



**TÉCNICO**  
LISBOA

# **REBITAGEM AUTO-PERFURANTE DE DUPLA FACE APLICADA A CHAPAS DE ESPESSURA FINA**

**Ricardo Jorge Moura Rita**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Mecânica**

Orientadores: Prof. Luís Manuel Mendonça Alves

Prof. Rafael Augusto Nunes Miranda Malta Afonso

**Júri**

Presidente: Prof. Rui Manuel dos Santos Oliveira Baptista

Orientador: Prof. Rafael Augusto Nunes Miranda Malta Afonso

Vogal: Eng. Ricardo Jorge da Silva Baptista

**Setembro de 2021**



## **Agradecimentos**

Quero aproveitar esta oportunidade para agradecer aos meus orientadores pelo seu enorme apoio na realização desta dissertação. Ao Professor Luís Alves, agradeço a sua disponibilidade e o entusiasmo com que me transmitiu os seus ensinamentos, permitindo-me ultrapassar os diversos desafios encontrados. Ao Professor Rafael Afonso quero começar por agradecer pela orientação focada e objetiva, bem como pela longa amizade durante os anos em que estudámos juntos, e também pela oportunidade de me permitir finalizar esta jornada com sucesso. Um obrigado do fundo do coração!

Agradeço também aos meus pais, à minha irmã e à minha companheira, pelo seu apoio incondicional e pela motivação necessária para concluir mais uma importante etapa da minha vida. Um simples obrigado não é suficiente!

Importa também agradecer àqueles que me acompanharam ao longo de toda esta caminhada, incentivando-me a dar sempre o meu melhor. Aproveito para relembrar todas as vivências que tivemos e desejar que muitas mais estejam no horizonte!

Finalmente, agradeço aos meus colegas de trabalho da RRTV Auto que pelo seu companheirismo me permitem realizar os meus sonhos e ambições. Um obrigado a todos!

## **Abstract**

This dissertation aims to analyse the application of Double-Sided Self-Pierce Riveting to produce mechanical joints between sheets of reduced thickness as those normally found in the automotive industry.

To achieve the proposed objective and eliminate the need to change all the geometric parameters of the tubular rivets used for thicker sheets, two different approaches are investigated. Initially, triangular and circular notches are introduced into the rivet wall to allow a further reduction in the height of the rivet while providing superior mechanical interlocking, due to the greater effect of flaring that the rivet undergoes during deformation. Subsequently, a strategy is studied which consists of reducing the height and thickness of the rivet in order to allow its application for joining thin sheets.

The different results obtained experimentally are evaluated through numerical simulations performed in the finite element program I-FORM, in order to test the influence of the modifications introduced in the tubular rivet on the capacity and quality of the mechanical joint obtained.

The strength of the joints produced is evaluated through destructive shear strength tests, which allows validating the admissible range of external stress values and to evaluate the success of the mechanical joint produced when compared to other joining processes.

## **Keywords**

Double-Sided Self-Pierce Riveting, Deformation-assisted joining, Mechanical Joints, Sheets, Tubular Rivets

## Resumo

A presente dissertação visa analisar a aplicação de um processo de rebite auto-perfurante de dupla face (*Double-Sided Self-Pierce Riveting*, na terminologia inglesa) para produzir ligações mecânicas entre chapas de espessuras reduzidas como aquelas que são normalmente encontradas na indústria automóvel.

Para se atingir o objetivo proposto e eliminar a necessidade de se alterarem todos parâmetros geométricos dos rebites tubulares utilizados para chapas de maior espessura, são investigadas duas abordagens diferentes. Inicialmente, são introduzidos entalhes triangulares e circulares na parede do rebite para permitir uma maior redução da altura do rebite ao mesmo tempo que se produz um bloqueio mecânico superior, devido ao maior efeito de expansão radial e dobragem que o rebite sofre durante a deformação. Posteriormente, é estudada uma estratégia que consiste na redução da altura e espessura do rebite de modo a permitir a sua aplicação para a união de chapas finas.

Os diferentes resultados obtidos experimentalmente são avaliados através de simulações numéricas realizadas no programa de elementos finitos I-FORM, de modo a testar a influência das modificações introduzidas no rebite tubular na capacidade e qualidade da ligação mecânica obtida.

A resistência das ligações produzidas é avaliada por meio de ensaios destrutivos de resistência ao corte que permitem validar a gama admissível de valores de solicitações externas e avaliar o sucesso da união mecânica produzida quando comparado com outros processos de ligação concorrentes.

## Palavras-Chave

Rebite auto-perfurante de dupla face, Ligações assistidas por deformação plástica, Ligações mecânicas, Chapas, Rebites Tubulares.

# Índice

<b>Agradecimentos</b> .....	3
<b>Abstract</b> .....	4
<b>Keywords</b> .....	4
<b>Resumo</b> .....	5
<b>Palavras-Chave</b> .....	5
<b>Lista de Figuras</b> .....	7
<b>Lista de Tabelas</b> .....	9
<b>1. Introdução</b> .....	10
<b>2. Estado da Arte</b> .....	12
<b>3. Desenvolvimento Experimental</b> .....	18
3.1. Estratégias adotadas .....	18
3.2. Materiais e propriedades mecânicas .....	19
3.3. Caracterização do processo experimental .....	20
3.4. Plano de trabalhos .....	22
<b>4. Desenvolvimento numérico</b> .....	24
<b>5. Discussão de resultados</b> .....	26
5.1. Introdução de entalhes na parede do rebite .....	26
5.2. Redução da altura inicial do rebite .....	30
<b>6. Conclusões</b> .....	38
<b>7. Desenvolvimentos futuros</b> .....	40
<b>Referências</b> .....	42

## Lista de Figuras

Figura 1. Materiais habitualmente utilizados na carroçaria de um veículo de motor de combustão interna (à esquerda) e de um veículo elétrico (à direita) [1]. .....	12
Figura 2. Ligação de chapas por a) Clinching; b) Parafuso auto-roscante e c) Rebitagem auto-perfurante convencional. ....	14
Figura 3. Processo de rebitagem auto-perfurante de dupla face (DSSPR). ....	16
Figura 4. Representação esquemática de uma secção unida por DSSPR (a) antes (esquerda) e depois do processo de união (direita), bem como (b) detalhes das diferentes modificações introduzidas nos rebites para produzir uniões entre chapas de espessura fina utilizando rebites com entalhes (detalhes A e B) e alturas reduzidas (detalhes A' e B').....	18
Figura 5. Curva tensão-extensão dos materiais utilizados. ....	20
Figura 6. Exemplo de rebites produzidos com entalhes (a) e com diferentes reduções de altura inicial (b). ....	21
Figura 7. Máquina de ensaios utilizada nos ensaios experimentais realizados. O detalhe da figura apresenta a configuração da montagem das chapas e do rebite tubular antes da compressão e respetiva ligação. ....	21
Figura 8. Máquina de ensaios utilizada e configuração utilizada para testar o desempenho das ligações produzidas. ....	22
Figura 9. Discretização inicial (à esquerda) e final (à direita) de uma simulação numérica do processo de DSSPR para um rebite com um entalhe circular (metade superior) e uma altura reduzida (metade inferior).....	25
Figura 10. Resultados experimentais dos ensaios de rebites com: Entalhes triangulares e ângulos de chanfro iguais a (a) 30° e (b) 45°; Entalhes circulares e ângulos de chanfro iguais a (c) 30° e (d) 45°. ....	26
Figura 11. Análise microscópica dos resultados experimentais dos ensaios de rebites com: Entalhes triangulares e ângulos de chanfro iguais a (a) 30° e (b) 45°; Entalhes circulares e ângulos de chanfro iguais a (c) 30° e (d) 45°.....	27
Figura 12. Resultados da simulação numérica para ligações produzida por um rebite com ângulos de chanfro iguais a 30° e entalhes triangulares (à esquerda) e circulares (à direita). ....	29

Figura 13. Resultados experimentais para a análise da influência da altura inicial dos rebites na produção do mecanismo de união mecânica para alturas iniciais de (a) 3 mm, (b) 4 mm e (c) 5 mm, com ângulos de chanfros $\alpha$ iguais a $45^\circ$ .....	30
Figura 14. Ligação mecânica por DSSPR em chapas de espessura igual a (a) 1.5 mm e (b) 5 mm, utilizando rebites com uma altura inicial de 5 mm, e (c) respectivos andamentos de força-deslocamento. ....	32
Figura 15. Comparação numérico experimental entre as ligações produzidas com rebites de espessuras iniciais iguais a (a) 1.5 mm e (b) 0.75 mm.....	33
Figura 16. Evolução de força-deslocamento numérico experimental entre as ligações produzidas com rebites de espessuras iniciais iguais a 1.5 mm e 0.75 mm.....	34
Figura 17. (a) Evolução da força com o deslocamento para os ensaios destrutivos das ligações produzidas e fotografias dos provetes experimentais após esses ensaios para os rebites de espessura inicial igual a (b) 1.5 mm e (c) 0.75 mm.....	35
Figura 18. Janela do processo de DSSPR para rebites com diâmetros exteriores iniciais iguais a 10 mm e ângulos de chanfro iguais a $45^\circ$ , considerando uniões entre chapas de igual espessura. ....	36
Figura 19. Ligação mecânica por DSSPR entre uma chapa com uma espessura igual a 1 mm e uma chapa com espessura igual a 5 mm com um rebite de ângulo de chanfro igual a $45^\circ$ . ....	40
Figura 20. Exemplo de janela do processo de DSSPR para rebites com diâmetros exteriores iniciais iguais a 10 mm e ângulos de chanfro iguais a $45^\circ$ , considerando agora uniões entre chapas de espessura diferente.....	41



## Lista de Tabelas

Tabela 1. Gama de parâmetros utilizados na primeira estratégia desenvolvida.....	23
Tabela 2. Gama de parâmetros utilizados na segunda estratégia desenvolvida.....	23
Tabela 3. Distâncias de bloqueio mecânico e alturas finais de rebites com e sem entalhes. .....	27
Tabela 4. Força máxima obtida para cada uma das ligações testadas na sua resistência ao corte.....	28
Tabela 5. Distâncias de bloqueio mecânico $i$ e alturas finais $h$ dos rebites ensaiados. ....	31
Tabela 6. Forças máximas de resistência ao corte das ligações em chapas de 1.5 mm e em chapas de 5 mm [9]. ....	34

# 1. Introdução

No universo dos processos de união por deformação plástica (*Joining by Forming*), mais concretamente nos processos de rebiteagem, tem sido desenvolvido um processo de rebiteagem auto-perfurante de dupla face (*Double-Sided Self-Pierce Riveting*, na terminologia inglesa) onde são utilizados rebites tubulares de geometria simples que ao serem colocados entre duas chapas paralelas sujeitas a uma compressão uniaxial através de punções de faces planas e paralelas, permitem a penetração e simultaneamente a expansão radial de ambas as extremidades do rebite tubular, produzindo-se uma ligação mecânica entre as duas chapas.

Até ao momento, este processo de união apenas tinha sido aplicado a chapas de espessura iguais ou superiores a 5 mm, porém dado a necessidade de se produzir ligações mecânicas em chapas de espessura inferior torna-se necessário analisar a mecânica da deformação deste processo nessas condições. Com efeito, serão analisados os principais parâmetros do processo e desenvolvidas estratégias para aplicar o processo de ligação anteriormente desenvolvido, limitando as modificações dos parâmetros dos rebites inicialmente utilizados para a união de chapas de espessura superior. A investigação será realizada em chapas de alumínio AA5754-H111 e rebites tubulares de aço inoxidável AISI 304. Análises numéricas e experimentais permitirão que o novo processo modificado incorpore todas as vantagens da rebiteagem auto-perfurante de dupla face convencional e seja aplicado na união de chapas finas ou na união de chapas finas com chapas espessas.

O presente documento foi estruturado partindo da descrição dos desenvolvimentos anteriores da tecnologia de união por rebiteagem auto-perfurante de dupla face, que permitiram estabelecer os parâmetros processuais e a mecânica do processo, analisando também os processos de ligação mecânica alternativos que são habitualmente utilizados na indústria.

Após o estado da arte, são apresentados os desenvolvimentos experimentais onde se começa por caracterizar o processo e os materiais utilizados, bem como o plano de ensaios que permite analisar a influência das diferentes estratégias desenvolvidas. Posteriormente são apresentadas as modelações numéricas que permitem avaliar a influência combinada dos diferentes parâmetros testados ao longo da deformação.

No capítulo de discussão de resultados, os resultados numéricos são comparados com os resultados obtidos experimentalmente e conclusões são retiradas sobre o sucesso das

soluções investigadas de modo a escolher qual a mais adequada para produzir ligações em chapas finas.

Nos capítulos finais, são apresentadas as principais conclusões da aplicação da tecnologia de rebite auto-perfurante de dupla face, os avanços desenvolvidos ao longo deste trabalho e as perspectivas de desenvolvimento deste tipo de ligação.

## 2. Estado da Arte

De uma forma geral, diferentes indústrias têm apostado o seu desenvolvimento nos materiais e tecnologias de produção que lhe permitam produzir os seus produtos de acordo com as especificações dos seus clientes, ambientais e económicas. Um bom exemplo desta aposta tem sido o desenvolvimento feito pela indústria automóvel. No entanto, com o desenvolvimento de novos materiais surge também a necessidade de novos processos que permitam a sua montagem para produzir produtos novos e otimizados. Os desafios para esta indústria são inúmeros, desde o preço das matérias-primas e da energia, às restrições colocadas aos seus produtos pelas normas ambientais. Para dar resposta a estes desafios e uma vez que a carroçaria do veículo é uma parte significativa da massa total do veículo, as medidas de redução de peso são normalmente o foco desta indústria na implementação de vários materiais leves e ligações ecológicas que possam ter como resultado o aumento da sustentabilidade dos seus produtos.

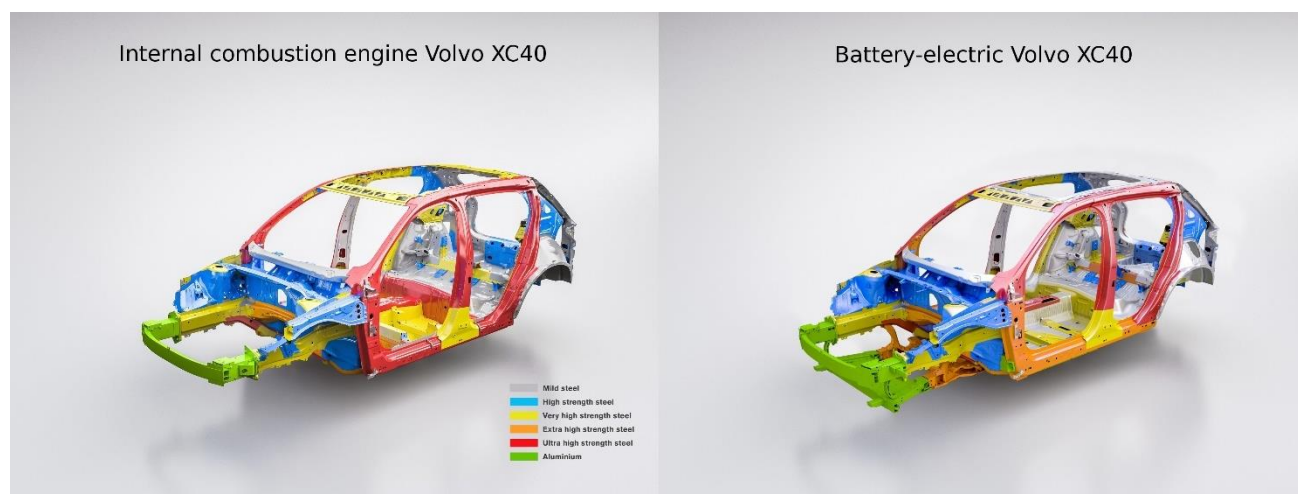


Figura 1. Materiais habitualmente utilizados na carroçaria de um veículo de motor de combustão interna (à esquerda) e de um veículo elétrico (à direita) [1].

Com o desenvolvimento dos veículos elétricos surge também a necessidade de apostar no desenvolvimento dos materiais. Observando a Figura 1 é possível constatar que com a eletrificação, a ausência de um motor de combustão interna na parte frontal do veículo e o maior peso colocado pelas baterias no chão do veículo, coloca novos desafios aos materiais utilizados. Com efeito, observa-se uma maior utilização de alumínio e um novo aço de extra alta-resistência na estrutura que anteriormente suportava o motor de combustão interna.

Também é possível constatar uma redução da resistência do aço utilizado ao longo das traves de reforço longitudinais inferiores, muito provavelmente pela necessidade de produzir ligações entre este aço e o alumínio que agora passa a ser utilizado numa estrutura de proteção das baterias elétricas no caso de uma colisão.

Assim sendo, é possível concluir que a ligação entre o aço e o alumínio é particularmente interessante para o desenvolvimento futuro dos veículos automóveis, dado que estes materiais permitem combinar a resistência necessária para garantir a segurança dos seus ocupantes e a leveza necessária para oferecerem uma reduzida pegada ecológica. Por este motivo, a investigação realizada nesta dissertação pretende dar uma importante contribuição para o sucesso da ligação destes materiais. Uma vez que a pegada ecológica de um veículo se mede não só durante a sua vida de serviço, mas também ao longo do seu ciclo de produção, é indispensável que o consumo energético e emissões poluentes dos processos utilizados para produzir as assemblagens entre os materiais seja também reduzido. Assim, o presente documento focar-se-á na utilização da tecnologia de ligações mecânicas por deformação plástica (*Joining by Forming*) que permitem produzir bloqueios mecânicos entre os materiais através de processos de enformação plástica que têm a vantagem de serem económicos e eficientes. Estes processos conseguem produzir ligações mecânicas utilizando apenas os materiais das geometrias envolvidas e sem a utilização de material adicional, podendo também serem utilizados elementos adicionais (ex: rebites) que produzem as ligações entre as geometrias ao mesmo tempo que oferecem resistência adicional à união mecânica produzida. Importa aqui referir que as diferentes propriedades dos materiais em estudo, limitam a utilização das habituais tecnologias de soldadura utilizadas na indústria automóvel, uma vez que o alumínio é uma liga difícil de soldar e que o aço apresenta um ponto de fusão bastante superior a esta liga, criando grandes dificuldades na aplicação destes processos de ligação. Na realidade, antes da implementação dos processos de soldadura, a montagem de um carro era maioritariamente realizada através da ligação mecânica das geometrias utilizando parafusos e processos de rebitagem. Neste sentido e analisando novamente as ligações mecânicas por deformação plástica que têm vindo a ser aprimoradas para responder aos padrões económicos e de qualidade, começemos por analisar os processos desta categoria que dispensam a utilização de material adicional. O principal processo utilizado é o processo de *Clinching* (Figura 2a) que dispensa a utilização de material adicional e permite assim um uso sustentável dos recursos, ao mesmo tempo que cumpre os requisitos de peso e união de materiais dissimilares. Este processo é um processo de enformação realizado à temperatura

ambiente que utiliza ferramentas simples, flexíveis e económicas que produzem uma indentação local nos materiais através de um punção de geometria variável, comprimindo duas geometrias sobrepostas e deformando-as plasticamente contra uma ferramenta para assim produzir um bloqueio mecânico permanente entre elas. A mecânica da deformação do processo e os principais parâmetros processuais são apresentados pelos estados da arte das referências da tecnologia [2-3] onde também são apresentadas diversas aplicações industriais e novos desenvolvimentos numéricos e experimentais. Os mecanismos de falha são investigados por diferentes autores, nomeadamente Zhang et al. [4] que se focou no desempenho de ligações produzidas entre a mesma liga de alumínio que é utilizada durante as investigações apresentadas neste documento. A integridade das uniões mecânicas produzidas por este processo de ligação é determinada pelo bloqueio mecânico produzido e está limitada às propriedades mecânicas dos materiais, sendo que em alguns casos torna-se necessário introduzir elementos adicionais (tais como rebites sólidos) que permitem satisfazer os requisitos de desempenho impostos a esta ligação que normalmente apresenta reduzidos níveis de resistência a esforços de corte.

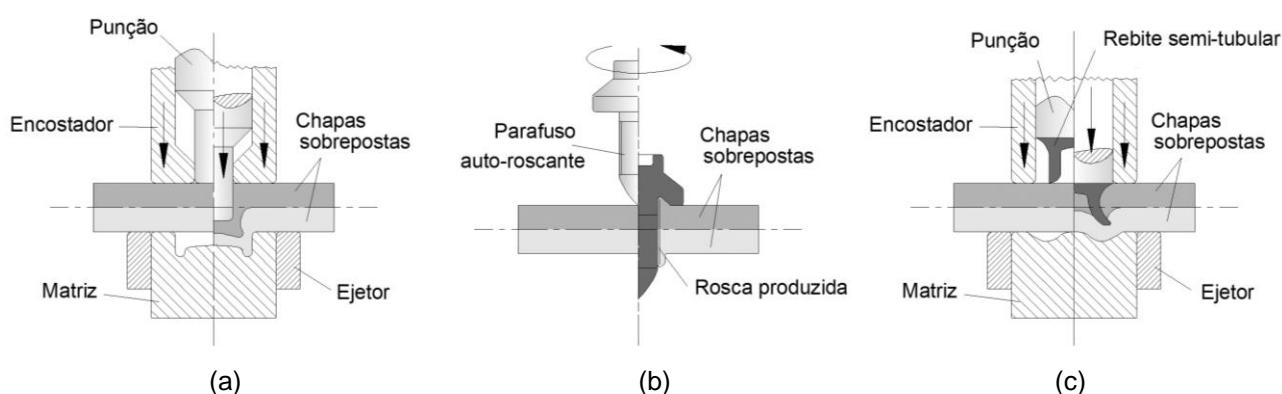


Figura 2. Ligação de chapas por a) Clinching; b) Parafuso auto-roscante e c) Rebitagem auto-perfurante convencional.

Dentro das ligações mecânicas por deformação plástica que utilizam elementos adicionais para promover a ligação entre as geometrias a serem unidas, destaca-se a utilização dos processos de aparafusamento auto-perfurante (*Flow Drill Screws* ou *FDS*, na terminologia inglesa) e a rebitagem auto-perfurante convencional (*Self-Pierce Riveting* ou *SPR*, na terminologia inglesa). O processo de *FDS* é um processo termomecânico de união de duas geometrias sobrepostas onde são utilizados parafusos com uma elevada velocidade de rotação para perfurar a geometria superior sujeitando-a a um aumento de temperatura e elevados níveis de deformação plástica associados às condições de atrito. Seguidamente e

à medida que a ponta do parafuso perfura as geometrias, uma rosca é formada em ambas as geometrias. Finalmente é produzido um aperto entre as geometrias superior e inferior através da formação de uma saliência na superfície exterior de ambas as geometrias (Figura 2b). Este processo oferece uma solução para os casos em que os processos de soldadura não seriam viáveis, tais como para a ligação de materiais compósitos, e permite também substituir as técnicas convencionais (parafusos, porcas e rebites cegos) que necessitam de uma pré-furação ou pré-posicionamento nos componentes a serem unidos. As ligações produzidas por este processo são facilmente desmontáveis no final da vida útil, embora essa propriedade seja por vezes responsável pelo desenroscamento não intencional da ligação causado por um carregamento mecânico e/ou térmico. Contudo, Aslan et al. [5] demonstraram que a combinação e interação entre o comportamento mecânico do material e os parâmetros do processo são críticos para evitar defeitos característicos e um desempenho inferior da junta, sugerindo uma alta sensibilidade da qualidade da união aos seus parâmetros processuais. As limitações deste processo surgem efetivamente para materiais com uma resistência à tração compreendida entre 600 e 700 MPa. Relativamente às espessuras dos materiais que são possíveis de unir, estas estão limitadas a 1.5 mm para ligas de aço e 4 mm para ligas de alumínio [6]. As limitações estéticas que advém da existência de protusões de material acima das superfícies exteriores de cada geometria que resultam da ligação mecânica produzida e dos parafusos estarem expostos são outras das limitações a adicionar àquelas anteriormente referidas.

Os processos de rebiteagem são outros processos de enformação plástica a frio, bastante utilizados na indústria automóvel dado que permitem cumprir os requisitos técnicos e produzir ligações em estruturas que resultam da combinação de materiais dissimilares. A mecânica destes processos é relativamente simples e permite obter níveis de bloqueio mecânico consideráveis com uma eficiência elevada e um custo reduzido. A rebiteagem auto-perfurante é um dos processos utilizados com bastante frequência que consiste na utilização de um rebite tubular de uma única face que perfura através de duas geometrias sobrepostas e à medida que realiza essa perfuração sofre o efeito do encruamento dos diferentes materiais envolvidos, o que leva a que o rebite expanda radialmente e as suas extremidades se dobrem, produzindo um bloqueio mecânico entre as geometrias (Figura 2c). No que diz respeito às ferramentas utilizadas, são utilizadas ferramentas para garantir o centramento do rebite ao longo da penetração e é também utilizada uma ferramenta inferior com uma cavidade para a qual os materiais são comprimidos, produzindo-se uma protuberância e um bloqueio mecânico entre ambos. Tal como para o processo de *Clinching*, as referências [7-

8] analisam as diversas vertentes deste processo. As vantagens alcançadas por este processo são comparáveis às obtidas pelos processos convencionais de rebiteamento, com a diferença de não ser exigida uma preparação prévia das geometrias a serem unidas. No entanto, este processo de SPR está limitado pela capacidade de unir chapas com espessuras muito dissimilares pois necessita de perfurar completamente uma das geometrias, fragilizando a região circundante ao rebite e estando limitada pela ductilidade do material que pode condicionar a solidez da ligação. Novamente, são produzidas protuberâncias em ambas as superfícies exteriores das geometrias e o rebite fica exposto aos elementos e à corrosão galvânica dado que os rebites utilizados são normalmente de aço. A geometria dos rebites é também algo complexa e cria diversas dificuldades na sua implementação, uma vez que são necessárias rebites de muito diferentes especificações para produzir uniões entre geometrias de diferentes espessuras.

Desta forma, aquilo que se procura é resolver as limitações dos processos anteriormente referidos e desenvolver uma tecnologia de ligação que permita introduzir novos benefícios nas ligações mecânicas produzidas, permitindo uma produção de baixo custo, altamente flexível, ecológica e realizada à temperatura ambiente. A resposta a estas exigências é oferecida por Alves et al. [9] que detalhadamente investigaram através da correlação entre metodologias numéricas e experimentais, um processo alternativo denominado rebiteamento auto-perfurante de dupla-face (*Double-Sided Self-Pierce Riveting* ou DSSPR, abreviadamente), cujo nome deriva do processo de rebiteamento auto-perfurante convencional (SPR) pois trata-se de uma modificação dos fundamentos e princípios mecânicos desse processo de modo a contornar as suas limitações.

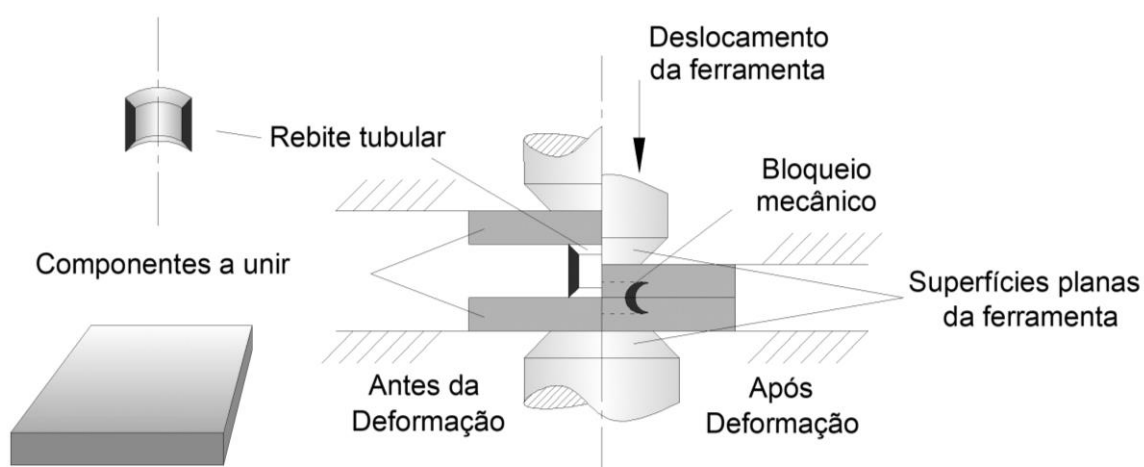


Figura 3. Processo de rebiteamento auto-perfurante de dupla face (DSSPR).



Neste processo de DSSPR, um rebite tubular de geometria simples é utilizado para produzir uma ligação mecânica entre duas geometrias. Para esse efeito, o rebite é colocado entre as duas geometrias que serão comprimidas uma contra a outra e, conseqüentemente, contra o rebite tubular através de um punção de faces planas. Ao longo dessa compressão, o rebite penetra cada uma das geometrias e vai alargando radialmente, dobrando-se até que as duas geometrias estejam em contato, momento no qual a ligação mecânica está concluída. Alves et al. [9] demonstraram ser possível a aplicação deste processo para produzir uma ligação mecânica entre duas chapas de alumínio por meio de um rebite de aço inoxidável. Foi também demonstrado que as anteriores desvantagens dos processos normalmente encontrados na indústria automóvel e que foram aqui discutidos, podem ser invertidas e que o processo tem a capacidade de produzir ligações mecânicas com o mesmo desempenho mecânico que anteriormente. Os autores deste estudo limitaram a espessura das geometrias a 5 mm, no entanto através de um efeito de escala, o processo de DSSPR pode ser facilmente aplicado a espessuras inferiores. Contudo, para eliminar a necessidade de se produzirem rebites com uma gama alargada de especificações, necessária em função das espessuras das geometrias a serem unidas, pretende esta dissertação apresentar duas estratégias que permitam com ligeiras modificações às dimensões dos rebites utilizados por Alves et al. [9] para unir chapas com espessuras de 5 mm, produzir uniões entre chapas com espessuras de 1.5 mm que se apresentam como limites para o processo de rebitagem auto-perfurante convencional (SPR). Para este efeito, numa primeira abordagem serão introduzidos entalhes triangulares e circulares na parede do rebite tubular, e posteriormente numa segunda abordagem, serão produzidas alterações à altura inicial e em alguns casos também à espessura inicial dos rebites, de modo a produzir ligações mecânicas em chapas de espessura fina utilizando o processo de rebitagem auto-perfurante de dupla-face (DSSPR).

Os procedimentos utilizados e o sucesso de cada uma das estratégias anteriormente serão analisados e discutidos nos capítulos seguintes.

### 3. Desenvolvimento Experimental

#### 3.1. Estratégias adotadas

O processo de rebiteagem auto-perfurante de dupla-face (DSSPR) é apresentado esquematicamente na Figura 4 onde se identifica os seus principais parâmetros processuais. Os parâmetros associados às chapas consistem unicamente nas suas espessuras  $t_{s1}$  e  $t_{s2}$ , e relativamente aos rebites tubulares, os parâmetros envolvidos são o diâmetro exterior  $d_0$ , a altura inicial  $h_0$ , a espessura  $t_0$  e o ângulo dos chanfros  $\alpha$ . Estes parâmetros são responsáveis pela forma final e desempenho da ligação mecânica produzida, e pela observação dos detalhes apresentados na Figura 4 é possível identificar os parâmetros resultantes do processo de ligação que são o diâmetro final  $d$  e a altura final  $h$  do rebite enformado, bem como a distância do bloqueio mecânico  $i$ .

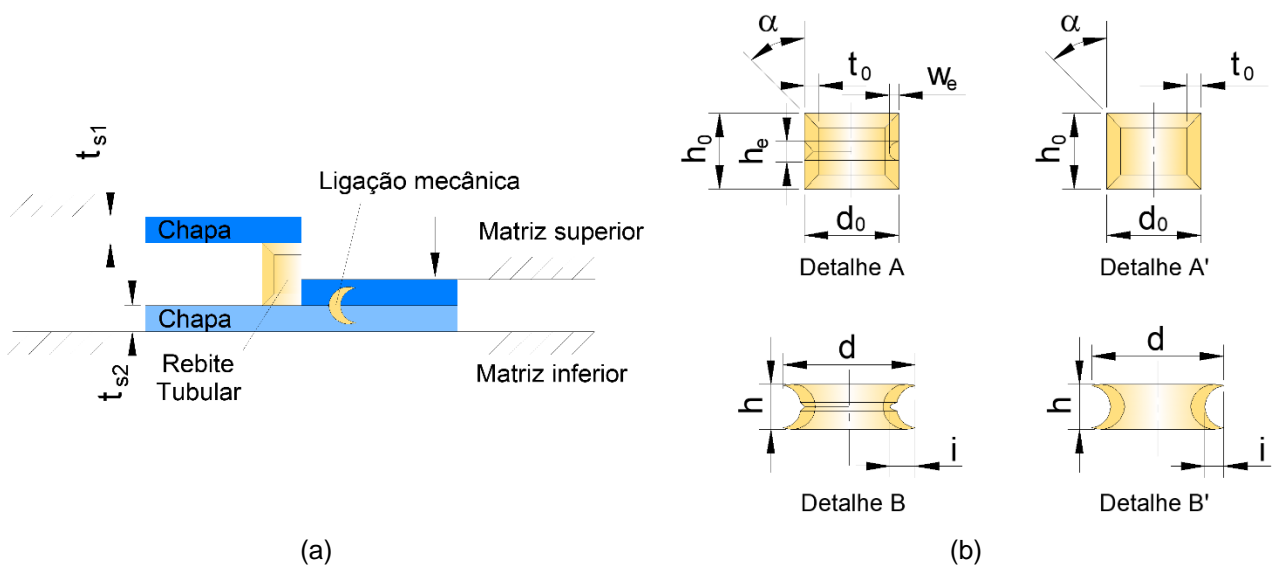


Figura 4. Representação esquemática de uma secção unida por DSSPR (a) antes (esquerda) e depois do processo de união (direita), bem como (b) detalhes das diferentes modificações introduzidas nos rebites para produzir uniões entre chapas de espessura fina utilizando rebites com entalhes (detalhes A e B) e alturas reduzidas (detalhes A' e B').

Para que o processo de DSSPR possa ser aplicado na rebiteagem de chapas de espessura mais fina que aquelas que foram anteriormente utilizadas na investigação realizada por Alves et al. [9], mantendo quase todos os parâmetros inalterados, é necessário que a altura final do rebite seja inferior àquela observada quando o processo foi aplicado para produzir uma união entre duas chapas com uma espessura igual a 5 mm. Desta forma, duas

estratégias diferentes foram testadas para permitir atingir esse objetivo que se enumeram em seguida.

A primeira estratégia consistiu em introduzir entalhes triangulares e circulares na parede do rebite tubular (ver detalhes A e B) mantendo a altura inicial  $h_0$  do rebite tubular que foi utilizada anteriormente na união de chapas de espessura espessa [9], de modo que ao fragilizar a região central do rebite, ele possa sofrer uma maior expansão radial e dobragem, e conseqüentemente a altura final do rebite possa ser inferior. Tendo em conta que a investigação anteriormente realizada [9] já tinha concluído que as melhores uniões eram obtidas para ângulo dos chanfros  $\alpha$  compreendidos entre 30 e 45°, foram testados entalhes triangulares e circulares para cada um desses ângulos.

Numa segunda estratégia foi reduzida a altura inicial  $h_0$  do rebite tubular (ver detalhes A' e B'), seguindo a relação  $h_0 = t_{s_1} + t_{s_2}$  que havia já sido observada no estudo original deste processo de rebite em chapas espessas [9]. Diferentes alturas iniciais  $h_0$  do rebite tubular foram também analisadas para validar esta relação. Para esta segunda estratégia foram apenas testados ângulos de chanfro iguais a 45° para evitar alguns defeitos que já tinham anteriormente sido observados para ângulos iguais a 30°, e que poderiam ser mais notáveis dado o reduzido comprimento do rebite. Adicionalmente, a espessura inicial  $t_0$  do rebite foi também reduzida a metade em alguns casos para avaliar a influência combinada desses parâmetros na deformação criada e no desempenho da ligação mecânica produzida. Todos os parâmetros avaliados serão sumarizados numa seção seguinte.

### 3.2. Materiais e propriedades mecânicas

O desenvolvimento desta investigação utilizou chapas de alumínio AA5754-H111 com 1.5 mm de espessura e rebites de aço inoxidável AISI 304 com um diâmetro exterior de 10 mm e uma espessura de 1.5 mm. A curva tensão-extensão destes materiais é apresentada na Figura 5 e foi obtida através de ensaios de compressão realizados numa prensa hidráulica (Instron SATEC 1200 kN) com uma velocidade de 5 mm/min.

Relativamente ao alumínio, a liga AA5754 é conhecida pela sua resistência à corrosão (em particular à água do mar), tem uma boa resistência mecânica e uma condutividade elétrica e térmica razoável. Este tipo de alumínio é utilizado na indústria automóvel, naval, alimentar e pecuária.

No que diz respeito ao aço AISI 304, é um dos tipos de aço inoxidável mais amplamente utilizado na fabricação de válvulas, tubagens, recipientes, equipamentos hospitalares e industriais. É indicado para a fabricação de peças que devem resistir ao ataque de um grande número de substâncias corrosivas, tais como o ácido nítrico, soluções alcalinas, soluções salinas, etc.

A escolha destes materiais foi feita de modo que comparações possam ser feitas com os resultados obtidos no estudo anterior realizado por Alves et al. [9] dado que foram estes os materiais utilizados nesse estudo.

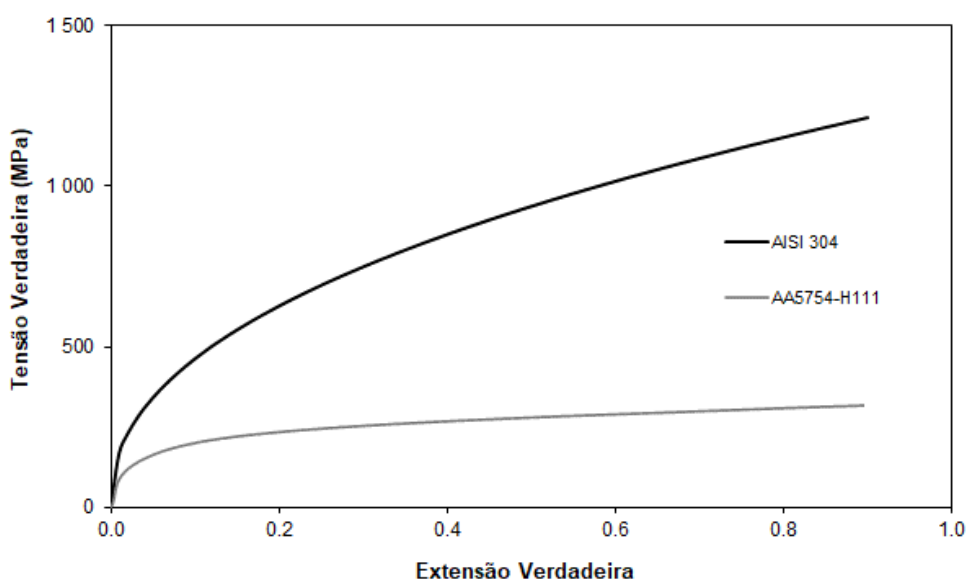


Figura 5. Curva tensão-extensão dos materiais utilizados.

### 3.3. Caracterização do processo experimental

O processo experimental foi dividido em várias etapas que foram repetidas para as diferentes estratégias analisadas e consistem generalizadamente na fabricação dos rebites e das chapas, no fabrico das uniões e nos ensaios destrutivos dessas uniões mecânicas.

O fabrico do rebite foi realizado a partir de um tubo de aço cortado de acordo com uma altura inicial  $h_0$  especificada. As seguintes operações incluíram o torneamento do ângulo dos chanfros  $\alpha$  e também dos entalhes triangulares e circulares, nos casos em que a sua influência foi estudada.



Figura 6. Exemplo de rebites produzidos com entalhes (a) e com diferentes reduções de altura inicial (b).

Em relação às chapas, as espessuras de 1.5 mm foram obtidas através da fresagem de chapas de espessura de 5 mm para efeitos de comparação com o estudo realizado na referência [9].

Com o intuito de analisar a progressão e interação entre os materiais, e as cargas de compressão envolvidas no processo de rebitagem, as ligações foram produzidas na mesma prensa hidráulica utilizada para a caracterização dos materiais que tem uma capacidade de carga máxima igual a 1200 kN (Figura 7).

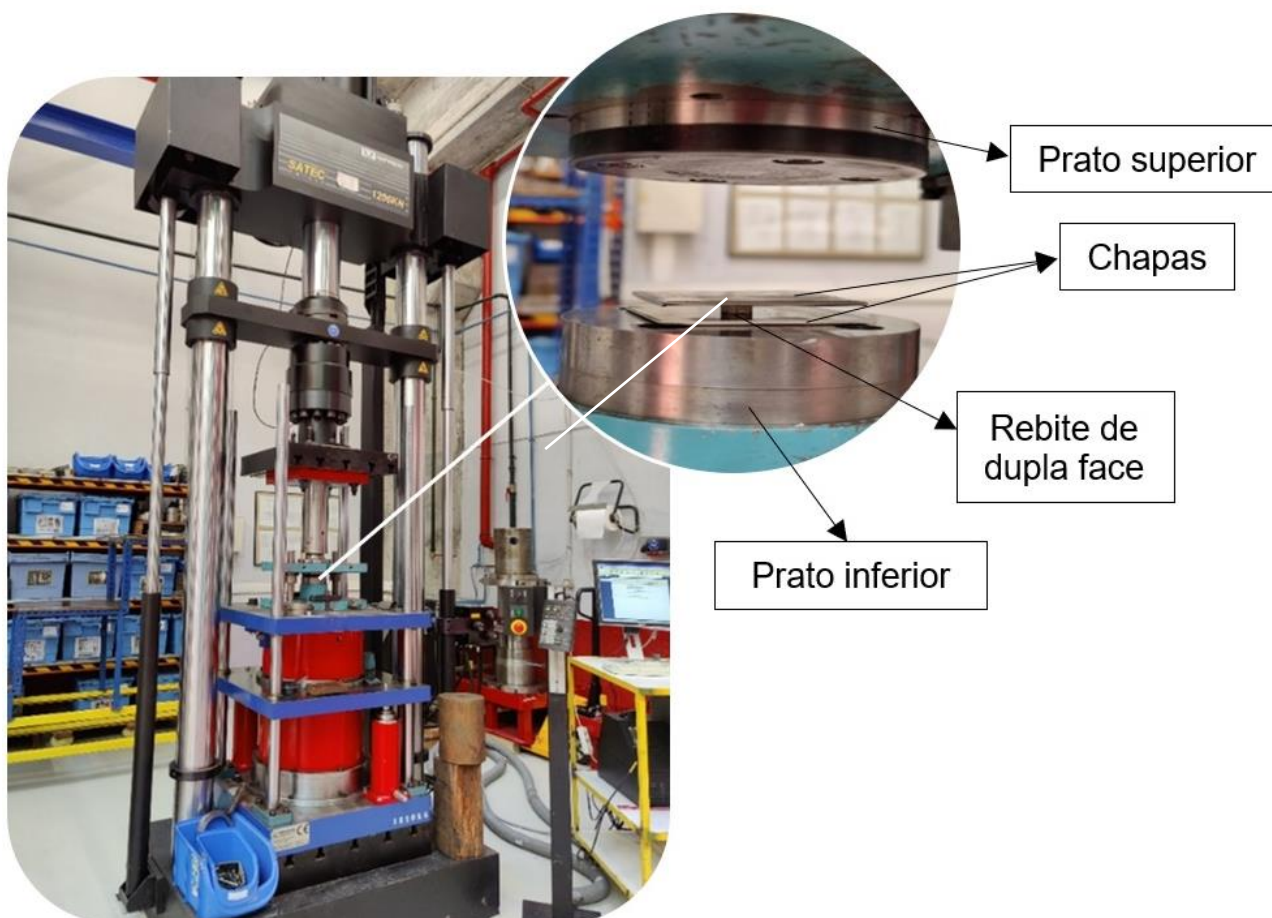


Figura 7. Máquina de ensaios utilizada nos ensaios experimentais realizados. O detalhe da figura apresenta a configuração da montagem das chapas e do rebite tubular antes da compressão e respetiva ligação.

Os ensaios destrutivos da ligação mecânica foram realizados de acordo com a norma ISO 12996:2013 que estabelece a geometria dos provetes de teste e o procedimento de avaliação da resistência ao corte para ligações mecânicas singulares numa ou mais chapas sobrepostas e até um limite de 5 mm de espessura por chapa [10]. O propósito destes ensaios é determinar as características mecânicas e os modos de deformação das juntas produzidas por diferentes métodos. Estes ensaios foram realizados na máquina de ensaios Instron 5900R (Figura 8).



Figura 8. Máquina de ensaios utilizada e configuração utilizada para testar o desempenho das ligações produzidas.

### 3.4. Plano de trabalhos

Para a primeira estratégia desenvolvida que consiste na introdução de entalhes triangulares e circulares foi testada a gama de parâmetros listada na Tabela 1 que inclui variações do ângulo dos chanfros  $\alpha$  para cada dimensão do entalhe triangular e circular utilizado, de acordo com os parâmetros apresentados nos detalhes A e B da Figura 4.

Tabela 1. Gama de parâmetros utilizados na primeira estratégia desenvolvida.

<b>Rebite</b>						
Material	$d_0$ (mm)	$h_0$ (mm)	$t_0$ (mm)	$\alpha$ (°)	$h_e$ (mm)	$w_e$ (mm)
AISI 304	10	10	1.5	30, 45	1	1
<b>Chapas</b>						
Material	$t_{s1}$ (mm)	$t_{s2}$ (mm)				
AA5754-H111	5	5				

Por sua vez, para a segunda estratégia desenvolvida que consiste na redução da altura inicial  $h_0$  do rebite tubular, a Tabela 2 apresenta as diferentes alturas e espessuras que foram analisadas durante estes testes, de acordo com os detalhes A' e B' da Figura 4.

Tabela 2. Gama de parâmetros utilizados na segunda estratégia desenvolvida.

<b>Rebite</b>				
Material	$d_0$ (mm)	$h_0$ (mm)	$t_0$ (mm)	$\alpha$ (°)
AISI 304	10	3, 4, 5	0.75, 1.5	45
<b>Chapas</b>				
Material	$t_{s1}$ (mm)	$t_{s2}$ (mm)		
AA5754-H111	1.5	1.5		

## 4. Desenvolvimento numérico

A utilização de programas de elementos finitos é essencial para uma correta e detalhada análise da mecânica da deformação do processo de DSSPR e da influência de cada variável analisada e introduzida na ligação mecânica produzida. Ao mesmo tempo, esta análise numérica permite prever e avaliar os resultados experimentais obtidos e possíveis erros introduzidos durante o fabrico dos provetes ou durante o processo de deformação. Ensaios de tentativa e erro que podem ser dispendiosos e que desperdiçam os recursos de matéria-prima são também bastante reduzidos com esta abordagem numérica.

Para as simulações numéricas foi utilizado o programa de elementos finitos I-FORM 2D desenvolvido pela seção de Tecnologia Mecânica do Instituto Superior Técnico e que tem sido validado ao longo dos anos em simulações de processos de enformação plástica. Este programa de elementos finitos é composto por três interfaces de utilizador (PRE, POST e REMESH) e uma interface executável que executa as simulações numéricas. Na interface PRE são definidas as condições da simulação numérica desde os parâmetros geométricos (geometrias das ferramentas e peças) aos parâmetros processuais (materiais, velocidades, condições de atrito, etc.). Após essa definição, a análise de elementos finitos é realizada e os seus resultados numéricos e gráficos podem ser analisados através da interface POST. Por sua vez, a interface REMESH permite realizar refinamentos locais e globais da malha que são essenciais para aumentar o rigor da análise efetuada, porém resultando num aumento do tempo de computação, uma vez que uma malha muito discretizada exige a resolução de sistemas de equações mais complexos. O refinamento das geometrias é realizado sempre que existam elevadas distorções das malhas que impossibilitem a continuação da simulação numérica, sendo necessário redefinir a estrutura dessas malhas. A modelação numérica do processo de DSSPR teve em consideração a axissimetria das geometrias e os cálculos numéricos foram restringidos ao primeiro quadrante da seção cruzada da ligação tal como apresentado na Figura 9.

As ferramentas foram consideradas objetos rígidos e discretizadas por meio de elementos lineares de contato-atrito. Tanto as chapas como os rebites foram modelados como objetos deformáveis e discretizados através de elementos quadrilaterais. As chapas foram inicialmente discretizadas com 1000 elementos e após os refinamentos intermédios globais que foram realizados ao longo da simulação, foi observado um aumento de quase dez vezes



mais elementos que inicialmente. Os rebites foram discretizados com aproximadamente 100 elementos.

O atrito foi modelado de acordo com uma lei de atrito constante (modelo de atrito de Prandtl) e o fator de atrito escolhido foi de 0.3, tendo em conta não só as propriedades dos materiais envolvidos na interface de contato, mas também a sua validação de acordo com os resultados de força obtidos experimentalmente, quando comparados com as forças previstas numericamente. O fator de atrito entre a interface peça-ferramenta foi definido como 0.1.

A Figura 9 mostra o modelo de elementos finitos utilizados com a respetiva discretização inicial e no final da simulação do processo após sucessivas operações de refinamento.

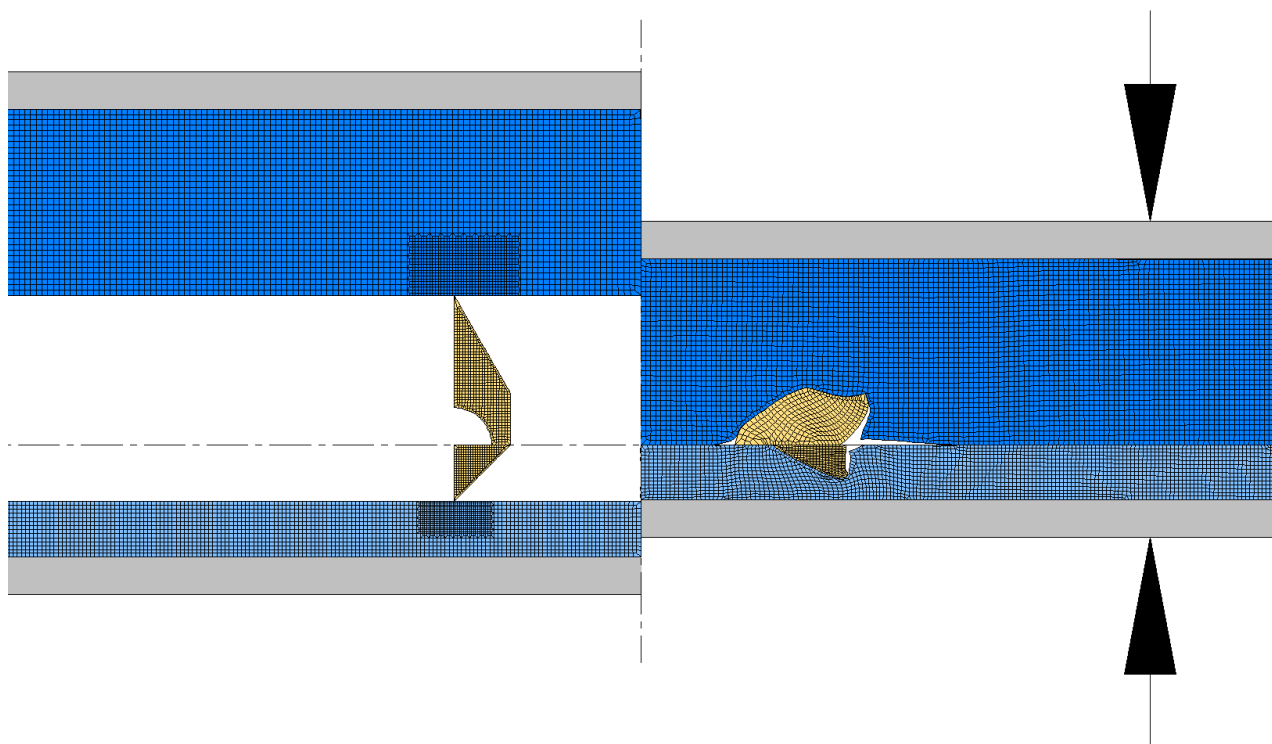


Figura 9. Discretização inicial (à esquerda) e final (à direita) de uma simulação numérica do processo de DSSPR para um rebite com um entalhe circular (metade superior) e uma altura reduzida (metade inferior).

## 5. Discussão de resultados

### 5.1. Introdução de entalhes na parede do rebite

Para analisar a redução de altura final provocada pela introdução de entalhes na parede do rebite, estes ensaios foram realizados em chapas com 5 mm de espessura e de acordo com os parâmetros apresentados na Tabela 1.

O corte transversal das ligações obtidas permite revelar as seções cruzadas tais como aquelas apresentadas na Figura 10 onde é possível observar para os dois ângulos analisados com o mesmo entalhe triangular, que a introdução do entalhe permite aumentar a expansão radial e a dobragem do rebite tal como previsto, aumentando o bloqueio mecânico da união produzida. O mesmo acontece novamente para os dois mesmos ângulos com um entalhe circular, verificando-se visualmente uma maior redução de altura quando comparado com os rebites de entalhe triangular.

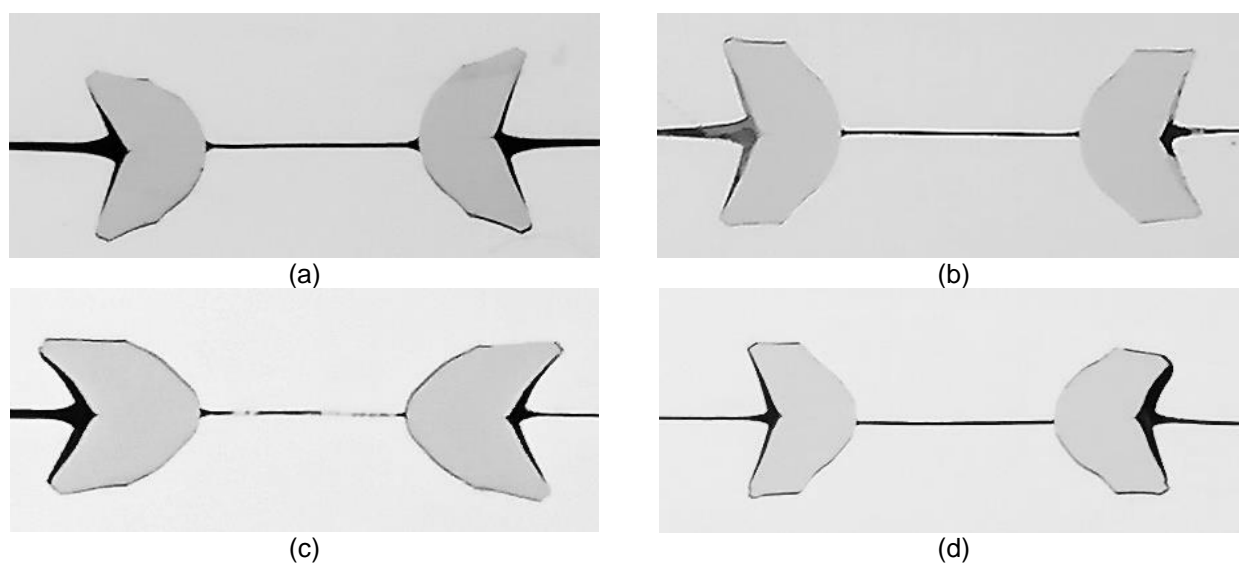
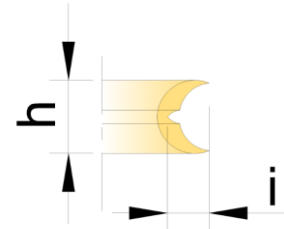


Figura 10. Resultados experimentais dos ensaios de rebites com: Entalhes triangulares e ângulos de chanfro iguais a (a) 30° e (b) 45°; Entalhes circulares e ângulos de chanfro iguais a (c) 30° e (d) 45°.

A média das distâncias de bloqueio mecânico  $i$  bem como média das alturas finais de cada rebite testado são apresentadas na Tabela 3, onde se incluem os resultados obtidos para rebites tubulares sem entalhes para a mesma espessura de chapa.

Tabela 3. Distâncias de bloqueio mecânico e alturas finais de rebites com e sem entalhes.

Altura inicial $h_0$ (mm)	Tipo de entalhe	Ângulo dos chanfros $\alpha$			
		30°		45°	
		$i$ (mm)	$h$ (mm)	$i$ (mm)	$h$ (mm)
10	Triangular	1.31	5.26	1.00	6.26
	Circular	1.53	4.23	1.31	5.1
	Sem entalhe	1.24	5.47	0.71	6.98



Através da Tabela 3 conclui-se que a expansão radial é máxima quando a altura final é mínima tanto quanto possível, dando origem a uma distância limite de bloqueio mecânico. O aumento combinado da distância de bloqueio mecânico e da redução de altura é apenas superior no rebite com entalhe circular, porém ainda não é suficiente para aplicar esta configuração de rebite a chapas de espessura mais fina. O objetivo de unir diferentes espessuras com praticamente a mesma configuração de rebite apenas com algumas modificações topológicas não é assim satisfeito. Além disso, analisando as seções da Figura 11 ao microscópio, verifica-se a existência de fissuras nas regiões dos entalhes cuja propagação é mais acentuada nos rebites com entalhes triangulares.

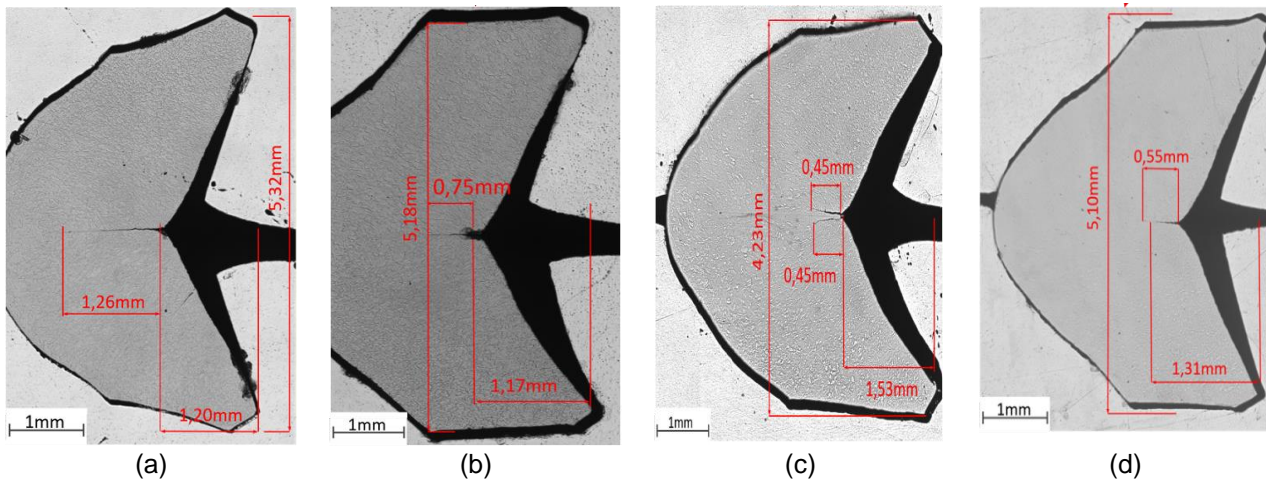


Figura 11. Análise microscópica dos resultados experimentais dos ensaios de rebites com: Entalhes triangulares e ângulos de chanfro iguais a (a) 30° e (b) 45°; Entalhes circulares e ângulos de chanfro iguais a (c) 30° e (d) 45°.

Esta observação limita o desempenho das uniões criadas sobretudo para cargas dinâmicas e de vibração que sujeitam a ligação a esforços de corte. Por esta razão, o desempenho das ligações produzidas com rebites com entalhes têm um desempenho inferior àquelas obtidas por um rebite sem entalhes como se observa na Tabela 4.

Tabela 4. Força máxima obtida para cada uma das ligações testadas na sua resistência ao corte.

Altura inicial $h_0$ (mm)	Tipo de entalhe	Força máxima da ligação (kN)	
		30°	45°
10	Triangular	-	8.08
	Circular	6.95	8.94
	Sem entalhe	-	11.58

Em particular, na Figura 11c onde se analisa um rebite com um entalhe circular e um ângulo de chanfro igual a 30°, que oferece a maior redução de altura (altura final de 4.23 mm) são visíveis duas fissuras na região interior circundante ao entalhe circular que certamente limitarão a vida útil da ligação, como evidencia a reduzida força máxima de 6.95 kN que a ligação consegue suportar, quando comparada com a força máxima da ligação produzida com rebites sem entalhe. A utilização de um aço mais dúctil poderá talvez solucionar esta abertura e propagação de fissura, e permitir a utilização de entalhes nos rebites para possibilitar a união de diferentes espessuras com o mesmo rebite tal como idealizado por esta estratégia.

Dado que não foi realizada nenhuma calibração de dano nem esta propriedade foi tida em consideração no modelo de elementos finitos utilizado, não é possível observar as fissuras observadas experimentalmente nas simulações numéricas da Figura 12 e apenas se observa um grande alargamento radial do rebite que o sujeita a esforços de tração, combinado com uma grande dobragem do material de rebite sobre si próprio na região onde foram introduzidos os entalhes. Estas observações justificam a formação e propagação de fissuras nessa região. Importa também referir que as modelações numéricas apresentadas dizem respeito ao instante onde ocorre o fecho da ligação e que após a recuperação elástica dos materiais envolvidos (ou seja, após a remoção das ferramentas), os materiais vão recuperar parcialmente no sentido da sua posição original, justificando novamente a ocorrência de fissuras na região dos entalhes. Também na Figura 12 se observa uma altura final ligeiramente inferior no caso da utilização de rebites com entalhes circulares, tal como verificado nos ensaios experimentais.

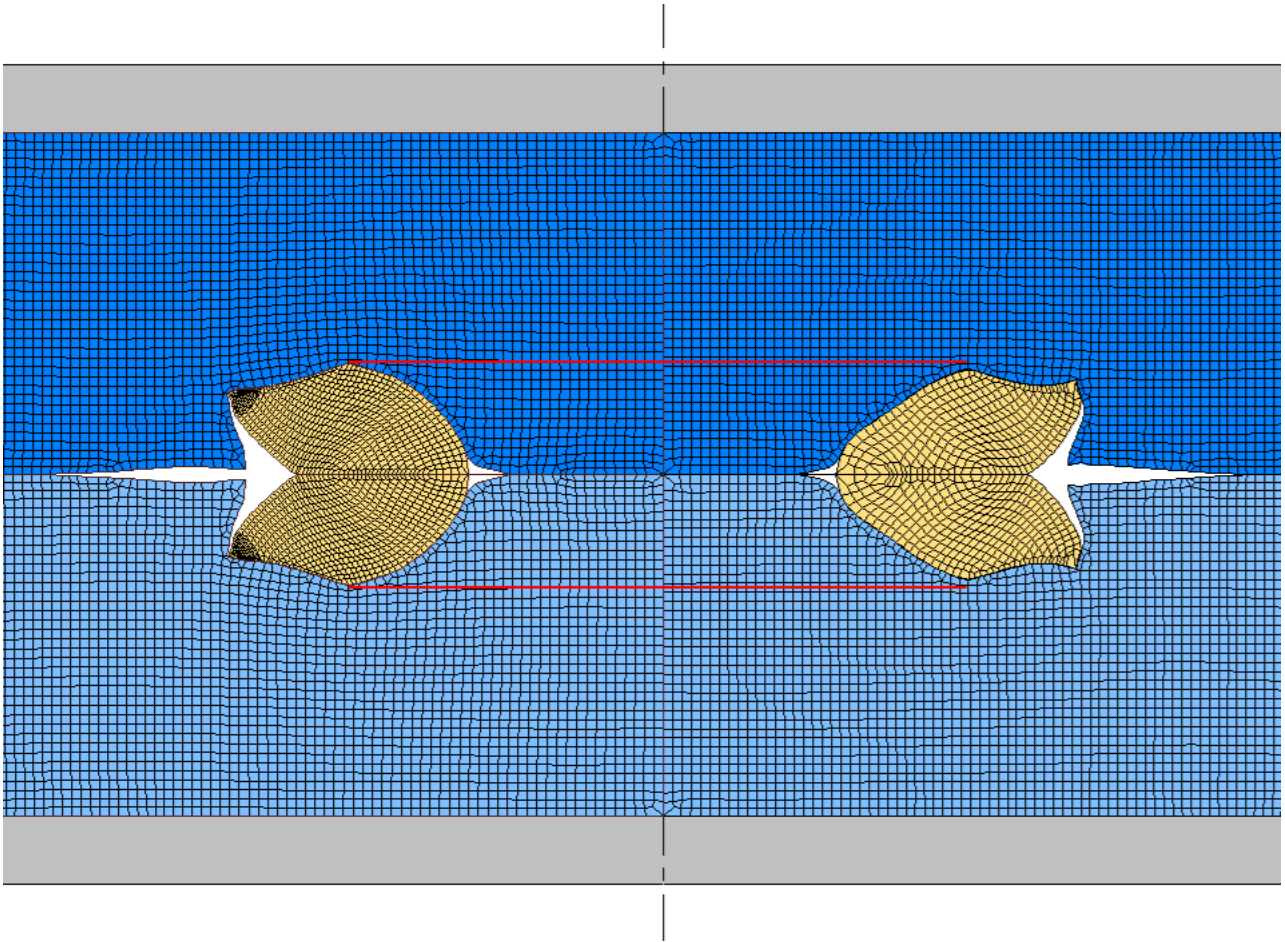


Figura 12. Resultados da simulação numérica para ligações produzida por um rebite com ângulos de chanfro iguais a  $30^\circ$  e entalhes triangulares (à esquerda) e circulares (à direita).

## 5.2. Redução da altura inicial do rebite

Após os resultados obtidos com as modificações topológicas produzidas nos rebites, foi estudada a influência da altura inicial do rebite no processo de ligação mecânica por DSSPR. À semelhança do estudo realizado por Alves et al. [9] em chapas de igual espessura de 5 mm em que foram analisadas alturas iniciais próximas da relação  $h_0 = t_{s_1} + t_{s_2}$ , começou-se por analisar uma altura inicial de rebite igual a 3 mm, verificando a sua capacidade de produzir uniões através deste processo de rebitagem em chapas com espessura igual a 1.5 mm, dado que esta espessura se apresenta como limite para o processo de rebitagem auto-perfurante convencional (SPR) em algumas combinações de materiais.

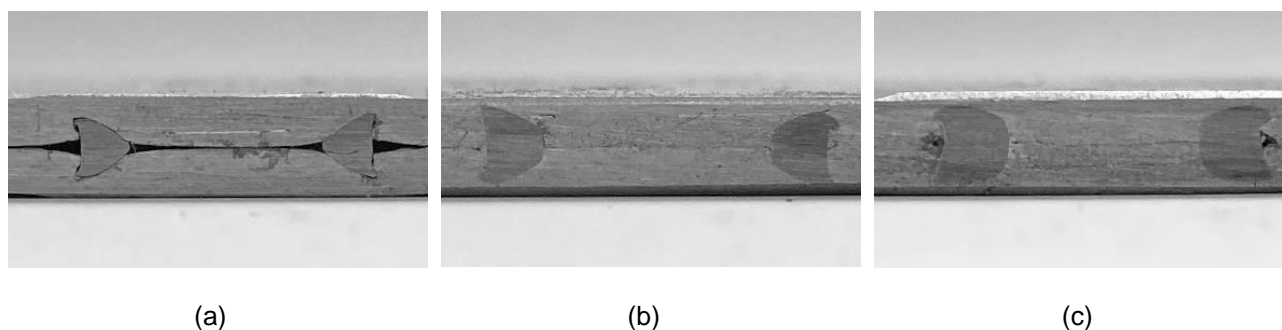


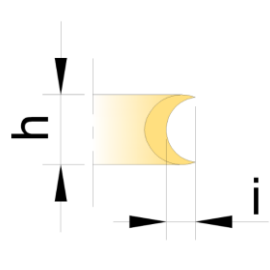
Figura 13. Resultados experimentais para a análise da influência da altura inicial dos rebites na produção do mecanismo de união mecânica para alturas iniciais de (a) 3 mm, (b) 4 mm e (c) 5 mm, com ângulos de chanfros  $\alpha$  iguais a 45°.

Analisando a Figura 13a é possível observar que para uma altura inicial de rebite igual a 3 mm ocorre um engrossamento da espessura do rebite, o que dificulta a expansão radial e conseqüente dobragem do mesmo, produzindo-se um bloqueio mecânico reduzido como se observa pela Tabela 5. O aumento da altura inicial do rebite com o objetivo de promover a expansão e dobragem do rebite também não produzem bons resultados tal como mostram as Figuras 13b e 13c. Através da Figura 13b é possível observar que o rebite penetra ambas as chapas e a sua expansão radial é muito reduzida, existindo uma dobragem também reduzida das suas extremidades que contribuiu muito pouco para o aumento da distância de bloqueio mecânico (ver Tabela 5), produzindo um dos bloqueios mecânicos mais reduzidos de todo o conjunto testado.

Observando a Figura 13c que resulta de uma altura inicial de rebite igual a 5 mm observa-se uma maior expansão radial e conseqüente dobragem das extremidades do rebite, embora exista um perceptível escoamento radial da chapa que provoca um ligeiro afastamento entre o rebite e a chapa, visível pelo material que se encontra em falta entre estas duas

geometrias. Por este motivo, embora este caso produza uma distância de bloqueio mecânico considerável é necessário ter em conta que o desempenho da união pode ser prejudicado. De igual forma, é também visível o surgimento de uma protuberância nas superfícies exteriores da chapa devido à deformação provocada pela elevada altura final do rebite, que em certos casos poderá até provocar fissuras ou mesmo penetrar a superfície da chapa até ao exterior, inutilizando a ligação mecânica produzida.

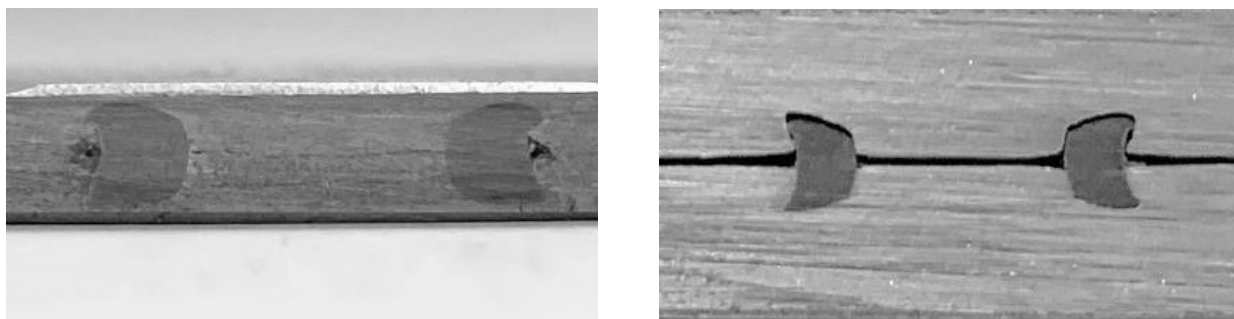
Tabela 5. Distâncias de bloqueio mecânico  $i$  e alturas finais  $h$  dos rebites ensaiados.

Altura inicial $h_0$ (mm)	Espessura inicial $t_0$ (mm)	$i$ (mm)	$h$ (mm)	
3	0.75	0.351	1.71	
	1.5	0.223	2.00	
0.171		2.25		
0.293		2.342		

A altura inicial de 5 mm para as mesmas condições utilizadas neste estudo já tinha sido avaliada por Alves et al. [9] durante a união de chapas de 5 mm de espessura. A comparação apresentada nas Figuras 14a e 14b permite verificar que a morfologia do rebite é muito semelhante assim como as evoluções de força-deslocamento numérico-experimentais que são apresentadas na Figura 14c. No entanto, analisando as duas seções com mais detalhe, é possível observar que para as chapas de espessura igual a 1.5 mm, a largura final da parede do rebite bem como a altura final são superiores em, respetivamente, cerca de 1 e 0.5 mm. As diferenças nestas duas dimensões dos rebites podem ser o resultado de um maior constrangimento produzido pelas maiores extensões a que os materiais estão sujeitos e consequentemente, às elevadas pressões que se desenvolvem perto das superfícies exteriores das chapas devido ao contato com a ferramenta, e que forçam o rebite a dobrar sobre si próprio provocando um maior engrossamento da sua espessura.

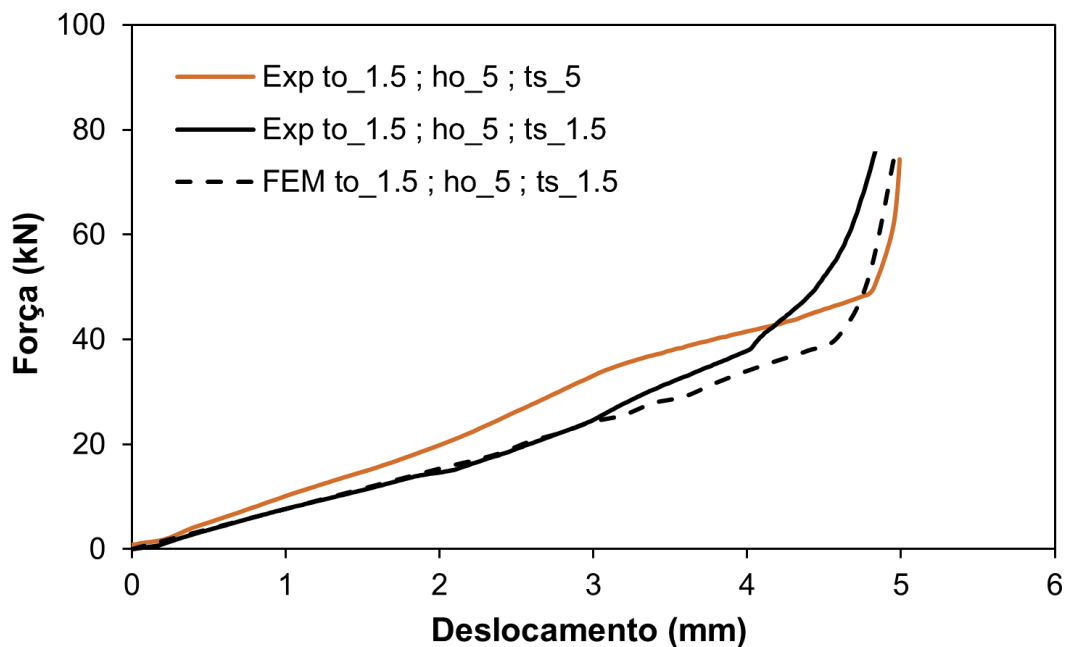
Desta forma, a solução para se produzir uniões mecânicas por DSSPR em chapas cuja espessura é menor ou igual à espessura do rebite para os parâmetros testados e que foram mantidos constantes, passa pela redução da espessura do rebite de modo a produzir a expansão radial e dobragem necessária para garantir um bloqueio mecânico adequado que determina entre outros aspetos, a segurança da ligação mecânica. Caso contrário, apenas

ocorrerá um engrossamento da parede do rebite com reduzidos níveis de bloqueio mecânico.



(a)

(b)



(c)

Figura 14. Ligação mecânica por DSSPR em chapas de espessura igual a (a) 1.5 mm e (b) 5 mm, utilizando rebites com uma altura inicial de 5 mm, e (c) respectivos andamentos de força-deslocamento.

Face às conclusões anteriores, a espessura inicial do rebite foi reduzida a metade, ou seja, 0.75 mm em vez dos anteriores 1.5 mm, de modo a produzir a morfologia do rebite pretendida. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 15 que apresenta uma comparação numérico-experimental entre rebites com espessuras iniciais iguais a 1.5 mm (Figura 15a) e 0.75 mm (Figura 15b). Pode observar-se que a redução da espessura inicial do rebite para metade do valor original permite obter uma adequada expansão radial e dobragem que se traduz numa distância de bloqueio mecânico superior (0.351 mm em vez



de 0.223 mm) e numa altura final inferior (1.71 mm em vez de 2.00 mm), criando a possibilidade de se produzir uniões mecânicas com esta tecnologia de união em chapas de menor espessura do que as testadas.

A correlação entre os resultados experimentais e numéricos é adequada e as diferenças observadas resultam do facto dos resultados numéricos apresentados serem referentes ao momento do fecho da ligação em que ambas as chapas estão em contato entre si e com a ferramenta. Os espaços em vazio entre o rebite e as chapas apresentados nas simulações numéricas que não são tão visíveis nos resultados experimentais são diminuídos após a recuperação elástica dos materiais. Após o corte transversal do provete experimental realizado de forma a revelar a seção da ligação produzida, o nível de recuperação elástica é ainda superior pois o constrangimento radial produzido pelo rebite é assim eliminado.

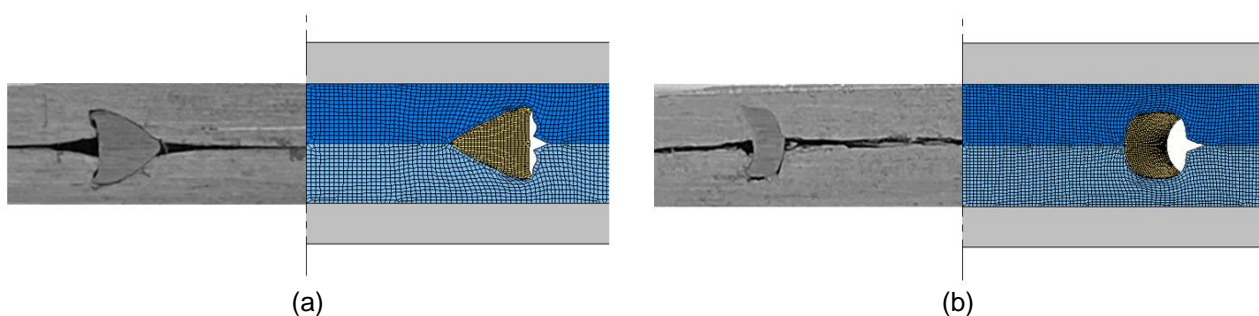


Figura 15. Comparação numérico experimental entre as ligações produzidas com rebites de espessuras iniciais iguais a (a) 1.5 mm e (b) 0.75 mm.

Analisando a curva de força-deslocamento apresentada na Figura 16, observa-se uma evolução semelhante das forças numérico-experimentais com o deslocamento, entre as uniões produzidas com rebites de espessuras iniciais iguais a 1.5 mm e 0.75 mm. O crescimento da força ocorre mais rapidamente para o rebite de espessura inicial igual a 1.5 mm devido à maior área de contato desse rebite, resultado da sua maior espessura inicial e consecutivo alargamento ao longo da penetração das chapas. O crescimento da força é mais acentuado no rebite de espessura inicial igual a 1.5 mm até ao momento em que as duas chapas entram em contato, a partir do qual ambas as espessuras iniciais do rebite de 1.5 mm e 0.75 mm têm o mesmo andamento numérico e experimental.

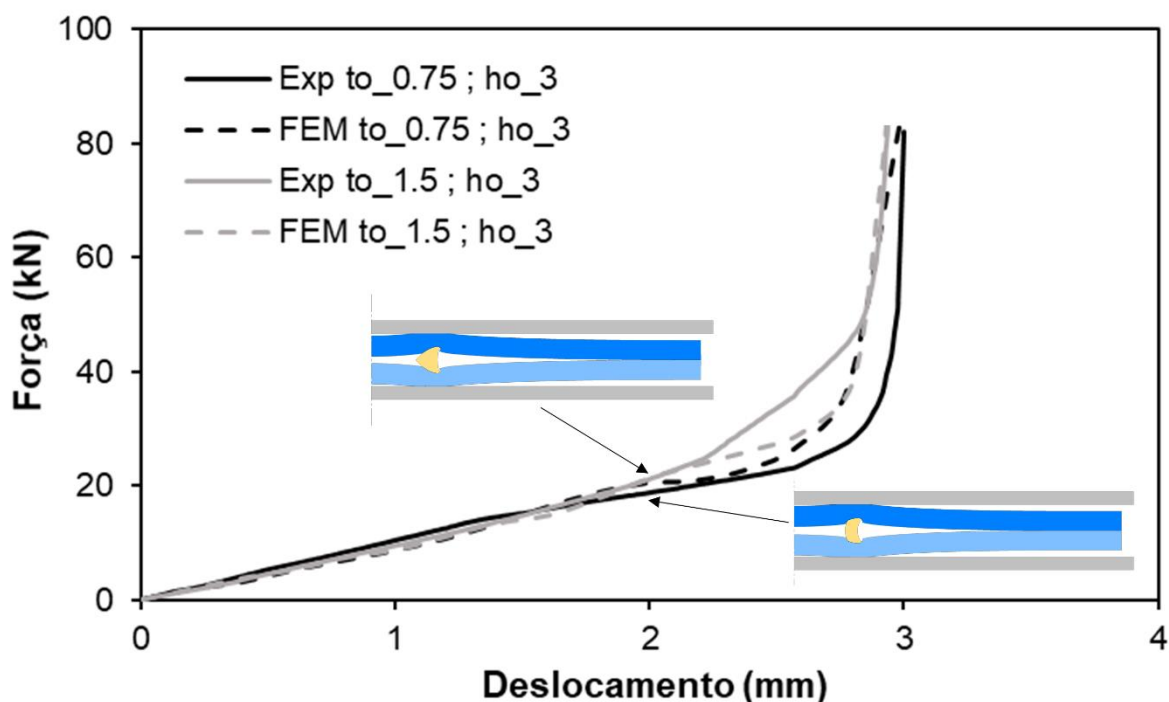


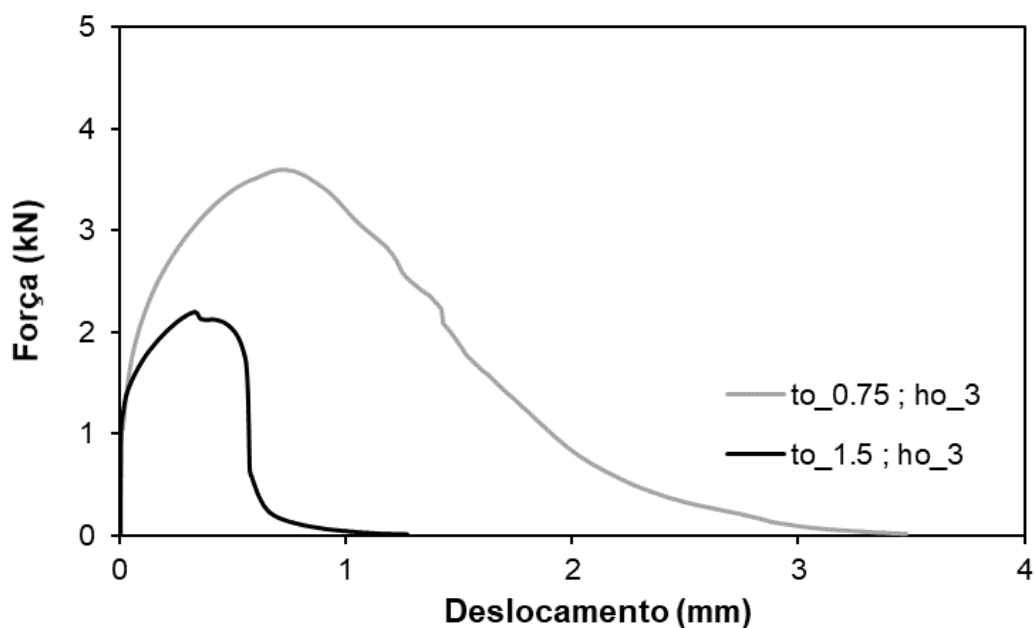
Figura 16. Evolução de força-deslocamento numérico-experimental entre as ligações produzidas com rebites de espessuras iniciais iguais a 1.5 mm e 0.75 mm.

O sucesso da modificação introduzida é também demonstrado pelos ensaios destrutivos realizados de acordo com a Figura 8. Os resultados são apresentados na Tabela 6 e na Figura 17. Com efeito, o rebite de espessura inicial igual a 0.75 mm consegue suportar uma carga superior em 1.4 kN à carga do rebite com 1.5 mm de espessura inicial. Comparando com a ligação por DSSPR produzida anteriormente por Alves et al. [9] em chapas com uma espessura de 5 mm e utilizando rebites com uma altura inicial de 8 mm e espessura inicial de 1.5 mm, os resultados obtidos para chapas com uma espessura de 1.5 mm são obviamente inferiores dado que neste ensaio destrutivo, a área da seção do rebite tem uma grande influência no desempenho da ligação e por esse motivo, quanto maior for essa área, maior será a força máxima que a ligação consegue suportar.

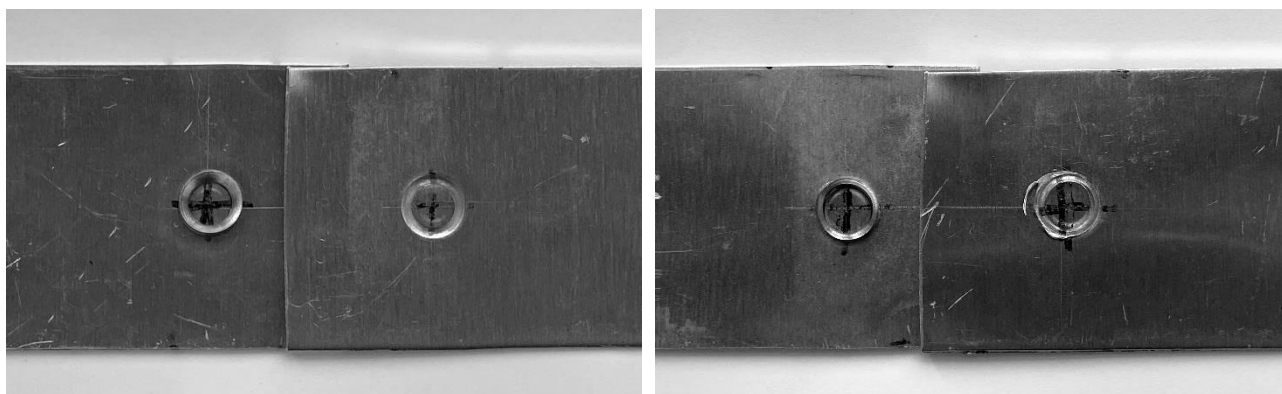
Tabela 6. Forças máximas de resistência ao corte das ligações em chapas de 1.5 mm e em chapas de 5 mm [9].

Altura inicial $h_0$ (mm)	Espessura inicial do rebite $t_0$ (mm)	Espessura inicial da chapa $t_s$ (mm)	Força máxima da ligação (kN)
3	0.75	1.5	3.6
	1.50		2.2
8	1.50	5	11.5

Para além disso, o rebite com 0.75 mm de espessura inicial suporta também níveis de deslocamento duas vezes superiores antes de ocorrer a separação das duas chapas tal como mostra a Figura 17a. A razão para esta observação deve-se ao maior bloqueio mecânico que resulta da maior dobragem que esse rebite sofre durante o processo de união e, portanto, durante a separação das duas chapas o rebite necessita de se desdobrar e ao longo desse movimento vai rasgando o material da chapa produzindo uma apana tal como mostra a Figura 17c, e sendo assim a separação desta união dificultada ao contrário do que acontece para o rebite com 1.50 mm de espessura inicial (Figura 17b).



(a)



(b)

(c)

Figura 17. (a) Evolução da força com o deslocamento para os ensaios destrutivos das ligações produzidas e fotografias dos provetes experimentais após esses ensaios para os rebites de espessura inicial igual a (b) 1.5 mm e (c) 0.75 mm.

Com base nos resultados obtidos neste estudo e os resultados já existentes para este processo de DSSPR utilizando os mesmos materiais para os rebites e chapas, e os mesmos parâmetros processuais, foi possível construir a janela de aplicabilidade deste processo apresentada na Figura 18, para rebites com diâmetros exteriores iniciais iguais a 10 mm e ângulos de chanfro iguais a 45°, tendo em conta que as ligações mecânicas são produzidas entre chapas com a mesma espessura. Observando a figura, é possível não só extrair informação para os parâmetros de chapas e rebites já testados, mas também extrapolar esses parâmetros para novas combinações.

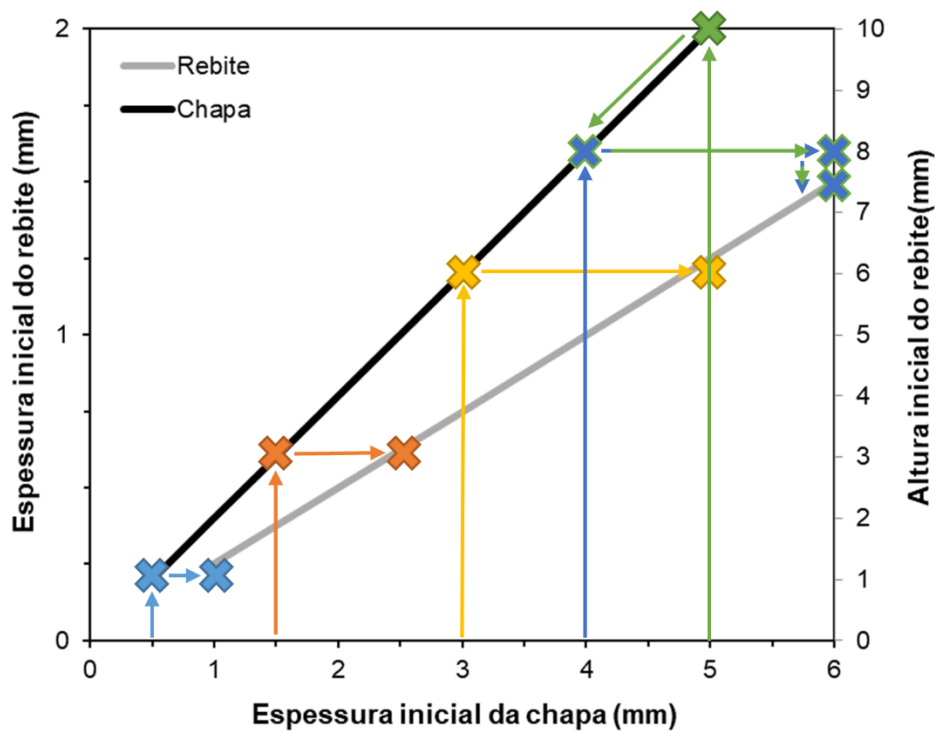


Figura 18. Janela do processo de DSSPR para rebites com diâmetros exteriores iniciais iguais a 10 mm e ângulos de chanfro iguais a 45°, considerando uniões entre chapas de igual espessura.

Analisando o gráfico da Figura 18, é possível retirar que para a união de chapas de espessura inicial igual a 0.5 mm é necessário um rebite com uma altura inicial de 1 mm e uma espessura inicial de 0.25 mm. Assim sendo, verifica-se uma relação que determina que a espessura inicial do rebite deve ser pelo menos metade da espessura da chapa e a sua altura inicial deve ser no máximo igual à soma das espessuras das chapas.

Por outro lado, para chapas com espessura muito grandes como é o caso das chapas de 5 mm anteriormente testadas em [9], observou-se que embora a altura inicial do rebite deva ser no máximo igual à soma das espessuras das chapas, o processo de DSSPR também

produz bons resultados com rebites com uma espessura inicial igual a 1.5 mm e uma altura inicial igual a 8 mm, sendo estes os mesmos parâmetros adequados para produzir a ligação mecânica em chapas com uma espessura de 4 mm. Desta forma, quando se pretende produzir este tipo de uniões com as especificações de rebites referidas em chapas de espessura maior que 4 mm, ou até outras geometrias com muito maior espessura, só existirá a necessidade de aumentar a altura e espessura inicial dos rebites caso os requisitos de desempenho (força máxima) da ligação sejam superiores aos que foram obtidos durante os estudos efetuados.

## 6. Conclusões

Ao longo desta dissertação foram desenvolvidas e analisadas duas estratégias para permitir a aplicação do processo de rebite auto-perfurante de dupla face (DSSPR) a geometrias de espessuras reduzidas, partindo das mesmas dimensões genéricas dos rebites que são utilizados para unir chapas mais espessas.

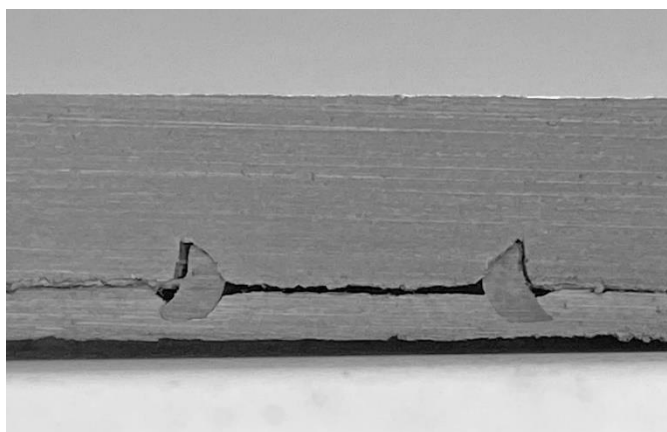
A primeira estratégia que consistiu na introdução de entalhes de diversas geometrias na parede do rebite de modo a fragilizar a sua região central e motivar uma maior expansão radial e consequente dobragem, mostrou-se não ser adequada para os materiais envolvidos surgindo o aparecimento de fissuras na região onde foram introduzidos os entalhes. Para além disso, a redução de altura produzida no rebite não se mostrou ser suficiente para permitir a união de uma gama alargada de espessuras.

A segunda estratégia seguida acaba por ser mais simples que a estratégia anterior, dado que os rebites são de mais fácil produção bastando cortá-los a partir de um tubo original com uma altura mais reduzida. Industrialmente, esses rebites serão produzidos por enformação ou fundição, mas esta alteração introduzida não cria dificuldade acrescidas no processo de fabrico dos rebites. Os resultados desta estratégia mostraram-se viáveis com a possibilidade de permitir a união de chapas mais finas e talvez até de chapas mais espessas, reduzindo-se neste último caso, os níveis de deformação local introduzida nas geometrias. Foram identificadas diferentes alturas iniciais dos rebites e as respetivas espessuras de chapa que conseguem unir, formulando-se assim uma janela para este processo de DSSPR que é fundamental para a sua implementação industrial. A influência da espessura dos rebites foi também analisada no âmbito desta última estratégia, procurando-se identificar os limites entre a relação espessura-altura inicial do rebite e respetiva espessura das geometrias a que pode ser aplicado. Com efeito, concluiu-se que quando a espessura da geometria a ser unida é próxima da espessura do rebite, torna-se necessário reduzir a espessura do rebite a praticamente metade para que em vez de ocorrer apenas um alargamento da parede do rebite durante o processo de união, possa existir a expansão radial e respetiva dobragem que permitem otimizar o desempenho da ligação. No entanto, para solicitações da ligação mecânica ao corte, a obtenção de paredes mais espessas no rebite oferece uma resistência adicional, tal como acontece nas operações de *Clinching* em que se adiciona um rebite sólido à indentação provocada para aumentar o desempenho da união mecânica.

Concluindo, os resultados obtidos nesta dissertação permitem alargar as especificações das geometrias cuja união se pretenda produzir por este processo de ligação por deformação plástica a frio, sem eliminar nenhuma das vantagens inerentes ao processo. Dado que a indústria automóvel tem a necessidade de produzir ligações entre geometrias de espessura fina, o processo de rebiteagem auto-perfurante de dupla face (DSSPR) pode agora finalmente com sucesso substituir o processo de rebiteagem auto-perfurante convencional (SPR), na medida em que dá resposta às necessidades atuais e futuras desta indústria.

## 7. Desenvolvimentos futuros

Os desenvolvimentos futuros do trabalho realizado nesta dissertação consistem sobretudo em perceber a dinâmica do processo de DSSPR durante a união de chapas de espessura fina com chapas de espessura espessa, que permite alargar o campo de aplicação deste processo de união a outras geometrias e permitirá cumprir os requisitos mais exigentes da indústria. Embora este desafio pareça facilmente superável, a verdade é que o constrangimento colocado pelo material que não está em deformação coloca dificuldades à penetração do rebite tal como se mostra na figura seguinte.



*Figura 19. Ligação mecânica por DSSPR entre uma chapa com uma espessura igual a 1 mm e uma chapa com espessura igual a 5 mm com um rebite de ângulo de chanfro igual a 45°.*

Observando a Figura 19 é possível constatar que as maiores extensões e por conseguinte, as maiores pressões que se desenvolvem na chapa de menor espessura levam a que existam um maior alargamento radial do rebite, que poderá talvez ser contornado pela utilização de ângulos de chanfro diferentes em cada uma das extremidades do rebite, de modo a que seja utilizado um ângulo mais pronunciado do lado da chapa que intensifique a penetração do rebite nessa chapa sem aumentar a penetração do rebite na chapa de menor espessura.

Novamente em relação à união entre chapas de espessuras diferentes, será interessante construir uma janela de processo que permita identificar a espessura e altura iniciais do rebite para essas condições. Utilizando o gráfico da Figura 18 que se apresenta na Figura 20, note-se agora a introdução do símbolo  $\neq$  que identifica as espessura e altura iniciais do rebite para as condições da Figura 19, considerando que para o caso de



espessuras diferentes, a espessura inicial da chapa considerada resulta da média das duas espessuras (ou seja, 3 mm para uma combinação entre uma chapa de espessura igual a 1 mm e 5 mm). Esta observação está de acordo com os parâmetros processuais utilizados para produzir a ligação apresentada na Figura 19, onde é utilizado um rebite com altura inicial de 3 mm e espessura inicial de 0.75 mm.

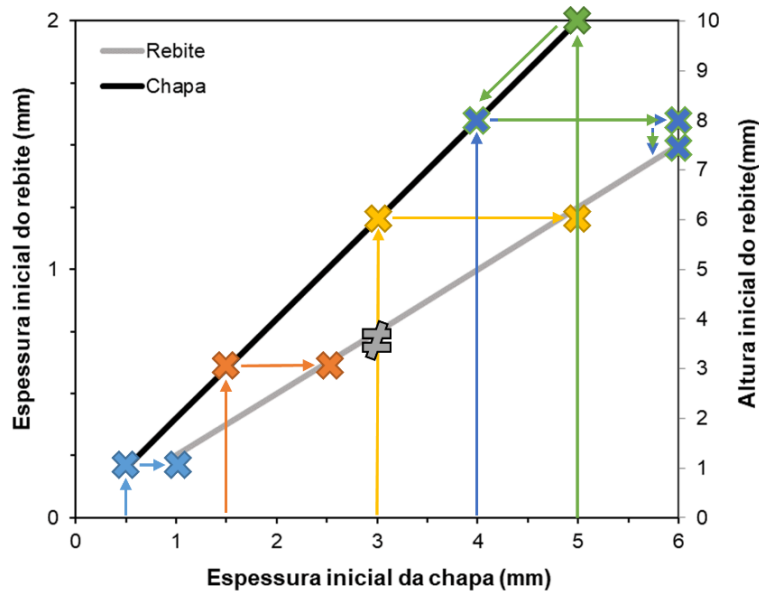


Figura 20. Exemplo de janela do processo de DSSPR para rebites com diâmetros exteriores iniciais iguais a 10 mm e ângulos de chanfro iguais a 45°, considerando agora uniões entre chapas de espessura diferente.

No mesmo sentido, será interessante avaliar o desempenho de geometrias produzidas com rebites de diâmetro e altura reduzida que consigam talvez dar resposta às necessidades de produzir reduzidos níveis de deformação local em alguns materiais, permitindo uma gama alargada de aplicações.

No campo de avaliação do desempenho das ligações a longo prazo, torna-se necessário realizar ensaios destrutivos e não destrutivos que permitam identificar os diferentes modos de deformação e falha que podem surgir neste tipo de ligações. Apenas com esta análise exaustiva será possível proceder a uma implementação industrial efetiva e validar o novo processo de união, aproveitando o facto dos equipamentos a serem utilizados poderem facilmente ser adaptados dos atualmente utilizados no processo de rebite auto-perfurante convencional (SPR).

## Referências

- [1] Volvo. We adjusted front-rear structure for safety in electric XC40. Repairer Driven News (acedido a 8 de Julho, 2021). <https://www.repairerdrivennews.com/2019/09/26/volvo-we-adjusted-front-rear-structure-for-safety-in-electric-xc40/>
- [2] X. He. Clinching for sheet materials. *Science and Technology of Advanced Materials*, 18 (2017), pp. 381-405
- [3] M.M. Eshtayeh, M. Hrairi, A.K.M. Mohiuddin. Clinching process for joining dissimilar materials: state of the art. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82 (2016), pp. 179–195.
- [4] Y. Zhang, X. He, Y. Wang, Y. Lu, F. Gu, A. Ball. Study on failure mechanism of mechanical clinching in aluminium sheet materials. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96 (2018), pp. 3057–3068.
- [5] F. Aslan, L. Langlois, T. Balan, Experimental analysis of the flow drill screw driving process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104 (2019), pp. 2377–2388.
- [6] L. Claus. New screws cut weight when joining parts and sheets of metals, *Machine Design*, May 26 (2016).
- [7] X. He, I. Pearson, K. Young. Self-pierce riveting for sheet materials: State-of-the-art. *Journal of Materials Processing Technology*, 199 (2008), pp. 27-36.
- [8] D. Li, A. Chrysanthou, I. Patel, G. Williams. Self-piercing riveting - a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92 (2017), pp. 1777-1824.
- [9] L.M. Alves, R.M. Afonso, P.A.F. Martins, Double-sided self-pierce riveting, *International Journal Advanced Manufacturing Technology*. 108 (2020), pp. 1541-1549.
- [10] ISO. Mechanical joining — Destructive testing of joints — Specimen dimensions and test procedure for tensile shear testing of single joints. ISO 12996:2013 (Julho, 2013).