FSSW [25].....	11
Figura 2.9– Representação das diferentes fases do processo <i>refill</i> -FSSW [24]. .....	12
Figura 2.10– Representação das fases envolvidas no processo SPR [32]. .....	13
Figura 2.11 – Representação das fases envolvidas no processo clinching [34]. .....	14
Figura 2.12– Exemplificação de um <i>interlocking</i> mecânico obtido por clinching [37]. .....	15
Figura 2.13– Representação esquemática das fases envolvidas na obtenção de uma junta simples através do processo hemming [40]. .....	16
Figura 2.14– Representação esquemática de alguns dos defeitos ocorrentes no processo de <i>hemming</i> [35]. .....	16
Figura 2.15 - a) Junta <i>mortise-and-tenon</i> tradicional [46] ; b) Junta obtida entre chapas de Alumínio e Policarbonato [45]; c) Junta obtida entre chapas de Alumínio [43]; d) Junta resultante de um ensaio destrutivo realizado [43]. .....	19
Figura 3.1– Representação esquemática tridimensional da ligação final pretendida pelo processo proposto.....	20
Figura 3.2– Representação esquemática seccional para a operação de quinagem (vista cortada). ...	21
Figura 3.3– Representação esquemática para a operação de forjamento da 1ª chapa (vista cortada). .....	21
Figura 3.4 - Representação esquemática para a operação de forjamento da 2ª chapa (vista cortada). .....	22
Figura 3.5– Parâmetros geométricos iniciais existentes na primeira fase do processo. ....	23
Figura 3.6– Representação esquemática da vista cortada simplificada ao centro da chapa: a) Parametrização prévia à fase de quinagem; b) Parametrização da chapa após a quinagem mediante as aproximações discutidas. ....	24

Figura 3.7– Representação esquemática da vista cortada no centro da ligação para chapas de espessura idêntica: a) Montagem realizada após a fase de quinagem; b) Junta após o forjamento da 1ª chapa; c) Junta após o forjamento da 2ª chapa. ....	25
Figura 3.8 – Representação esquemática da vista cortada no centro da ligação entre chapas de diferente espessura: a) Montagem realizada após a fase de quinagem; b) Junta após o forjamento da 1ª chapa.....	25
Figura 3.9– Esquema representativo dos parâmetros geométricos existentes no processo com evidência na influência da espessura total da junta H na representação esquemática do processo...	26
Figura 3.10 – Representação da área de trabalho considerada para as configurações de junta admitidas: a) Representação gráfica; b) Aglomerado de configurações de junta possíveis consoante a espessura total da mesma. ....	27
Figura 3.11 - Modelação numérica realizada na pré-análise de sobreposição: a) Modelação inicial mediante os parâmetros geométricos envolventes; b) Número de elementos finitos modelados; c) Exemplo da metodologia apresentada em b) para $t_1 = t_2 = 5$ mm e $h = 15$ mm.....	29
Figura 3.12– Fase final da simulação numérica realizada para $t = 5$ mm e $m = 0.1$ : a) $c = 9$ mm, $\Delta x = 0$ ; b) $c = 10$ mm, $\Delta x = 0.5$ mm ; c) $c = 11$ mm, $\Delta x = 3$ mm.....	30
Figura 3.13– Representação gráfica dos limites obtidos para a folga $c$ : a) Atrito fixo ( $m = 0.1$ ) e $K$ variável; b) Atrito variável e $K$ fixo ( $K = 0.2$ ). ....	32
Figura 3.14– Representação gráfica final da aplicabilidade do processo para $K = 0.2$ , $m = 0.1$ : a) Representação dos limites identificados para as configurações de junta consideradas; b) Limitação do gráfico final em diferentes zonas de aplicabilidade consideradas. ....	32
Figura 3.15– Exemplo da modelação realizada para a chapa a deformar ( $t = 5$ mm; $L = 14.8$ mm; $i = 5$ mm).....	35
Figura 3.16– Esquema do aglomerado de ferramentas e materiais modelados. ....	36
Figura 4.1 - Fotografias dos diferentes equipamentos utilizados no decorrer do procedimento experimental realizado: a) Eletroerosora por fio [49]; b) Prensa hidráulica; c) Máquina de ensaios universal [50]. ....	38
Figura 4.2 - Representação esquemática do conjunto da ferramenta utilizada nas operações de deformação plástica realizadas: a) Vista tridimensional; b) Nomenclatura optada para os componentes da ferramenta representados. ....	39
Figura 4.3– Localização gráfica dos ensaios realizados por via experimental. ....	41
Figura 4.4– Evolução tensão-extensão para os ensaios realizados no material a caracterizar[43].....	42
Figura 4.5 - Diagrama esquemático dos processos de corte utilizáveis no processo: a) Eletroerosão por fio [51]; b) Corte por jato de água [52] .....	42
Figura 4.6– Representação esquemática da perda de volume existente após o corte realizado na chapa por Eletroerosão por fio mediante a parametrização geométrica realizada.....	43
Figura 4.7 – Representação esquemática do processo de arrombamento por Lancing [53]: a) Componentes utilizados no processo; b) Chapa antes e após a operação mediante diversas configurações .....	43

Figura 4.8 - Visualização da estrutura completa da ferramenta para o realizar da operação de quinagem proposta: a) Fotografia tridimensional; b) Vista esquemática tridimensional cortada no centro.....	44
Figura 4.9– Modelos de deformação considerados para a fase de quinagem: a) Modelo teórico; b) Modelo realista; c) Modelo de comprimento quinado máximo.....	45
Figura 4.10– Representação esquemática da estrutura completa da ferramenta para o realizar da primeira operação de forjamento proposta: a) Vista esquemática tridimensional cortada no centro; b) Parametrização do componente Punção-Base consoante os parâmetros geométricos estabelecidos (unidades em milímetros).....	48
Figura 4.11 -Representação esquemática da estrutura completa da ferramenta para o realizar da segunda operação de forjamento proposta: a) Vista tridimensional cortada; b) Vista de topo com a exclusão dos componentes Encostador, Calços Guiadores e Punção. ....	50
Figura 4.12 - Representação do ensaio destrutivo a realizar: a) Representação esquemática (Vista de corte centrado e de topo); b) Fotografia retirada à configuração inicial do ensaio destrutivo realizado .....	51
Figura 5.1 - Resultados experimentais obtidos mediante diferentes ensaios: a) Ensaio 1; b) Ensaio 2; c) Ensaio 3; d) Comprovação do preenchimento parcial da região de interlocking mecânico .....	52
Figura 5.2– Comprovação por via numérica da inalteração dos limites desvendados anteriormente para as configurações de junta realizadas experimentalmente: a) Representação gráfica; b) Descrição pormenorizada dos parâmetros geométricos considerados para as simulações numéricas realizadas. ....	53
Figura 5.3 - Resultados numéricos obtidos relativamente à sobreposição de material: a) $t = 2,5$ mm: a.I) Sim 1.1 – $K = 0$ ; a.II) Sim 1.2 – $K = 0,14$ ; a.III) Sim 1.3 – $K = 0,7$ ; b) $t = 3.75$ mm: b.I) Sim 2.1 – $K = 0$ ; b.II) Sim 2.2 – $K = 0,13$ ; b.III) Sim 2.3 – $K = 0,53$ .....	54
Figura 5.4 - Comprovação gráfica da inserção do limite para a junta com $H = 5$ mm (Ensaio experimental 2) no segmento de reta <b>a</b> e do limite para a junta com $H = 7.5$ mm (Ensaio experimental 3) no segmento de reta <b>c</b> . ....	55
Figura 5.5– Gráfico de aplicabilidade final do processo proposto com introdução dos pontos respetivos aos ensaios experimentalmente realizados.....	56
Figura 5.6 – Fotografias retiradas a resultados experimentais provenientes da fase de quinagem: a) Quinagem realizada sem a inclusão do parâmetro $i$ (fenda de proporções catastróficas visível); b) Quinagem realizada com inclusão do parâmetro $i$ (sem qualquer fenda visível); c) Deformação do material quinado no sentido da largura; d) Recuperação elástica da aba após a sua quinagem; .....	58
Figura 5.7– Comprovação experimental para a fase de quinagem com folga $c$ diferente mas de espessura idêntica (Ensaio 2 e chapa 2 do Ensaio 3). ....	58
Figura 5.8– Evolução experimental e numérica obtida para a carga exercida em função do deslocamento do punção para a fase de quinagem consoante dois ensaios realizados (Ensaio 1 e 2). ....	59
Figura 5.9– Correlação da evolução de força exercida em função do deslocamento do punção com a malha deformada a nível numérico na fase de quinagem (Ensaio 1).....	60

Figura 5.10– Exemplo da modelação efetuada para a primeira fase de forjamento (Ensaio 1).....	61
Figura 5.11 - Evolução experimental e numérica obtida para a carga exercida em função do deslocamento do punção para a primeira fase de forjamento (Ensaio 1). .....	61
Figura 5.12 - Evolução experimental e numérica obtida para a carga exercida em função do deslocamento do punção para a primeira fase de forjamento (Ensaio 2). .....	62
Figura 5.13 - Evolução experimental e numérica obtida para a carga exercida em função do deslocamento do punção para a primeira fase de forjamento (Ensaio 3). .....	62
Figura 5.14 - Correlação da evolução de força exercida em função do deslocamento do punção com a malha deformada a nível numérico na primeira fase de forjamento (Ensaio 1). .....	63
Figura 5.15 - Esquema detalhado da malha deformada em determinados instantes da Fase III (Ensaio 1).....	64
Figura 5.16 - Exemplo da modelação efetuada para a segunda fase de forjamento (Ensaio 1).....	65
Figura 5.17 - Evolução experimental e numérica obtida para a carga exercida em função do deslocamento do punção para a segunda fase de forjamento (Ensaio 1).....	65
Figura 5.18 - Evolução experimental e numérica obtida para a carga exercida em função do deslocamento do punção para a segunda fase de forjamento (Ensaio 2).....	65
Figura 5.19 - Evolução experimental e numérica obtida para a carga exercida em função do deslocamento do punção para a segunda fase de forjamento (Ensaio 3).....	66
Figura 5.20 - Correlação da evolução de força exercida em função do deslocamento do punção com a malha deformada a nível numérico na segunda fase de forjamento (Ensaio 1).....	67
Figura 5.21 – Visualização detalhada do interlocking mecânico obtido pelo processo proposto para o Ensaio 1: a) Resultado numérico considerando perdas de volume; b) Resultado numérico desprezando perdas de volume; c) Fotografia do resultado experimental obtido. ....	67
Figura 5.22 - Evolução experimental para a carga exercida em função do deslocamento dos grampos para o ensaio destrutivo realizado (Ensaio 1). .....	68

# Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Testes de fricção utilizados para DPCM [12].	6
Tabela 2.2 - Principais vantagens e limitações da tecnologia de adesivos.	8
Tabela 2.3 - Principais vantagens e limitações da RSW.	10
Tabela 2.4 - Principais vantagens e limitações da FSSW.	12
Tabela 2.5 - Principais vantagens e limitações do SPR.	14
Tabela 2.6 - Principais vantagens e limitações do <i>clinching</i> .	15
Tabela 2.7 - Principais vantagens e limitações do hemming.	17
Tabela 2.8– Comparação entre os diferentes processos de ligação discutidos mediante determinados parâmetros (adaptado de [42]).	18
Tabela 3.1– Valores máximos obtidos para a folga $c$ mediante fatores $K$ e $m$ para as espessuras de chapa consideradas.	31
Tabela 3.2– Nº de Elementos Finitos modelados consoante os parâmetros geométricos considerados.	35
Tabela 3.3–Descrição da função de cada ferramenta consoante a etapa do processo a simular.	36
Tabela 4.1 – Plano de ensaios experimentais realizado.	40
Tabela 4.2 – Dimensões do punção para cada ensaio experimental - Fase de Quinagem.	46
Tabela 4.3 – Dimensões dos calços Guiadores para cada ensaio experimental – Fase de Quinagem.	47
Tabela 4.4 - Dimensões do punção para cada ensaio experimental – Primeira Fase de forjamento.	48
Tabela 4.5 - Dimensões dos Calços Guiadores para cada ensaio experimental – Primeira Fase de forjamento.	49
Tabela 4.6 - Dimensões do punção para cada ensaio experimental – Segunda Fase de forjamento.	50
Tabela 4.7 - Dimensões dos Calços Guiadores para cada ensaio experimental – Segunda Fase de forjamento.	50



# Nomenclatura

## Símbolos

### Gregos

$\Delta$	Varição geométrica
$\varepsilon$	Extensão verdadeira
$\sigma$	Tensão verdadeira

### Romanos

A	Altura
d	Deslocamento
F	Força exercida
H	Espessura total da junta
h	Comprimento teórico da aba quinada
$h^f$	Comprimento livre da aba quinada
$h_{\max}$	Comprimento máximo da aba quinada
$h_r$	Comprimento real da aba quinada
i	Folga
L	Comprimento da ligação
$L_c$	Comprimento dos Calços-Guiadores
$L_p$	Comprimento do Punção
m	Fator de atrito ( <i>Prandtl</i> )
R	Raio do Punção para a fase de quinagem
$r_{\text{fio}}$	Raio do fio erosor
t	Espessura das chapas
W	Largura
x	Comprimento horizontal aproximado de sobreposição de material

## **Acrónimos**

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
DPCM	Deformação Plástica de Chapa na Massa
EF	Elementos Finitos
FEM	<i>Finite Element Method</i>
FSSW	<i>Friction Stir Spot Welding</i>
FSW	<i>Friction Stir Welding</i>
IST	Instituto Superior Técnico
NOF	Núcleo de Oficinas
RSW	<i>Resistance Spot Welding</i>
SPR	<i>Self-Pierce Riveting</i>



# 1 Introdução

---

## 1.1 Enquadramento

No presente, a investigação relativa a otimizar ou inovar tecnologias de fabrico é uma enorme fonte de interesse, uma vez que pode oferecer diversas vantagens a qualquer indústria. O uso de tecnologias mais eficientes permite reduzir desperdícios que podem surgir em diferentes formas, desde a nível de desperdícios de materiais até de tempo produtivo. Por exemplo, a necessidade de produzir componentes geometricamente complexos, embora possa aumentar o desempenho de determinado conjunto, constitui um acréscimo em tempo produtivo indesejado (relacionado com o número de distintos métodos de fabricos utilizados), ao qual se junta um acréscimo em custos produtivos.

A tecnologia de DPCM pretende responder a tais limitações. Esta é resumidamente referida como o conjunto de processos de deformação plástica em chapa, dos quais resultam escoamentos tridimensionais de material, combinando assim características de deformação de chapa com deformação em massa convencional [1]. A sua inovação consiste na possibilidade de deformar zonas locais da chapa fora do seu plano, permitindo obter geometrias mais complexas, por exemplo, o aumento local de espessura das chapas de forma a atribuir melhores propriedades mecânicas a secções críticas da mesma, ou até uma diminuição local da espessura, com o objetivo de otimizar o desempenho do componente, reduzindo o seu peso final [2].

No entanto, os métodos de fabrico de DPCM podem apresentar uma gama de aplicabilidade ainda mais elevada quando inseridos dentro da família dos processos de ligação. As ligações de chapas é algo muito recorrente na indústria atual e são diversas as tecnologias que as permitem efetuar com produtividade elevada, como é o caso da soldadura, desde soldadura por fusão até soldadura no estado sólido. Para uma ligação de chapas sobrepostas, o uso da soldadura por pontos é ainda hoje bastante recorrente, uma vez que se trata de um processo totalmente automatizado com cadências elevadas [3], sendo por isso a tecnologia mais utilizada da união de chapas sobrepostas na atualidade [4], detetando também o uso de soldadura por fricção linear sobretudo em ligações de chapas constituídas por ligas metálicas mais leves que as ligas de aço convencionalmente utilizadas. A união por componentes mecânicos, como os parafusos e rebites, e por adesivos estruturais também apresentam uma elevada aplicabilidade e permitem de certa forma responder a alguns dos defeitos oriundos da soldadura por pontos, como por exemplo a dificuldade em unir chapas de materiais dissimilares. Estas apresentam também as suas desvantagens características, nomeadamente no que diz respeito à criação de zonas de concentração de tensões desfavoráveis à resistência da ligação (parafusos e rebites) e na complexidade de pré-preparação das superfícies dos materiais a unir (adesivos).

De modo a evitar tais defeitos, surge uma nova tendência denominada por *joining by forming*, dentro da qual se englobam processos de ligação de materiais a partir da deformação plástica de um ou

mais componentes que formam a junta. Dentro da tendência destacada, é possível detetar a utilização atual em diversas indústrias de alguns processos constituintes da mesma [5], no entanto, quando restringida a aplicabilidade de tais processos apenas a ligações entre chapas, destacam-se o *clinch*, *self Pierce riveting* e *hemming*, todos eles aplicáveis à união de chapas sobrepostas.

## 1.2 Objetivos

O projeto proposto na dissertação encontra-se associado, tanto à recente tendência de *joining by forming* como ao conjunto de processos de DPCM, especificando-se na gama de ligações de chapas sobrepostas. Pretende-se como objetivo principal a realização de uma ligação puramente mecânica entre duas chapas. Para tal, é realizado um desenvolvimento teórico com o objetivo secundário de modelar todo o processo geometricamente e compreender as condições em que este pode ser corretamente utilizado. Para demonstrar o seu funcionamento, é apresentado um procedimento experimental desenvolvido exclusivamente para a ligação proposta, no qual se encontra inserido um outro objetivo secundário referente ao projeto de uma ferramenta própria para realizar o procedimento experimental elaborado na totalidade do processo, e recorrido ainda a um procedimento numérico de modo a fundamentar os resultados experimentais obtidos. No final da dissertação, pretende-se ainda a realização de um ensaio destrutivo numa ligação obtida pelo processo proposto, retirando as respetivas conclusões relativamente ao seu desempenho resistivo.

## 1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação realizada encontra-se organizada em sete capítulos, sendo a presente introdução o primeiro capítulo apresentado. O **Capítulo 2** diz respeito ao Estado da Arte realizado, onde é exposta toda a investigação previamente realizada referente essencialmente a conceitos gerais característicos da tecnologia de DPCM, processos de ligação concorrentes ao processo proposto na dissertação e contextualização histórica relativamente ao aparecimento do processo proposto. O **Capítulo 3** tem em consideração o desenvolvimento teórico efetuado de modo a sustentar o processo proposto, onde este é detalhado a nível geométrico e de aplicabilidade, bem como o desenvolvimento numérico realizado com o objetivo de fundamentar os resultados do processo. No **Capítulo 4**, é apresentado todo o desenvolvimento experimental realizado no decorrer da dissertação, descrevendo os equipamentos, ferramentas, material e procedimentos experimentais concretizados. No **Capítulo 5** são documentados os resultados obtidos através dos desenvolvimentos anteriormente descritos, bem como uma sucinta discussão dos mesmos. Por fim, resta o **Capítulo 6**, onde se encontram retiradas as respetivas conclusões do trabalho efetuado, bem como uma breve ponderação de perspetivas a realizar no futuro visando melhorias na aplicabilidade do processo proposto.

## 2 Estado da Arte

---

Uma vez que o processo proposto se encontra relacionado tanto com a tecnologia de DPCM como com processos de ligação em chapas sobrepostas, é essencial compreender o progresso atual envolvente ambos os aspetos.

Este capítulo encontra-se dividido em três subcapítulos principais. No **primeiro subcapítulo** são apresentados alguns conceitos associados à tecnologia de DPCM de modo a desvendar as melhorias que esta pode atingir quando comparada com os métodos de deformação plástica convencionalmente utilizados e também entender as dificuldades a nível de processo que tendencialmente ocorrem neste tipo de tecnologia. No **segundo subcapítulo**, a abordagem tomada recai sobre os processos de ligação utilizados atualmente no propósito de obter uma ligação semelhante à que é pretendida. Após devidamente descritas e esmiuçadas a nível das vantagens e limitações de cada processo, é realizada uma comparação geral de todos estes mediante determinados parâmetros relevantes. Por fim, no **terceiro subcapítulo** é apresentada uma contextualização histórica relativamente ao surgimento dos conceitos-base procedentes ao método de ligação de chapas proposto na dissertação.

### 2.1 Deformação plástica de chapa na massa

Tal como foi referido no Capítulo 1, a tecnologia de DPCM tem como conceito principal a correta adaptação de processos conhecidos e já bastante investigados de deformação plástica em massa em componentes de espessura reduzida, ou seja, onde normalmente se verificava um estado de tensão plana no componente, este passa a estar atuado sob um estado de tensão tridimensional, o que permite modelar o mesmo para formatos mais complexos num número reduzido de operações, melhorando simultaneamente o desempenho do componente e os custos associados ao fabrico do mesmo. De modo a reorganizar os diferentes processos existentes de deformação plástica, foi elaborado o seguinte esquema organizador baseado nas seguintes características[6]:

- i. O propósito da operação (deformar, separar, unir, entre outros) juntamente com o formato inicial e final pretendido do produto;
- ii. Influência da velocidade e temperatura impostos no processo;
- iii. Estado de Deformação
- iv. Estado de Tensão
- v. Sequência de deformações ocorridas no produto no decorrer do processo;
- vi. Caracterização das ferramentas e máquina utilizadas.

No entanto, o seguinte modo de organização é ligeiramente mais simples, estando baseado em apenas duas características (Figura 2.1), sendo assim mais facilmente aplicável a processos característicos de DPCM [1]:

- i. Alterações na espessura da peça
  - a. Redução de espessura
  - b. Aumento de espessura
  - c. Aplicável tanto para aumento como redução de espessura
- ii. Modo de atuação da ferramenta
  - a. Linear
  - b. Rotativa

Process	Linear tool motion				Rotational tool motion			
	Upsetting	Ironing	Forging	Coining	Flow forming	Orbital forming	Boss forming	
Change in thickness	↑↓	↓	↑↓	↑↓	↓	↑↓	↑↓	
Combination with sheet	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	
Forming force	High	Medium	High	High	Low	Medium	Medium	

Figura 2.1—Organização proposta para processos de DPCM[7].

Na Figura 2.1, observam-se alguns dos processos passíveis de utilização coerentes com o propósito de DPCM, devidamente identificados pelos parâmetros apresentados, incluindo a introdução de uma outra componente, a carga exercida. Em operações onde ocorre um contacto elevado entre a peça e o conjunto de ferramentas, as cargas a exercer serão consequentemente elevadas, como pode ser verificável em operações de cunhagem ou forjamento. Os processos incrementais como o flou-forjamento ou forjamento orbital podem responder a esta limitação, uma vez que se torna possível realizar uma operação semelhante com uma drástica redução na área de contacto entre peça e ferramentas, uma vez que as ultimas atuam apenas parcialmente na peça. As cargas exercidas numa operação de forjamento orbital representam cerca de 10 a 20% das cargas exercidas numa operação de *upsetting* com um produto final idêntico [1]. No entanto, o forjamento orbital trata-se de um processo algo complexo a nível de controlo e o facto de atuar parcialmente na peça leva a que o tempo operativo aumente bastante relativamente ao *upsetting*, o que eleva gastos energéticos.

### 2.1.1 Forjamento de chapa

Dentro do aglomerado de processos constituintes da DPCM, o forjamento de chapa é aquele com maior destaque na atualidade, uma vez que permite o fabrico acessível de componentes complexos num número reduzido de etapas, existindo atualmente resultados bastante promissores no que toca a substituir processos como a estampagem convencional ou evitar a necessidade de operações de maquinagem [1]. Uma notória vantagem do forjamento de chapa relativamente à estampagem é a obtenção de peças com uma distribuição de espessura mais facilmente controlável, retirando excessos de espessura indesejados e reduzindo o seu peso final [8]. Inversamente, o forjamento de

chapa também permite alcançar espessuras ligeiramente mais elevadas em zonas da peça em que tal se justifique (zonas críticas), estando puramente dependente do formato das ferramentas envolvidas. Exemplificando, o processo de fabrico de uma taça de formato ligeiramente complexo pode ser efetuado através de dois processos, forjamento de chapa e forjamento em massa, Figura 2.2. É visível que, para o mesmo componente final, o forjamento de chapa assume um processo contínuo mais simples, isto é, com um número total de etapas mais reduzido.

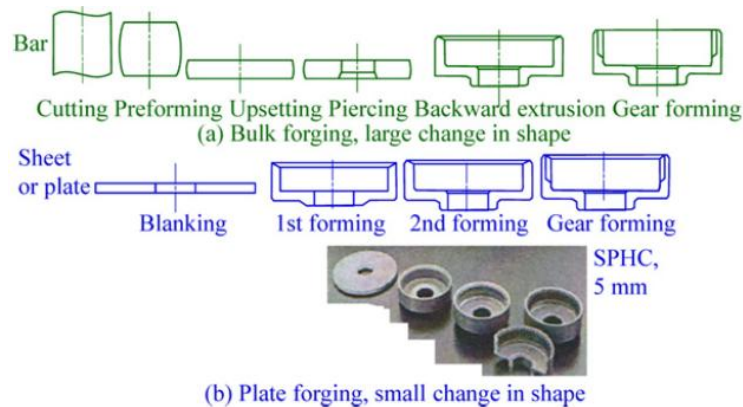


Figura 2.2 - Comparação entre etapas no forjamento em massa e forjamento de chapa para o mesmo componente final [9].

### 2.1.2 Limitações nos processos de DPCM

A existência de cargas muito elevadas no processo pode apresentar alguns problemas, tanto a nível de ferramentas como a nível da máquina-ferramenta utilizada. Com elevadas pressões de contacto, o tempo de vida de ferramentas é previsivelmente reduzido, daí a necessidade de estabelecer o melhor conjunto de operações a realizar, tentando obter um equilíbrio entre tempo produtivo (o mais reduzido possível) e um número de operações ideal para que o material seja enformado de forma controlável e previsível. Ainda assim, no que toca a produzir componentes geometricamente complexos com um elevado número de detalhes físicos bastante reduzidos relativamente às dimensões gerais dos mesmos, é comum verificar a existência de zonas de material sujeitas a elevadas extensões plásticas e também uma interface entre zonas sujeitas a estados de tensão e extensão que variam entre bi ou tridimensionais, Figura 2.3. A isto se deve o facto de existir uma combinação entre deformação plástica de massa como de chapa que pode causar uma enorme disparidade de tensões, podendo certas tensões locais sobreporem-se em cerca de uma a 2 unidades de grandeza das tensões normais de contacto impostas [10]. Com tensões locais tão elevadas, o fluxo do material pretendido terá tendência a divergir de tais zonas onde apresenta enorme dificuldade a escoar, comprometendo a rigorosa geometria do componente a fabricar. É então perceptível que um rigoroso controlo do fluxo do material no decorrer do processo é essencial para que este ocorra sem falhas.

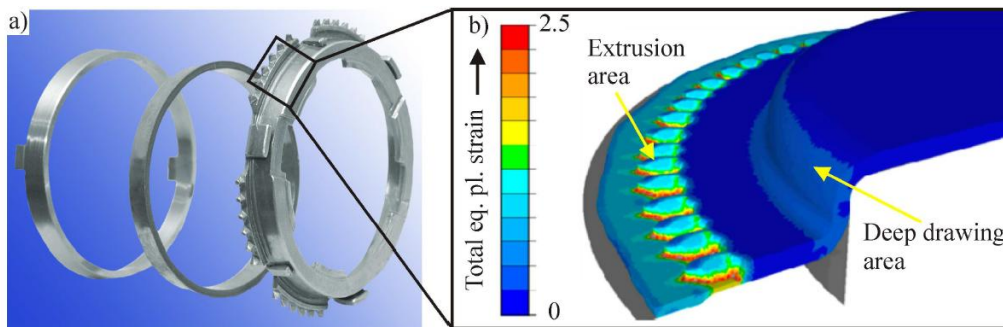


Figura 2.3 - a) Anel sincronizador produzido por DPCM; b) Análise FEM com evidência nas extensões plásticas existentes nos detalhes geométricos do mesmo anel [11].

### 2.1.3 Condições tribológicas

As condições tribológicas são de extrema relevância na generalidade dos processos de enformação plástica, sejam eles em massa ou chapa. Em processos de DPCM onde as tensões locais podem variar de forma drástica tendo em conta diferentes zonas do material, as condições tribológicas podem apresentar uma solução no sentido de estabilizar a realização do processo e permite assim obter uma uniformidade na qualidade da peça a produzir [10]. Para tal, encontram-se validados alguns testes destinados a compreender as condições de fricção a que o processo se encontra exercido. Alguns testes tipicamente utilizados para o mesmo objetivo, como é o caso do ensaio em anel ou o *ensaio por dupla taça*, realizados em provetes cilíndricos, apenas se tornam coerentes para deformação plástica em massa, uma vez que para DPCM o provete apresentaria um diâmetro bastante superior à sua espessura, dificultando a realização dos ensaios. Em [12] são propostos 3 diferentes testes aplicáveis consoante a magnitude relativa das cargas impostas nos diferentes processos, Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Testes de fricção utilizados para DPCM [12].

Cargas impostas	Teste recomendado	Representação esquemática
Reduzidas	<i>Strip Drawing</i>	
Moderadas	Micro-Ensaio por dupla taça	
Elevadas	<i>Pin extrusion</i>	

De modo a modelar o atrito existente, é normalmente utilizada a lei de Coulomb para tensões normais reduzidas, enquanto que para tensões superiores, é atribuída uma lei de atrito constante[1], o que ocorre geralmente em processos de DPCM. O estudo da evolução da fricção existente é algo ainda decorrente, essencialmente no estudo das suas condições na fase de transição entre a fase onde é

aplicável a Lei de Coulomb e a que é aplicável a lei de atrito constante, existindo modelos de fricção existentes para tal fase [13] que ainda carecem de validação para processos de DPCM.

Existem ainda estudos recentes com o objetivo de desvendar a influência do formato e composição de ferramentas juntamente com a adição de determinados lubrificantes. O objetivo principal baseia-se no controlo da fricção de forma local de modo a melhorar o escoamento do material em zonas críticas e consequentemente, reduzir as cargas exercidas pela ferramenta de modo a exponenciar o seu tempo de vida, o que pode revelar uma elevada importância se for pretendido elaborar uma cadeia produtiva. A investigação com o propósito de entender a interação entre lubrificantes e ferramentas revestidas e previamente maquinadas por micro-fresagem (de modo a atribuir uma rugosidade muito reduzida à mesma e um revestimento mais eficaz) aparenta ser bastante promissora num futuro próximo, chegando-se à conclusão que o seu revestimento proporcionava interações químicas com o lubrificante utilizado, diminuindo a fricção existente entre a peça e a ferramenta [14].

## 2.2 Processos de Ligação para chapas sobrepostas

O espectro atual de processos de ligação existente é muito extenso, existindo atualmente uma enorme variedade de ligações possíveis que respondem aos requisitos específicos de cada junta, como material, configuração, resistência mecânica, entre muitos outros. Antigamente, os processos de ligação podiam ser ramificados em três distintas categorias, sendo elas a soldadura, as ligações com componentes mecânicos (parafusos, rebites) e a tecnologia de adesivos. No entanto, as tecnologias de *joining by forming* assumem atualmente uma importante componente que merece algum destaque, uma vez que permite responder a algumas das limitações das categorias anteriores [15], podendo ser tratada como uma nova categoria referente aos processos de ligação. Para o corrente trabalho, apenas se pretende destacar processos capazes de produzir uma ligação de chapas sobrepostas e cuja sua aplicabilidade tenha atingido um estado de investigação algo avançado. De seguida, encontram-se abordados seis processos usufruídos no presente para tal, Figura 2.4, com uma comparação geral entre estes mediante determinados aspetos relevantes para a sua utilização.

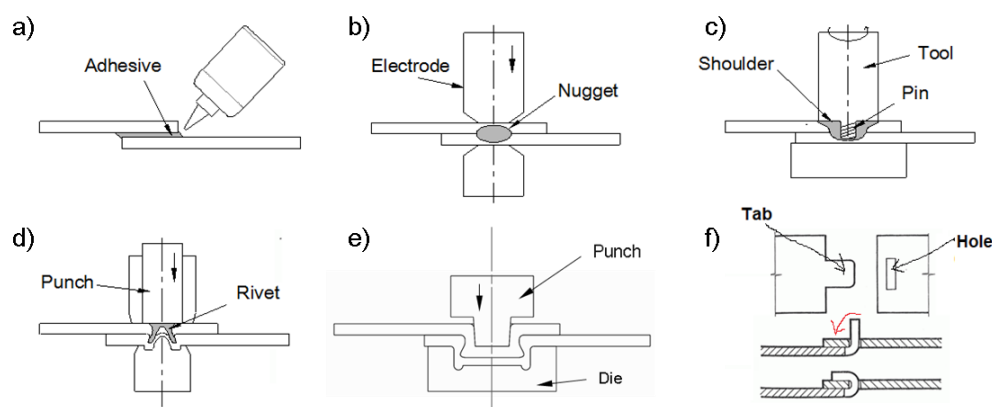


Figura 2.4– Processos atualmente utilizados na obtenção de juntas entre chapas sobrepostas: a) Tecnologia de adesivos; b) Soldadura por pontos (RSW); c) Soldadura por fricção linear por pontos (FSSW); d) Self-pierce Riveting (SPR); e) Clinching; f) Hemming.

### 2.2.1 Tecnologia de adesivos

A utilização de adesivos, embora identificável na antiguidade, foi exponenciada a meio do século XX com o objetivo de substituir componentes de ligação mecânicos (parafusos e rebites nomeadamente) através do cumprimento de três metas, sendo estas a redução de partículas emissoras tóxicas e poluentes, uma maior facilidade na reciclagem e reparação de ligações e o aumento do seu desempenho ao reduzir desperdícios como peso e custos de fabrico de um determinado componente [16]. Um adesivo consiste num material polimérico que, ao lhe serem aplicadas determinadas condições a nível de pressão, tempo e temperatura, é responsável pela união de componentes adjacentes à sua superfície de contacto, denominada por adesão.

Uma junta adesiva apresenta convencionalmente um comportamento a esforços de corte e compressão satisfatório, sendo os esforços de clivagem o tipo de carregamento mais crítico neste tipo de juntas. No entanto, um bom dimensionamento da junta pode reforçar a sua resistência mediante determinadas cargas, garantido uma área de contacto elevada entre o adesivo e os aderentes e projetar a ligação consoante as cargas de serviço espectáveis, Figura 2.5.



Figura 2.5– Otimização na configuração de juntas adesivas [17].

O uso de adesivos na indústria automóvel e aeronáutica é também motivo de um recorrente estudo, principalmente no que toca a união de chapas sobrepostas. Numa primeira fase, o uso de adesivos em componentes estruturais com tempos de vida a longo prazo era algo desconsiderado, essencialmente devido ao seu desgaste temporal elevado a que o adesivo estará sujeito e ainda a requisitos a nível mecânico e condições ambientais que uma junta adesiva não conseguia cumprir com segurança. No entanto, com o desenvolvimento essencialmente de polímeros termoendurecíveis, a resistência do adesivo a temperaturas e tempos de serviço elevados tem sido melhorada, bem como a sua correta reciclagem, de modo a cumprir requisitos ambientais impostas às mais diversas indústrias [18]. Uma visão geral das suas vantagens e limitações características pode ser consultada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Principais vantagens e limitações da tecnologia de adesivos.

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none"><li>• Não afeta a microestrutura dos materiais</li><li>• Ausência de distorção</li><li>• Acessível na ligação de componentes com materiais ou espessuras dissimilares</li><li>• Boa resistência a fenómenos de fadiga, incluindo bom amortecimento</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Difícil garantir a sua fiabilidade a longo prazo, uma vez que o adesivo deteriora com o passar do tempo</li><li>• Necessidade da aplicação de pré-tratamentos das superfícies dos materiais a ligar</li><li>• Tempo de cura pode ser muito elevado e necessitar de elevadas</li></ul>



<p>a vibrações</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pode ser aplicado juntamente com outros métodos de união mecânicos</li> <li>• Distribui as cargas de serviço uniformemente ao longo da sua superfície de contacto</li> </ul>	<p>temperaturas e pressões, o que compromete a cadência do processo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Para adesivos mais resistentes, as juntas acabam por apresentar uma desmontagem complicada</li> </ul>
--	--

### 2.2.2 Soldadura por pontos (RSW)

O método de soldadura por pontos é um processo bastante utilizado atualmente na união de chapas metálicas. O seu uso encontra-se atualmente implementado e bastante otimizado em diversas indústrias (automóvel, doméstica, aeroespacial, entre outras). O processo é realizado através da geração de calor a partir de uma corrente elétrica oriunda de eletrodos que junta as peças entre estes. As superfícies de contacto na região de concentração de corrente são aquecidas por Efeito de *Joule* num pequeno pulso de baixa voltagem e elevada intensidade de corrente assim que as chapas se encontrem totalmente pressionadas pelos eletrodos. Após determinado intervalo de tempo, a corrente elétrica decresce subitamente, enquanto que a carga exercida pelos eletrodos decresce gradualmente, auxiliando o arrefecimento e solidificação do material soldado. Após solidificada a junta, os eletrodos são afastados, concluindo a ligação, Figura 2.6 [19].

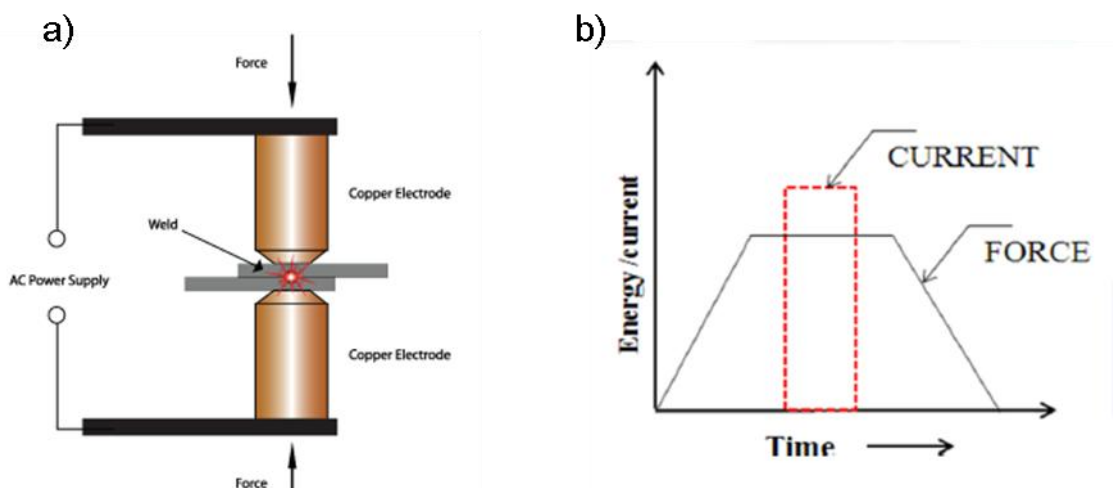


Figura 2.6– a) Representação esquemática simplificada de uma operação RSW [20]; b) Ciclo de intensidade de corrente e força típico no decorrer de uma ligação obtida por RSW [21].

Uma vez que se trata de um processo muito bem compreendido e de otimização elevada, a soldadura por pontos moderna passa por aglomerar outros processos que permitam melhorar o processo de ligação. Um exemplo consiste na tentativa de complementar a soldadura por pontos com a junta adesiva. A sua aplicação pode facilitar o procedimento de soldadura, uma vez que pode proteger os materiais a ligar de temperaturas e correntes demasiado elevadas, e inversamente, pode facilitar a união de dois metais que apresentem baixas condutividade elétrica e térmicas, podendo até melhorar o comportamento da junta quando sujeita a elevadas vibrações e esforços por fadiga[19]. As suas vantagens e limitações essenciais encontram-se expostas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Principais vantagens e limitações da RSW.

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixo custo unitário</li> <li>• Garante a ausência de distorção ou empenos nas peças, embora possa deixar algumas depressões</li> <li>• Junta bastante uniforme</li> <li>• Funciona de forma automática e semi-automática</li> <li>• Pode ser efetuada de forma muito rápida e acessível</li> <li>• Método eficiente a nível energético e bastante compreendido atualmente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Embora apresente um custo unitário baixo, o investimento inicial é ainda assim considerável</li> <li>• Necessário alguma qualificação dos operários para manutenção e controlo das máquinas</li> <li>• Necessária uma preparação superficial rigorosa</li> <li>• Pouco aplicável a peças espessas</li> <li>• Processo apenas aplicável a materiais condutores (maioria dos metais) e também pouco aplicável a metais com condutividades dispares</li> <li>• Necessita de inspeção rigorosa das juntas obtidas</li> </ul>

### 2.2.3 Soldadura por fricção linear (FSW)

Tecnologia de ligação criada e desenvolvida recentemente (década de 90), a soldadura por fricção linear (FSW) permite a união de materiais em estado sólido. O processo em si é baseado na atuação de uma ferramenta rotativa não consumível através de um caminho pré-estabelecido sob os materiais a unir. Com a sua ação sobre os mesmos, ocorre geração de calor por fricção que favorece o amaciamento dos materiais constituintes da junta sem que estes atinjam os seus respetivos pontos de fusão. O material é então arrastado pela ferramenta, a qual forja este mesmo por ação do pino e encostador da mesma (este último constringe o fluxo de material), que será posteriormente extrudado na zona entre a ferramenta e o material indeformado [22], Figura 2.7. O tipo de juntas obtíveis por este processo é atualmente algo diversificado, Figura 2.7. No entanto, quando se pretende realizar uma ligação entre chapas sobrepostas, o método convencional de soldadura por fricção linear pode-se tornar desvantajoso face a uma das vertentes deste processo, denominada por soldadura por fricção linear por pontos (FSSW).

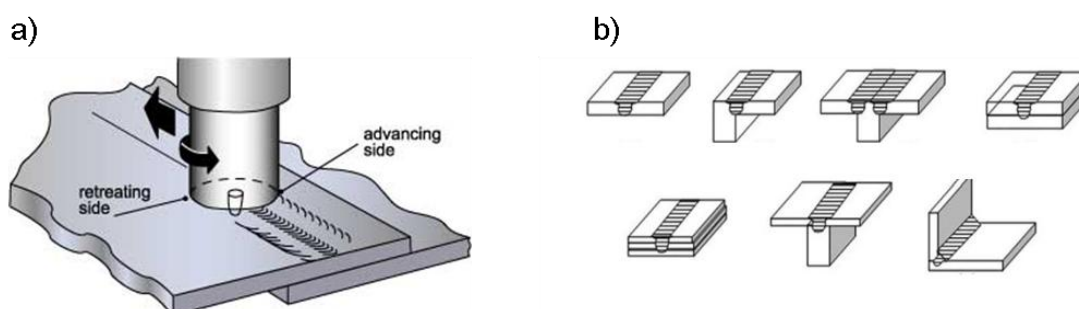


Figura 2.7 - a) Representação esquemática do escoamento do material resultante do avanço da ferramenta em FSW [23]; b) Configurações de junta convencionais numa operação de FSW [24].

Esta vertente surge com a ideia de tentar agrupar os princípios aplicados na soldura por fricção linear convencional, mas formando uma ligação mais pontual, como é visível em processos como a soldadura por pontos ou ligações por componentes mecânicos. Nos casos em que se pretende uma

ligação de chapas sobrepostas, este processo apresenta uma enorme melhoria, uma vez que permite aumentar em larga escala a produtividade do mesmo, realizando a junta apenas em determinados pontos onde tal é requerido, ao invés de realizar a junta ao longo de toda a largura das chapas, como seria o caso da soldadura por fricção linear convencional.

O processo em si pode ser resumido em 3 diferentes etapas. Este inicia-se com o movimento rotacional a elevada velocidade da ferramenta, constituída por um pino e um encostador (*shoulder*). A esta ferramenta, é exercido posteriormente um movimento longitudinal em direção aos materiais a unir, que apenas termina ao existir contacto entre o material-topo e o encostador, ocorrendo remoção de material pelas extremidades do encostador. Após terminado o movimento longitudinal da ferramenta, esta mantém a sua rotação, gerando calor por fricção que aquece e amacia o material nas suas redondezas. Quando atingida a união desejada, a ferramenta é retirada da peça, deixando um pequeno furo com um diâmetro semelhante ao do pino e uma altura semelhante à penetração do pino nos materiais, Figura 2.8.

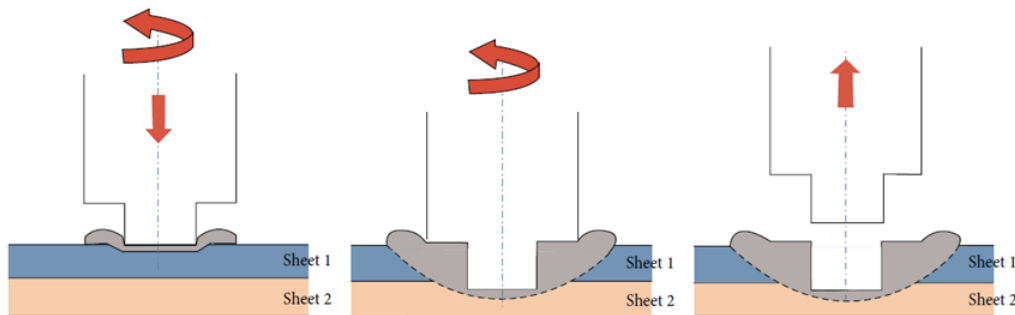


Figura 2.8– Modo de interação da ferramenta com os materiais a unir nas suas três diferentes fases no decorrer de uma operação de FSSW [25].

O processo tem sido convenientemente aplicado em juntas sobrepostas de chapas com espessuras entre 1 e 3 mm. Para espessuras mais elevadas, ainda decorre alguma investigação essencialmente a nível de projeto de ferramentas que permitam concretizar tais ligações em tempos de ciclo reduzidos. Apesar do seu objetivo primário ter sido destinado a unir chapas de alumínio, o processo é já aplicável a outras ligas metálicas, como ligas de magnésio e alguns aços. Para aços de elevada resistência já foi demonstrada tal possibilidade, mas ainda com perspetivas de melhoria, essencialmente na redução de cargas e temperaturas existentes no processo [26]. As vantagens e limitações existentes neste processo podem ser consultadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Principais vantagens e limitações da FSSW.

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Junta com boas propriedades mecânicas, incluindo uma resistência a cargas de fadiga muito elevada</li> <li>• Baixa ou até inexistente distorção dos materiais a unir, mesmo quando estes são longos</li> <li>• Ausência de fumos e radiações nocivos</li> <li>• Desgaste muito reduzido da ferramenta, tornando o processo economicamente eficiente</li> <li>• Não necessita de mão-de-obra especializada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessário restringir os materiais a unir de forma rigorosa</li> <li>• Estética da junta prejudicada devido à existência de um orifício contido na mesma</li> <li>• Dificuldade em obter percursos tridimensionais complexos (FSW)</li> <li>• Maioritariamente testado apenas para juntas de chapas sobrepostas (FSSW)</li> <li>• Algumas alterações estruturais e mecânicas não-desejadas</li> <li>• Dificuldade no projeto de ferramentas para soldar materiais muito resistentes</li> </ul>

Anteriormente, foi referida uma das limitações deste processo que consiste num pequeno furo deixado na junta proveniente da extração do pino no final do processo. Este orifício, embora de dimensões reduzidas, não só compromete esteticamente a junta como também pode originar uma zona propícia à propagação de fendas consoante determinados carregamentos na junta. De modo a tentar evitar este orifício, a aplicação de um material de adição é por norma utilizado. No entanto, novas vertentes do processo têm sido investigadas de modo a que este orifício seja evitado ao garantir conservação de volume no processo. O mais estudado até a data trata-se do chamado *refill-FSSW* [27]. Esta vertente permite, a partir do uso de uma ferramenta mais complexa e com um processo praticamente idêntico, conservar o material afetado pelo movimento rotativo do pino. Assim, é possível não só evitar o aparecimento do orifício, como também escoamentos de material para o exterior da junta, Figura 2.9.

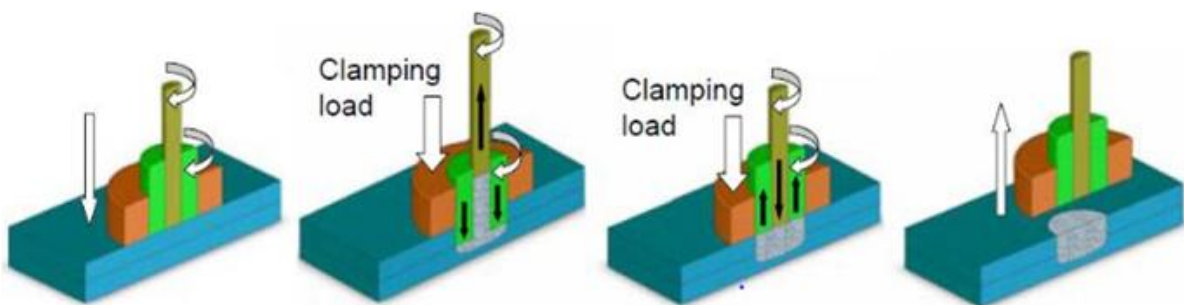


Figura 2.9– Representação das diferentes fases do processo *refill-FSSW* [24].

#### 2.2.4 Ligações com componentes mecânicos

As juntas obtidas com o auxílio de componentes mecânicos são hoje em dia bastante usuais, existindo uma enorme variedade de ligações com diferentes formatos e geometrias. O uso de componentes como parafusos e rebites (os mais usais) é hoje em dia vastamente conhecido, o que torna a sua utilização acessível e o projeto da junta bastante preciso, sendo possível prever o número

de componentes mecânicos necessários, a sua melhor localização e o seu tipo e formato para obter uma determinada ligação consoante as suas cargas de serviço [28].

Uma vez que este tipo de ligações se encontra bastante conhecido, foi proposta uma nova vertente que se encontra igualmente englobada na tendência de *joining by forming*. A essa vertente é dada o nome de *self-pierce riveting*. Este processo pode apresentar uma melhoria significativa relativamente à união tradicional através de componentes mecânicos, uma vez que não requer qualquer pré-furação, o que pode implicar uma melhoria significativa na produtividade de ligações.

#### 2.2.4.1 Self-pierce riveting (SPR)

É um processo de enformação à temperatura ambiente no qual é efetuada a ligação entre duas ou mais chapas através de um rebite semi-tubular. Este rebite insere-se na chapa superior e perfura (não na totalidade) a chapa inferior da junta, sendo guiado por uma matriz complementar à geometria do rebite [29]. De momento, as chapas a ligar não devem apresentar grandes espessuras (entre 0.5 a 3mm) com uma espessura total da junta a rondar os 6mm no máximo. No entanto, para matérias mais dúcteis, é possível atingir uma junta com 10mm de espessura [30]. O formato dos rebites é um fator do projeto da junta, apresentando o diâmetro, forma e material necessários para tal

O processo pode ser sucintamente descrito por quatro fases [31], Figura 2.10:

1. *Clamping* – O rebite é forçado através de um punção a atuar perpendicularmente na chapa superior, carregando as chapas a ligar contra a matriz inferior.
2. *Piercing* – O rebite começa a furar a chapa superior da junta e conseqüentemente a alterar o formato das chapas inferiores.
3. *Flaring* – O material da chapa inferior começa a fluir para a matriz, formando assim uma ligação entre os materiais.
4. *Releasing* – O punção termina a sua atuação e recua após atingir determinada força ou após alinhar a superfície superior do rebite com a superfície da chapa superior.

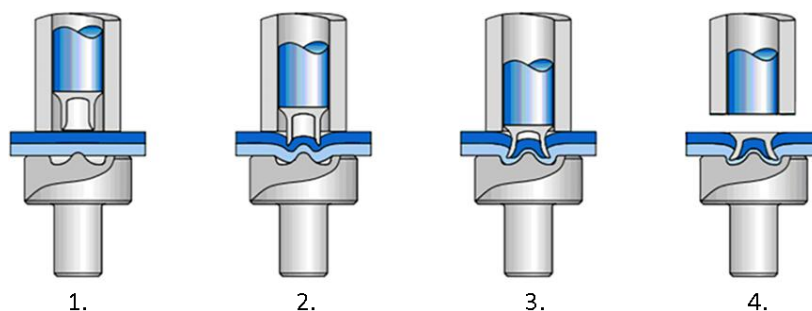


Figura 2.10– Representação das fases envolventes no processo SPR [32].

Tal como foi referido anteriormente, a vantagem deste processo ao não necessitar de pré-furação, induzindo a um elevado aumento da produtividade no fabrico de ligações mecânicas, é de elevado interesse para qualquer indústria. Assim, o uso de SPR sofreu um crescimento exponencial, estando comprovada a sua utilização maioritariamente na indústria automóvel numa variedade elevada de ligas metálicas, embora mais utilizada na ligação de chapas de alumínio, pois o seu comportamento

dúctil permite o realizar do processo de forma mais controlada e com um risco minimizado de falha [33]. As suas vantagens e limitações gerais encontram-se expostas na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Principais vantagens e limitações do SPR.

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> <li>• União de 2 ou mais materiais dissimilares sobrepostos</li> <li>• Não necessita de furação prévia</li> <li>• Processo rápido de fácil automação</li> <li>• Não prejudica o meio ambiente, logo não necessita de sistemas de extração de fumos tóxicos (vantagem relativamente à RSW)</li> <li>• Atinge juntas com elevada resistência a cargas estáticas e fadiga</li> <li>• Baixo custo unitário</li> <li>• Processo eficiente a nível energético e uso de material</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Montagem industrial complicada, uma vez que a ligação ocorre nas 2 faces periféricas da junta;</li> <li>• Não apropriado a materiais de baixa ductilidade</li> <li>• Pode não apresentar propriedades estéticas satisfatórias</li> <li>• Elevadas cargas no decorrer do processo de enformação</li> <li>• Inaplicável a materiais algo espessos</li> </ul>

### 2.2.5 Clinching

O processo de ligação de chapas por *clinching* apresenta um conceito geral muito semelhante ao anteriormente descrito, onde a diferença essencial consiste na ausência de qualquer componente mecânico inserido na junta para gerar e manter a ligação. As etapas do processo são praticamente equivalentes às apresentadas no processo de SPR, onde a diferença consiste na ação direta do punção sobre a chapa superior. Com a deformação plástica desta chapa e com a consequente deformação plástica da chapa inferior, esta última flui sobre uma matriz de formato especial que permite que, após totalmente preenchida pelo material da chapa inferior, seja formado um *interlocking* axissimétrico entre ambas as chapas, Figura 2.11.

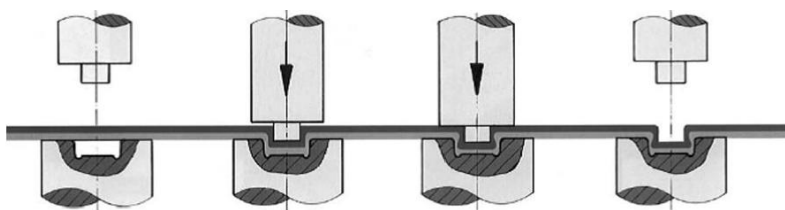


Figura 2.11 – Representação das fases envolvidas no processo clinching [34].

O processo, embora acessível de realizar, necessita de um controlo elevado no seu decorrer, uma vez que a fiabilidade da junta se encontra dependente do *interlocking* ocorrente, isto é, a zona local onde o material deformado plasticamente constituente da chapa superior se insere sobre a chapa inferior, sendo esta área de contacto responsável pelo realizar da junta, Figura 2.12. Por exemplo, se uma das chapas na zona de *interlocking* apresentar uma redução de espessura muito grande, a ligação pode estar propícia a falhar [35]. Uma vez que o escoamento do material é de extrema



importância neste processo, parâmetros como dimensões das ferramentas (punção e matriz) e a fricção existente entre as chapas e as ferramentas apresentam um elevado destaque no mesmo [36].

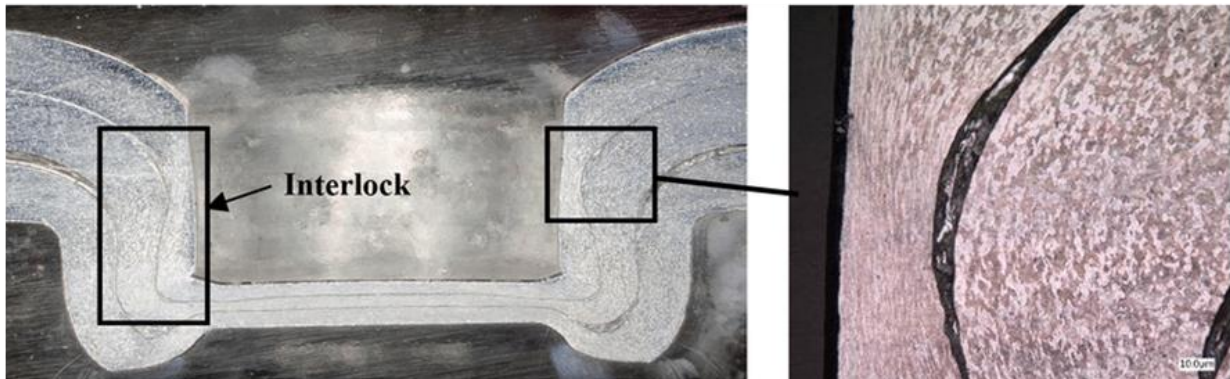


Figura 2.12– Exemplificação de um *interlocking* mecânico obtido por clinching [37].

Tal como o processo anterior, também o uso do *clinching* se encontra bastante associado à indústria automóvel, com a adição ainda de aplicações elétricas de uso doméstico [38]. As suas vantagens e limitações podem ser consultadas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Principais vantagens e limitações do *clinching*

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> <li>• União de 2 ou mais materiais dissimilares sobrepostos</li> <li>• Não necessita de furação prévia</li> <li>• Processo rápido de fácil automação</li> <li>• Não prejudica o meio ambiente, logo não necessita de sistemas de extração de fumos tóxicos (vantagem relativamente à RSW)</li> <li>• Atinge juntas com elevada resistência a cargas estáticas e fadiga</li> <li>• Baixo custo unitário</li> <li>• Processo eficiente a nível energético e uso de material</li> <li>• Não necessita de componentes mecânicos na junta para manter a ligação (relativamente a SPR)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Montagem industrial complicada, uma vez que a ligação ocorre nas 2 faces periféricas da junta;</li> <li>• Não apropriado a materiais de baixa ductilidade</li> <li>• Pode não apresentar propriedades estéticas satisfatórias</li> <li>• Elevadas cargas no decorrer do processo de enformação</li> <li>• Inaplicável a materiais algo espessos</li> <li>• Não atinge ligações tão resistentes a cargas estáticas e fadiga como o SPR</li> </ul>

### 2.2.6 Hemming

O processo de *hemming* é muitas vezes utilizado como uma das operações finais em ligação de componentes obtidos por estampagem. De forma objetiva, consiste num método de obtenção de ligações mecânicas através de vários tipos de quinagem dos componentes envolventes, sem o uso de materiais adicionais. De modo a obter uma ligação entre duas chapas sobrepostas, o processo de *hemming* pode ser descrito em três fases, Figura 2.13, em que a apenas uma das chapas é aplicada ação sob ferramentas, estando a outra chapa totalmente imobilizada. Essas três fases do processo são as seguintes [39]:

1. *Bending* – Consiste numa quinagem em flange com cunho de arraste sobre uma das chapas, resultando uma dobra a 90°.
2. *Pre-hemming* – Realizado após montada a segunda chapa, esta operação consiste numa continuação da quinagem da chapa anteriormente deformada, reduzindo o ângulo da sua dobra.
3. *Hemming* – Etapa final do processo, no qual a chapa é quinada na sua totalidade até ocorrer a ligação mecânica. Nesta etapa, a chapa imobilizada pode ser ligeiramente deformada por ação da chapa quinada, de modo a fortalecer a ligação mecânica entre ambas.

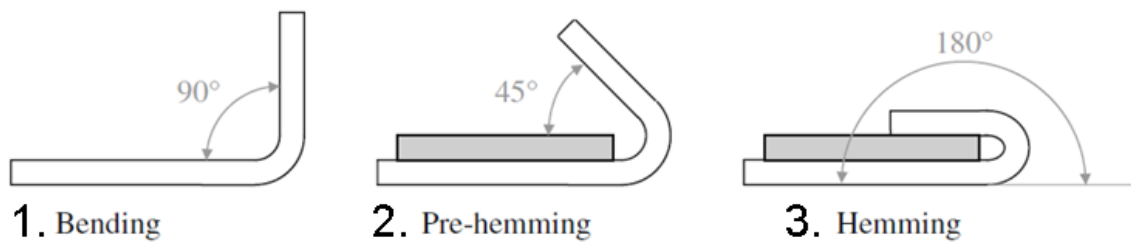


Figura 2.13– Representação esquemática das fases envolvidas na obtenção de uma junta simples através do processo hemming [40].

Apesar de parecer simples, este processo pode apresentar bastantes formas de falha, uma vez que as quinagens constituintes do mesmo são aplicadas a peças já previamente sujeitas a elevadas deformações, como é o caso de peças previamente estampadas. Também o material e o perfil de espessuras do componente são parâmetros fundamentais na obtenção de uma ligação mecânica sem falhas através deste processo [35], Figura 2.14.

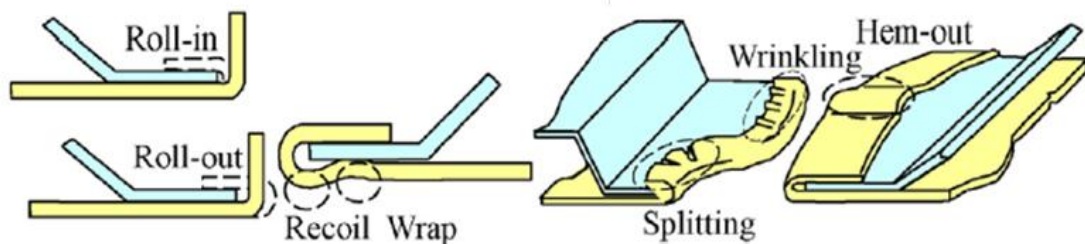


Figura 2.14– Representação esquemática de alguns dos defeitos ocorrentes no processo de *hemming* [35].

Uma vez que se trata de um processo onde a correta quinagem do material é essencial de modo a obter uma junta resistente e sem falhas, o auxílio da quinagem com determinadas componentes pode responder a algumas desvantagens deste processo. Por exemplo, o uso de um pré-aquecimento nas chapas pode atribuir maior ductilidade ao material e assim prevenir alguns dos defeitos representados na Figura 2.14, tal como foi testado em [41] em ligas de magnésio. Tal como as ligações mecânicas anteriormente descritas, também o *hemming* se encontra extensivamente aplicado na indústria automóvel e aplicações elétricas, começando também a surgir na indústria alimentar [35]. Na Tabela 2.7 estão apresentadas as suas vantagens e limitações.



Tabela 2.7 - Principais vantagens e limitações do hemming.

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> <li>• União de 2 ou mais materiais dissimilares sobrepostos</li> <li>• Embora seja realizada maioritariamente em peças semi-acabadas, não necessita de pré-operações para ser realizado</li> <li>• Processo puramente mecânico, logo não produz fumos ou componentes tóxicos</li> <li>• Baixo custo unitário</li> <li>• Não necessita de componentes mecânicos na junta para manter a ligação</li> <li>• Permite obter juntas geometricamente complexas com componentes igualmente complexos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diversas origens de defeitos, ainda não totalmente compreendidas</li> <li>• Não apropriado a materiais de baixa ductilidade</li> <li>• Aplicabilidade reduzida em chapas espessas</li> <li>• Processo pouco produtivo, uma vez que é composto por diversas operações com necessidade de ferramentas customizadas para cada</li> <li>• Pode induzir extensões plásticas algo elevadas que comprometem a fiabilidade da junta</li> <li>• Resistência mecânica da junta ainda não totalmente investigada quando relacionada com outros métodos concorrentes</li> </ul>

### 2.2.7 Visão Geral dos processos descritos

Após breve análise, é possível notar a tendência atual da indústria com o desenvolvimento de processos de ligação. Por exemplo, a dificuldade dos métodos de união mais antigos, como a soldadura por pontos, em unir materiais que atualmente começam a ser mais utilizados, como ligas metálicas mais leves (essencialmente de alumínio e magnésio), polímeros e materiais resistentes, apresenta um entrave na evolução dos processos de ligação. Também o uso de componentes mecânicos convencional nas ligações, como parafusos e rebites, perturba não só a produtividade na obtenção de ligações (devido à necessidade de pré-furação) como também aumenta consideravelmente o peso do componente, algo que as novas tendências na indústria pretendem evitar ao máximo.

No entanto, os processos referidos encontram-se atualmente tão bem explícitos e conhecidos que dificulta a mudança para outros processos nas mais diversas indústrias que, embora apresentem resultados promissores que permitem responder às desvantagens anteriormente relatadas, não se encontram ainda tão bem detalhados ao ponto de serem utilizados com a máxima segurança e fiabilidade possíveis e assim substituir totalmente processos de ligação já bastante investigados [36].

Na Tabela 2.8 pode ser vista uma comparação pré-eliminar entre os seis processos relatados anteriormente mediante determinados aspetos considerados influentes nas decisões entre quais dos processos optar para determinada junta entre chapas sobrepostas [42], comprovado pelas vantagens e limitações apresentadas nas Tabelas 2.2 – 2.7.

Tabela 2.8– Comparação entre os diferentes processos de ligação discutidos mediante determinados parâmetros (adaptado de [42]).

	Adesivos	RSW	FSSW	Clinching	SPR	Hemming
Produtividade	Reduzido	Elevado	Moderado	Elevado	Elevado	Moderado
Dependência da temperatura	Moderado	Elevado	Muito reduzido	Muito reduzido	Muito reduzido	Moderado
Cargas exercidas	Muito Reduzido	Reduzido	Muito Reduzido	Muito Elevado	Muito Elevado	Moderado
Alterações na microestrutura	Não	Sim	Não	Não	Não	Não
Resistência estática	Moderado	Moderado	Moderado	Muito Elevado	Muito Elevado	Moderado
Resistência fadiga	Reduzido	Reduzido	Moderado	Elevado	Elevado	Pouco investigado
Resistência impacto	Moderado	Elevado	Elevado	Elevado	Muito Elevado	Elevado
Elementos mecânicos	Sim Adesivo	Não	Não	Não	Sim Rebite	Não
Custo por junta	Elevado	Elevado	Moderado	Muito Reduzido	Reduzido	Reduzido
Eficiência ambiental	Reduzida	Muito Reduzida	Muito Elevada	Muito Elevada	Muito Elevada	Muito Elevada
Acessibilidade	Reduzida	Elevada	Elevada	Muito Elevada	Muito Elevada	Moderada
Dependência de condições superficiais	Muito Elevada	Elevada	Reduzida	Moderada	Reduzida	Moderada
Necessidade de Pré-operações	Sim Tratamento superficial	Sim Tratamento superficial	Não	Não	Não	Sim/Não Pré-aquecimento opcional

## 2.3 Contexto histórico

A ideia do processo surge como variante de um outro processo recentemente investigado [43] onde se propôs uma ligação obtida por DPCM entre duas chapas metálicas perpendiculares uma a outra. Ambas as chapas apresentam um formato customizado, baseado numa união designada por ligação *mortise-and-tenon*, um método de união bastante utilizado na união perpendicular com componentes de madeira [44], onde uma das chapas é designada *mortise* e outra designada por *tenon*, Figura 2.15 a). No entanto, enquanto que a ligação tradicional por *mortise-tenon* se

concretizava ao realizar um encaixe entre ambos os componentes, o processo inovador [43] incorpora uma operação de forjamento procedente ao encaixe, formando assim uma ligação mecânica entre ambos os componentes.

O processo apresentou bons resultados pré-eliminares para juntas compostas por chapas de alumínio, tornando possível partir para outras aplicações, onde o mesmo processo se encontrava aplicado em chapas de policarbonato e também numa ligação híbrida entre chapas de alumínio e policarbonato [45], Figura 2.15 b).

Embora tenha sido possível formar a ligação mecânica desejada, a sua resistência mecânica obtida não foi ainda totalmente investigada, essencialmente a nível de ensaios mais extensos na sua componente temporal, por exemplo ensaios do comportamento da junta afenómenos de fadiga ou fluência. No entanto, o ensaio destrutivo realizado na junta, onde foi aplicada uma carga de tração no sentido longitudinal da mesma até que ambas as chapas se separassem, Figura 2.15 c) – d), apresentou resultados bastante promissores, tanto em [43] como em [45].

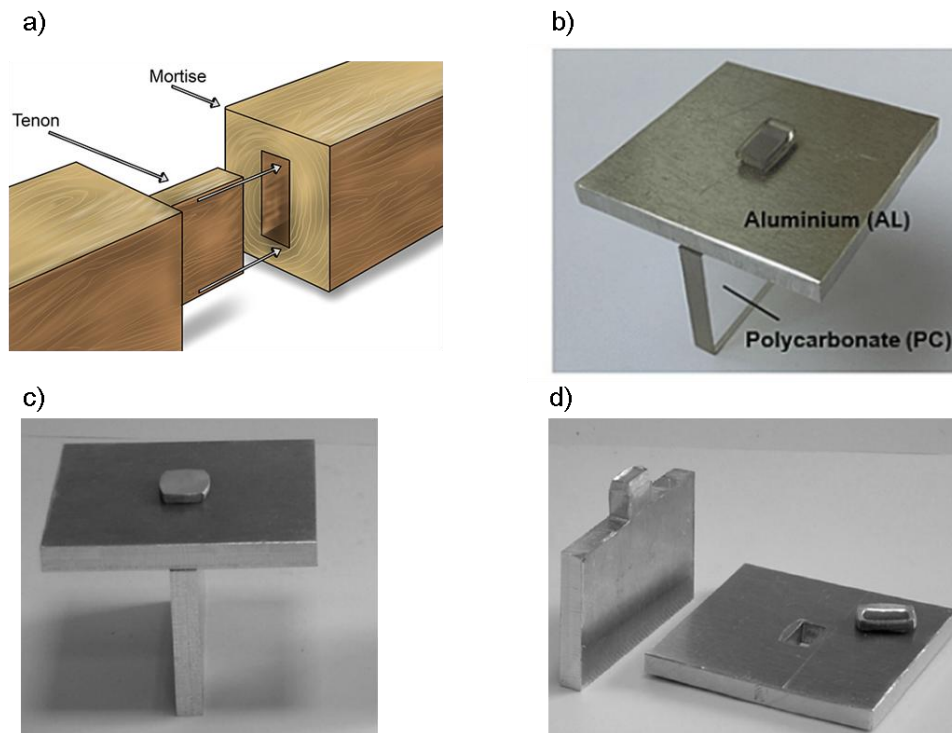


Figura 2.15 - a) Junta *mortise-and-tenon* tradicional [46] ; b) Junta obtida entre chapas de Alumínio e Policarbonato [45]; c) Junta obtida entre chapas de Alumínio [43]; d) Junta resultante de um ensaio destrutivo realizado [43].

## 3 Desenvolvimento Teórico

---

Neste capítulo é apresentado o processo proposto pela dissertação. Pretende-se demonstrar uma abordagem relativamente às etapas do processo, as propriedades geométricas da junta obtida e uma percepção da sua aplicabilidade, bem como uma descrição do desenvolvimento numérico realizado.

Para tal, foi efetuada uma estruturação em três subcapítulos. O **primeiro subcapítulo** diz respeito a uma narração completa de todo o processo a ser realizado, descrevendo sucintamente as suas diferentes etapas envolvidas. No **segundo subcapítulo** é proposto um modelo teórico do processo, no qual é realizada uma parametrização das variáveis geométricas influentes do mesmo, bem como uma discussão das limitações geométricas a que o mesmo se encontra sujeito. Por fim, no **terceiro subcapítulo** é apresentado o desenvolvimento numérico realizado a fim de modelar e simular o processo proposto na sua totalidade.

### 3.1 O Processo

Tal como foi referido no Capítulo 1, o processo apresenta características relacionadas tanto com a tecnologia de DPCM como com a tendência de *joining by forming*. Este tem como objetivo a realização de uma ligação mecânica através do forjamento de chapa, garantindo um *interlocking* puramente mecânico sem qualquer auxílio de fontes térmicas ou elétricas. De referir que uma junta mecânica oriunda deste processo apenas pode ser realizada localmente, isto é, nunca na totalidade de largura das chapas (como é obtido, por exemplo no método FSW convencional, descrito no capítulo anterior) e só poderá ser realizado na obtenção de uma junta composta por apenas duas chapas, Figura 3.1.

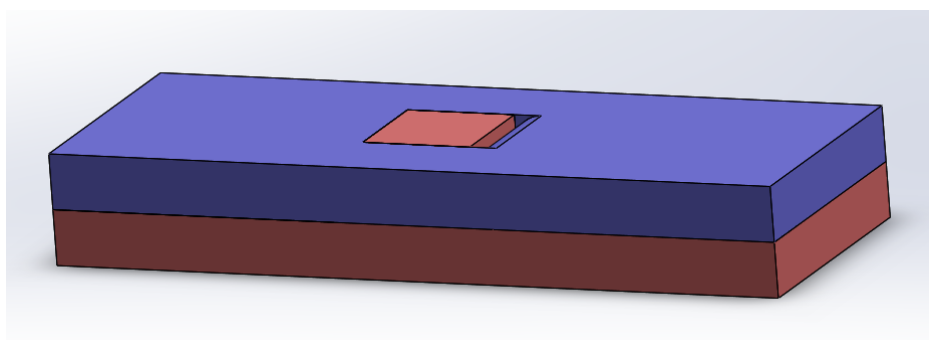


Figura 3.1– Representação esquemática tridimensional da ligação final pretendida pelo processo proposto.

O processo pode ser descrito mediante quatro operações:

1. **Corte de um percurso pré-estabelecido** – Consiste na abertura de um percurso através de uma operação de corte. Este apresenta um formato retangular aberto em ambas as chapas, isto é, seguindo apenas três segmentos de reta sendo dois deles equivalentes com dimensões pré-estabelecidas, Figura 3.5.

2. **Quinagem das chapas** – Segue-se uma operação de quinagem realizada individualmente em cada chapa através de uma quinagem de flange com cunho de arraste na secção retangular limitada pelo percurso previamente cortado, resultando assim duas chapas, ambas com uma secção deformada vertical que perfaz um ângulo de 90° com a superfície de base da respetiva chapa não-deformada, Figura 3.2.

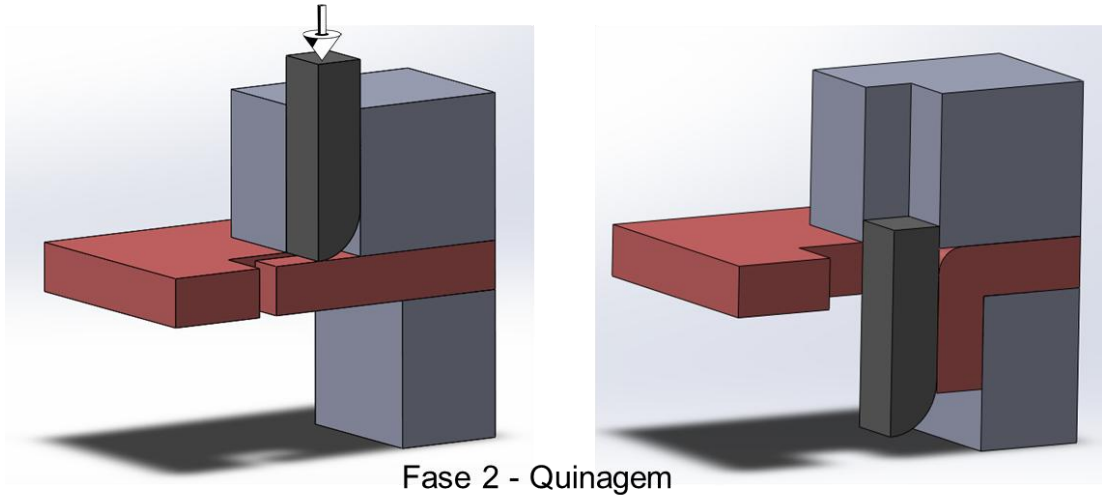


Figura 3.2– Representação esquemática seccional para a operação de quinagem (vista cortada).

3. **Forjamento da 1ª chapa** – Segue-se uma montagem entre chapas de modo a forjar uma das abas verticais resultantes da operação anterior, Figura 3.3. Tal forjamento é realizado com o objetivo de forjar a aba de uma das chapas no interior da cavidade da chapa oposta, ou seja, a aba oriunda da quinagem passa de uma posição vertical para uma horizontal, Figura 3.3. Tal forjamento é efetuado de forma constrangida por um conjunto de ferramentas de modo a garantir o escoamento pretendido do material, como será explicado mais adiante.

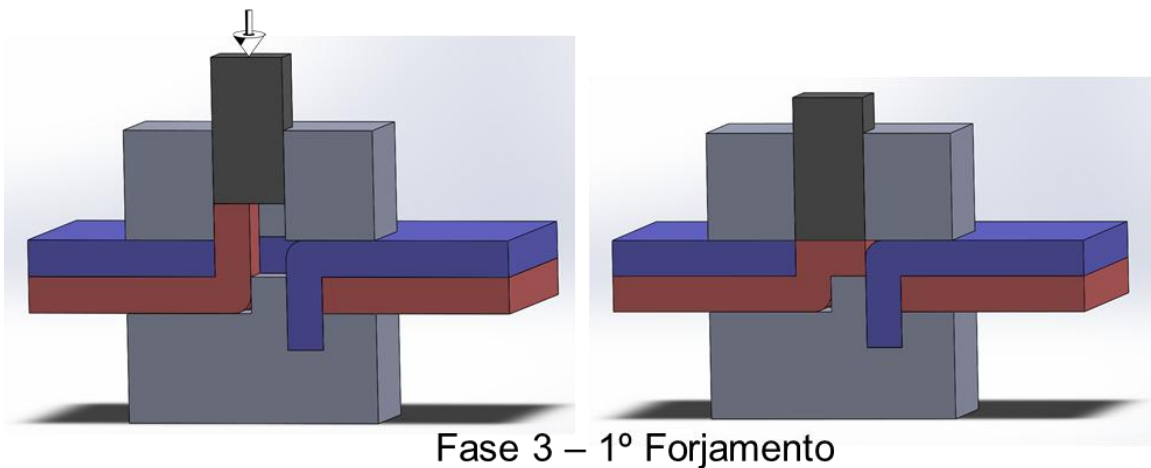


Figura 3.3– Representação esquemática para a operação de forjamento da 1ª chapa (vista cortada).

4. **Forjamento da 2ª chapa** – Quando se dá por terminado o 1º forjamento, segue-se o 2º forjamento da aba constituinte da 2ª chapa a enformar. Este forjamento é idêntico ao anterior, resultando no fecho da junta e termina assim a ligação mecânica entre chapas. Para esta

operação, pretende-se que as funções de constrangimento do volume deformado sejam em parte desempenhadas pela 1ª chapa deformada no 1º forjamento, Figura 3.4.

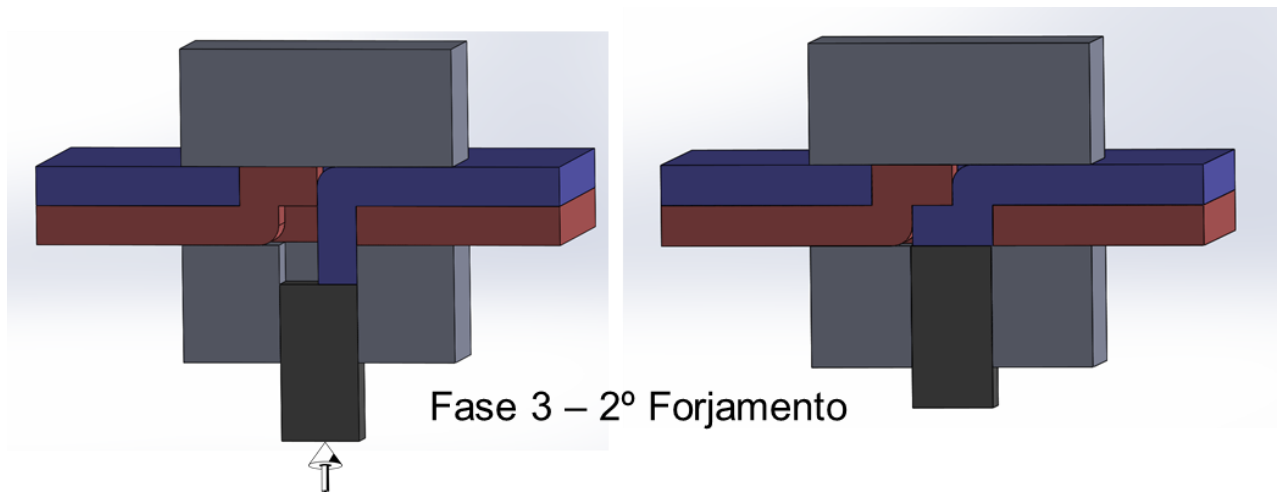


Figura 3.4 - Representação esquemática para a operação de forjamento da 2ª chapa (vista cortada).

Observando o desenrolar do processo, é notável a conservação de volume em todas as operações de deformação plástica. É ainda notável também a ausência de componentes mecânicos ou materiais de adição de forma a manter a junta. Convém destacar que as Figuras 3.2 - 3.4 apresentam apenas uma vista tridimensional simplista da atuação de diversas ferramentas nas chapas a deformar de modo a auxiliar a compreensão das diferentes etapas do processo, estando estas expostas no seu formato realista mais adiante, Capítulo 4.

### 3.2 Modelação Teórica

O novo processo de ligação de chapas sobrepostas por DPCM pode ser estruturado por diversos parâmetros geométricos que se encontram não só impostos nas chapas, como também nas ferramentas a utilizar. Uma vez que o desenvolvimento de processos baseados em DPCM ainda se encontra em decorrente investigação, as operações de deformação plástica devem ser efetuadas com especial atenção ao fluxo de material decorrente no processo, uma vez que este não ocorre de forma tão previsível como nas deformações plásticas em massa convencionais [10].

Assim sendo, optou-se por realizar o processo em condições de deformação plana, isto é, sem qualquer deformação em uma das 3 direções principais em todas as etapas do mesmo. Este constrangimento é importante, pois permite fixar um dos parâmetros geométricos da ligação (largura do material a deformar) e permite um escoamento do material mais previsível e assim mais tendencioso a enformar como pretendido. A nível experimental, a necessidade de impor deformação plana no processo implica ainda a necessidade de uma maior robustez nas ferramentas utilizadas, Capítulo 4.

Uma vez que o processo se inicia com o corte através de um determinado percurso, as dimensões do mesmo podem ser estipuladas em quatro diferentes parâmetros, Figura 3.5. O parâmetro  $W$  consiste na largura da junta que se mantém constante durante todo o processo, pretendendo-se que não

exista deformação no seu sentido, o parâmetro  $i$  consiste numa pequena folga que permite auxiliar a fase de quinagem, a espessura da chapa identificada como  $t$ , restando o parâmetro  $L$  que representa a secção da chapa a deformar. Destaca-se ainda que a distância entre o percurso pré-estabelecido e os limites horizontais e verticais da chapa total definem as dimensões finais da junta pretendida, bem como a localização específica da ligação mecânica. O modo de realização de tal percurso encontra-se apresentado e discutido no seguinte Capítulo.

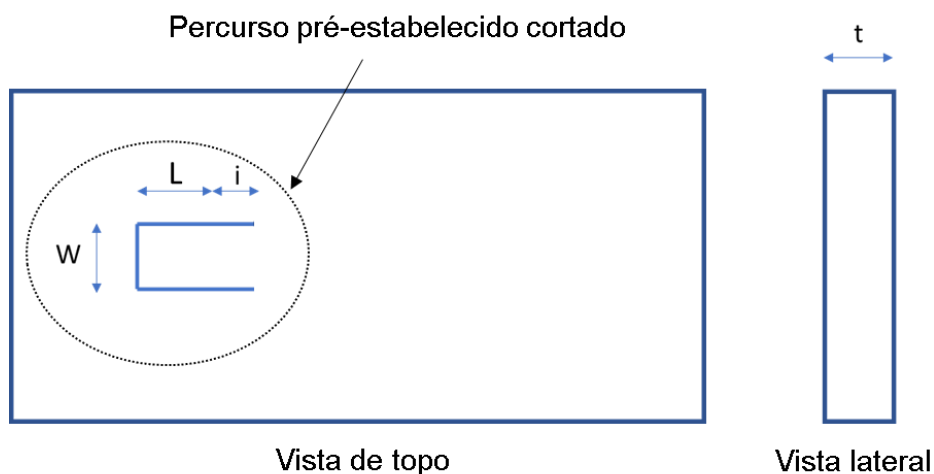


Figura 3.5– Parâmetros geométricos iniciais existentes na primeira fase do processo.

Ao realizar a operação de quinagem, a secção inicial da chapa, Figura 3.6 a), altera a sua geometria nas secções espectáveis a deformar em ambas as posteriores fases de forjamento. A secção deformada teoricamente idealizada, Figura 3.6 b) representada a linha contínua, difere da deformação real ocorrente na fase quinagem, Figura 3.6 b) representada a tracejado. Do modo de deformação realista apresentado, resulta um raio exterior na secção dobrada da chapa e um conseqüente comprimento quinado da aba resultante  $h$  superior ( $h < h_r$ ), uma vez que é imposta uma conservação de volume na secção limitada pelo parâmetro  $L$ . No entanto, para o modelo teórico proposto, optou-se por desprezar o raio exterior presente na chapa oriundo da fase de quinagem, permitindo uma abordagem tanto simples como coerente do modelo teórico para a análise dos parâmetros geométricos envolventes no processo e também na discussão da sua aplicabilidade, apresentada no presente Capítulo mais adiante. Ainda assim, o comprimento quinado real  $h_r$  não é totalmente desprezado, sendo este um parâmetro a destacar sobretudo na componente experimental do processo, Capítulo 4, onde a sua existência se encontra evidenciada e discutida. No entanto, para o modelo teórico proposto, é considerado o comprimento quinado  $h$ , que pode ser calculado pela seguinte equação ao ser imposta a condição de conservação de volume na secção da chapa a deformar e considerando uma espessura da aba da chapa inalterada:

$$L \times t \times W = t \times (h + t) \times W \Leftrightarrow \Leftrightarrow h = L - t \quad (3.1)$$

De realçar ainda que, tal como referido anteriormente, a secção limitada pelo parâmetro  $i$  não sofre qualquer deformação. A importância da imposição deste parâmetro encontra-se evidenciada na componente experimental do processo, Capítulo 4.

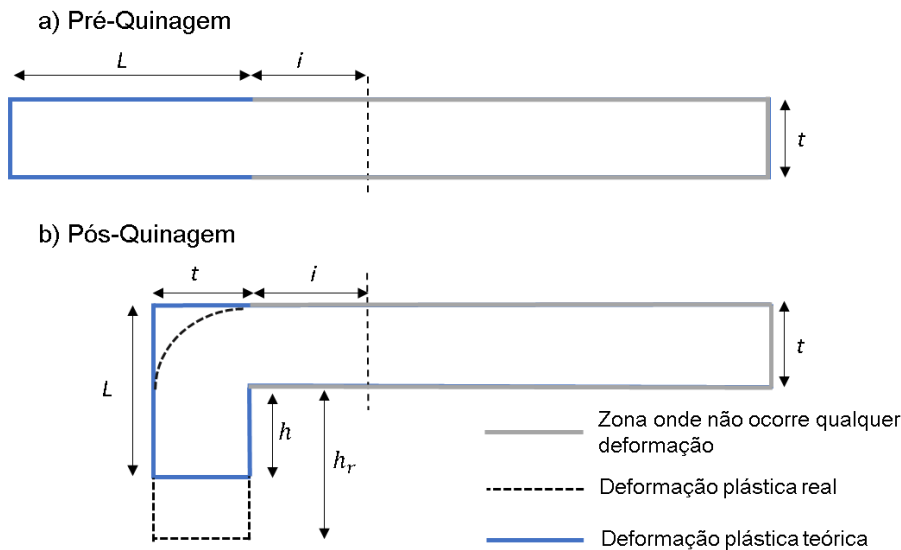


Figura 3.6– Representação esquemática da vista cortada simplificada ao centro da chapa: a) Parametrização prévia à fase de quinagem; b) Parametrização da chapa após a quinagem mediante as aproximações discutidas.

Após realizada a montagem de ambas as chapas quinadas, Figura 3.7 a), numa primeira abordagem, pretende-se demonstrar os parâmetros existentes numa ligação entre chapas de espessura idêntica e as relações entre estes. É então notável a existência de dois novos parâmetros, a folga  $c$  correspondente à distância entre abas quinadas de ambas as chapas onde se dará o *interlocking* mecânico correspondente e o comprimento livre  $h^f$ , comprimento este visível no exterior das chapas a unir. Uma vez que se pretende que a aba quinada de ambas as chapas se posicione encostado à respetiva chapa oposta, conclui-se que os parâmetros  $L_1$  e  $L_2$  terão que ser iguais, o que significa que os comprimentos dos percursos cortados previamente na primeira fase do processo terão que ser conseqüentemente iguais em ambas as chapas a ligar (assumindo o parâmetro  $i$  constante). De realçar ainda que a largura das secções a deformar  $W$  também terá que ser obrigatoriamente igual em ambas as chapas. Observando a representação geométrica imposta, Figura 3.7 a), atinge-se a seguinte equação:

$$L_1 = L_2 = L = c + t_1 + t_2 \quad (1.3)$$

Considerando o forjamento de uma das chapas, Figura 3.7 b), conclui-se que todo o comprimento livre da respetiva chapa forjada se inseriu no interior da folga  $c$  e então, por conservação de volume nesta operação, é possível atingir a seguinte igualdade:

$$c = h_1^f = h_2^f \quad (3.2)$$

É importante ainda evidenciar que a espessura de ambas as chapas é mantida constante após os respetivos forjamentos na secção do *interlocking*, Figura 3.7 c). Tal se deve à ocorrência de



conservação de volume, que obriga a que estas se mantenham idênticas às espessuras iniciais das respectivas chapas de modo a que a folga  $c$  seja totalmente preenchida.

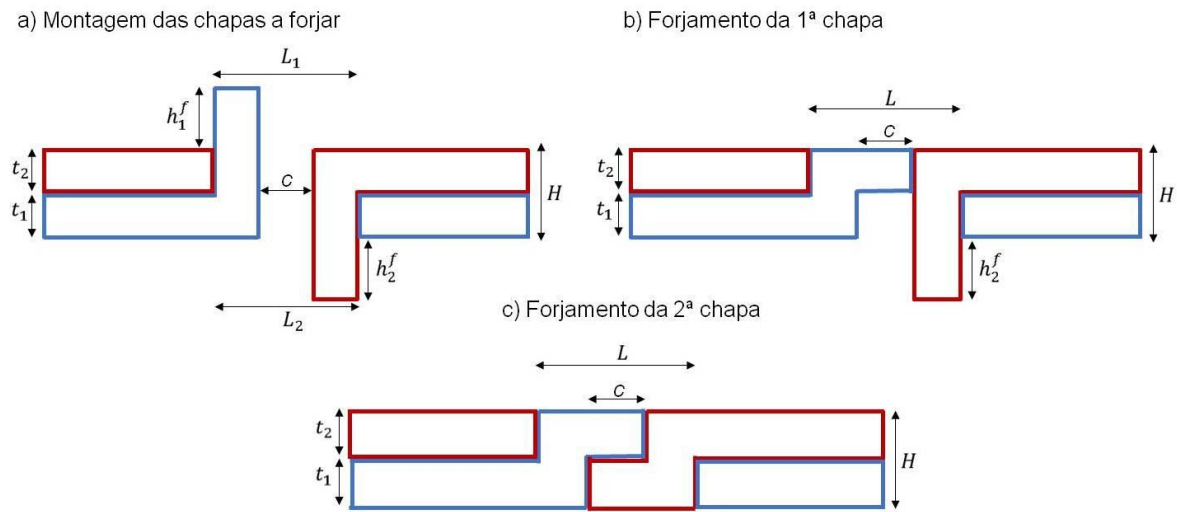


Figura 3.7– Representação esquemática da vista cortada no centro da ligação para chapas de espessura idêntica: a) Montagem realizada após a fase de quinagem; b) Junta após o forjamento da 1ª chapa; c) Junta após o forjamento da 2ª chapa.

De seguida, pretende-se verificar o modelo teórico proposto para uma junta composta por chapas de espessura diferente, Figura 3.8. Também para este caso se verifica que  $L_1$  é geometricamente igual a  $L_2$ . Como a espessura difere, os comprimentos quinados de ambas as chapas também serão consequentemente diferentes. No entanto, os comprimentos livres de ambas as chapas mantêm-se iguais à folga  $c$ , tal como foi mostrado ao atingir a equação (3.4) e também a equação (3.3) se mantem válida, Figura 3.8 b). Novamente é admitido que as espessuras de cada chapa se mantêm constantes após o respetivo forjamento, mantendo-se a conservação de volume, e que os rasgos efetuados inicialmente em cada chapa têm que apresentar um comprimento  $L$  igual de modo a serem posteriormente bem ligadas. Refere-se ainda a importância da equação (3.3), que é constituída por todos os parâmetros essenciais na estruturação da junta a realizar, assumindo-se assim como a equação fundamental do processo.

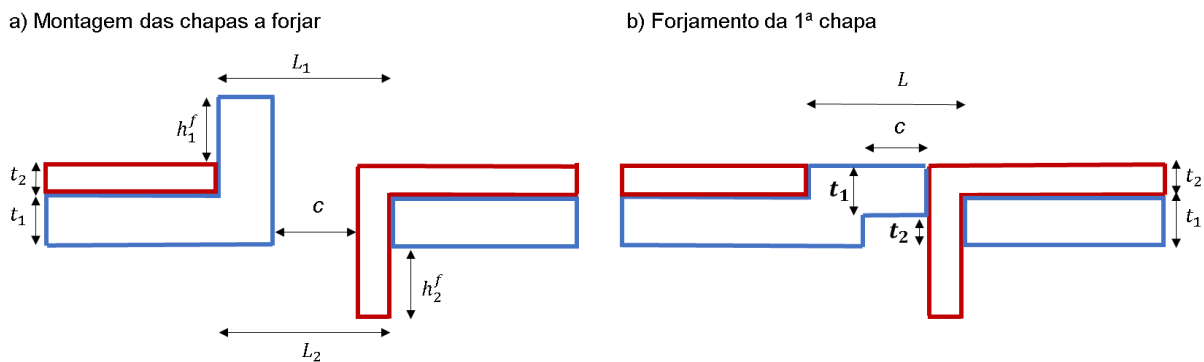


Figura 3.8 – Representação esquemática da vista cortada no centro da ligação entre chapas de diferente espessura: a) Montagem realizada após a fase de quinagem; b) Junta após o forjamento da 1ª chapa.

### 3.2.1 Representação gráfica

De modo a encerrar o modelo teórico proposto, resta entender os limites de aplicação previstos do processo de modo a perceber em que condições este pode ser aplicado. A sua aplicabilidade encontra-se bastante relacionada com a equação (3.3) apresentada anteriormente, que pode ser ainda mais simplificada na seguinte forma:

$$L = c + H \quad (3.5)$$

Surge então o parâmetro  $H$  que consiste na soma entre as espessuras das duas chapas ligadas. Considerando o comprimento de ligação total  $L$  em função da folga entre chapas onde se dará o *interlocking mecânico* pretendido, encontra-se estabelecida uma equação linear que define assim as variáveis essenciais evolutivas no processo, apresentando o comprimento total  $L$  em função da folga, sendo a espessura total da junta a respetiva ordenada na origem, Figura 3.9.

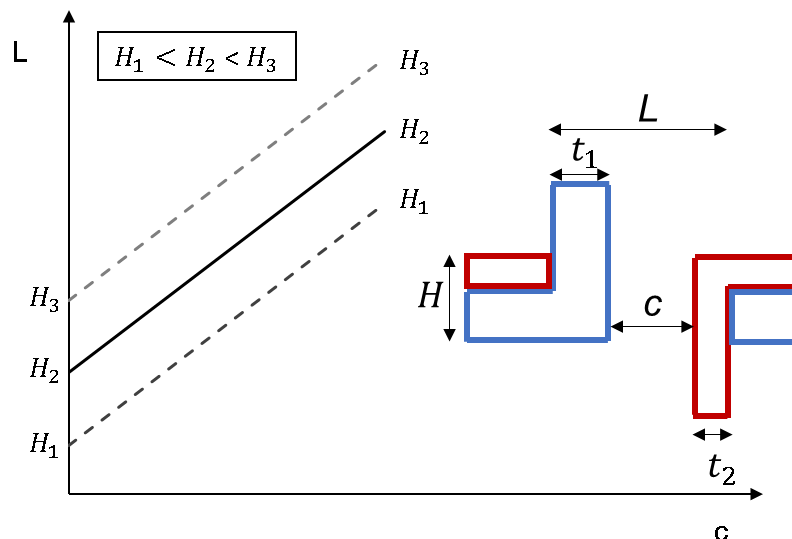


Figura 3.9– Esquema representativo dos parâmetros geométricos existentes no processo com evidência na influência da espessura total da junta  $H$  na representação esquemática do processo.

#### 3.2.1.1 Limites associados às espessuras das chapas

Uma vez que um dos pressupostos do processo passa por estar inserido na tecnologia de DPCM, considera-se apenas a sua aplicabilidade para chapas, admitindo uma espessura máxima de 5 mm. Assim sendo, a espessura máxima total de uma junta adquirida por este processo apenas poderá ser 10 mm. Num sentido inverso, considerou-se uma espessura mínima de chapa cerca de 1 mm, resultando assim numa espessura mínima total da junta de 2 mm. De modo a simplificar a posterior representação gráfica da aplicabilidade do processo, o parâmetro  $H$  foi introduzido apenas por múltiplos de 2 mm. Como este parâmetro representa a ordenada na origem da equação (3.5), a variação do mesmo resulta em cinco diferentes retas separadas por um *offset* vertical idêntico à sua variação. Assumiram-se ainda espessuras de chapa representadas por números inteiros entre 1 mm e 5 mm, Figura 3.10.

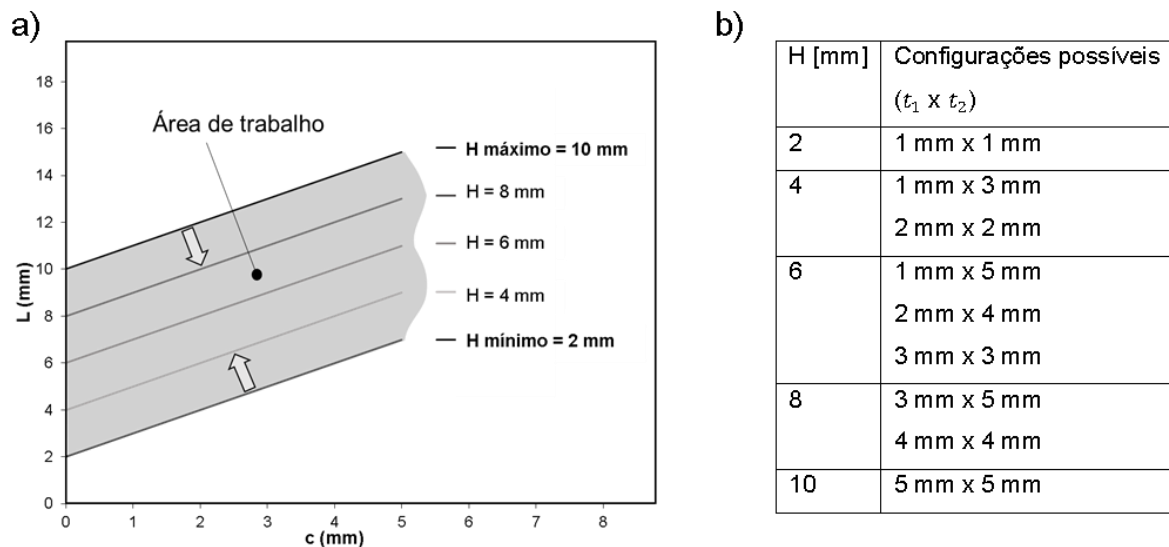


Figura 3.10 – Representação da área de trabalho considerada para as configurações de junta admitidas: a) Representação gráfica; b) Aglomerado de configurações de junta possíveis consoante a espessura total da mesma.

De realçar ainda que obviamente, qualquer um dos parâmetros envolventes terá que ser positivo de modo a que estes fisicamente façam sentido, referindo ainda que  $L$  terá que ser sempre superior a  $c$ , caso contrário resultaria uma espessura total da junta nula (equação 3.5). No entanto, não basta o parâmetro  $c$  ser positivo, uma vez que, ao analisar de forma breve as etapas constituintes do processo, é possível prever um outro limite geométrico máximo existente no mesmo.

### 3.2.1.2 Limite de sobreposição

O limite máximo previsto apresenta-se como o ocorrer de sobreposição do material constituinte da chapa quando forjada. Esta consequência é algo comum nos processos de forjamento de chapa em DPCM, visto que ao enformar um componente com dimensões da sua área transversal muito reduzidas relativamente à sua altura, as probabilidades de este apresentar sobreposições são potencializadas. Uma vez que o comprimento  $L$  diz respeito ao comprimento da chapa que será deformado no decorrer do processo, quando maior este for, maior será a altura da chapa a deformar nas etapas de forjamento, significando que, para a mesma área transversal da secção da chapa a forjar (ou seja, espessura e largura da secção a deformar das chapas constantes), a altura da mesma será superior. A existência de sobreposições deve ser evitada, podendo encaminhar a diversos problemas que comprometem a fiabilidade da junta obtida, como por exemplo sujeitar o material a elevadas distorções no início das secções sobrepostas. Tais distorções levam potencializam múltiplas propagações de fendas assim que o material atinja o seu ponto de fratura, e ainda dificultar o preenchimento da secção total de *interlocking* mecânico ao criar folgas indesejadas que podem colocar em causa a resistência mecânica da junta efetuada.

De modo a desvendar o limite geométrico para o qual ocorre sobreposição do material nas operações de forjamento, é importante notar uma variedade de parâmetros algo elevada de modo a que estabelecer corretamente tal limite. No total, é possível detetar três diferentes tipos de parâmetros influentes na ocorrência de sobreposições de material, sendo estes a geometria da secção a

deformar, o material da mesma e também as condições de fricção existentes na superfície de contacto entre os diversos componentes da ferramenta e o material a deformar.

Assim sendo, devido a uma enorme diversidade de parâmetros influentes na ocorrência deste fenómeno, optou-se por recorrer a uma pré-análise numérica de modo a tentar identificar o limite de sobreposição de material como alternativa a um extenso desenvolvimento experimental. No entanto, esta pré-análise distingue-se da análise numérica exibida no seguinte subcapítulo, uma vez que enquanto esta última se encontra destinada a obter resultados comparáveis ao realizar do processo, a pré-análise discutida tem como propósito complementar a aplicabilidade do processo de modo a evidenciar as condições em que este não deve ser executado. No entanto, os recursos utilizados em ambos os casos (simulação numérica da pré-análise de sobreposição e simulação numérica total do processo) são idênticos, ambos provenientes do software informático *I-FORM*. Uma descrição mais detalhada relativamente aos conceitos gerais induzidos neste software, bem como os motivos para o seu uso, encontra-se exibida mais adiante, Subcapítulo 3.3.

A modelação efetuada, Figura 3.11 a), apresenta a secção a deformar de forma idêntica à representada anteriormente quando apresentada a modelação teórica da chapa após a fase de quinagem, com a existência de apenas duas ferramentas, uma assume o propósito de matriz (Ferramenta 1) e outra que representa a ação do punção sobre o material (Ferramenta 2). Estas ferramentas não são geometricamente idênticas às utilizadas experimentalmente na fase de forjamento da chapa, no entanto foram modeladas de forma a que a sua ação e constrangimento sobre a malha a deformar fosse idêntica ao que se verifica, tanto a nível teórico como experimental. Uma vez que a pré-análise efetuada se encontra dependente de parâmetros geométricos variáveis, optou-se por utilizar uma malha pré-estabelecida a partir dos mesmos parâmetros, os quais são a espessura da primeira chapa a forjar  $t_1$ , a espessura da segunda chapa a forjar  $t_2$  e a sua altura da aba que corresponde ao parâmetro  $h$ , Figura 3.11, estando o número total de Elementos Finitos (EF) quadriláteros considerados inteiramente dependente das dimensões da secção da chapa a deformar na modelação efetuada, Figura 3.11 b) – c) . De modo a representar a influência deste último parâmetro na aplicabilidade do processo, pode ser convertido na folga  $c$  através da seguinte equação:

$$c = h - t_1 \quad (3.7)$$

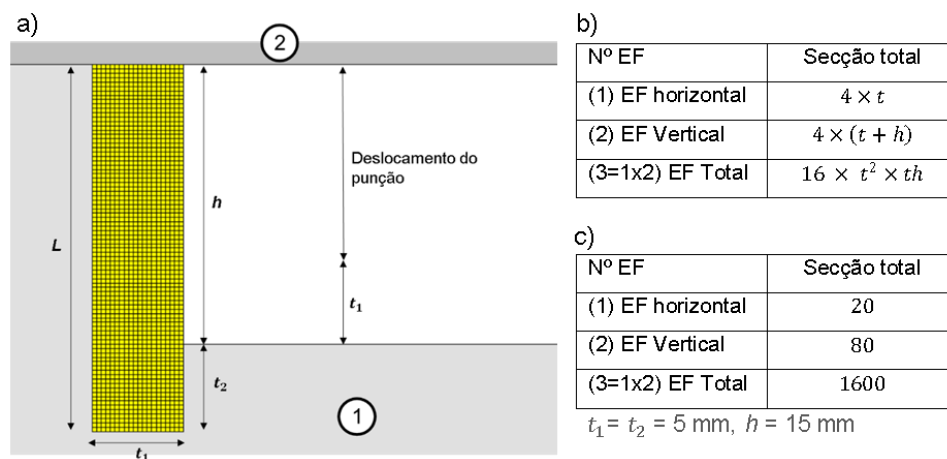


Figura 3.11 - Modelação numérica realizada na pré-análise de sobreposição: a) Modelação inicial mediante os parâmetros geométricos envolventes; b) Número de elementos finitos modelados; c) Exemplo da metodologia apresentada em b) para  $t_1 = t_2 = 5$  mm e  $h = 15$  mm.

Relativamente aos parâmetros geométricos, a pré-análise foi realizada fixando a espessura da chapa e variando a altura livre de modo a desvendar o seu valor mínimo para a qual é notória a ocorrência de sobreposição do material deformado. Para todos os casos simulados, foi também assumida a existência de deformação plana, fixando assim a largura do material a deformar ( $W = 10$  mm). Como pode ser visto na Figura 3.11, mantendo um comprimento  $L$  constante, a altura da aba  $h$  será tanto menor quanto maior for a espessura da segunda chapa a forjar,  $t_2$ . Assim sendo, ao manter a espessura  $t_1$  constante e reduzir simultaneamente a altura da aba  $h$ , a tendência para o material instabilizar é menor, uma vez que o seu quociente entre altura da aba e espessura será menor. Esta evidência leva a concluir que nas pré-análises a realizar, devem ser tidos em conta ligações de chapas de espessura idêntica, ou seja:

$$t_1 = t_2 \quad (3.8)$$

Pensando de forma inversa, se a pré-análise fosse realizada considerando que  $t_2$  fosse superior a  $t_1$ , a altura livre para a qual ocorre instabilidade seria a mesma que a verificada no caso da equação (3.8), porém o parâmetro  $c$  e consequentemente o parâmetro  $L$  seriam superiores e o correspondente limite seria geometricamente superior àquele que realmente é. Se o contrário se verificasse, ou seja  $t_1$  superior a  $t_2$ , a pré-análise estaria a ser realizada à chapa de maior espessura da junta, o que não seria correto, uma vez que a chapa menos espessa é que apresenta uma maior tendência a falhar. Assim, ao ser realizada a análise para uma ligação de chapas de espessura idêntica, é possível obter um limite de  $c$  máximo para cada espessura de chapa, sendo o  $c$  máximo correspondente à chapa menos espessa da junta o limite proposto. Por exemplo, um  $c$  máximo de  $X$  obtido para uma ligação de chapas de 2 mm significa que, numa ligação de uma chapa de 2 mm com outra de 5 mm, o  $c$  máximo da junta deverá ser  $X$  de modo a que não ocorra instabilidade da chapa de 2 mm no seu forjamento.

Uma vez que os parâmetros geométricos se encontram examinados, resta abordar as variáveis relativas ao material utilizado e às condições de fricção existentes. Relativamente ao material, este foi considerado constante e modelado consoante a equação característica do comportamento de

deformação do mesmo, equação 4.1. Em relação ao atrito, foi apenas considerado como variável a fricção existente na superfície de contacto do punção com o material a deformar, tendo sido verificado previamente que o atrito existente na matriz não influencia significativamente o escoamento do material. Assim sendo, a fricção existente no punção atuante foi modelada como constante (atrito de *Prandtl*), variando assim os valores do coeficiente de atrito  $m$  de modo a compreender a influência deste no escoamento do material.

Uma vez que os dados obtidos se encontram largamente dependentes da análise visual inspecionada do escoamento do material presente no final das simulações numéricas realizadas, é possível evidenciar três casos obtidos, Figura 3.12, onde todos eles foram alcançados com um atrito constante idêntico no punção ( $m = 0.1$ ) e para a mesma espessura de chapa (5 mm), variando apenas a altura da aba,  $h$ , que resulta consequentemente num aumento da folga  $c$ .

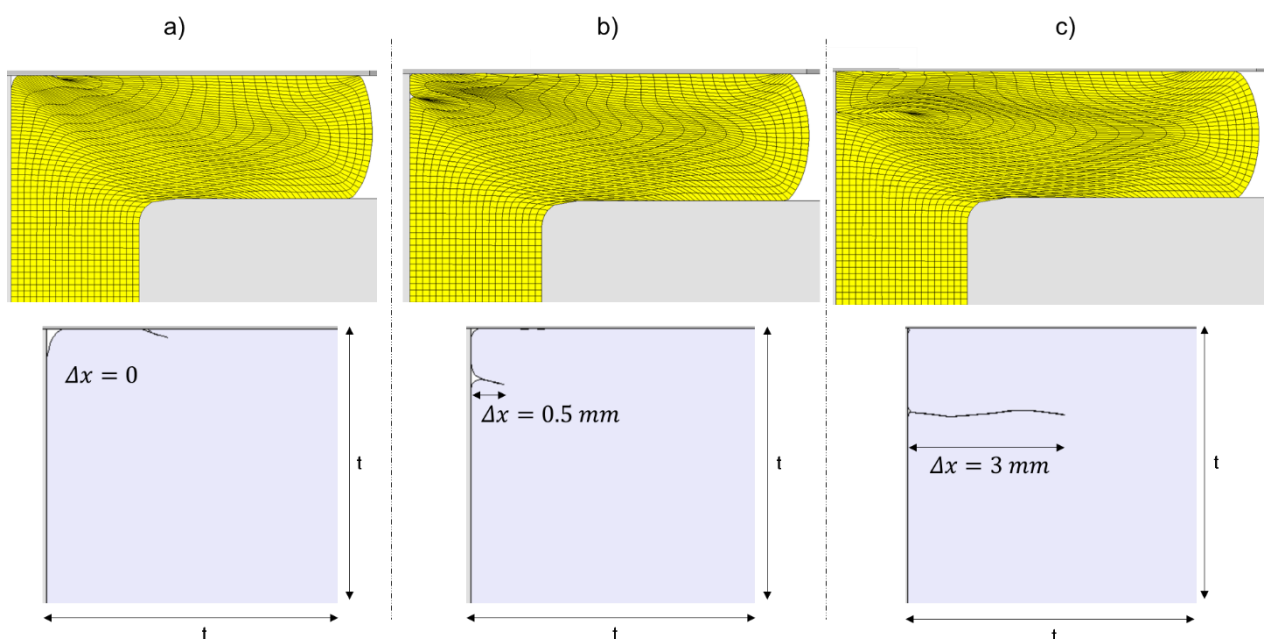


Figura 3.12– Fase final da simulação numérica realizada para  $t = 5 \text{ mm}$  e  $m = 0.1$ : a)  $c = 9 \text{ mm}$ ,  $\Delta x = 0$  ; b)  $c = 10 \text{ mm}$ ,  $\Delta x = 0.5 \text{ mm}$  ; c)  $c = 11 \text{ mm}$ ,  $\Delta x = 3 \text{ mm}$ .

Observando os três casos identificados, notam-se estados finais do fluxo do material algo diferentes. Enquanto que no primeiro caso não existe qualquer sobreposição de material, no segundo e terceiro caso esta torna-se evidente, sendo a sobreposição do terceiro caso bastante mais acentuada que a do segundo. De modo a interpretar a diferença entre casos aceitáveis e limitantes, optou-se por quantificar o comprimento total de sobreposição em termos percentuais da seguinte forma:

$$\Delta x = K \times t \quad (3.9)$$

Onde  $\Delta x$  pretende representar a variação final da distância horizontal aproximada entre a secção lateral da matriz e a zona limite de sobreposição de material e  $K$  representa a percentagem total dessa mesma distância relativamente à espessura da chapa em questão. A introdução do fator  $K$  é relevante, uma vez que permite quantificar a sobreposição de material existente relativamente à espessura considerada, podendo assim ser mais facilmente comparável para diferentes espessuras

de chapa. Para os casos da Figura 3.12, detetam-se três diferentes valores para este fator:  $K = 0$  para o caso a),  $K = 0.1$  para o caso b) e  $K = 0.6$  para o caso c).

Os resultados obtidos para esta pré-análise encontram-se identificados nos seguintes gráficos, Figura 3.13 onde é possível notar a influência em separado tanto do fator de atrito  $m$  como do fator  $K$ , apresentando apenas os segmentos de reta limite relativamente à espessura total de junta de modo a simplificar a compreensão dos mesmos ( $H = 2 \text{ mm}$  e  $H = 10 \text{ mm}$ ). Numa primeira fase, é possível observar uma tendência crescente relativamente à folga máxima admitida em relação ao aumento da espessura da chapa a deformar.

Relativamente às condições de fricção, conclui-se que um atrito mais elevado no punção de forjamento dificulta o escoamento do material, facilitando a ocorrência de sobreposição de material de modo a que esta ocorra com uma altura livre mais reduzida e, conseqüentemente, uma folga  $c$  mais conservadora quando comparado com os casos que possuem condições de fricção menos influentes. Para o fator  $K$ , nota-se o contrário do raciocínio anterior, ou seja, valores superiores para este parâmetro permitem atingir juntas geometricamente superiores, embora esteja adjacente um maior risco da presença de sobreposições do fluxo de material resultante. Relativamente aos perfis obtidos, de referir ainda que para casos onde foi simulado um fator de atrito igual a 0.1 e 0.05, os limites identificados e sobreposições observadas foram praticamente idênticos e que os limites obtidos, devidamente identificados na Tabela 3.1, apresentam todos eles uma linha de tendência linear.

Tabela 3.1– Valores máximos obtidos para a folga  $c$  mediante fatores  $K$  e  $m$  para as espessuras de chapa consideradas.

Espessura de chapa [mm]	Folga $c$ máxima [mm]				
	K = 0	K = 0.2		K = 0.6	
	m = 0.1 m = 0.05	m = 0.2	m = 0.1 m = 0.05	m = 0.2	m = 0.1 m = 0.05
1	1	1	2	2	3
2	3	3	4	4	5
3	5	5	6	6	7
4	7	7	8	8	9
5	9	9	10	10	11

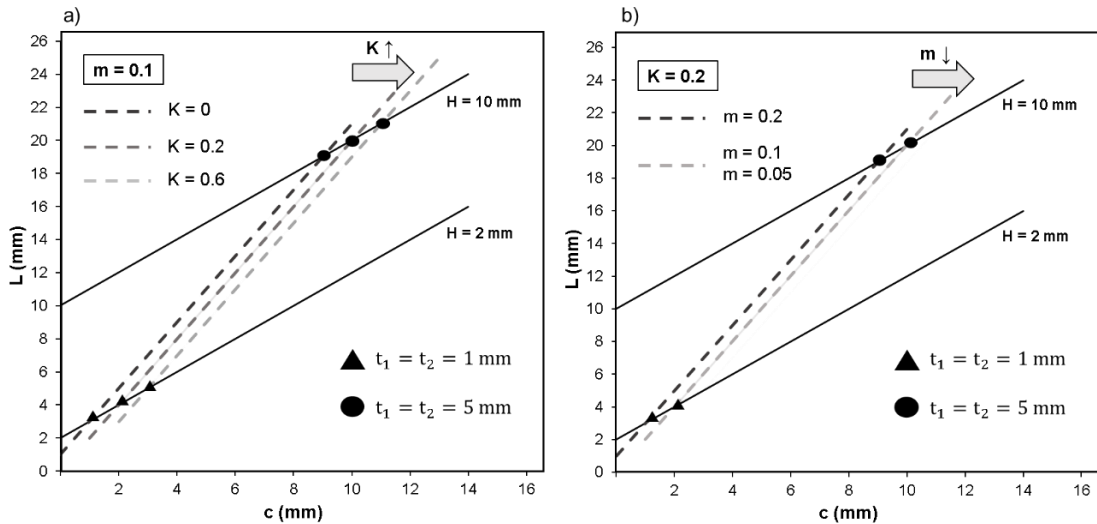


Figura 3.13– Representação gráfica dos limites obtidos para a folga  $c$ : a) Atrito fixo ( $m = 0.1$ ) e  $K$  variável; b) Atrito variável e  $K$  fixo ( $K = 0.2$ ).

Os limites identificados na Tabela 3.1 foram aglomerados com o intervalo de ligações obtiveis previamente considerado, Figura 3.14, onde foi assumido um fator  $K$  limite de 0.2 e um fator de atrito  $m$  no punção de 0.1. O primeiro gráfico observado destaca os limites identificados em cada segmento de reta representado para as configurações de junta consideradas. O segundo gráfico surge como uma evolução do anterior, onde a aplicabilidade do processo é esquematizada com o recurso a três diferentes regiões, sendo a Região 1 a **zona segura de trabalho**, onde é previsto que não ocorra qualquer falha no processo proposto, a Região 2 a **zona de transição**, em que o correto realizar do processo se encontra dependente da configuração da junta e essencialmente da chapa menos espessa constituinte da mesma, e a Região 3 a **zona de falha**, representando o aglomerado de parâmetros geométricos que devem ser desconsiderados de forma a que a junta seja corretamente efetuada ao evitar o risco de sobreposições de material no interior da junta.

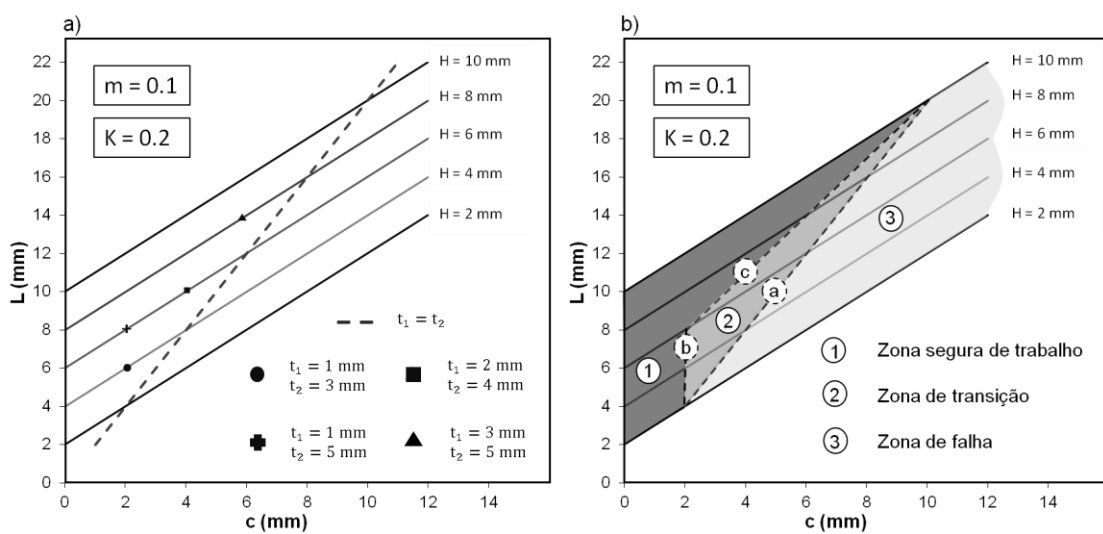


Figura 3.14– Representação gráfica final da aplicabilidade do processo para  $K = 0.2$ ,  $m = 0.1$ : a) Representação dos limites identificados para as configurações de junta consideradas; b) Limitação do gráfico final em diferentes zonas de aplicabilidade consideradas.



Relativamente à zona de transição, esta pode ser facilmente representada através de três segmentos de reta: o segmento de reta **a** representa os limites máximos visíveis quantitativamente na Tabela 3.2 para as condições de atrito e de sobreposição admitidas. Tal como foi referido, estes são os limites máximos para as espessuras de chapa consideradas, sendo que qualquer ligação registada após tal segmento de reta depara-se bastante propícia a possuir sobreposições de material no seu interior. O segmento de reta **b** representa o limite obtido na folga *c* para uma chapa com uma espessura 1 mm. Observando a Tabela 3.1, nota-se a presença desta espessura de chapa nas ligações onde  $H = [2; 4; 6]$  mm logo, sendo esta a espessura mínima dentro do espetro considerado, o seu correspondente limite na folga *c* será o limite da aplicabilidade do processo para a zona onde qualquer ligação considerada é de possível concretização (Zona 1, Figura 3.14). Resta por fim o segmento de reta **c**, que conecta os limites restantes em cada uma das restantes equações características do processo: o ponto limite da equação característica de  $H = 6$  mm, onde o limite de *c* corresponde ao limite da chapa com uma espessura de 1 mm como foi referido anteriormente, o ponto limite da equação característica de  $H = 8$  mm onde o limite de *c* coincide com o correspondente limite da chapa com uma espessura de 3 mm (uma vez que é a chapa menos espessa considerada que permite a sua utilização para atingir uma junta com uma espessura total de 8 mm) e por fim o limite existente na equação característica de  $H = 10$  mm onde o único limite de *c* existente corresponde ao obtido para uma chapa de espessura de 5 mm. O limite em  $H = 6$  mm para uma chapa de espessura 2 mm (ou seja, uma ligação entre chapas de 2 e 4 mm) registado no primeiro gráfico da Figura 3.14 encontra-se inserido na região de transição.

No entanto, os gráficos presentes na Figura 3.14 podem ser alterados ao serem consideradas outras espessuras de chapa, essencialmente se forem inseridas chapas de espessura inferior a 1 mm ou de espessura superior a 5 mm. Se este intervalo for expandido, a zona segura de trabalho sofre uma redução de área, estando o limite geométrico da chapa menos espessa localizado numa folga inferior à detetada para a chapa de 1 mm, resultando num aumento direto da zona de transição. Também para casos onde é variado o material deformado, poderão existir mudanças drásticas na aplicabilidade apresentada, uma vez que os limites de sobreposição podem ser bastante diferentes a nível das propriedades geométricas onde os mesmos se detetam e também no escoamento do material, podendo apresentar sobreposições totalmente diferentes das destacadas para o caso em estudo.

### 3.3 Modelação Numérica

O presente subcapítulo visa demonstrar todo o processo numérico realizado de forma fundamentada referente ao processo proposto. Tal como foi referido anteriormente, optou-se pelo uso do software informático *I-FORM*. Criado na década de 80 e desenvolvido desde então pelo departamento de Tecnologia Mecânica do Instituto Superior Técnico, o software *I-FORM* permite resolver problemas associados a deformação plástica através do recurso do método dos elementos finitos e da teoria da plasticidade [47], tanto em 2D (casos de deformação plana, tensão plana ou axissimétricos) como em 3D. O software permite simular uma enorme variedade de operações onde ocorre deformação plástica do material deformado, sendo bastante útil tanto para compreender os fluxos de material

existentes como também para extrapolar uma enorme variedade de parâmetros obtíveis em diferentes fases do processo. Ao ser possível obter uma previsão bastante realista do processo a realizar, a atividade experimental a realizar pode ser simplificada em termos de custo e tempo despendidos, sendo mais facilmente otimizada [48].

### **3.3.1 Procedimento**

Para o caso em estudo, o uso do software *I-FORM* torna-se bastante vantajoso para análise de diversos parâmetros constituintes do processo realizado. O estudo numérico realizado pode ser dividido em duas diferentes etapas:

1. Análise física do processo geral. Nesta etapa, pretende-se simular as diferentes fases do processo (quinagem, 1º forjamento e 2º forjamento) de forma progressiva de modo a observar os fluxos de material existentes. Esta etapa, embora algo pré-eliminar, permite desvendar se o processo é fisicamente realizável, sendo essencial no objetivo de prever se o material está a ser corretamente deformado. Esta etapa serve também como fonte de otimização de ferramentas experimentais a utilizar de modo a melhorar o escoamento de material existente;
2. Obtenção de dados comparáveis com a componente experimental. A partir de uma simulação idêntica à referida na etapa anterior, é possível extrapolar dados através do software *I-FORM* e proceder à devida comparação e validação com os dados obtidos através do desenvolvimento experimental do processo. Para tal, procedeu-se à obtenção da evolução da carga vertical exercida pelo punção no desenrolar de cada fase do processo em função do seu deslocamento vertical. Estes dados, também obtíveis no desenvolvimento experimental do processo, Capítulo 4, são apresentados num formato gráfico de modo a facilitar a compreensão das diferentes fases na evolução das cargas exercidas consoante o deslocamento do punção. Tais gráficos são componentes essenciais a obter num processo de deformação plástica por diversos motivos:
  - a. Permite caracterizar o processo em diferentes fases consoante os perfis obtidos, facilitando a compreensão do mesmo;
  - b. Possibilita o estudo das limitações do mesmo, por exemplo a nível de carga ou deformação máximas atingíveis;
  - c. Auxilia a comparação em casos onde ocorrem variações de determinados parâmetros do processo em estudo, podendo desvendar quando este não está a ser corretamente realizado assim que a evolução do gráfico apresente resultados peculiares.

Assim sendo, ao ser verificado que a evolução das cargas exercidas pelo punção atuante relativamente ao seu deslocamento obtida por métodos numéricos e experimentais é semelhante, o processo proposto pode ser validado com elevada segurança.

### **3.3.2 Modelação do Processo**

De modo a modelar a totalidade do processo proposto, optou-se por utilizar o software *I-FORM* em duas dimensões (em condições de deformação plana) utilizado num computador portátil de sistema

operativo *Windows 10* com um processador *i7-5700HQ* (2.70GHz), memória RAM de 8,00 GB onde foram usados 6 processadores lógicos.

Foram modeladas duas secções retangulares correspondentes a ambas as secções das chapas a deformar através de elementos finitos quadriláteros, onde as suas respetivas malhas se encontram dependentes dos parâmetros geométricos da ligação introduzidos anteriormente no modelo teórico proposto, Figura 3.15 e Tabela 3.2. Para a Secção A, secção limitada pelo parâmetro geométrico  $L$ , foi efetuada uma pequena redução decimal na distância atribuída a tal parâmetro. A esta redução se deve uma pequena perda de volume existente na primeira fase do processo, fundamentada no seguinte Capítulo. Relativamente à Secção C, uma vez que se prevê que esta não sofra qualquer deformação no decorrer das simulações executadas, optou-se por não refinar tal secção. A largura do material a deformar é modelada como constante em todas as simulações realizadas. De modo a simular o aperto existente da ferramenta das chapas, foi imposta um constrangimento fixo na extremidade indeformada de cada chapa de modo a que não exista qualquer movimento horizontal das mesmas com o decorrer da deformação em todas as etapas do processo. O material de cada chapa foi definido consoante a respetiva equação característica do comportamento de deformação, equação (4.1), e não foi introduzida qualquer influência térmica.

Tabela 3.2– Nº de Elementos Finitos modelados consoante os parâmetros geométricos considerados.

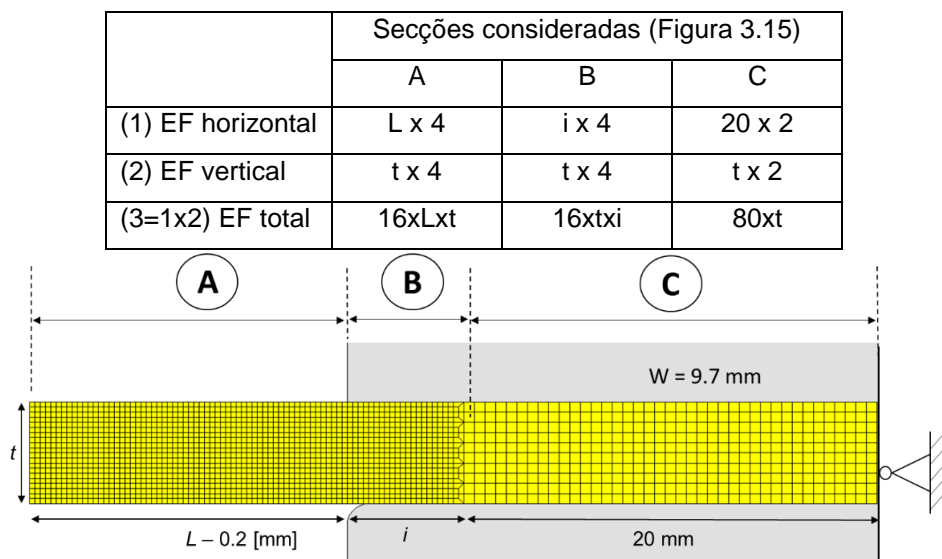


Figura 3.15– Exemplo da modelação realizada para a chapa a deformar ( $t = 5$  mm;  $L = 14.8$  mm;  $i = 5$  mm)

De modo a simular o processo de forma simples, foram utilizadas no total nove ferramentas. Estas foram modeladas como objetos rígidos com geometrias discretizadas através de elementos de contato-fricção linear. Embora estas não sejam geometricamente idênticas às utilizadas experimentalmente, foram modeladas de forma a que a sua ação e constrangimento sejam semelhantes ao que se verificou experimentalmente, garantido assim uma concordância entre ambos os métodos de análise, Figura 3.16, onde é referido como “Chapa 1” a primeira chapa a ser forjada, sendo a malha referida como “Chapa 2” a segunda e última a ser forjada. As funções de cada ferramenta modelada, consoante a etapa do processo a simular, encontram-se devidamente

identificadas na Tabela 3.4. Estas encontram-se representadas e identificadas apenas para uma das simulações realizadas, estando as ferramentas suscetíveis a alterações geométricas consoante as dimensões da junta pretendidas com base nos parâmetros estabelecidos na modelação teórica.

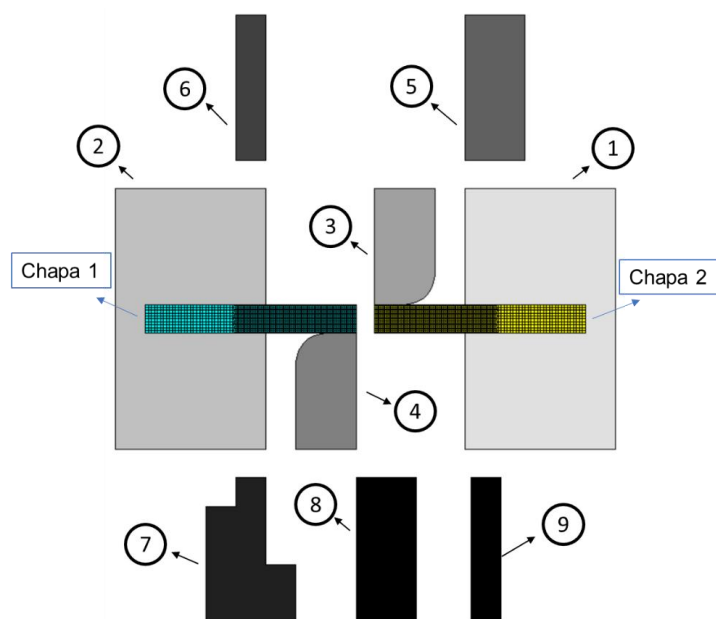


Figura 3.16– Esquema do aglomerado de ferramentas e materiais modelados.

Tabela 3.3–Descrição da função de cada ferramenta consoante a etapa do processo a simular.

Nº Ferramenta	Etapas do Processo		
	Quinagem	1º Forjamento	2º Forjamento
1	Constrange o escoamento de material	Constrange o escoamento de material	Constrange o escoamento de material
2	Constrange o escoamento de material	Constrange o escoamento de material	Constrange o escoamento de material
3	Punção que atua sobre da chapa 2	Sem influência	Sem influência
4	Punção que atua sobre da chapa 1	Sem influência	Sem influência
5	Sem influência	Punção atuador	Constrange o escoamento de material
6	Sem influência	Constrange o escoamento de material	Constrange o escoamento de material
7	Sem influência	Constrange o escoamento de material	Sem influência
8	Sem influência	Sem influência	Punção atuador
9	Sem influência	Sem influência	Constrange o escoamento de material

## 4 Desenvolvimento experimental

---

Neste capítulo, pretende-se apresentar todo o desenvolvimento experimental realizado com base na obtenção da ligação proposta. Este foi realizado em parceria com a área científica de Tecnologia Mecânica e Gestão Industrial e o Núcleo de Oficinas (NOF), ambos pertencentes ao Instituto Superior Técnico (IST).

Este capítulo encontra-se dividido em quatro subcapítulos. O **primeiro subcapítulo** diz respeito aos equipamentos usufruídos no decorrer do desenvolvimento experimental, essencialmente no que diz respeito a máquinas-ferramenta utilizadas. No **segundo subcapítulo** é abordada a ferramenta utilizada no decorrer das operações de deformação plástica, incluindo uma descrição de todos os componentes envolventes da mesma. O **terceiro subcapítulo** destina-se a descrever o procedimento experimental efetuado em cada fase do processo proposto, expondo assim a caracterização mecânica do material utilizado, a escolha do processo de corte utilizado e a manipulação da ferramenta utilizada para cada fase do processo. Por fim, no **quarto subcapítulo** é explicado o procedimento efetuado no ensaio destrutivo realizado na junta.

### 4.1 Equipamentos

De modo a realizar o processo proposto, é prevista uma necessidade de três conjuntos diferentes de equipamentos: um para realizar a primeira etapa de corte local sobre a chapa, outro para efetuar todas as operações de deformação plástica e ainda um terceiro equipamento para ensaiar destrutivamente a junta obtida. Para a primeira etapa, optou-se pelo uso da tecnologia de corte através de eletroerosão por fio, cuja máquina pertence ao Núcleo de Oficinas, Figura 4.1 a). A escolha para tal processo encontra-se justificada no Subcapítulo 4.3. Para as etapas de deformação plástica, foi utilizada uma prensa hidráulica pertencente ao Laboratório de Tecnologia Mecânica, Figura 4.1 b). Por fim, o ensaio destrutivo efetuado na junta foi realizado numa máquina de ensaios universal, presente no laboratório de Caracterização Mecânica de Materiais, Figura 4.1 c).

A eletroerosora por fio utilizada foi fabricada pela *Charmille* consiste no modelo *Robofil 190*. A sua área de trabalho encontra-se limitada a 200x200 mm com uma altura máxima de 200 mm, incorporada com um dielétrico composto por água desionizada (200L) e projetada para maquinar componentes compostos por materiais eletricamente condutores com um peso máximo de 100 kg. A prensa hidráulica foi fabricada pela INSTRON e consiste no modelo SATEC 1200. Esta apresenta uma capacidade máxima de 1200 KN e encontra-se incorporada com um software que permite realizar uma enorme diversidade de ensaios, tanto de movimento ascendente (ensaios de tração) como de movimento descendente (ensaios de compressão). A célula de carga da prensa permite medir a carga exercida no decorrer do ensaio a realizar, enquanto o transdutor de deslocamento mede o deslocamento vertical existente. De referir ainda a existência de diversos complementos existentes na prensa que permitem a correta fixação de uma enorme variedade de ferramentas, sendo assim uma prensa bastante acessível e adaptável a um espetro elevado de ensaios a realizar.

Por fim, A máquina de ensaios universal utilizada foi fabricada também pela INSTRON e consiste no modelo 4507. Esta possui um limite de carga em cerca de 200 KN e uma velocidade de atuação máxima de 500 mm/min, podendo ser utilizada em ensaios de tração, compressão e flexão.

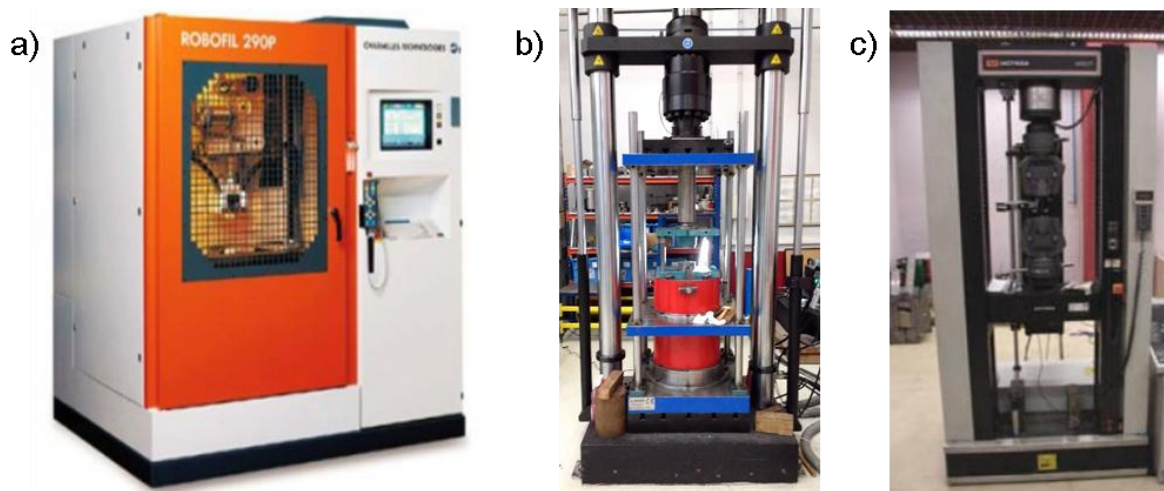


Figura 4.1 - Fotografias dos diferentes equipamentos utilizados no decorrer do procedimento experimental realizado: a) Eletroerosora por fio [49]; b) Prensa hidráulica; c) Máquina de ensaios universal [50].

## 4.2 Ferramenta

Tal como foi evidenciado anteriormente, é essencial o correto constrangimento dos elementos a deformar em diversas secções de modo a limitar o escoamento de material para um fluxo do mesmo pretendido, sendo um dos requisitos essenciais na realização de métodos associados a DPCM, Capítulo 2. Foi então necessário proceder ao fabrico de uma ferramenta idealizada para realizar o processo pretendido nas suas fases de quinagem e forjamento. Esta ferramenta foi projetada de forma a que cumprisse os seguintes requisitos:

1. Constituição do menor número de componentes possível, de modo a que possa ser mais facilmente manipulada e sem causar entropia no processo;
2. Componentes geometricamente simples, facilitando o seu fabrico;
3. Escolha de um material mecanicamente rígido, garantindo assim que este poderá constranger e deformar as chapas de forma eficaz, ou seja, sem que tal resulte qualquer dano aos componentes constituintes da ferramenta;
4. Montagem entre componentes da ferramenta que permita atribuir alguma diversidade ao processo, isto é, que permita realizá-lo com diferentes parâmetros geométricos;
5. Sistema de fixação mecânico seguro, ou seja, que permita o uso de componentes mecânicos como por exemplo parafusos de modo a fixar corretamente os componentes a deformar e reduzir eventuais folgas na montagem que possam surgir tanto de pequenos erros de fabrico, como de algum eventual desgaste a que as ferramentas possam ter sido sujeitas.

Uma visualização tridimensional dos componentes base da ferramenta pode ser inspecionada, Figura 4.2. Os componentes da ferramenta destacados na Figura 4.2 estão presentes em todos os ensaios

realizados, independentemente da operação decorrente, estando no entanto sujeitas a alterações geométricas consoante o ensaio a realizar, como será demonstrado mais adiante. Ambas as Laterais são fixadas através de parafusos M12, o que permite uma força de aperto considerável que auxilia a fixação do Encostador em ambas as laterais através de parafusos M8. O encostador apresenta uma cavidade centrada com uma largura de 10 mm e um comprimento de 50 mm, dentro da qual será inserido o punção atuador com uma área transversal retangular. Este comprimento foi projetado de forma a aumentar a aplicabilidade do Encostador, estando assim adaptado a diversas dimensões transversais do punção. Quando se pretende usar um punção que apresente um comprimento inferior a 50 mm, é possível introduzir os nominados Calços Guiadores no interior da cavidade do Encostador (as suas faces de topo e base ficam totalmente alinhadas com as respetivas faces do Encostador) de comprimento variável, dependente das dimensões transversais do punção e da localização onde este será atuado. Tais calços possuem um furo roscado centrado que permite a sua fixação ao Encostador através de um parafuso M8 para cada. A grande vantagem no uso destes calços consiste na falta de necessidade de um sistema de manipulação do punção, uma vez que este vai totalmente guiado pelos calços, sendo apenas necessário inserir o punção no interior da cavidade do Encostador de forma a que este possa posteriormente ser exercido diretamente pela prensa. Restam ainda os Calços Base, que têm como função limitar a área de trabalho para o pretendido e ainda manter uma distância entre ambos constante facilitando a fixação entre ambas as Laterais e o Encostador. Estes apresentam a função de alinhar ambas as laterais para que, quando os 3 componentes se encontram totalmente encostados, seja facilitado o aperto do Encostador em ambas as laterais. Todos os componentes desenvolvidos para realizar o procedimento experimental do processo foram fabricados em aço inoxidável AISI 430, sendo este um aço bastante resistente, podendo assim deformar e constringer as chapas ensaiadas com facilidade, minimizando o seu futuro desgaste. É também um material altamente resistente a fenómenos de corrosão, garantido o seu correto funcionamento em elevados períodos temporais.

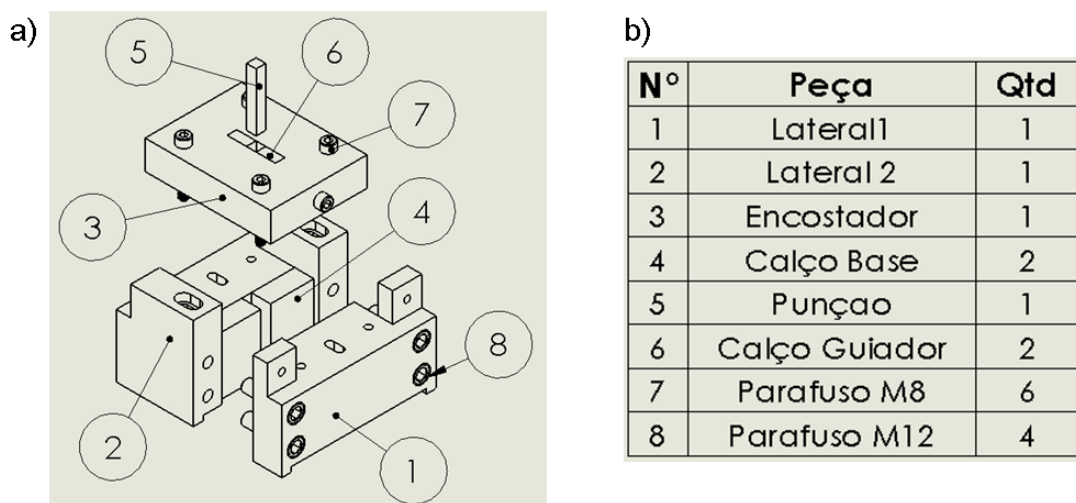


Figura 4.2 - Representação esquemática do conjunto da ferramenta utilizada nas operações de deformação plástica realizadas: a) Vista tridimensional; b) Nomenclatura optada para os componentes da ferramenta representados.

### 4.3 Procedimento experimental

Embora cada operação realizada necessite apenas de dois Calços Guiadores e um punção, estes podem variar consoante as dimensões finais da junta que se pretende obter e também consoante a operação a realizar. Por exemplo, um punção típico de forjamento (em que ambas as faces de topo e base apresentam a mesma área transversal e são paralelas entre si) dificilmente realizaria uma operação de quinagem por flange com cunho de arraste, visto que o seu canto vivo deformaria em excesso o material. Para tal operação, é característico o uso de um punção com um *fillet* de determinado raio, que por sua vez também não é convencionalmente utilizado em operações de forjamento.

Neste subcapítulo pretende-se apresentar todo o procedimento experimental realizado, complementando os subcapítulos anteriores com uma descrição mais detalhada da manipulação da ferramenta e das chapas referida. Começando pela obtenção da junta proposta, o plano de Ensaio correspondente encontra-se representado na Tabela 4.1 baseado nos parâmetros apresentados no modelo teórico desenvolvido, bem como sua localização gráfica, Figura 4.3, de acordo com a representação esquemática seguida para representar aplicabilidade do processo apresentada no Capítulo anterior.

Embora tenham sido inseridos pontos no gráfico da Figura 4.3 aos quais correspondem espessuras de chapa que não foram consideradas quando efetuado o desenvolvimento da aplicabilidade do processo, Capítulo 3, assumiu-se neste gráfico que as diferentes regiões de aplicabilidade se mantêm constantes, sendo que tal assunção se encontra devidamente explorada no seguinte Capítulo. De referir ainda que é novamente designada a chapa 1 como sendo a chapa sujeite ao primeiro forjamento, sendo a chapa 2 a última a ser forjada.

Tabela 4.1 – Plano de ensaios experimentais realizado.

Nº Ensaio	$t_1$ [mm]	$t_2$ [mm]	H [mm]	c [mm]	L [mm]
1	5	5	10	5	15
2	2.5	2.5	5	2.5	7.5
3	5	2.5	7.5	2.5	10



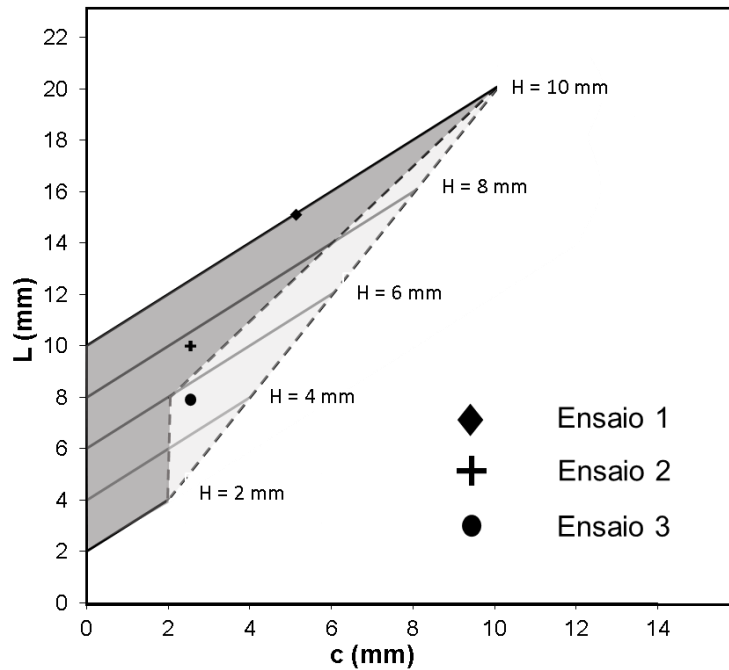


Figura 4.3– Localização gráfica dos ensaios realizados por via experimental.

Todo o procedimento experimental apresentado foi efetuado em chapas de alumínio EN AW 5754 H111. As pré-formas consistem em chapas de dimensões 50x100 mm com uma espessura de 5 mm. O uso deste material não foi escolhido ao acaso, uma vez que a validação do processo em ligas metálicas leves encontra-se coerente com a tendência atual nas mais diversas indústrias de encontrar alternativas a ligas de aço convencionalmente utilizadas até à data que permitam reduzir o peso desnecessário do produto final.

A caracterização mecânica do material foi previamente realizada a partir de ensaios de tração e compressão de discos empilhados [49]. Os ensaios de tração foram realizados em provetes compostos por três distintas orientações relativamente à direção de laminagem da chapa providenciada (0°, 45° e 90°), enquanto o ensaio de compressão de discos empilhados foi realizado empilhando três discos idênticos com um diâmetro de 15 mm. Os resultados dos ensaios, Figura 4.4, permitem obter uma equação característica do comportamento do material quando sujeito a determinada extensão plástica, no formato de uma equação de *Ludwik-Hollomon*:

$$\sigma = 325 \varepsilon^{0.18} (\text{MPa}) \quad (4.3)$$

Os resultados obtidos nos métodos de caracterização do material permitem concluir ainda que este apresenta boas propriedades homogêneas e isotrópicas, uma vez que os testes realizados apresentaram resultados similares independentemente da direção de laminagem da chapa.

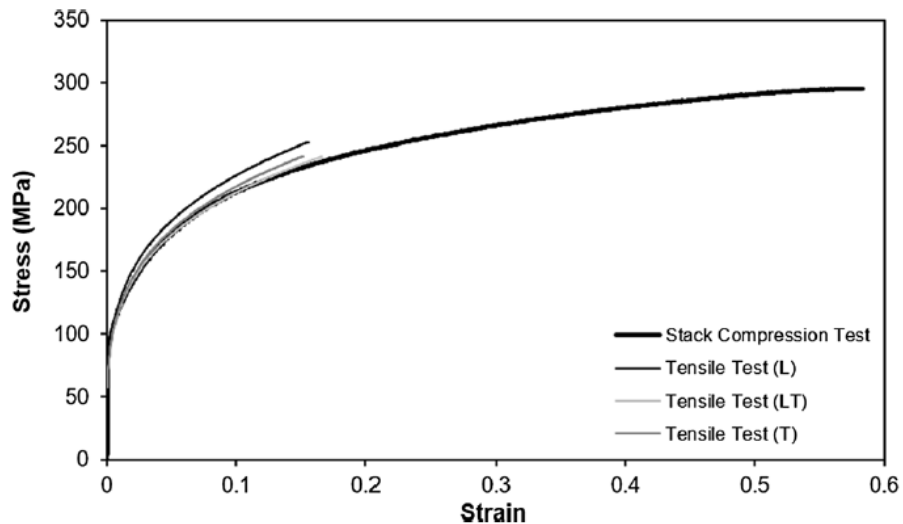


Figura 4.4– Evolução tensão-extensão para os ensaios realizados no material a caracterizar[43]

#### 4.3.1 Processos de corte

Tal como foi discutido no início do presente Capítulo, foi utilizado o processo de eletroerosão por fio de modo a obter o percurso pré-estabelecido descrito anteriormente. Este processo permite obter percursos rigorosos a nível geométrico com uma produtividade elevada uma vez que, para percursos erodidos de idêntica geometria, o processo pode realizar a erosão pretendida em diversas chapas simultaneamente e de forma automatizada, Figura 4.5. Esta operação de corte tem a desvantagem significativa de se limitar apenas a materiais que possuam uma condutividade elétrica elevada, sendo por isso impraticável em determinadas famílias de materiais, como por exemplo polímeros ou compósitos não-metálicos. De modo a responder a tal limitação, uma alternativa ao processo de corte utilizado trata-se da tecnologia de corte por jato de água, Figura 4.5. Atualmente, este processo permite obter cortes precisos para uma elevada gama de materiais, incluindo ligas metálicas [50].

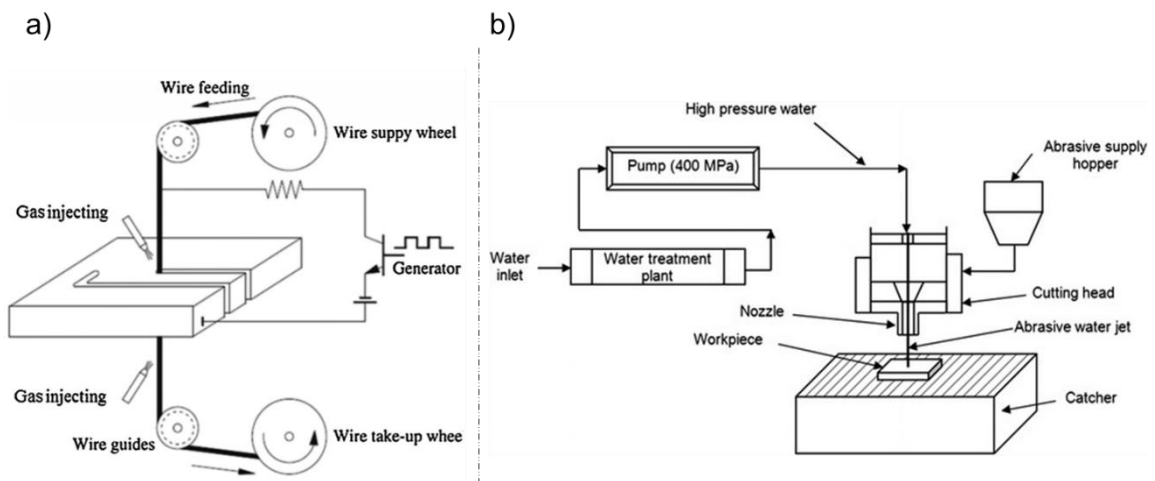


Figura 4.5 - Diagrama esquemático dos processos de corte utilizáveis no processo: a) Eletroerosão por fio [51]; b) Corte por jato de água [52]

Ambos os processos abordados, sabendo que se tratam de processos remoção de material, põem em causa a conservação de volume do processo proposto. Relativamente ao processo de corte

utilizado, embora o fio erosor apresente dimensões muito reduzidas, com um diâmetro constante de 0.3 mm, o material removido cria uma folga tanto no sentido da largura como do comprimento da secção da chapa limitada pelo percurso erodido. Tais folgas reduzem a secção volúmica a deformar, Figura 4.6, pondo em causa a condição de deformação plana do processo, visto que o material pode então escoar ligeiramente para as folgas existentes no sentido da largura. Esta evidência, apesar de não comprometer o realizar do processo experimentalmente, pode causar alguma divergência de resultados experimentais com numéricos, Capítulo 5.

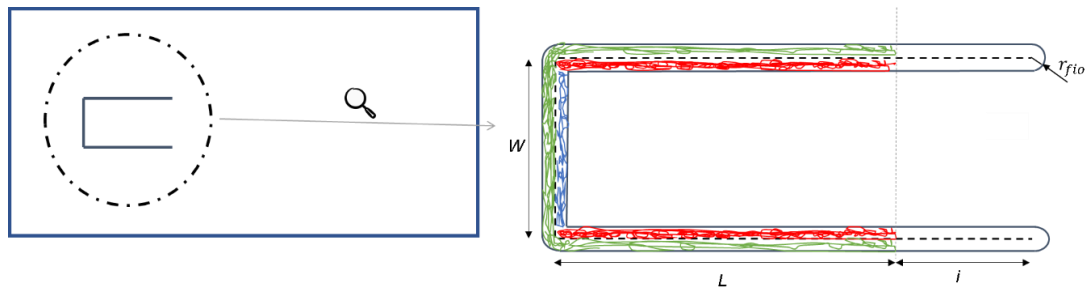


Figura 4.6– Representação esquemática da perda de volume existente após o corte realizado na chapa por Eletroerosão por fio mediante a parametrização geométrica realizada.

A perda de volume encontra-se então dependente dos parâmetros geométricos estabelecidos pelo modelo teórico anteriormente proposto, podendo ser calculada pela seguinte equação:

$$Perda\ Volume = \left( 2 \times L + (W - 2 \times r_{fio}) + \left( 2 \times L + W + \frac{\pi}{2} \times r_{fio} \right) \right) \times t \times r_{fio} \quad (4.2)$$

Existe no entanto um outro processo capaz de responder à perda de volume prevista. Trata-se de uma variante da tecnologia de corte por arrombamento denominada por *Lancing*. Esta operação realiza um corte parcial da chapa num formato idêntico ao percurso pré-estabelecido existente no processo proposto de forma progressiva, quinando a chapa ligeiramente com uma enorme diversidade de formatos passíveis de alcançar, Figura 4.7. Assim sendo, idealmente seria possível realizar não só a abertura do percurso sem qualquer perda de volume, como também a operação de quinagem pretendida em simultâneo.

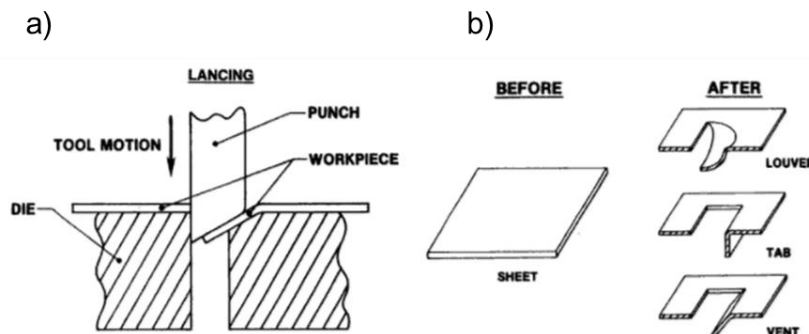


Figura 4.7 – Representação esquemática do processo de arrombamento por Lancing [53]: a) Componentes utilizados no processo; b) Chapa antes e após a operação mediante diversas configurações

Esta operação, embora aparente ser bastante promissora quando analisado o seu efeito na produtividade geral do processo proposto (visto que realiza as duas primeiras fases do processo em simultâneo numa única operação), foi desconsiderada no caso em estudo, uma vez que, de modo a garantir sua correta aplicação, seria necessário um estudo muito rigoroso essencialmente no que diz respeito às dimensões do punção a utilizar e o seu modo de corte e deformação nas chapas atuadas, bem como provar a sua correta utilização em chapas mais espessas. Uma vez que o objetivo principal da presente dissertação passa por provar e entender o processo proposto, o corte do percurso pré-estabelecido através da eletroerosão por fio torna-se bastante acessível com a finalidade do mesmo ser atingido e o realizar da quinagem por flange com cunho de arraste com a atuação de um punção de formato simples permite compreender com maior detalhe o desenrolar e resultado final desta etapa do processo.

#### 4.3.2 Quinagem

Para realizar a quinagem por flange com cunho de arraste, a ferramenta foi montada para tal, Figura 4.8. A chapa a quinar deve ser introduzida com precaução, garantindo um alinhamento preciso entre a cavidade centrada do encostador e o percurso pré-erodido da mesma chapa. Relativamente ao componente atuante, optou-se pelo uso de um punção com um *fillet* de raio equivalente à espessura da chapa, visto que se trata de um punção de formato simples e de atuação eficaz [54]. A isto se deve o facto do punção, desta forma, atuar progressivamente sobre a chapa no decorrer da operação, fazendo com que esta deforme também de forma progressiva e evite criação de fendas que podem levar a que o material eventualmente fracture na zona dobrada. É recomendada ainda a existência de uma folga entre o punção e a matriz inferior com um comprimento semelhante à espessura da própria chapa. Assim é possível garantir que a espessura da chapa quinada se mantenha aproximadamente constante e nunca superior à sua espessura inicial [54].

Nesta etapa, a existência do parâmetro  $i$  é essencial, uma vez que garante a ausência de concentração de tensões no limite do percurso previamente erodido. Quantitativamente, este parâmetro foi assumido como igual à espessura da chapa que se pretende quinar, permitindo assim que a zona limite do percurso erodido se mantenha indeformada como é pretendido.

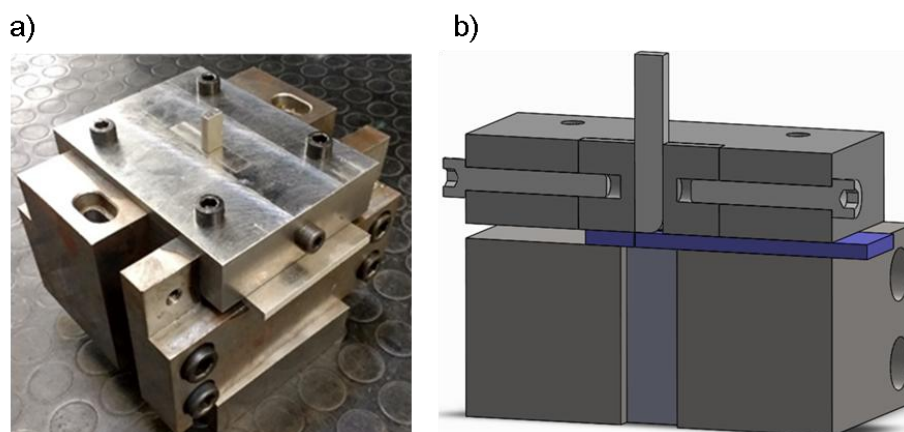


Figura 4.8 - Visualização da estrutura completa da ferramenta para o realizar da operação de quinagem proposta: a) Fotografia tridimensional; b) Vista esquemática tridimensional cortada no centro.

Em todos os ensaios efetuados, a quinagem foi realizada de modo a que a face lateral do punção coincidente ao comprimento da aba quinada da chapa percorra toda a sua superfície de contacto. Para tal, é necessária uma previsão do comprimento da aba da chapa resultante da sua quinagem. Este diverge daquele apresentado no modelo teórico, Capítulo 3, uma vez que, sendo prevista a existência do raio exterior na dobra da chapa, este comprimento  $h_r$  será superior na realidade do que o apresentado na modelação teórica do processo  $h$ , Figura 4.9. No entanto, o realizar da quinagem em canto vivo faz com que o arco exterior observado na dobra da chapa apresente um formato algo complexo, complicando a previsão da altura da aba resultante, tanto numérica como analiticamente. Também não se torna possível terminar a operação assim que o punção percorra a distância pré-estabelecida, uma vez que a ferramenta utilizada não permite uma visualização do progresso da operação, podendo correr o risco da operação ser terminada antes desta estar totalmente finalizada.

De modo a obter uma boa previsão da distância a percorrer pelo punção, foi considerado um novo modelo para a deformação da chapa após a etapa de quinagem, Figura 4.9 c), que, embora seja totalmente irrealista (visto que assume um reposicionamento total da secção da chapa a deformar, limitada pelo parâmetro  $L$ , de uma posição inicial horizontal para uma posição final vertical), apresenta um comprimento quinado máximo que nunca será atingido,  $h_{max}$ . Este comprimento, por conservação de volume, é similar ao parâmetro  $L$ , admitindo que toda a espessura da chapa após deformação se mantém constante. No realizar de todas as operações, optou-se então por atribuir uma variação de deslocamento do punção  $\Delta d$  através da seguinte igualdade:

$$\Delta d = L + t \quad (4.3)$$

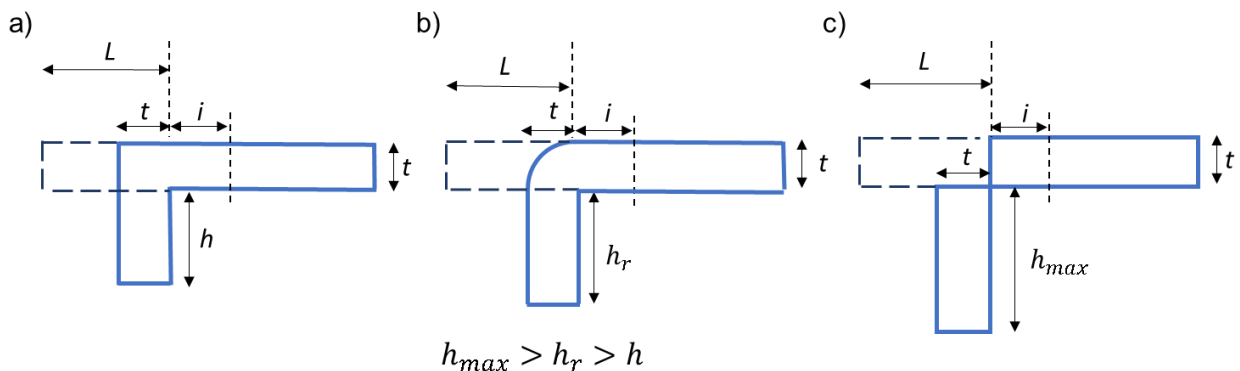


Figura 4.9– Modelos de deformação considerados para a fase de quinagem: a) Modelo teórico; b) Modelo realista; c) Modelo de comprimento quinado máximo.

Deste modo, é totalmente garantido que o punção percorra toda a superfície da chapa deformada. O realizar da quinagem desta forma permite garantir que o comprimento quinado fique aproximadamente perpendicular à superfície da chapa indeformada, auxiliando na redução da recuperação elástica da mesma após finalizada a quinagem e garantido também que toda a espessura da aba quinada se mantém igual ou menor à espessura inicial da chapa.

As ferramentas variáveis, anteriormente referidas, encontram-se apresentadas na Tabela 4.2 (punção) e na Tabela 4.4 (Calços Guiadores), onde é possível consultar as suas dimensões para cada ensaio realizado. Relativamente ao punção, é necessário lembrar que existe um limite para o

seu comprimento  $L_p$ , uma vez que a quinagem é efetuada de forma localizada numa secção centrada da chapa, daí que este comprimento se encontra limitado consoante as seguintes equações:

$$L_p \leq L - t_1 = c + t_2 \quad (4.4)$$

$$L_p \leq L - t_2 = c + t_1 \quad (4.5)$$

A equação (4.4) apresenta o limite mínimo do comprimento do punção para a quinagem da chapa 1, enquanto a equação (4.5) assume o mesmo propósito para a chapa 2. Se as equações não se verificarem para cada uma das operações de quinagem, estas não estarão a ser realizadas corretamente, correndo o risco de quinar uma zona de material que não deveria sofrer qualquer deformação ou de não estar a ser respeitada a folga entre o punção e a matriz inferior (folga equivalente à espessura da chapa a quinar). A sua altura (parâmetro  $A$ ) foi projetada a partir da soma entre a distância prevista que o punção percorre (equação 4.3) com a espessura do encostador (30 mm), adicionando ainda alguma altura extra de modo a que o punção realize toda à fase de quinagem num único movimento descendente.

Tabela 4.2 – Dimensões do punção para cada ensaio experimental - Fase de Quinagem.

Ensaio	Punção				Imagem representativa
	A [mm]	$L_p$ [mm]	R [mm]	W [mm]	
1	60	10	5	10	<p>Diagrama de um punção cilíndrico com dimensões A (altura), W (largura da base), <math>L_p</math> (comprimento) e R (raio de arredondamento na base).</p>
2	40	5	2.5		
3 – chapa 1	40	5	5		
3 – chapa 2	40	5	2.5		

Tabela 4.3 – Dimensões dos calços Guiadores para cada ensaio experimental – Fase de Quinagem.

Ensaio	Calço Guiador				Imagem representativa
	$L_c$ – Calço 1 [mm]	$L_c$ – Calço 2 [mm]	W [mm]	A [mm]	
1	20	20	10	30	
2	27.5	17.5			
3 – chapa 1	25	20			
3 – chapa 2	27.5	17.5			

Após finalizada a quinagem de uma das chapas de cada ensaio, procede-se à desmontagem da ferramenta, retirando a chapa quinada como estipulado e é realizada de seguida a quinagem da 2ª chapa seguindo precisamente a metodologia adotada na operação anterior, com exceção no ensaio 3, onde é necessário proceder à troca de algumas ferramentas, como pode ser consultado nas Tabelas 4.2 e 4.3, uma vez que neste ensaio se pretende provar o processo para a união de chapas de diferente espessura, variando as dimensões Punção e consequentemente as dimensões dos Calços Guiadores.

#### 4.3.3 1º Forjamento

De modo a realizar o forjamento da 1ª chapa, foi seguida a montagem apresentada na Figura 4.10 a). Nesta fase surge a aplicação de um componente inserido entre os Calços-Base, cuja sua aplicabilidade se insere apenas nesta fase do processo. A este componente foi atribuído o nome de Punção-Base, Figura 4.10 b), tendo como propósito constranger o escoamento de material enformado nesta etapa do processo, garantindo que no seu final, todo o material enformado da 1ª chapa se assente no interior da 2ª chapa. A peça apresenta um formato algo complexo a nível geométrico na zona que assenta sob as chapas, sendo que tais detalhes estão inteiramente dependentes dos parâmetros geométricos considerados no modelo teórico do processo.

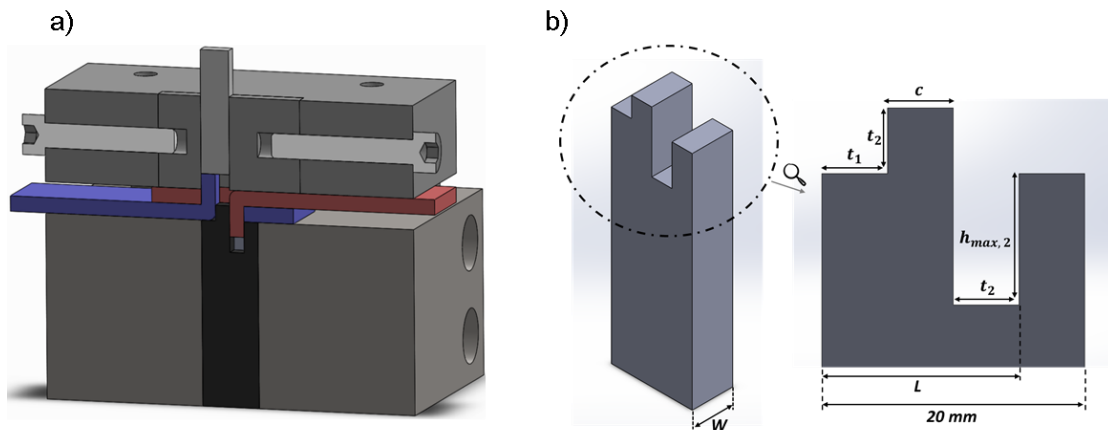


Figura 4.10– Representação esquemática estrutura completa da ferramenta para o realizar da primeira operação de forjamento proposta: a) Vista esquemática tridimensional cortada no centro; b) Parametrização do componente Punção-Base consoante os parâmetros geométricos estabelecidos (unidades em milímetros).

Tal como na quinagem, o punção e os Calços Guiadores utilizados continuam a ser uma variável a considerar, novamente dependentes das propriedades geométricas da junta. As ferramentas optadas para esta fase e para cada ensaio encontram-se representados nas Tabelas 4.4 (punção) e 4.5 (Calços Guiadores). Relativamente aos punções, a sua altura foi projetada considerando um limite mínimo de 30 mm que diz respeito à espessura do Encostador, mas também foi desejável não projetar punções com uma altura muito excessiva de modo a evitar que estes instabilizassem no decorrer das operações. Para o seu comprimento  $L_p$ , é determinado com a seguinte equação:

$$L_p = c + t_1 \quad (4.6)$$

Esta equação diverge das equações (4.4) e (4.5) visto que, enquanto nas anteriores é atribuído um limite máximo para o comprimento do punção, para esta fase é essencial garantir a igualdade entre variáveis demonstrada na equação (4.6) de modo a que o forjamento seja bem realizado e com o mínimo de folgas ente o punção e os Calços Guiadores.

Tabela 4.4 - Dimensões do punção para cada ensaio experimental – Primeira Fase de forjamento.

Ensaio	Punção			Imagem representativa
	$L_p$ [mm]	A [mm]	W [mm]	
1	10	35	10	
2	5			
3	7.5			



Tabela 4.5 - Dimensões dos Calços Guiadores para cada ensaio experimental – Primeira Fase de forjamento.

Ensaio	Calço Guiador				Imagem representativa
	$L_c$ – Calço 1 [mm]	$L_c$ – Calço 2 [mm]	A [mm]	W [mm]	
1	15	25	30	10	
2	20				
3	17.5				

A primeira fase de forjamento termina assim que a superfície de contacto do punção com a chapa 1 se encontre alinhada com a superfície de topo da chapa superior (chapa 2), sendo necessário proceder à desmontagem da ferramenta para realizar a ultima fase de forjamento.

#### 4.3.4 2º Forjamento

Comparando com as fases anterior, esta etapa é a fase mais simples de realizar, uma vez que para os casos do ensaio 1 e 2, as ferramentas variáveis (punção e Calços Guiadores) mantêm-se idênticas. Para montar a ferramenta, basta inverter o produto final da fase anterior, ficando na zona superior a aba quinada da chapa 2. Este é então facilmente encaixado no interior da cavidade do Encostador, garantido que se encontra totalmente encostado a um dos calços (neste caso, o Calço 1), Figura 4.11. Como está a ser forjada a segunda chapa, a equação (4.6) altera-se nesta fase para a seguinte relação:

$$L_p = c + t_2 \quad (4.7)$$

Para o caso do ensaio 3, como é alterada a espessura da chapa a forjar, o punção é necessariamente diferente, equação (4.7), e conseqüentemente também os calços, Tabela 4.7 (Punção) e Tabela 4.8 (Calços Guiadores). Nesta etapa, o componente Punção-Base não é aplicado, sendo o forjamento realizado sobre um dos Calços-Base utilizados, Figura 4.11. Como pode ser visto, a secção deformada da chapa no primeiro forjamento desempenha as funções de constrangimento apresentadas pelo Punção-Base na fase de forjamento anterior. Esta fase é então fisicamente idêntica à fase anterior, finalizando assim que a superfície de contacto do punção com a chapa 2 se encontre alinhada com a superfície superior da chapa 1.

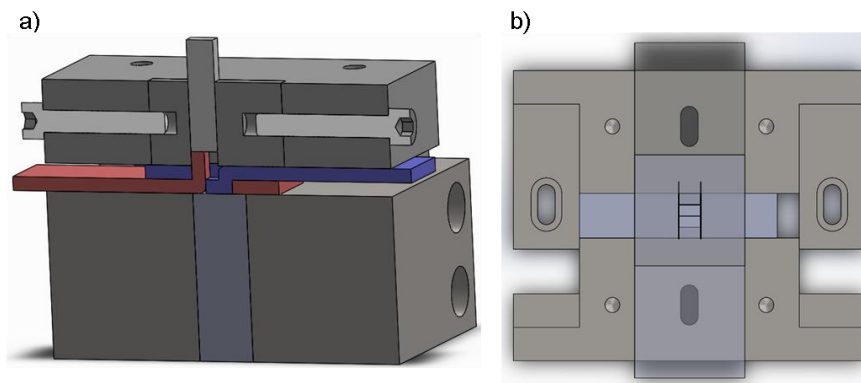


Figura 4.11 -Representação esquemática da estrutura completa da ferramenta para o realizar da segunda operação de forjamento proposta: a) Vista tridimensional cortada; b) Vista de topo com a exclusão dos componentes Encostador, Calços Guiadores e Punção.

Tabela 4.6 - Dimensões do punção para cada ensaio experimental – Segunda Fase de forjamento.

Ensaio	Punção			Imagem representativa
	$L_p$ [mm]	A [mm]	W [mm]	
1	10	35	10	
2	5			
3	5			

Tabela 4.7 - Dimensões dos Calços Guiadores para cada ensaio experimental – Segunda Fase de forjamento.

Ensaio	Calço Guiador				Imagem representativa
	$L_c$ – Calço 1 [mm]	$L_c$ – Calço 2 [mm]	A [mm]	W [mm]	
1	15	25	30	10	
2	20				
3	20				

## 4.4 Ensaio destrutivo

De modo a finalizar o procedimento experimental realizado, resta avaliar a junta obtida pelo processo proposto relativamente à sua resistência mecânica. Para tal, é necessária uma enorme diversidade de ensaios destrutivos à mesma, onde o objetivo dos mesmos passa por submeter a junta a uma elevada variedade de carregamentos conforme diferentes direções, com variações nas propriedades geométricas da junta e também nos materiais presentes na mesma, carregamentos esses que podem ser estáticos ou de carga variável (esforços de fadiga).

No caso em estudo, optou-se por realizar apenas um tipo de ensaio, denominado por *lap-shear tension test*, onde a junta obtida é submetida a uma carga de tração uniaxial exercida por uma ferramenta fixa numa extremidade da junta com velocidade constante, fixando a extremidade oposta. Uma vez que se pretende garantir a ausência de quaisquer esforços por flexão no decorrer dos testes, inserem-se duas chapas, uma em cada extremidade da junta obtida, de modo a que o carregamento efetuado no decorrer do ensaio seja totalmente uniaxial relativamente à junta, evitando assim qualquer desalinhamento da carga exercida, Figura 4.12. Tal como nos ensaios anteriores, a carga exercida pelos grampos da máquina de ensaios sobre a junta em função do seu deslocamento é extrapolada, obtendo a evolução da força exercida e o seu valor máximo. Este tipo de ensaios destrutivos, embora sejam bastante utilizados em juntas adesivas, também podem ser considerados para ligações pontuais entre chapas de modo a entender o seu comportamento quando submetidas a esforços de corte [26]. A nível visual, pretende-se ainda entender o modo de falha da junta de modo a evidenciar a sua secção crítica para este tipo de carregamento.

Pretende-se a realização do ensaio à temperatura ambiente e a uma velocidade constante de 1 mm/min. O software incorporado na máquina permite um reconhecimento da carga máxima atingida, terminando automaticamente o ensaio a realizar assim que esta seja alcançada.

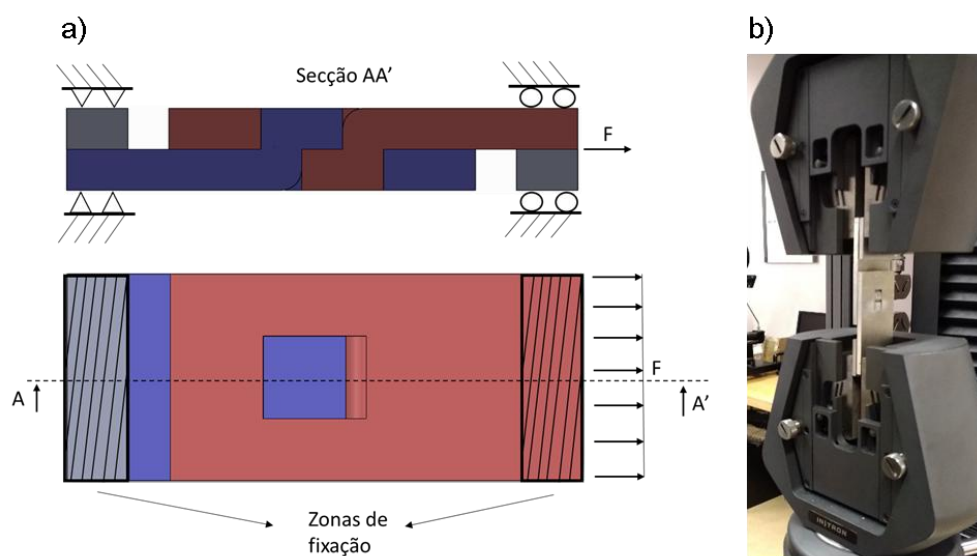


Figura 4.12 - Representação do ensaio destrutivo a realizar: a) Representação esquemática (Vista de corte centrado e de topo); b) Fotografia retirada à configuração inicial do ensaio destrutivo realizado

## 5 Resultados e Discussão

Neste capítulo, encontram-se apresentados os resultados obtidos a partir do desenvolvimento experimental e numérico realizados, bem como uma discussão dos mesmos.

Este encontra-se subdividido em três diferentes subcapítulos. No **primeiro subcapítulo** encontram-se apresentados as ligações obtidas por via experimental, bem como uma finalização relativamente à aplicabilidade do processo proposto. No **segundo subcapítulo** é abordada a comparação entre resultados numéricos e experimentais obtidos mediante as diferentes fases do processo. Por fim, no **terceiro subcapítulo** são expostos os resultados obtidos pelo ensaio destrutivo realizado na junta obtida pelo processo proposto.

### 5.1 Juntas obtidas

Ao realizar todo o processo experimental evidenciado no Capítulo anterior, foi possível obter três ligações mecânicas com sucesso, Figura 5.1 a) – c). Observa-se, no entanto, alguma ausência de volume na secção correspondente ao *interlocking* mecânico alcançado, atingindo a conclusão que a perda de volume evidenciada no processo de corte utilizado é notável a nível visual, concluindo também que a folga existente no sentido da largura foi totalmente preenchida pelo fluxo de material presente nas operações de forjamento realizadas, Figura 5.1 d). No entanto, todas as ligações mecânicas efetuadas permitiram uma fixação total das suas chapas constituintes mesmo tendo em conta este fator, garantindo a inexistência de qualquer folga que permita deslocamentos entre estas.

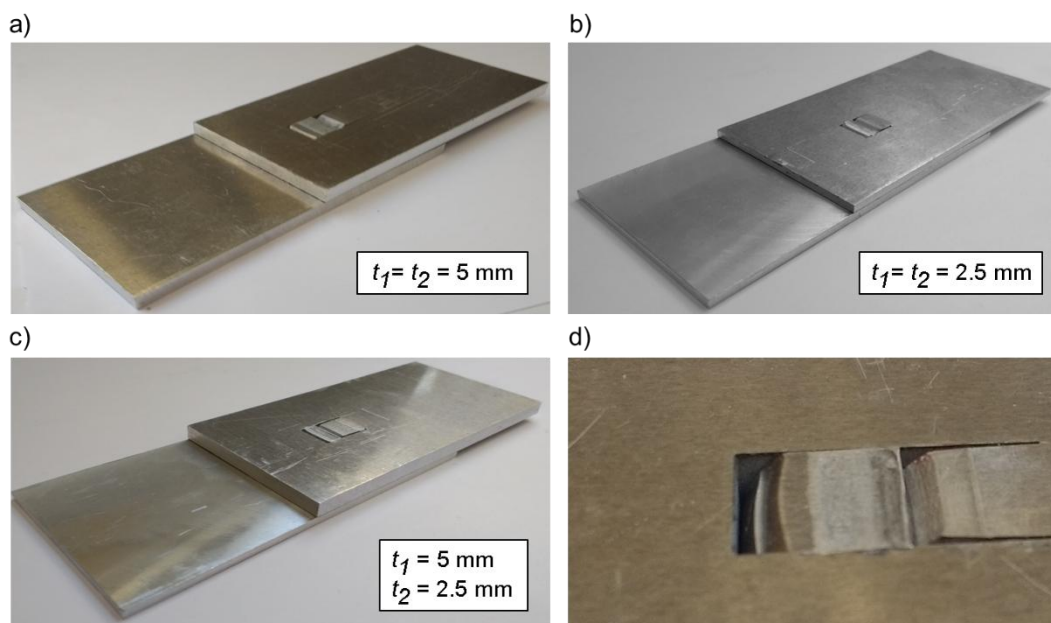


Figura 5.1 - Resultados experimentais obtidos mediante diferentes ensaios: a) Ensaio 1; b) Ensaio 2; c) Ensaio 3; d) Comprovação do preenchimento parcial da região de interlocking mecânico

### 5.1.1 Representação gráfica

Tal como foi representado no plano de ensaios, Capítulo 4, duas das ligações obtidas (Ensaio 2 –  $H = 5$  mm e Ensaio 3 –  $H = 7.5$  mm) encontram-se representadas graficamente deslocadas dos segmentos de reta considerados, uma vez que as suas espessuras totais das respetivas juntas  $H$  se encontram fora dos valores atribuídos a este parâmetro no Capítulo 3, embora estejam inseridas dentro do intervalo de  $H$  considerado ( $H \in [2; 10]$  mm). Assim sendo, é necessário apresentar uma nova representação gráfica com a inserção específica aos segmentos de reta correspondentes às espessuras totais das juntas obtidas experimentalmente, com a exceção para  $H = 2$  mm, de modo a evidenciar o limite mínimo considerado para tal parâmetro. No entanto, ao serem inseridas novas espessuras, o gráfico resultante das diferentes zonas de aplicabilidade, Figura 3.14, pode sofrer alterações, essencialmente no que diz respeito aos segmentos de reta que limitam a zona de transição. Assim sendo, procedeu-se a uma breve análise individual relativamente a cada segmento de reta considerado como limitação de tal zona de modo a entender se a inserção dos novos dados causa alguma alteração nas diferentes regiões identificadas.

Começando pelo segmento de reta **a**, é conhecido que este limite máximo existente resultou da pré-análise de sobreposição de material na etapa de forjamento para uma ligação onde se considerou chapas de espessura idêntica. Uma vez que tal pré-análise foi efetuada em cinco diferentes espessuras de modo a desvendar o valor máximo para o parâmetro  $c$  para cada espessura de chapa, a regressão linear obtida entre os pontos obtidos para cada sobreposição prevê-se que se mantenha válida para qualquer espessura, garantindo que certos requisitos como condições de fricção, material da chapa e o fator de sobreposição (fator  $K$ ) se mantenham inalterados. Para confirmar este raciocínio, foi realizada uma análise numérica idêntica à documentada no Capítulo 3 para as condições geométricas registadas na interseção do segmento de reta **a** com as retas representativas da junta para  $H = [5 ; 7,5]$  mm de modo a provar que tal limite se mantém linear e inalterado, Figura 5.2. Sendo esta análise efetuada a uma pressuposta ligação de chapas de igual espessura, as espessuras simuladas são então de 2,5 mm para  $H = 5$  mm e 3,75 mm para  $H = 7,5$  mm

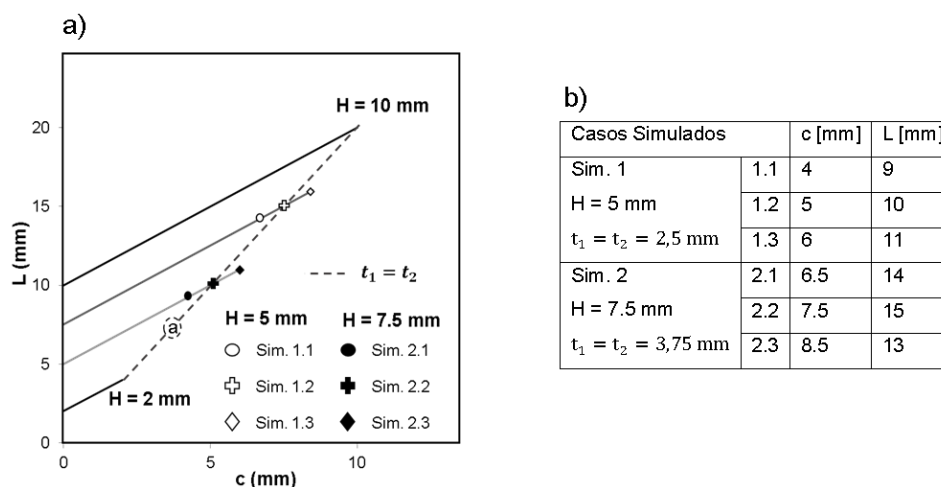


Figura 5.2– Comprovação por via numérica da inalteração dos limites desvendados anteriormente para as configurações de junta realizadas experimentalmente: a) Representação gráfica; b) Descrição pormenorizada dos parâmetros geométricos considerados para as simulações numéricas realizadas.

Os resultados obtidos, Figura 5.3, demonstram uma coerência muito elevada com verificados anteriormente, Capítulo 3. Relembrando que o parâmetro  $c$  foi variado em intervalos de 1 mm, as sobreposições obtidas apresentam valores de  $K$  muito semelhantes consoante a distância gráfica  $a$  que cada ensaio se situa relativamente ao segmento de reta  $a$ . Por exemplo, para ambas as juntas simuladas, os casos onde a folga é 1 mm menor que a prevista pelo limite anteriormente apresentado, Sim. 1.1 e 2.1, não é visível qualquer sobreposição de material, prevendo assim que o forjamento da chapa ocorra sem qualquer distúrbio. No entanto, para os casos coincidentes ao limite anteriormente apresentado, Sim. 1.2 e 2.2, o fator  $K$  apresenta valores de 0,14 e 0,13 respetivamente, concluindo que tais casos são considerados como limite para a folga  $c$  para a sua respetiva equação característica, visto que os casos seguintes, Sim 1.3 e 2.3, apresentam sobreposições muito avançadas e de todo indesejáveis,  $K = 0,6$  e  $0,54$  respetivamente. Conclui-se então que o segmento de reta  $a$  não sofre qualquer alteração gráfica quando introduzida uma chapa de espessura igual a 2,5 mm de modo a representar as equações características do processo para  $H = [5 ; 7,5]$  mm.

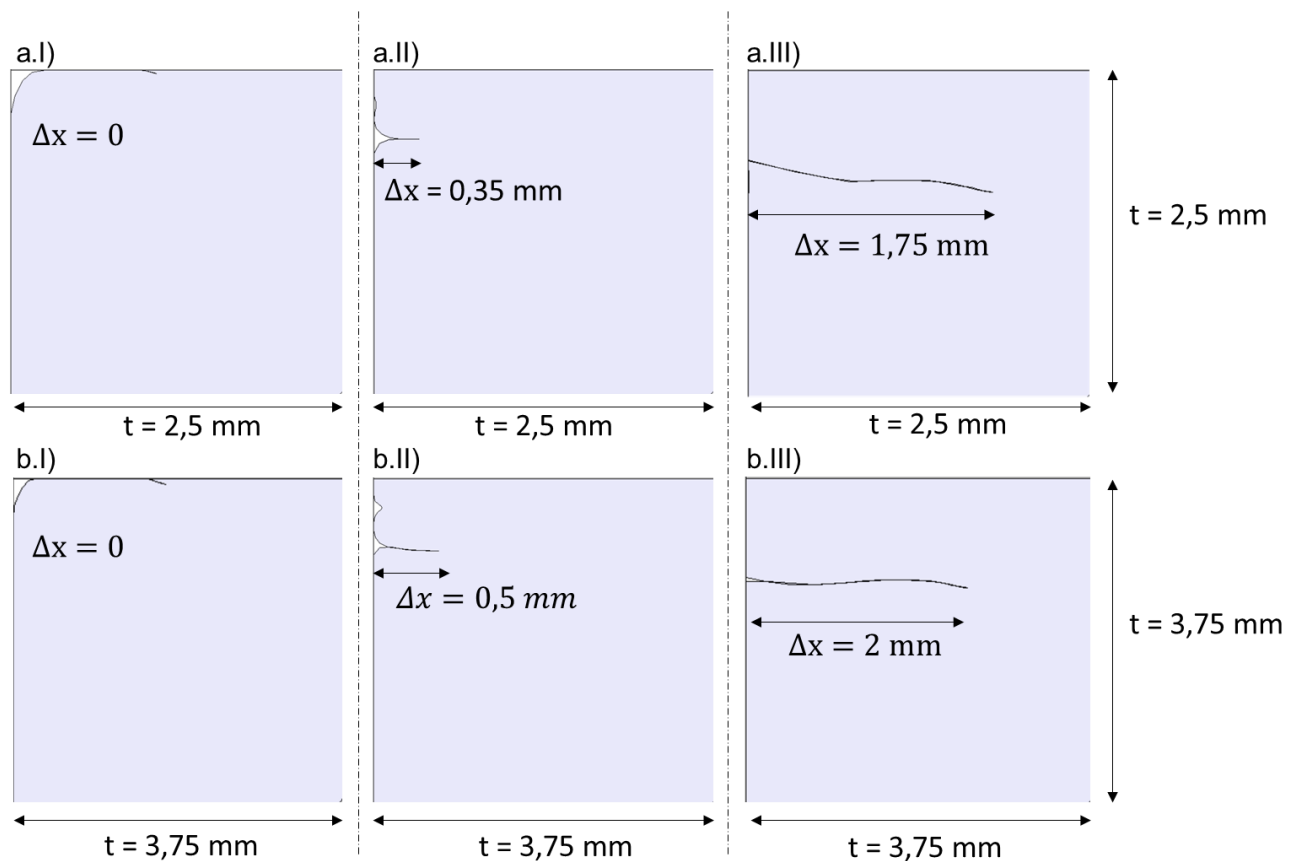


Figura 5.3 - Resultados numéricos obtidos relativamente à sobreposição de material: a)  $t = 2,5$  mm: a.I) Sim 1.1 –  $K = 0$  ; a.II) Sim 1.2 –  $K = 0,14$  ; a.III) Sim 1.3 –  $K = 0,7$  ; b)  $t = 3,75$  mm: b.I) Sim 2.1 –  $K = 0$  ; b.II) Sim 2.2 –  $K = 0,13$  ; b.III) Sim 2.3 –  $K = 0,53$

Para o segmento de reta  $b$ , também não será de esperar qualquer alteração, uma vez que tal limite se encontra correlacionado com a chapa de espessura menos espessa considerada na análise de aplicabilidade,  $t = 1$  mm. Para atingir uma espessura total de junta de 7,5 mm, seria necessário ligar a

chapa de 1 mm com outra de 6,5 mm. No entanto, esta segunda espessura encontra-se fora do espetro de espessuras considerado, significando que a espessura máxima alcançável da junta mantém-se  $H = 6$  mm, ou seja, a ligação com uma chapa de 5 mm, e consequentemente se mantem o limite representado pelo segmento de reta **b**.

Para o segmento de reta **c**, obtido através da união conservativa dos restantes limites apresentados, Capítulo 3, resta verificar se o limite existente na equação característica da junta de  $H = 7,5$  mm influencia o seu posicionamento. Sabendo que a única ligação possível para tal espessura total de junta se trata de uma chapa de espessura igual a 2,5 mm com outra de 5 mm, é conhecido que o limite para tal ligação estará relacionado com a primeira identificada, por se tratar da chapa menos espessa e assim mais suscetível a evidenciar fenómenos de sobreposição. O seu respetivo limite já foi, no entanto, identificado anteriormente, Figura 5.3, prevendo que este se situa para uma folga  $c = 5$  mm. Ao determinar graficamente o ponto de interseção entre tal folga e a equação característica para  $H = 7,5$  mm, confirma-se que este ponto se situa coincidente com o segmento de reta **c** previamente determinado, Figura 5.4, concluindo assim que o limite máximo para a mesma ligação se encontra perfeitamente representado, não influenciando a zona de trabalho seguro previamente identificada.

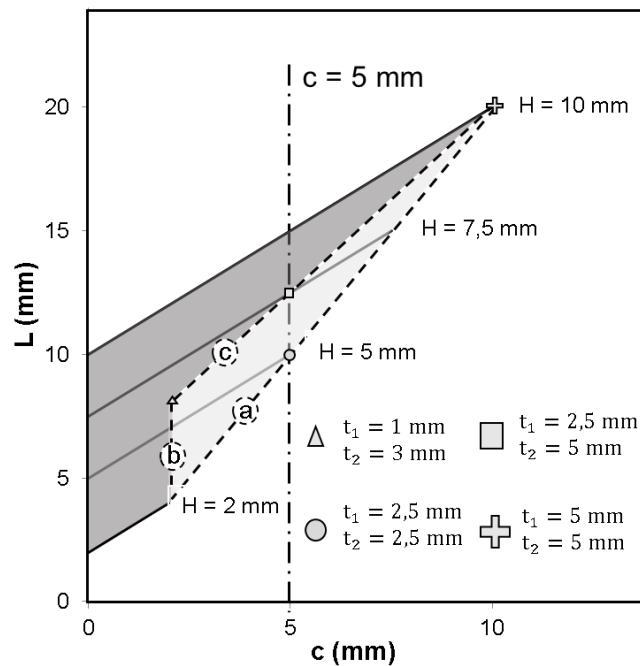


Figura 5.4 - Comprovação gráfica da inserção do limite para a junta com  $H = 5$  mm (Ensaio experimental 2) no segmento de reta **a** e do limite para a junta com  $H = 7,5$  mm (Ensaio experimental 3) no segmento de reta **c**.

Assim sendo, é possível afirmar que o gráfico de aplicabilidade do processo apresentado no Capítulo 3, Figura 3.14, não sofre qualquer alteração relativamente às diferentes Regiões identificadas ao serem inseridas as ligações obtidas experimentalmente, Figura 5.5, mantendo-se os diferentes segmentos de reta **a**, **b** e **c** totalmente idênticos. Também é notável a presença de uma ligação experimentalmente bem-sucedida, localizada no interior da Zona de Transição, evidenciando assim

que as ligações presentes nesta zona também podem ser corretamente realizadas sem qualquer falha espectável nas diferentes operações inerentes ao processo.

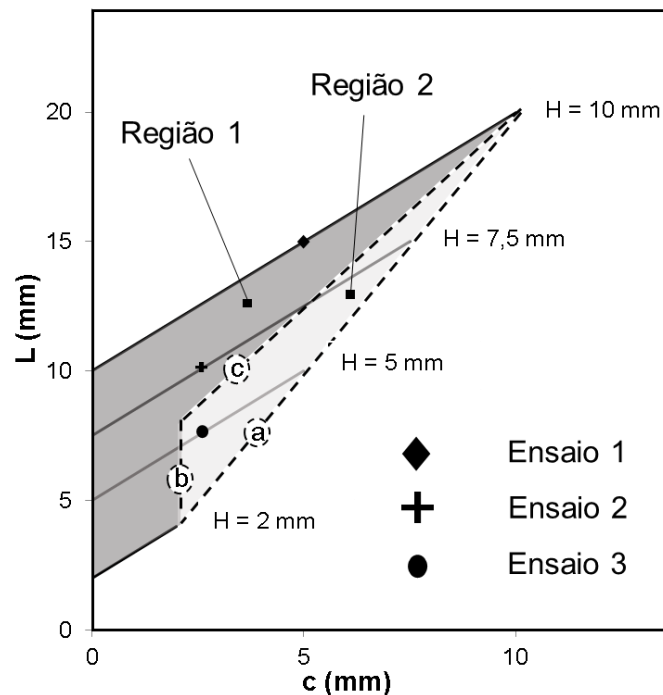


Figura 5.5– Gráfico de aplicabilidade final do processo proposto com introdução dos pontos respetivos aos ensaios experimentalmente realizados.

## 5.2 Fases do processo

Neste subcapítulo pretende-se apresentar os resultados obtidos por via experimental e numérica para cada fase do processo, usando a sua complementação para entender e discutir os diferentes aspetos adjacentes nas diferentes fases do processo. Para a sua estruturação, optou-se por apresentar as fases do processo consoante a sua ordem cronológica.

Para etapa de corte do percurso pré-estabelecido através da eletroerosão por fio, não existe qualquer registo significativo a apontar relativamente a parâmetros do processo. No entanto, como é de essencial importância obter uma perspetiva da perda de volume existente na chapa por remoção de material, foi realizada uma medição posterior ao corte, verificando as dimensões resultantes da secção a deformar de modo a conhecer os parâmetros geométricos a considerar na simulação numérica do processo. Tal como referido no Subcapítulo 3.3, notou-se um decréscimo de aproximadamente 0.2 mm em todos os comprimentos  $L$  dos provetes erodidos. Também para a largura  $W$ , considerada constante para todos os provetes, se verificou um decréscimo de 0.3 mm, resultando na realidade uma largura de 9.7 mm para todos os provetes ensaiados.

Após garantida uma secção da chapa cortada equivalente à pretendida através de uma rigorosa medição, seguem-se as operações de deformação plástica constituintes do processo. Todas estas foram realizadas com a atuação do respetivo punção a uma velocidade reduzida de 1 mm/min de modo a que a extrapolação de dados possa ser bastante precisa com um elevado número de pontos.



### 5.2.1 Quinagem

De todas as operações realizadas, a operação de quinagem foi a mais dificultada e exigente a nível de rigor experimental, uma vez que se encontra dependente de diversos aspetos, tais como:

1. Montagem do conjunto de ferramentas bastante rigorosa quando comparada com as outras fases do processo. Como foi descrito anteriormente, a restrita atuação do punção sobre a zona de material limitada pelo percurso previamente cortado é essencial de modo a que o material seja corretamente quinado;
2. Material das chapas. Uma operação de quinagem pode ser dificultada quando se pretende manipular materiais que apresentem uma ductilidade reduzida. Esse não foi o caso, uma vez que o material manipulado permite atingir extensões algo elevadas sem fraturar;
3. Geometria do percurso cortado. O comprimento do mesmo foi atribuído como parâmetro  $L$ , cuja distância se relaciona diretamente com o comprimento total da junta realizada. No entanto, verificou-se experimentalmente que o realizar da quinagem numa zona de material com um comprimento do percurso erodido dimensionalmente igual a  $L$  não pôde ser realizado corretamente, devido à elevada concentração de tensões existente no início e fim de tal percurso. Tais zonas, no decorrer do processo de quinagem, apresentam uma elevada tendência a crescimento de fendas na zona dobrada do material, ocorrendo uma fratura parcial do material visível no final dos ensaios, Figura 5.6 a). Embora não quebre totalmente, este acontecimento é de todo indesejável, podendo comprometer as propriedades mecânicas da junta. A introdução geométrica do parâmetro  $i$  serve então de folga, garantindo que as zonas de início e final do percurso erodido se mantenham indeformadas e que assim não ocorra nenhum crescimento de fendas. Ao ser atribuído um valor idêntico à espessura da chapa a quinar para tal parâmetro, foi possível realizar a operação de quinagem sem qualquer crescimento de fenda ou conseqüente fratura do material, Figura 5.6 b);
4. Quinagem em canto vivo. Embora algo desaconselhado, a quinagem em canto vivo foi realizada com sucesso. No entanto, pode causar problemas em materiais com comportamento mecânico pouco dúctil.

Também é notável a presença de alguma deformação no sentido da largura, embora numa região bastante reduzida, Figura 5.6 c). Esta evidência, embora não seja fisicamente influente na obtenção da junta, pode ser motivo de alguma discordância entre os métodos experimentais e numéricos, uma vez que neste último método foi assumida deformação plana em todo o processo realizado. A recuperação elástica existente após terminada a quinagem da chapa também pode ser notada, embora esta não cause qualquer problema nas etapas do processo conseqüentes à de quinagem, Figura 5.6 d).

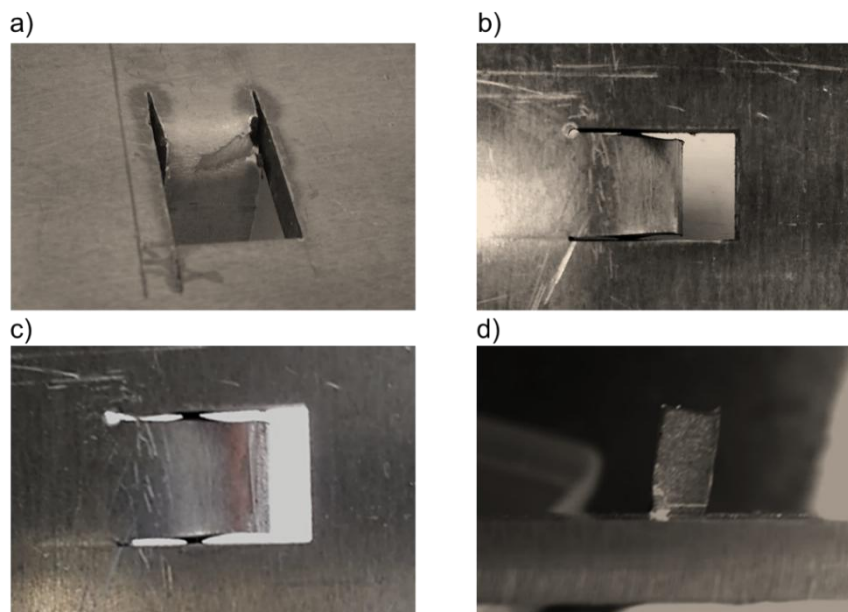


Figura 5.6 – Fotografias retiradas a resultados experimentais provenientes da fase de quinagem: a) Quinagem realizada sem a inclusão do parâmetro  $i$  (fenda de proporções catastróficas visível); b) Quinagem realizada com inclusão do parâmetro  $i$  (sem qualquer fenda visível); c) Deformação do material quinado no sentido da largura; d) Recuperação elástica da aba após a sua quinagem;

Para a etapa de quinagem, uma vez que se realizam duas etapas independentes por ensaio, registam-se seis etapas no total. No entanto, em dois dos três ensaios realizados (Ensaio 1 e 2), a quinagem realizada é equivalente nas duas chapas deformadas visto que estas apresentam a mesma secção volúmica a quinar. Foi possível ainda confirmar que a variação geométrica da folga  $c$  não altera de forma significativa os perfis da força em função do deslocamento registados, concluindo assim que tais perfis apenas sofrem variações notáveis apenas quando alterada a espessura da chapa, Figura 5.7. Deste modo, resultam apenas dois registos relevantes a destacar para esta etapa do processo, Figura 5.8.

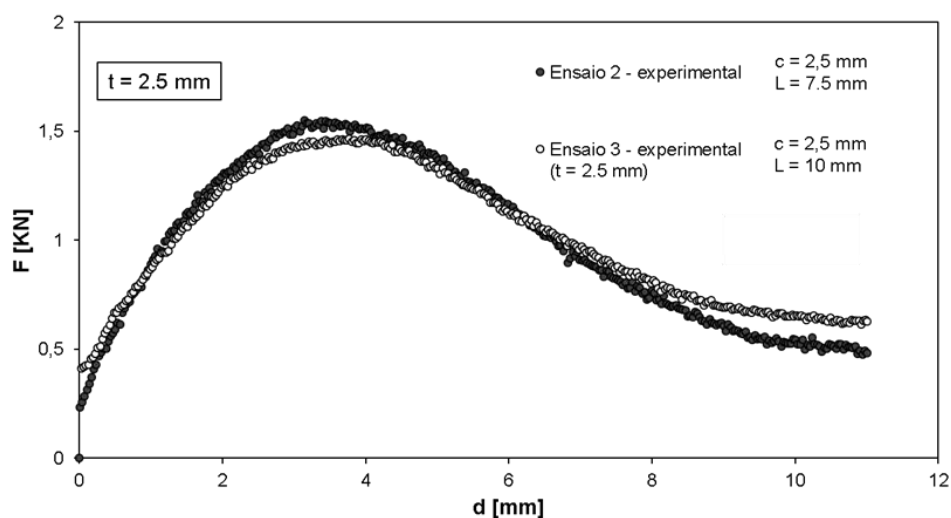


Figura 5.7– Comprovação experimental para a fase de quinagem com folga  $c$  diferente mas de espessura idêntica (Ensaio 2 e chapa 2 do Ensaio 3).

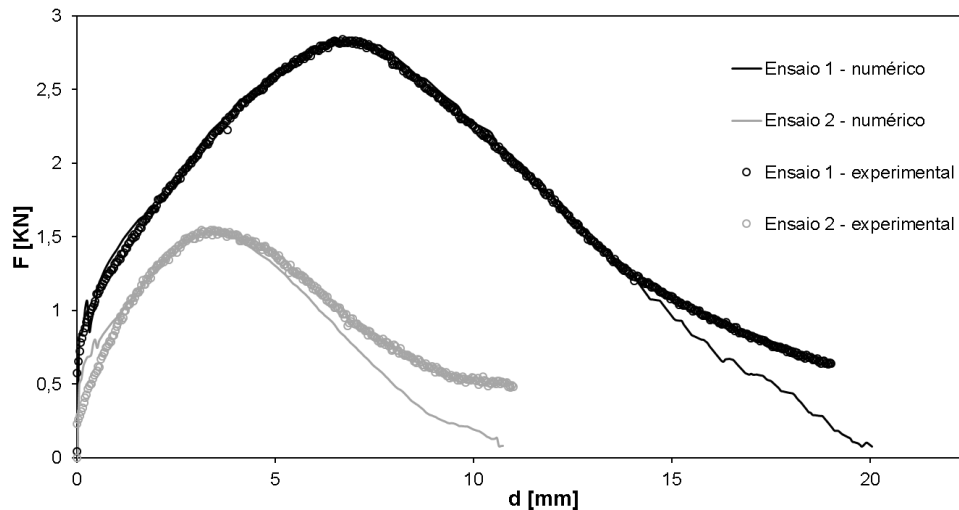


Figura 5.8– Evolução experimental e numérica obtida para a carga exercida em função do deslocamento do punção para a fase de quinagem consoante dois ensaios realizados (Ensaio 1 e 2).

Para esta etapa, é possível notar uma ótima correlação entre ambas as abordagens tomadas, onde não só as evoluções obtidas, como também o respetivo valor da carga máxima para cada ensaio e o correspondente deslocamento do punção onde tal ocorre se apresentam de forma bastante semelhante. O perfil obtido é equivalente ao que seria previsto, típico de uma operação de quinagem por flange com cunho de arraste com um punção de uma fase, onde a carga exercida pelo mesmo sofre um súbito acréscimo até atingir o seu valor máximo, decrescendo gradualmente até ao final da operação. Também foi possível garantir uma passagem total da superfície lateral do punção em contacto com a aba quinada, validando o conceito apresentado para tal no Capítulo anterior.

Uma vez que o perfil obtido numericamente se assemelha bastante ao obtido experimentalmente, prevê-se que os resultados numéricos obtidos a nível do escoamento do material deformado sejam também muito próximos ao ocorrente experimentalmente. Assim sendo, estes podem ser utilizados de modo a entender a deformação existente do material em determinados pontos relevantes dos perfis obtidos, Figura 5.9. Pode ser visível um pequeno raio interior na matriz inferior, tendo como função facilitar a deformação da malha sem comprometer a viabilidade da simulação realizada. Para esta operação, identifica-se apenas um ponto com algum interesse, sendo este o instante onde a carga máxima é atingida. Obviamente, esta carga apresenta uma magnitude superior quando se trata da quinagem da chapa com uma espessura de 5 mm, uma vez que a sua quinagem requer cargas mais elevadas que uma quinagem idêntica para espessuras mais reduzidas

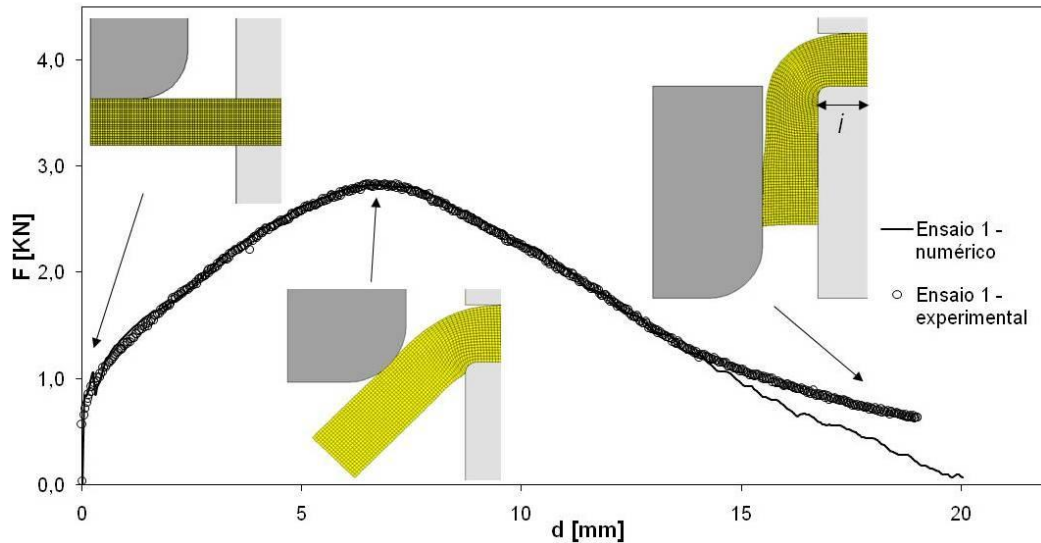


Figura 5.9– Correlação da evolução de força exercida em função do deslocamento do punção com a malha deformada a nível numérico na fase de quinagem (Ensaio 1).

Ainda referente à Figura 5.9, pode ser constatado um exemplo de malha numericamente obtida no instante de carga máxima para o caso do ensaio 1. É possível constatar que tal ocorre assim que o comprimento de contacto da malha com o punção se encontra totalmente centrado no raio deste, sendo este o comprimento de contacto máximo atingível. Após este ponto, procede-se a uma redução gradual do comprimento de contacto existente, resultando consequentemente numa redução gradual da carga vertical exercida pelo punção. Embora tal raciocínio se encontre apenas apresentado para o caso do Ensaio 1, o mesmo foi comprovado para todos os ensaios realizados. É possível ainda notar alguma deformação na região limitada pelo parâmetro geométrico  $i$  na simulação numérica final obtida, Figura 5.9, divergindo assim ligeiramente do modelo teórico proposto anteriormente, onde se assumiu uma ausência de deformação em tal região.

### 5.2.2 1º Forjamento

A operação de forjamento apresenta uma montagem mais acessível quando comparada com a etapa anterior. Os comprimentos das abas quinadas de ambas as chapas permitem uma fácil fixação, tanto a nível da zona inferior da ferramenta (complementar ao rasgo do Punção Base) como da sua zona superior (facilmente encostada a um dos calços Guiadores). A facilidade em encostar a um dos calços Guiadores apenas é obtida com o realizar da quinagem em canto vivo, daí ter sido tomada esta opção, que facilita bastante o escoamento do material no decorrer de ambos os forjamentos.

Também para esta operação foi visível alguma deformação do material para a folga criada pela eletroerosão por fio no sentido da largura, notando também alguma deformação orientada para secções periféricas à zona dobrada da chapa a forjar no final do processo, como será visto mais adiante. Relativamente à modelação numérica, esta baseou-se num reposicionamento das diversas ferramentas de modo a estruturar o processo experimental realizado, Figura 5.10, destacando ainda que o material da chapa se encontra previamente deformado como consequência da operação de quinagem simulada, não existindo qualquer diferença entre o material deformado no final da

simulação da operação de quinagem e o material a deformar no início da simulação para a operação de forjamento discutida. Na ferramenta modelada de forma a representar o componente Punção-Base utilizado experimentalmente, foi introduzido um pequeno raio, Figura 5.10, pois, tal como elaborado na fase do processo anterior relativamente à introdução de um pequeno raio na matriz sobre a qual a chapa é quinada, este também permite uma deformação mais facilitada da malha sem comprometer a qualidade dos elementos finitos modelados.

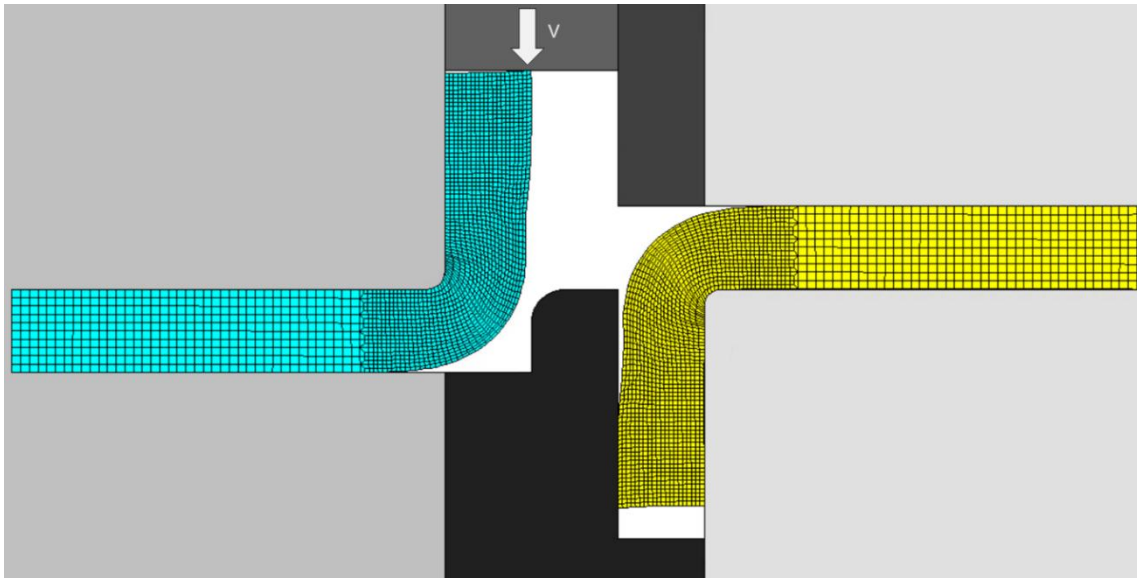


Figura 5.10– Exemplo da modelação efetuada para a primeira fase de forjamento (Ensaio 1).

Nas conseqüentes etapas de forjamento, registam-se três diferentes operações, uma para cada ensaio realizado, resultando assim em três perfis obtidos experimentalmente e outros três obtidos numericamente. Estes encontram-se devidamente representados, Figuras 5.11 - 5.13.

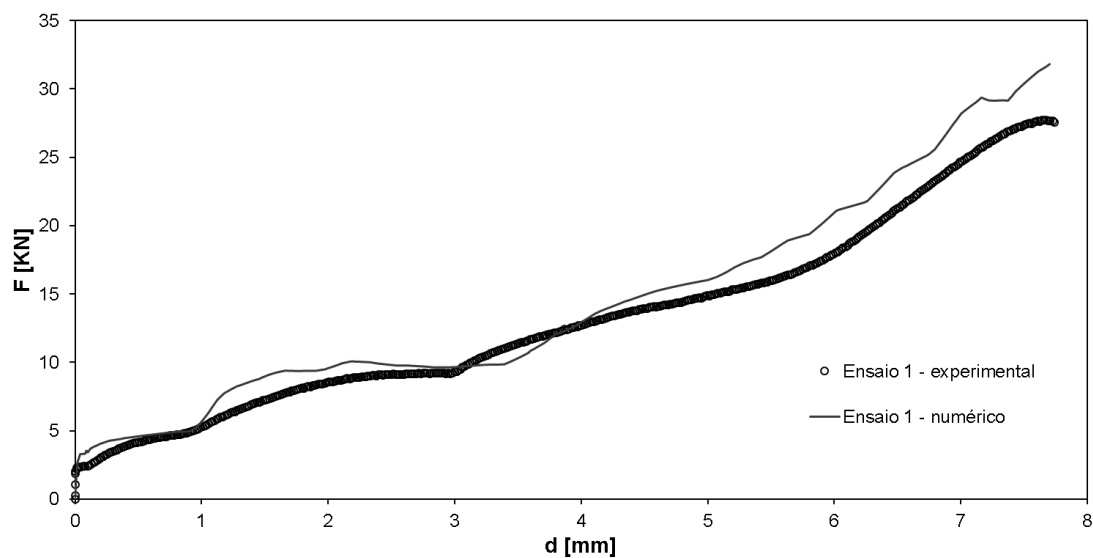


Figura 5.11 - Evolução experimental e numérica obtida para a carga exercida em função do deslocamento do punção para a primeira fase de forjamento (Ensaio 1).

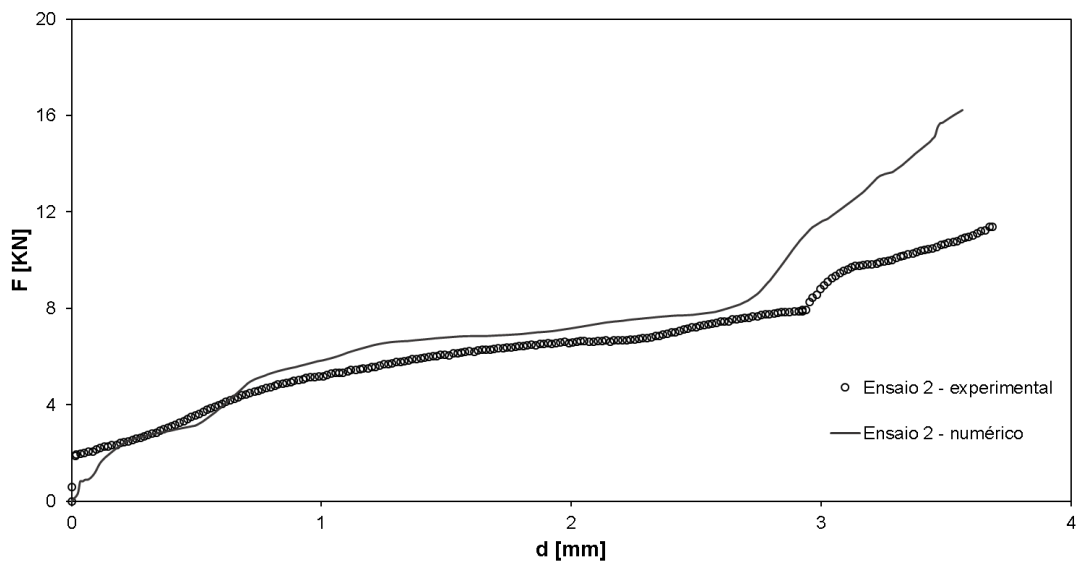


Figura 5.12 - Evolução experimental e numérica obtida para a carga exercida em função do deslocamento do punção para a primeira fase de forjamento (Ensaio 2).

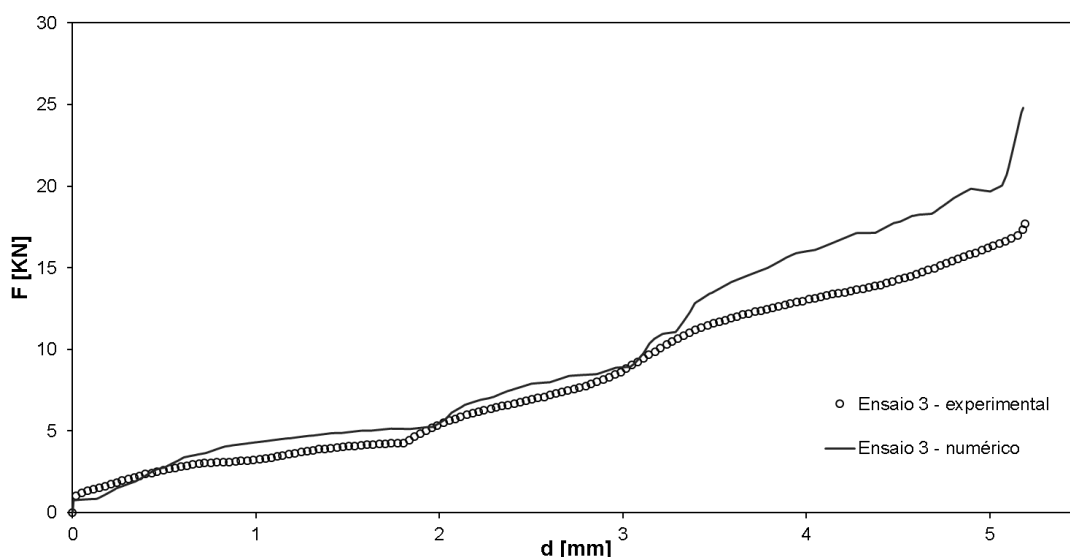


Figura 5.13 - Evolução experimental e numérica obtida para a carga exercida em função do deslocamento do punção para a primeira fase de forjamento (Ensaio 3).

Observando os perfis obtidos, é possível notar instantaneamente a complexidade das evoluções obtidas relativamente às observadas para a etapa de quinagem, o que pode ser propício a causar algumas pequenas divergências entre abordagens numéricas e experimentais. No entanto, a correlação entre ambas as abordagens realizadas é ainda assim bastante semelhante para os três ensaios executados, notando ainda uma enorme semelhança das evoluções obtidas quando comparadas entre ensaios. Relativamente às cargas exercidas, observam-se magnitudes algo superiores às identificadas na fase de quinagem, tal como seria de esperar.

Sabendo que no decorrer desta operação existem diversos contactos do material a deformar com uma elevada variedade de ferramentas que entram em contacto com o mesmo em diferentes

instantes, é possível constatar que a complexidade do perfil visível anteriormente pode ser compreendida ao examinar alguns dos pontos onde se registam súbitas mudanças da carga exercida pelo punção consoante o seu deslocamento, Figura 5.14. Embora seja apresentada apenas uma das três evoluções detalhada, os pontos devidamente detalhados também são identificáveis para qualquer um dos ensaios realizados, diferindo apenas na carga e deslocamento exercidos onde tais pontos ocorrem devido às diferentes propriedades geométricas características da junta ( $c$ ,  $L$ ,  $t_1$  e  $t_2$ ).

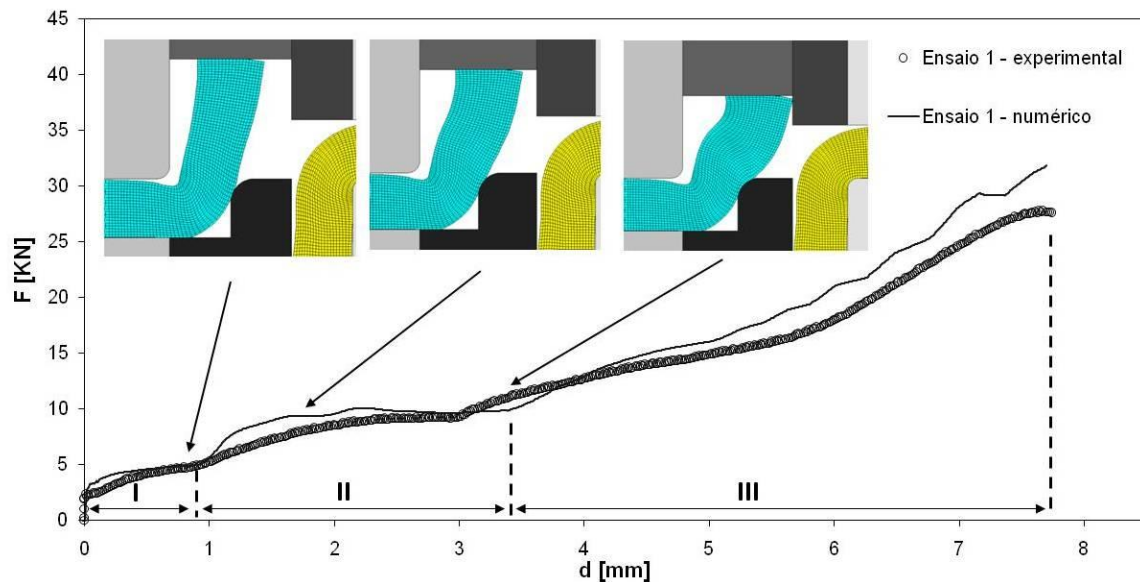


Figura 5.14 - Correlação da evolução de força exercida em função do deslocamento do punção com a malha deformada a nível numérico na primeira fase de forjamento (Ensaio 1).

Na Figura 5.14, é apresentado ainda um modo de descrição detalhada desta operação através de uma divisão da evolução verificada mediante três diferentes fases:

1. Fase I – Fase onde se inicia o forjamento da chapa. No instante em que o punção entra em contacto com a peça, a carga acresce subitamente (à volta de 5KN). No entanto, como existe uma pequena folga entre a chapa e a matriz inferior devido ao raio da dobra da chapa existente, Figura 5.8, o material em contacto com o punção apresenta assim uma tendência a deslizar ao longo do mesmo até que este entre em contacto com a matriz inferior, onde ocorre o final desta fase. Assim que o material inicia o deslizamento, a carga exercida é aproximadamente constante, evidenciando assim que nesta fase, o material não está a ser totalmente enformado. Uma vez que no caso experimental existem fenómenos de recuperação elástica provenientes da fase de quinagem anterior, este efeito de deslizamento do material em contacto com o punção se encontra ainda mais propício a ocorrer.
2. Fase II – Esta fase inicia assim que o material entra em contacto com a matriz inferior (Punção Base). Quando tal ocorre, a carga sofre novamente um acréscimo até aproximadamente 10 KN. No entanto, a tendência de deslizamento continua a ser visível nos resultados numéricos, resultando consequentemente numa estabilização da carga exercida pelo punção. A fase termina assim que o material entre em contacto com a matriz superior.



3. Fase III – Fase final da operação, onde se encerra o forjamento. Esta inicia assim que o material entra em contacto com a matriz superior, representada numericamente como um dos Calços Guiadores, ocorrendo novamente um acréscimo da carga exercida. Esta, no entanto, ao contrário das fases anteriores, apresenta uma tendência sempre crescente, uma vez que é nesta fase que o material em análise é totalmente enformado, isto é, a área de contacto entre o material e o punção aumenta consoante o deslocamento do punção, resultando num aumento da carga exercida, Figura 5.15. Esta carga pode atingir magnitudes muito elevadas na fase final do forjamento, como pode ser visível nas Figuras 5.11 - 5.13. No entanto, é visível alguma divergência de resultados no final do processo, onde as cargas exercidas obtidas por via numérica são sempre mais elevadas que as cargas experimentais. Tal se deve à aproximação de deformação plana, que experimentalmente não é totalmente válida, devido à perda de material proveniente da fase de eletroerosão por fio. Como o ensaio numérico foi realizado admitindo deformação plana na sua totalidade, a determinado instante o material enformado apresenta alguma dificuldade a deformar, resultando num aumento exponencial da carga exercida, enquanto que experimentalmente, o material apresenta uma facilidade superior em ser inserido nas zonas laterais onde não há material, o que resulta num acréscimo de força menos significativo daquele que se obteve por via numérica.

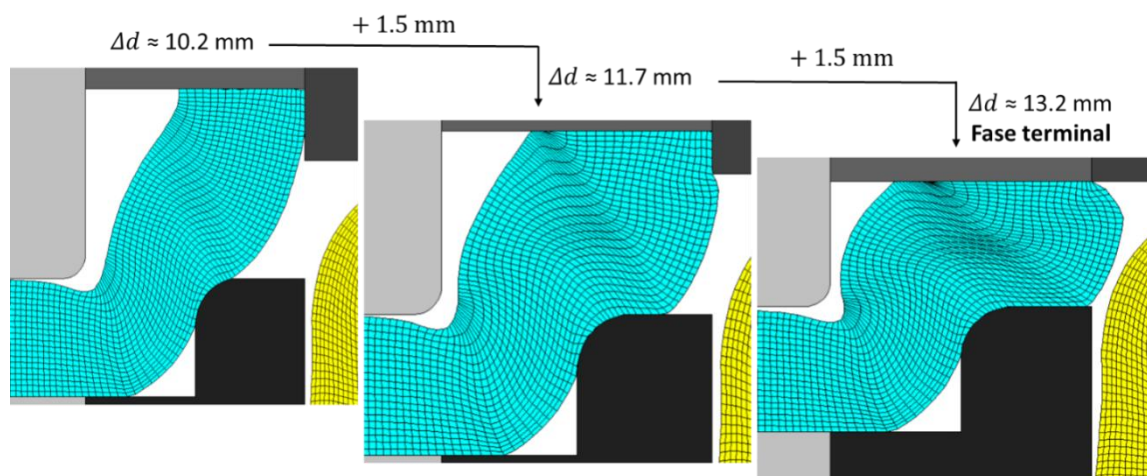


Figura 5.15 - Esquema detalhado da malha deformada em determinados instantes da Fase III (Ensaio 1).

Após concluído o 1º forjamento, resta finalizar a ligação mecânica através do 2º e último forjamento. Este, tal como o anterior, apresenta uma montagem da ferramenta acessível, sendo apenas necessário inverter o produto obtido pela etapa de forjamento anterior, ficando a zona previamente deformada na base, em contacto com um dos Calços-Base. A nível numérico, a velocidade atribuída ao punção atuante no primeiro forjamento é dada como nula, sendo que esta ferramenta e a adjacente desempenham uma função de constrangimento para o segundo forjamento a realizar. A matriz inferior da etapa anterior é também retirada, sendo introduzidos dois novos punções: o punção atuante, ao qual é atribuído uma velocidade constante, e um punção com funções de constrangimento, servindo como representação numérica de um dos Calços Guiadores, Figura 5.16.



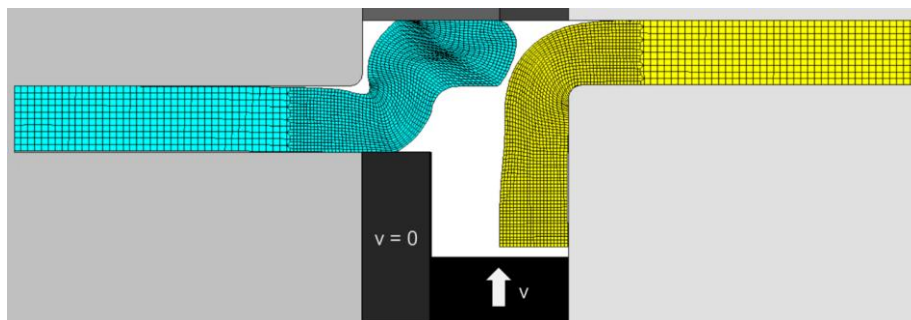


Figura 5.16 - Exemplo da modelação efetuada para a segunda fase de forjamento (Ensaio 1).

### 5.2.2.1 Ensaios realizados

Tal como na operação anterior, também para o 2º forjamento se registam três diferentes gráficas, isto é, um registo experimental e outro numérico para cada ensaio, Figuras 5.17 – 5.19.

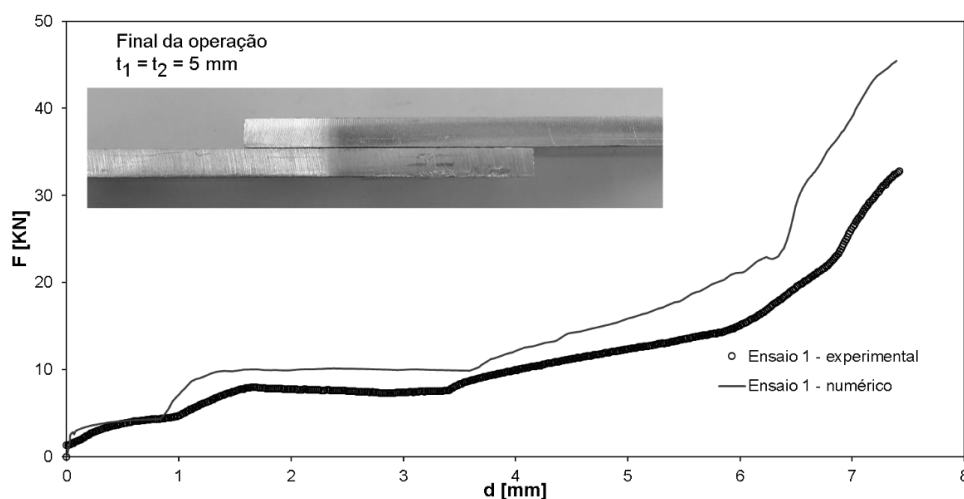


Figura 5.17 - Evolução experimental e numérica obtida para a carga exercida em função do deslocamento do punção para a segunda fase de forjamento (Ensaio 1).

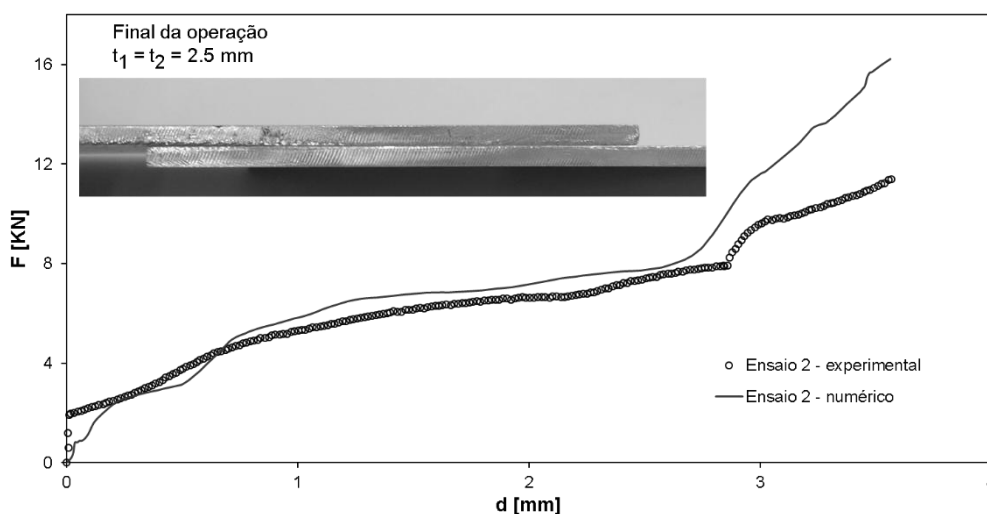


Figura 5.18 - Evolução experimental e numérica obtida para a carga exercida em função do deslocamento do punção para a segunda fase de forjamento (Ensaio 2).

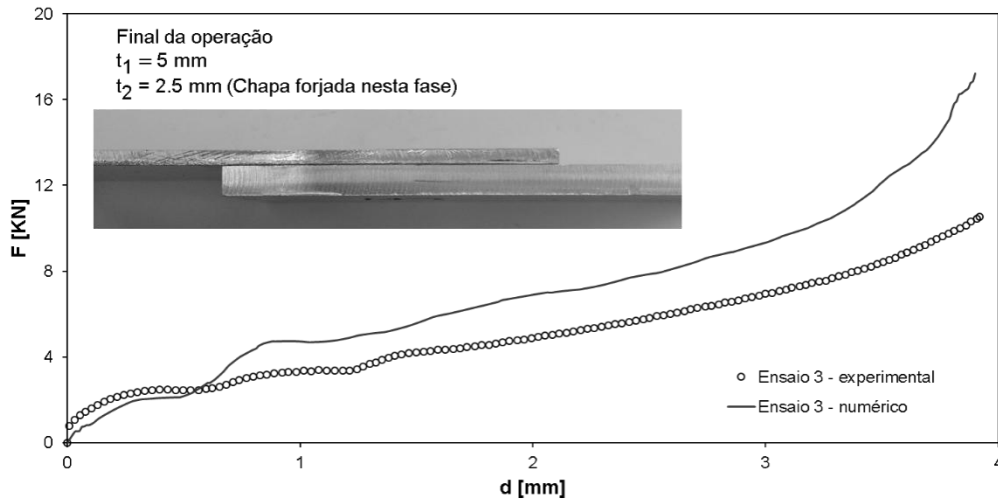


Figura 5.19 - Evolução experimental e numérica obtida para a carga exercida em função do deslocamento do punção para a segunda fase de forjamento (Ensaio 3).

Numa primeira análise, é possível verificar perfis semelhantes aos obtidos na operação de forjamento anterior para cada ensaio, significando que o facto de estar a ser utilizada a primeira chapa como matriz inferior de modo constringer o fluxo de material ocorrente nesta operação de forjamento desempenha esta função tal como inicialmente previsto. No entanto, são notórias algumas divergências entre resultados numéricos e experimentais para cada ensaio essencialmente na fase final da operação e do processo desenvolvido, novamente devido à consideração de deformação plana no desenvolvimento numérico que, nesta operação, leva a que as cargas máximas atinjam magnitudes ainda superiores às constatadas na operação de forjamento anterior por existir uma maior dificuldade no escoamento de material para determinadas regiões livres. Ainda sim, é possível concluir que ambas as abordagens tomadas assumem perfis bastante semelhantes para cada ensaio.

Relativamente às diferentes fases envolvidas nesta operação, pode ser visualizada uma visão detalhada das mesmas, Figura 5.20. Como pode ser conferido, esta Figura assemelha-se bastante à Figura 5.14, concluindo que as interações do fluxo de material deformado são bastantes semelhantes e ocorrem aproximadamente nos mesmos instantes, ou seja, para os mesmos deslocamentos exercidos pelo punção, existindo apenas uma diferença na transição entre Fases I e II, onde na Figura 5.14 consistia no contacto entre o material a deformar e a matriz inferior, nesta operação consiste no contacto entre o material deformado e o material pós-deformado da primeira chapa. Nota-se ainda que tal transição se torna menos notória nos casos experimentais realizados para o segundo forjamento que para o primeiro forjamento. Tal se deve novamente à alteração entre o uso de uma matriz de canto vivo (Punção Base) no primeiro forjamento para o uso material da primeira chapa forjada, que apresenta um formato complexo cujo seu contacto com a chapa a forjar ocorre de forma gradual, evidenciando evoluções da carga exercida em função do deslocamento menos repentinas. Para os casos numéricos, também se poderia notar o mesmo raciocínio com a modelação de uma malha muito refinada, tornando o contacto entre elementos das diferentes chapas também mais gradual.

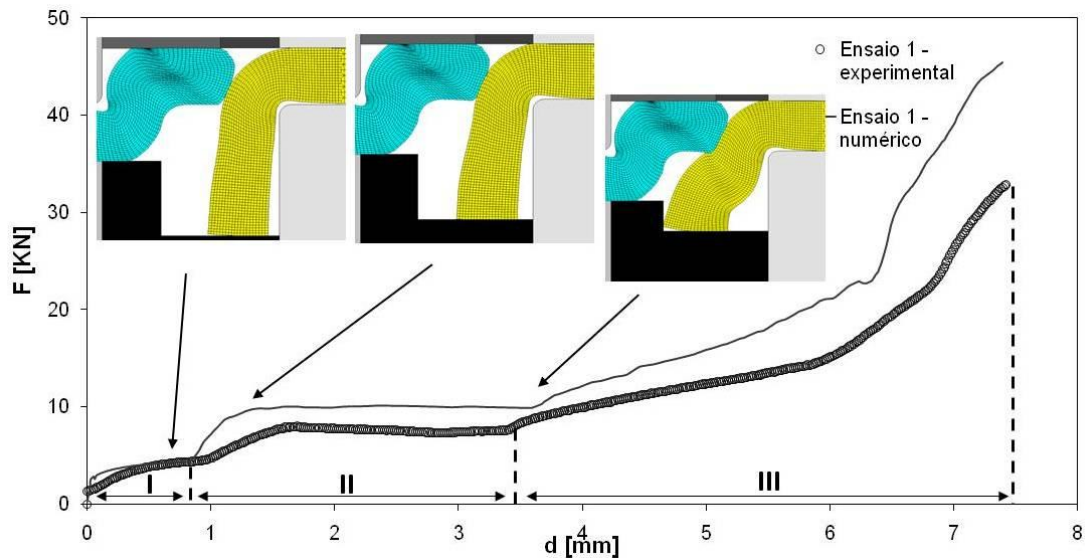


Figura 5.20 - Correlação da evolução de força exercida em função do deslocamento do punção com a malha deformada a nível numérico na segunda fase de forjamento (Ensaio 1).

Pretende-se ainda concluir relativamente ao *interlocking* mecânico resultante por ambas as abordagens consideradas. Para tal, realizou-se ainda uma outra abordagem por via numérica onde as perdas de volume oriundas da operação inicial de corte foram numericamente desconsideradas de modo a visualizar o seu *step* final, podendo ser comparável com o idêntico *step* final para o caso numérico onde as perdas de volume existentes foram consideradas, Figura 5.21 a) – b). Como a ligação efetuada experimentalmente é pontual, foi realizado um corte centrado numa das ligações efetuadas de modo a obter uma vista do *interlocking* mecânico obtido no seu respetivo ensaio experimental, Figura 5.21 c).

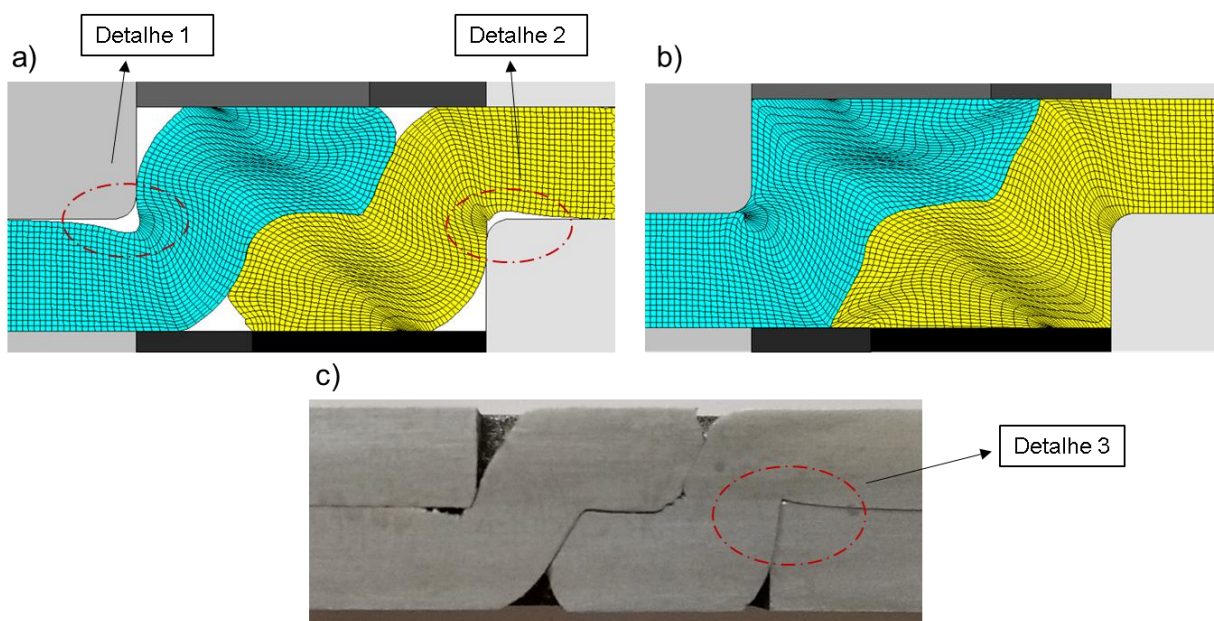


Figura 5.21 – Visualização detalhada do interlocking mecânico obtido pelo processo proposto para o Ensaio 1: a) Resultado numérico considerando perdas de volume; b) Resultado numérico desprezando perdas de volume; c) Fotografia do resultado experimental obtido.

Analisando a imagem obtida experimentalmente, verifica-se uma região de interlocking mecânico bastante semelhante com a obtida numericamente com a consideração das perdas de volume existentes. A única divergência visível trata-se da existência de pequenas folgas de material junto aos cantos sobre os quais se quinaram as chapas, Detalhe 1 e 2 da Figura 5.21 a). Tal se deve ao facto de tais cantos estarem a ser numericamente representados como parte da ferramenta, ferramenta essa modelada como um corpo rígido, isto é, totalmente indeformável. No entanto, com o realizar da componente experimental de ambos os forjamentos existentes, não é uma ferramenta a constranger as tais secções, mas sim a chapa adversa à que está a ser forjada. Assim sendo, ao contrário da simulação numérica, este constrangimento imposto por regiões da chapa não é totalmente rígido, podendo deformar com o resultante contacto entre este e a secção da chapa a ser forjada. Esta explicação pode ser fundamentada pelo Detalhe 3 presente na Figura 5.21 c), onde é notória alguma deformação da secção supostamente indeformada da chapa.

Esta ocorrência pode permitir uma fixação entre chapas com uma resistência mecânica superior, uma vez que reduz algumas folgas existentes na interface entre chapas. No entanto, o canto vivo sobre o qual ambas as abas foram anteriormente quinadas aparenta estar a ser exercido pelo canto vivo da chapa não-deformada adversa, novamente verificado pelo Detalhe 3 da Figura 5.21 c), podendo então comprometer as secções quinadas da chapa. Para a Figura 5.21 b), não é visível qualquer folga existente no interior da ligação, tal como seria espectável. No entanto, o segundo forjamento a realizar num caso sem perdas de volume pode causar um aumento exponencial das cargas a exercer na fase final da operação, muito devido às dificuldades de escoamento existentes em determinadas secções inseridas na junta.

### 5.3 Ensaio destrutivo

Para o ensaio destrutivo realizado, encontra-se representado o respetivo perfil gráfico detalhado obtido, Figura 5.22, ensaio esse efetuado para a junta obtida através do Ensaio experimental 1.

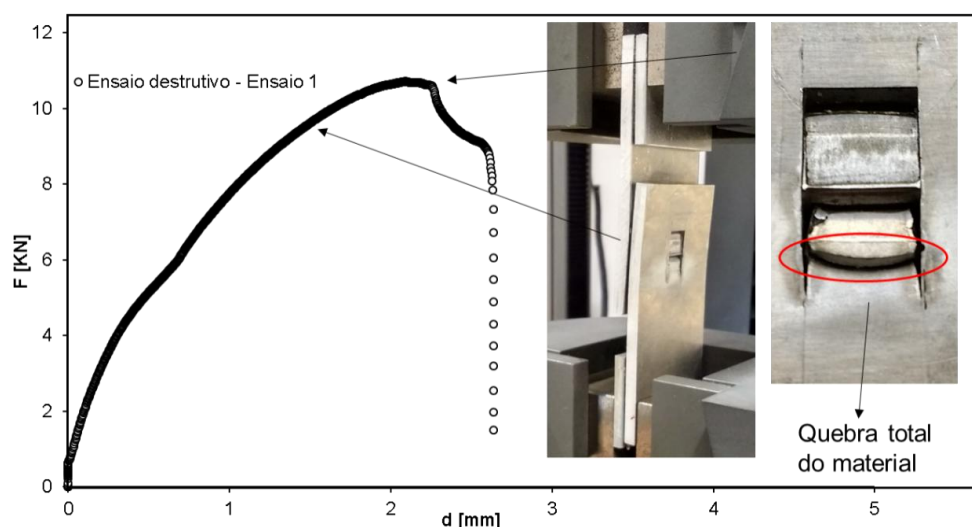


Figura 5.22 - Evolução experimental para a carga exercida em função do deslocamento dos grampos para o ensaio destrutivo realizado (Ensaio 1).

Com o realizar do ensaio, pode ser observada a atuação do *interlocking* mecânico obtido sobre as chapas unidas pelo mesmo, deformando-a através da reação da ligação às cargas exercidas pela máquina de ensaios. Este fenómeno evidencia a elevada resistência mecânica atingida, sendo então previsto que o modo de falha fosse ocorrer numa secção exterior á ligação mecânica alcançada. No entanto, tal como exibido na Figura 5.22 através de uma Fotografia direcionada à carga máxima atingida no decorrer do ensaio, o modo de falha acaba por ocorrer no interior da ligação, mais precisamente em uma das secções previamente dobradas na fase de quinagem, sendo notória a quebra total do material.

Este fenómeno evidencia a quinagem como a etapa crítica do processo, uma vez que esta operação reduz localmente a espessura do material dobrado, tornando tal secção mais suscetível a falhar. O realizar da quinagem em canto vivo exponencia ainda mais este fenómeno, tornando a espessura da chapa na secção dobrada ainda menor em determinada região. Ainda assim, foi possível atingir uma carga máxima de aproximadamente 10.7 KN, o que comprova a elevada resistência mecânica da junta, tendo em conta a sua reduzida geometria.

## 6 Considerações Finais

---

Neste capítulo final, pretende-se efetuar a conclusão da respetiva dissertação, finalizando desta forma a mesma. Este encontra-se dividido em dois subcapítulos. O **primeiro subcapítulo** apresenta todas as conclusões relativamente ao caso estudo, expondo considerações sobre o realizar do mesmo e também um resumo dos seus aspetos significativos detetados. Por fim, no **segundo subcapítulo** pretende-se promover algum trabalho futuro com perspectiva de ser realizado num futuro próximo relativamente à otimização do processo proposto.

### 6.1 Conclusões

Observando a fase inicial do capítulo anterior, é possível concluir que o processo proposto foi realizado com sucesso, isto é, foi possível obter uma ligação puramente mecânica, sem qualquer necessidade de material aditivo, elementos de ligação ou influências térmicas. As operações por deformação plástica inseridas no decorrer do processo também foram bem-sucedidas, sendo que os resultados finais a nível visual obtidos foram bastante próximos do que foi projetado com antecedência ao desenvolvimento experimental e numérico realizados. As ligações obtidas restringem completamente as respetivas chapas ligadas, evitando a existência de quaisquer folgas na região de *interlocking* mecânico que permitam movimentos das mesmas.

Relativamente à comparação entre os registos obtidos por via numérica e experimental para cada operação realizada, registou-se uma elevada semelhança, tanto no que diz respeito à deformação do material resultante de cada operação, como nas evoluções da carga exercida pelo punção atuante em função do deslocamento do mesmo.

A aplicabilidade do processo estimada permite o seu realizar de forma segura, isto é, minimizando o risco da existência de sobreposição de material no seu forjamento, uma vez que os limites obtidos para o modelo teórico proposto foram detetados de forma mais conservativa que para o seu modelo mais realista. Ainda assim, tais limites abrangem uma elevada variedade de configurações de junta obtíveis, retirando a possibilidade de falha nas fases de forjamento do processo por sobreposição de material. De notar ainda a enorme influência das condições de fricção existentes entre os diversos componentes da ferramenta desenvolvida e o material a deformar. O facto de ser assumido um fator de atrito constante é uma aproximação aceitável, dado que as cargas exercidas nas operações realizadas são relativamente altas tendo em conta as reduzidas áreas de contacto existentes entre o material a deformar e o respetivo punção atuante. Ainda assim, a alteração deste parâmetro por via numérica, embora não muito drástica, pode alterar totalmente o escoamento do material, daí que experimentalmente se torne essencial garantir a existência de condições de fricção favoráveis ao escoamento de material pretendido, como se verifica na generalidade de operações de DPCM.

Relativamente ao ensaio destrutivo realizado, o modo de falha ocorreu tal como previsto, uma vez que as dificuldades na correta realização da operação de quinagem da chapa foram bastante

frequentes. Ainda assim, a resistência mecânica da junta testada apresentou resultados bastante promissores relativamente a esforços de corte.

Comparando com processos concorrentes, a maioria dos quais se encontram descritos no Capítulo 2, podem ser vistas algumas melhorias relativamente a alguns dos processos, tais como a acessível possibilidade em unir chapas de material dissimilar (grande vantagem relativamente à soldadura por pontos e por fricção linear) ou a sua inerente simplicidade, não necessitando de qualquer atuação de fontes de calor ou de materiais que mantenham a fixação da junta realizada (grande vantagem relativamente a métodos como a tecnologia de adesivos e ou o *Self-Pierce Riveting*). No entanto, de modo a comparar com elevado pormenor o processo proposto com os seus concorrentes, é necessário ainda alguma investigação mediante determinados parâmetros, a qual se encontra sucintamente descrita no seguinte subcapítulo.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Relativamente ao trabalho realizado, um aspeto a melhorar seria numa melhor definição dos limites de aplicabilidade do processo proposto. Para tal, seria necessário proceder a um extenso estudo experimental no qual se pretenderia entender com maior detalhe os limites geométricos do material, considerando condições de fricção e material a deformar fixos, para os quais ocorrem fenómenos de sobreposição do mesmo, substituindo assim os resultados obtidos pela pré-análise numérica documentada no Capítulo 3. Para tal, seria necessário fixar uma determinada configuração de junta, ou seja, fixando também as espessuras de ambas as chapas, e alterar a altura livre do material após a fase de quinagem de modo a desvendar corretamente o seu valor máximo admissível. Um estudo mais detalhado relativamente à resistência mecânica da junta também deve ser realizado, submetendo a mesma a diferentes tipos de cargas de modo a entender a sua resistência mediante o máximo de condições possíveis, por exemplo, um ensaio de tração no sentido da largura, um ensaio de clivagem na junta (*peel-out* 90°) e um teste relativamente a fenómenos de fadiga mediante diversos tipos de cargas aplicadas (ciclo tração-compressão ou pulsante). Um estudo detalhado a nível destrutivo assume uma importância elevada na validação do processo proposto, visto que torna possível a sua comparação com os seus processos concorrentes.

De forma a desenvolver o processo proposto de modo a que este possa responder a uma maior diversidade aspetos existentes, o primeiro desenvolvimento futuro a destacar passa por provar a correta execução do processo para chapas de diferente material. Uma vez que se torna necessário uma ductilidade de material a deformar algo elevada de modo que as operações por deformação plástica a realizar, sobretudo a operação de quinagem, a aplicabilidade do processo para materiais como a generalidade de ligas metálicas e polímeros é, à partida, possível. No entanto, a análise relativamente à sua aplicabilidade pode divergir bastante daquela que foi realizada no caso em estudo, Capítulo 3. É sugerido então uma primeira fase de comprovação do processo proposto para ligas metálicas correntemente utilizadas, seguido de uma segunda fase idêntica mas para ligações entre chapas de material constituinte da família de polímeros. Se forem bem-sucedidas, pode ser possível então iniciar a comprovação do processo para uma ligação híbrida, isto é, entre diferentes

famílias de materiais, lembrando que na primeira fase do processo (corte do percurso limitante da secção do material a deformar) o uso de uma operação de corte por jato de água pode realizar esta fase do processo proposto para materiais não-condutores, substituindo a operação de eletroerosão por fio.

A aplicabilidade do processo para materiais de comportamento pouco dúctil, como é o caso de ligas de aço altamente resistente, ou materiais inseridos na família de cerâmicos ou compósitos não-metálicos também pode ser desenvolvida. No entanto, a fase de quinagem do processo poderá ser bastante dificultada, no sentido de ser realizada sem qualquer quebra do material a deformar. Um aspeto a ter em consideração neste desenvolvimento futuro pode ser a introdução de alguma influência térmica nesta fase do processo, por exemplo, um pré-aquecimento localizado na região do material a dobrar, podendo aumentar ligeiramente a sua ductilidade de forma a que esta região resista com maior eficácia a quebras de material.

Um estudo importante também a realizar seria o uso de uma operação de arrombamento por *Lancing*. Esta operação pode apresentar uma enorme importância na melhoria da produtividade do processo proposto, podendo realizar as duas primeiras etapas do mesmo num único movimento descendente do punção, evitando também perdas de volume previamente associadas às operações de corte na primeira fase do processo. Para tal, prevê-se que grande parte do desafio proposto no uso desta operação passa por otimizar corretamente as dimensões e geometria do punção atuador, bem como provar a sua aplicabilidade na obtenção de uma junta constituída por chapas de espessuras algo espessas.



## Referências

- [1] M. Merklein, J. Allwood, B.-A. Behrens, A. Brosius, H. Hagenah, K. Kuzman, K. Mori, A. Tekkaya e A. Weckenmann, "Bulk forming of sheet metal," *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, vol. 61, pp. 725-745, 2012.
- [2] K. Mori e T. Nakano, "State-of-the-art of plate forging in Japan," *Production Engineering*, vol. 10, pp. 81-91, 2015.
- [3] S. Aslanlar, A. Ogur, U. Ozsarac e E. Ilhan, "Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding," *Materials & Design*, vol. 29.7, pp. 1427-1431, 2008.
- [4] B. Bartczak, J. Mucha e T. Trzepieciński, "Stress distribution in adhesively-bonded joints and the loading capacity of hybrid joints of car body steels for the automotive industry," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 45, pp. 42-52, 2013.
- [5] P. Groche, S. Wohletz, B. M., C. Pabst e F. Resch, "Joining by forming—a review on joint mechanisms, applications and future trends," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 214.10, pp. 1972-1994, 2014.
- [6] H. Kudo, "An Attempt for Classification of Metal Forming Operations," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 29.2, pp. 469-476, 1980.
- [7] M. Merklein, H. Hagenah e T. Schneider, "Sheet-bulk metal forming processes—state of the art and its perspectives," *TTP*, pp. 197-204, 2013.
- [8] T. Nakano, "Compound technology of sheet metal forming and cold forging," *JOURNAL-JAPAN SOCIETY FOR TECHNOLOGY OF PLASTICITY.*, vol. 42.5, pp. 388-392, 2001.
- [9] T. Nakano, "Introduction of flow control forming (FCF) for sheet forging and new presses," *Proceedings of the International Seminar on Precision Forging*, pp. 35-40, 2009.
- [10] N. Bay, A. Azushima, P. Groche, I. Ishibashi, M. Merklein, M. Morishita, T. Nakamura, S. Schmid e M. Yoshida, "Environmentally benign tribo-systems for metal forming," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 59.2, pp. 760-780, 2010.
- [11] H. Hetzner, J. Koch, S. Tremmel, S. Wartzack e M. Merklein, "Improved sheet bulk metal forming processes by local adjustment of tribological properties," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 133.6, 2011.

- [12] M. Merklein, M. Lechner, D. Gröbel, M. Löffler, T. Schneider, R. Schulte e P. Hildenbrand, "Innovative approaches for controlling the material flow in sheet-bulk metal forming processes," *Manufacturing Review*, vol. 3: 2, 2016.
- [13] S. B. Petersen, P. A. F. Martins e N. Bay, "Friction in bulk metal forming: a general friction model vs. the law of constant friction," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 66.1, pp. 186-194, 1997.
- [14] R. Hense, C. Wels, P. Kersting, U. Vierzigmann, M. Löffler, D. Biermann e M. Merklein, "High-feed milling of tailored surfaces for sheet-bulk metal forming tools," *Production Engineering*, vol. 9.2, pp. 215-223, 2015.
- [15] P. Groche, S. Wohletz, M. Brenneis, C. Pabst e F. Resch, "Joining by forming—a review on joint mechanisms, applications and future trends," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 214.10, pp. 1972-1994, 2014.
- [16] A. Pizzi e K. L. Mittal, *Handbook of adhesive technology*, revised and expanded, CRC press, 2003.
- [17] I. Pires, "Adhesive Bonding 2016 - IST," [Online]. Available: [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/282093452019618/adhesive\\_bonding\\_2016.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/282093452019618/adhesive_bonding_2016.pdf). [Acedido em 07 Abril 2017].
- [18] L. F. M. da Silva, A. G. de Magalhaes e M. F. S. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*, Publindustria, 2007.
- [19] M. I. Khan e A. K. Pandey, "State of art in modern Resistance Spot Welding," *International Journal of Technical Research and Applications e-ISSN*, vol. 1.1, pp. 19-25, 2013.
- [20] Vista Industrial Products INC., "Spot Welding Services," [Online]. Available: <http://www.vista-industrial.com/images/Spot-Welding.gif>. [Acedido em 8 Abril 2017].
- [21] M. I. Khan, *Manufacturing science*, PHI Learning Pvt. Ltd, 2011.
- [22] D. P. Malleshm, "STATE OF ART: FRICTION STIR WELDING," *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2015.
- [23] TWI, "Friction Stir Welding - Process Overview," [Online]. Available: [http://www.twi-global.com/\\_resources/assets/inline/full/0/8990.jpg](http://www.twi-global.com/_resources/assets/inline/full/0/8990.jpg) . [Acedido em 9 Abril 2017].
- [24] E. Aluminium, "Aluminium Automotive Manual," [Online]. Available: [https://european-aluminium.eu/media/1522/7-solid-state-welding\\_2015.pdf](https://european-aluminium.eu/media/1522/7-solid-state-welding_2015.pdf). [Acedido em 11 Abril 2017].
- [25] T. FU, "State-of-the-art of Friction Stir Spot Welding," *Journal of Materials Engineerin*, vol. 43.4, pp. 102-114, 2015.

- [26] N. T. Nguyen, D. Y. Kim e H. Y. Kim, "Assessment of the failure load for an AA6061-T6 friction stir spot welding joint," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 225.10, pp. 1746-1756, 2011.
- [27] C. Schilling e J. Dos Santos, "Method and device for linking at least two adjoining work pieces by friction welding". USA Patente 6722556B2, 20 Abril 2004.
- [28] E. J. Shigley, R. C. Mischke e G. R. Budynas, *Projecto de Engenharia Mecânica*, 7ª Edição, Editora Bookman, 2005.
- [29] K. Denham, "Self-piercing riveting". British Patente Patent WO1998001679 A1, 15 Janeiro 1998.
- [30] X. He, I. Pearson e K. Young, "Self-pierce riveting for sheet materials: state of the art," *Journal of materials processing technology*, vol. 199.1, pp. 27-36, 2008.
- [31] R. Porcaro, H. A. A. Aalberg e M. Langseth, "Joining of aluminium using self-piercing riveting: testing, modelling and analysis," *Int. J. Crashworthiness*, vol. 9.2, pp. 141-154, 2004.
- [32] ASME, "Journal of Manufacturing Science and Engineering," [Online]. Available: [http://manufacturingscience.asmedigitalcollection.asme.org/data/Journals/JMSEFK/935683/manu\\_139\\_02\\_021007\\_f001.png](http://manufacturingscience.asmedigitalcollection.asme.org/data/Journals/JMSEFK/935683/manu_139_02_021007_f001.png). [Acedido em 15 Abril 2017].
- [33] T. Barnes e I. Pashby, "Joining Techniques for Aluminium Spaceframes Used in Automobiles: Part II. Adhesive Bonding and Mechanical Fasteners," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 99.1, pp. 72-79, 2000.
- [34] J. Varis, "Ensuring the integrity in clinching process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 174.1, p. 277-285, 2006.
- [35] K. I. Mori, N. Bay, L. Fratini, F. Micari e A. E. Tekkaya, "Joining by plastic deformation," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 62.2, pp. 673-694, 2013.
- [36] M. M. Eshtayeh, M. Hrairi e A. K. M. Mohiuddin, "Clinching process for joining dissimilar materials: state of the art," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 82.1, pp. 179-195, 2016.
- [37] L. Kaščák, E. Spišák e J. Majerníková, "Joining three car body steel sheets by clinching method," *Open Engineering*, vol. 6.1, 2016.
- [38] N. Nong, O. Keju, Z. Yu, Q. Zhiyuan, T. Changcheng e L. Feipeng, "Research on Press Joining Technology for Automotive Metallic Sheets," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 137.1, p. 159-163, 2003.
- [39] J. Shang, L. Wilkerson e S. Hatkevich, "Hemming of aluminum alloy sheets using electromagnetic

forming,” *Journal of materials engineering and performance*, vol. 20.8, 2011.

- [40] P. Jimbert, I. Eguia, I. Perez, M. A. Gutierrez e I. Hurtado, “Analysis and Comparative Study of Factors Affecting Quality in the Hemming of 6016-T4AA Performed by Means of Electromagnetic Forming and Process Characterization,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 211.5, p. 916–924, 2011.
- [41] J. Carsley e S. Kim, “Warm Hemming of Magnesium Sheet,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 16.3, p. 331–338, 2007.
- [42] BOLLHOFF, “Devices and systems for joining sheets and profiles without fasteners,” 2013. [Online]. Available: [http://pdf.directindustry.com/pdf/boellhoff/rivclinch-devices-systems-joining-sheets-profiles-without-fasteners/9129-29986-\\_2.html](http://pdf.directindustry.com/pdf/boellhoff/rivclinch-devices-systems-joining-sheets-profiles-without-fasteners/9129-29986-_2.html). [Acedido em 20 Abril 2017].
- [43] I. M. F. Bragança, C. M. A. Silva, L. M. Alves e P. A. F. Martins, “Joining sheets perpendicular to one other by sheet-bulk metal forming,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 89.1, pp. 77-86, 2017.
- [44] X. Fu, Chinese architecture, Yale University Press, 2002.
- [45] I. M. F. Bragança, C. M. A. Silva, L. M. Alves e P. A. F. Martins, “Lightweight joining of polymer and polymer-metal sheets by sheet-bulk forming,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 145, pp. 98-104.
- [46] Wonkee Donkey Tools, “How to make a drawbored mortise and tenon joint,” [Online]. Available: <https://www.wonkeedonkeetools.co.uk/brad-point-bit/how-to-make-a-drawbored-mortise-and-tenon-joint/>. [Acedido em 20 Agosto 2017].
- [47] P. Martins, “FINITE ELEMENT FLOW FORMULATION Lecture 1 - Fundamentals and Computer Implementation,” Technical University of Denmark and the University of Aalborg, 2011.
- [48] C. V. Nielsen, W. Zhang, L. M. Alves, N. Bay e N. Bay, Modeling of thermo-electro-mechanical manufacturing processes: applications in metal forming and resistance welding, Springer Science & Business Media, 2012.
- [49] IST, “Área científica de Tecnologia Mecânica e Gestão Industrial - Laboratório,” [Online]. Available: [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779572577294/MT\\_lab.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779572577294/MT_lab.pdf). [Acedido em 01 Outubro 2017].
- [50] NOF, “Rede de Oficinas - Oficina de Mecânica,” [Online]. Available: <https://nof.tecnico.ulisboa.pt/rede-de-oficinas/oficina-de-mecanica/>. [Acedido em 1 Outubro 2017].
- [51] C. M. A. Silva, M. B. Silva, L. M. Alves e P. A. F. Martins, “A new test for determining the mechanical and fracture behavior of materials in sheet-bulk metal forming,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2015.

- [52] J. Olsen e J. Zeng, “ the state-of-the-art of precision abrasive waterjet cutting,” *In Proceedings of the 8 th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technolog*, 2006.
- [53] R. K. Fard, R. A. Afza e R. Teimouri, “Experimental investigation, intelligent modeling and multi-characteristics optimization of dry WEDM process of Al–SiC metal matrix composite,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 15.4, nº 483-494, 2013.
- [54] M. Shukla, “Abrasive water jet milling,” em *Nontraditional Machining Processes: Research Advances*, 2013, pp. 177-203.
- [55] R. H. Todd, D. K. Allen e L. Alting, *Manufacturing processes reference guide*, Industrial Press Inc., 1994.
- [56] J. Rodrigues e P. Martins, *Tecnologia Mecânica Vol. II - Tecnologia da Deformação Plástica - 2ª edição*, ESCOLAR EDITORA, 2005.