

REBITAGEM AUTO-PERFORANTE DE DUPLA FACE APLICADA A CHAPAS DE ESPESSURA FINA

Ricardo Jorge Moura Rita

ricardo.rita@tecnico.ulisboa.pt

Instituto Superior Técnico, Universidade Lisboa, Portugal

Setembro 2021

Palavras-Chave: Rebitagem auto-perfurante de dupla face, Ligações assistidas por deformação plástica, Ligações mecânicas, Chapas, Rebites Tubulares.

Resumo: A presente dissertação visa analisar a aplicação de um processo de rebitagem auto-perfurante de dupla face (*Double-Sided Self-Pierce Riveting*, na terminologia inglesa) para produzir ligações mecânicas entre chapas de espessuras reduzidas. 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. A resistência das ligações produzidas é avaliada por meio de ensaios destrutivos de resistência ao corte.

1. Introdução

No universo dos processos de união por deformação plástica (*Joining by Forming*), mais concretamente nos processos de rebitagem, tem sido desenvolvido um processo de rebitagem 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

paralelos, 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.

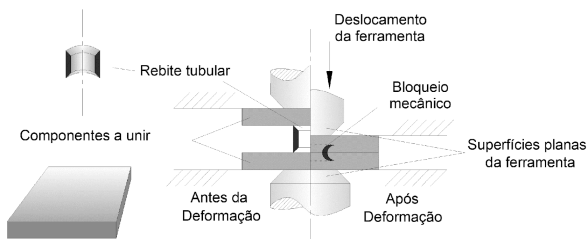


Figura 1. Processo de rebiteagem auto-perfurante de dupla face (DSSPR).

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. 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.

2. Desenvolvimento

Experimental

2.1. Estratégias adotadas

O processo de rebiteagem auto-perfurante de dupla-face (DSSPR) é apresentado esquematicamente na Figura 2 onde se identifica os seus principais parâmetros processuais. Os parâmetros associados às chapas consistem unicamente nas suas espessuras t_{s_1} e t_{s_2} , 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 α .

Estes parâmetros são responsáveis pela forma final e desempenho da ligação mecânica produzida, e pela observação dos detalhes apresentados na Figura 2 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 .

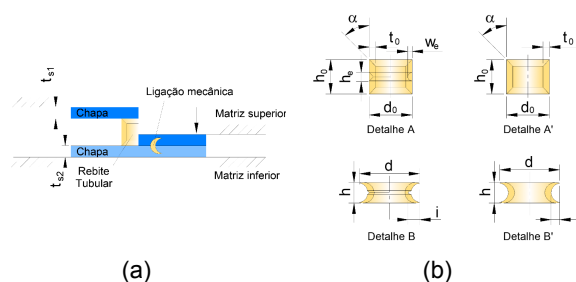


Figura 2. Representação esquemática de uma secção unida por DSSPR (a) antes (esquerda) e depois do processo de união (direita), bem como (b) detalhes das diferentes modificações introduzidas nos rebites para produzir uniões entre chapas de espessura fina utilizando rebites com entalhes (detalhes A e 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. [1], 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 [1], 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 [1] já tinha concluído que as melhores uniões eram obtidas para ângulo dos chanfros α 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'). 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.

2.2. 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.

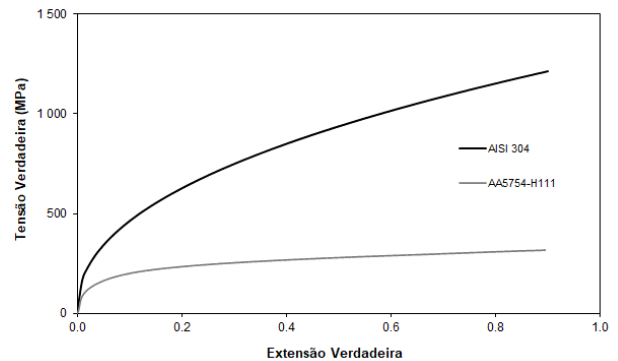


Figura 3. Curva tensão-extensão dos materiais utilizados.

A curva tensão-extensão destes materiais é apresentada na Figura 3 e foi obtida através de ensaios de compressão realizados numa prensa hidráulica (Instron SATEC 1200 kN) com uma velocidade de 5 mm/min.

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. [1] dado que foram estes os materiais utilizados nesse estudo.

2.4. 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 α para cada dimensão do entalhe triangular e circular utilizado, de acordo com os parâmetros apresentados nos detalhes A e B da Figura 2.

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

Rebite						
Material	d_0 (mm)	h_0 (mm)	t_0 (mm)	α (°)	h_e (mm)	w_e (mm)
AISI 304	10	10	1.5	30, 45	1	1
Chapas						
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 2.

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

Rebite				
Material	d_0 (mm)	h_0 (mm)	t_0 (mm)	α (°)
AISI 304	10	3, 4, 5	0.75, 1.5	45
Chapas				
Material	t_{s1} (mm)	t_{s2} (mm)		
AA5754-H111	1.5	1.5		

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. Os ensaios destrutivos de avaliação da ligação mecânica foram realizados na máquina de ensaios Instron 5900R de acordo com a norma ISO 12996:2013 [2].

3. Desenvolvimento numérico

A modelação numérica do processo de DSSPR realizada no programa de elementos finitos I-FORM 2D 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 4. 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 quadriláteros.

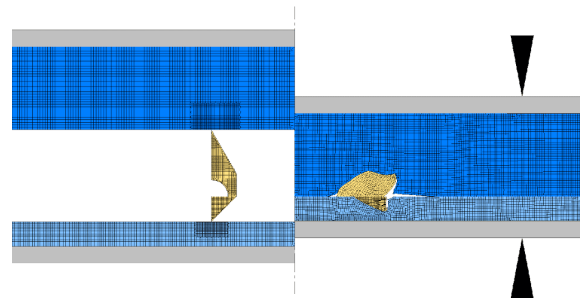


Figura 4. Discretização inicial (à esquerda) e final (à direita) de uma simulação numérica do processo de DSSPR para um rebite com um entalhe circular (metade superior) e uma altura reduzida (metade inferior).

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

4. Discussão de resultados

4.1. 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 5 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.

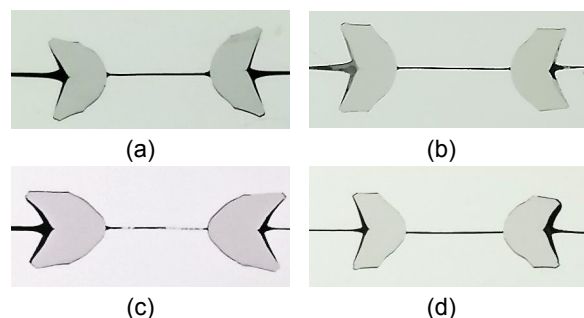
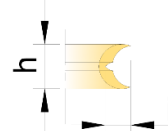


Figura 5. Resultados experimentais dos ensaios de rebites com: Entalhes triangulares e ângulos de chanfro iguais a (a) 30° e (b) 45°; Entalhes circulares e ângulos de chanfro iguais a (c) 30° e (d) 45°.

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 α			
		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.

4.2. 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. [1] 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) [3-4] em algumas combinações de materiais.

Analisando a Figura 6a 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 4.

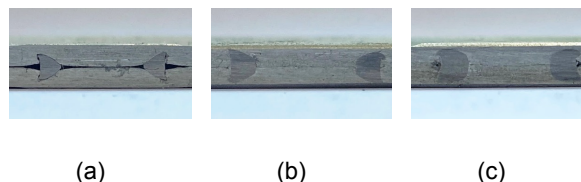


Figura 6. Resultados experimentais para a análise da influência da altura inicial dos rebites na produção do mecanismo de união mecânica para alturas iniciais de (a) 3 mm, (b) 4 mm e (c) 5 mm, com ângulos de chanfros α iguais a 45°.

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 6b e 6c.

Tabela 4. 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	
		0.223	2.00	
4	1.5	0.171	2.25	
5		0.293	2.342	

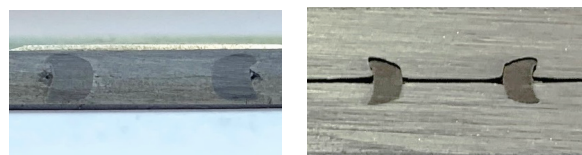
Através da Figura 6b é possível observar que o rebite penetra ambas as chapas e a sua expansão radial é muito reduzida, existindo uma dobragem também reduzida das suas extremidades que contribuiu muito pouco para o aumento da distância de bloqueio mecânico (ver Tabela 4), produzindo um dos

bloqueios mecânicos mais reduzidos de todo o conjunto testado.

Observando a Figura 6c que resulta de uma altura inicial de rebite igual a 5 mm observa-se uma maior expansão radial e consequente 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.

A altura inicial de 5 mm para as mesmas condições utilizadas neste estudo já tinha sido avaliada por Alves et al. [1] durante a união de chapas de 5 mm de espessura. No entanto, analisando as duas seções com mais detalhe (Figura 7), 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.



(a)

(b)

Figura 7. 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.

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.

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 8 que apresenta uma comparação numérico-experimental entre

rebites com espessuras iniciais iguais a 1.5 mm (Figura 8a) e 0.75 mm (Figura 8b).

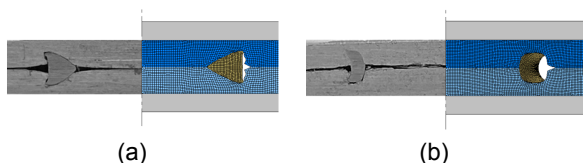
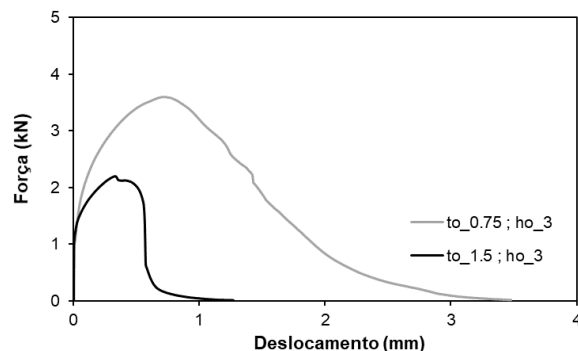


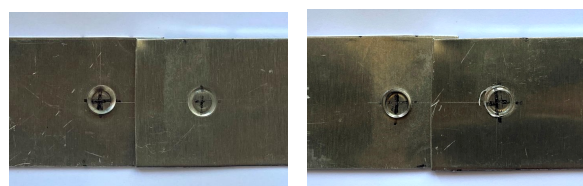
Figura 8. Comparação numérico experimental entre as ligações produzidas com rebites de espessuras iniciais iguais a (a) 1.5 mm e (b) 0.75 mm.

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. O sucesso da modificação introduzida é também demonstrado pelos ensaios destrutivos apresentados na Figura 9.



(a)



(b)

(c)

Figura 9. (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 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. [1] 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. 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 14a.

A razão para esta observação deve-se ao maior bloqueio mecânico que resulta da maior dobra 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 9c, e sendo assim a separação desta união dificultada ao contrário do que acontece para o rebite com 1.50 mm de espessura inicial (Figura 9b).

5. 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 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 permitiu a união de chapas mais finas, reduzindo-se neste último caso, os níveis de deformação local introduzida nas geometrias. 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 dobra que permitem otimizar o desempenho da ligação.

Referências

- [1] 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.
- [2] ISO. Mechanical joining — Destructive testing of joints — Specimen dimensions and test procedure for tensile shear testing of single joints. ISO 12996:2013 (Julho, 2013).
- [3] 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.

[4] D. Li, A. Chrysanthou, I. Patel, G. Williams. Self-piercing riveting - a review.

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 92 (2017), pp. 1777-1824