

INFLUÊNCIA DA TOPOGRAFIA DA SUPERFÍCIE DE ATRITO DO REBITE NA FORMAÇÃO DE JUNTAS DE ALUMÍNIO 6056-T6 E COMPÓSITO PA6-30FV REBITADAS POR FRICÇÃO

B. C. Proença¹, L. Blaga², N. Z. Borba², J. F. dos Santos², L. B. Canto¹,
S. T. Amancio Filho^{2,3,*}

¹Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, São Carlos, Brasil.

²Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Centre for Materials and Coastal Research, Institute of Materials Research, Materials Mechanics, Solid State Joining Processes, Geesthacht, Germany

³Hamburg University of Technology, Institute of Polymer Composites, Hamburg, Germany,

*autor correspondente: sergio.amancio@hzg.de (Max-Planck-St. 1, D-21502, Geesthacht, Germany)

RESUMO

A rebitagem por fricção é um novo processo de união híbrida metal-polímero que utiliza calor friccional para deformar e ancorar um rebite metálico dentro de peças poliméricas. Trabalhos anteriores utilizaram apenas rebites com a superfície de atrito usinada, ou seja, plana e uniforme, pois essa superfície é a responsável pela geração de calor durante o processo. Este estudo investigou os efeitos da topografia da superfície do rebite metálico não usinada, sobre a máxima temperatura processual e a geometria da zona de ancoragem de juntas de alumínio 6056-T6 e poliamida 6 reforçada com 30% de fibra de vidro curta. O aumento da superfície de atrito do rebite de $33,0 \pm 2,0 \text{ mm}^2$ para $46,7 \pm 10,1 \text{ mm}^2$ ocasionou aumento de $330 \pm 10 \text{ °C}$ para $376 \pm 8 \text{ °C}$ na temperatura máxima processual média e aumento de $0,48 \pm 0,05$ para $0,71 \pm 0,02$ na razão volumétrica de ancoragem.

Palavras-chave: Rebitagem por Fricção, 'FricRiveting', PA6-30FV, AA6056-T6, juntas híbridas metal-polímero

INTRODUÇÃO

A rebiteagem por fricção (do Inglês 'FricRiveting') é uma técnica inovadora para união híbrida metal-polímero. Esta foi desenvolvida e patenteada em 2007 pelo instituto alemão Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) (1). A técnica é baseada nos princípios de fixação mecânica e soldagem por fricção. A viabilidade técnica da rebiteagem por fricção foi comprovada para diversas combinações de materiais, incluindo termoplásticos não reforçados e alumínio (2-4), termoplásticos reforçados em combinação com alumínio (5, 6) e titânio (7) e recentemente em termofixos pultrudados unidos com rebites de titânio (8).

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta um esquema simplificado das etapas da rebiteagem por fricção para uma junta do tipo inserto metálico em placa de polímero termoplástico.

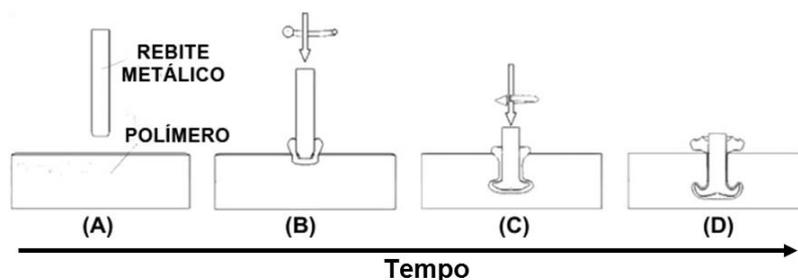


Figura 1. Esquema simplificado da rebiteagem por fricção para junta do tipo inserto metálico em placa polimérica. Posicionamento inicial dos componentes (A). Fase de fricção em que o rebite metálico rotativo é inserido na placa polimérica expulsando o polímero amolecido (B). Fase de forjamento com a formação da zona de ancoragem (C). Consolidação da junta sob pressão (D). Adaptado de (5).

Inicialmente, os componentes são posicionados (Fig. 1-A). O rebite metálico é rotacionado e pressionado contra a placa polimérica termoplástica (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**-B). Durante esta fase, calor friccional é gerado e amolece/funde uma fina camada de polímero ao redor da extremidade do rebite metálico que é expelida na forma de rebarba. A temperatura na extremidade do rebite aumenta devido à baixa condutividade térmica do polímero. Ao final da fase de fricção, a temperatura na extremidade do rebite é suficiente para permitir sua deformação plástica. Nesse ponto, a velocidade de rotação do rebite é desacelerada e a força axial, chamada de força de forjamento, é aumentada para um valor definido ou mantido igual à força da fase de fricção (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**-C). A extremidade do rebite se deforma plasticamente assumindo uma geometria paraboloidal, com aumento do diâmetro do rebite em relação ao original,

formando, assim, a zona de ancoragem do rebite na placa polimérica. Ao final, a junta é consolidada sob pressão (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**-D). Os principais mecanismos de união deste processo são o ancoramento mecânico e forças adesivas na interface metal-polímero. (1, 2, 6)

O presente trabalho investigou, pela primeira vez, os efeitos da topografia da extremidade do rebite metálico sobre a máxima temperatura processual e a zona de ancoragem de juntas do tipo inserto metálico alumínio 6056-T6 em placa de compósito de poliamida 6 reforçada com 30% de fibra de vidro curta (PA6-30FV). Com isso espera-se eliminar futuramente etapas e diminuir custos do processo relacionado à usinagem da superfície do rebite.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Foram utilizados pré-formas de rebites comerciais extrudados de alumínio 6056-T6 e placas extrudadas de compósito de poliamida 6 reforçada com 30% de fibra de vidro curta. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta as geometrias e dimensões do rebite de AA 6056-T6 (Figura 2-a) e da amostra de PA6-30FV (Figura 2-b) utilizadas.

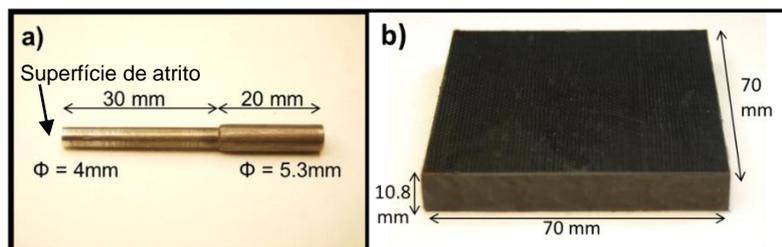


Figura 2. Rebite metálico de AA6056-T6 (A) e placa do compósito PA6-30FV (B).

Como as superfícies de atrito das pré-formas de rebites são irregulares devido ao processo de extrusão e corte das bobinas metálicas, a falta de uniformidade foi analisada através de um estereomicroscópio (Leica DC 300, Alemanha) e um microscópio confocal a laser (Keyence 3D Laser Confocal Microscope VK 9700, Japão). Rebites com dois perfis topográficos distintos foram selecionados. Esses perfis, denominados R1 e R2, são apresentados na Figura 3**Erro! Fonte de referência não encontrada.** Rebites do tipo R1 possuem uma topografia aparentemente côncava (Figura 3-A) enquanto rebites do tipo R2 possuem uma

superfície menos uniforme e parcialmente encoberta por uma crosta (Figura 3-B). A área superficial de atrito das pré-formas dos rebites foi medida através do microscópio a laser. Rebites do tipo R1 apresentaram superfície de atrito média de $46,7 \pm 10,1 \text{ mm}^2$, aproximadamente 30% maior do que a de rebites do tipo R2 ($33,0 \pm 2,0 \text{ mm}^2$).

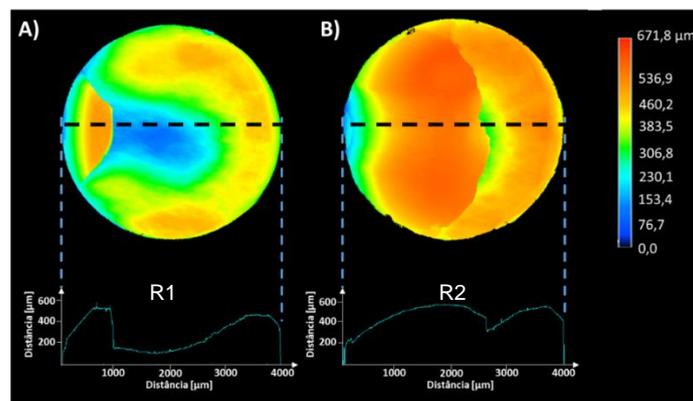


Figura 3. Perfil topográfico dos rebites selecionados do tipo R1 (A) e R2 (B).

Procedimento de união por rebiteagem por fricção

O processo foi dividido em duas etapas controladas por força: uma etapa de fricção limitada pelo deslocamento do mandril, e uma etapa de forjamento limitada pelo tempo. O equipamento utilizado para este estudo foi um sistema friccional de união denominado RNA (4, 6). Os parâmetros do processo foram baseados em trabalhos anteriores (6) e fixados em velocidade de rotação de 18000 rpm, deslocamento na fricção de 8 mm, força de união de 2400 N e tempo de forjamento de 3 s. Durante a união, uma termo-câmera de radiação infravermelha (ImageIR®8800, Infratech GmbH, Alemanha) foi utilizada para monitorar a evolução da temperatura na rebarba polimérica expelida durante o processo.

Caracterização da zona de ancoragem das juntas

Análises geométricas da zona de ancoragem do rebite foram realizadas utilizando um estereomicroscópio (Leica DC 300). Atingiu-se o plano da secção central das juntas através de procedimentos metalográficos padrão. Com as imagens, as medidas necessárias para o cálculo da razão volumétrica de ancoragem, apresentada na Eq. (1), foram quantificadas, como ilustrado na Figura 4.

Três réplicas de cada geometria de superfície foram empregadas para o cálculo da razão volumétrica de ancoragem média (5).

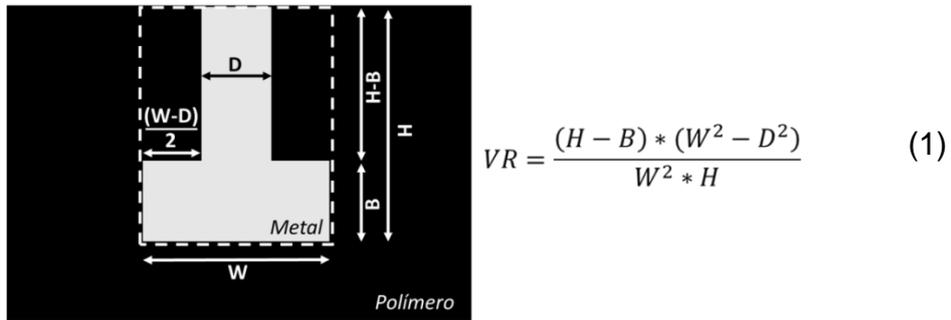


Figura 4. Detalhamento da região de união segundo o modelo geométrico de razão volumétrica de ancoragem. Adaptado de (5).

Na Eq. (1), W é o diâmetro máximo do rebite deformado, H é a profundidade de penetração do rebite, B é a altura da zona de ancoragem e D é o diâmetro do rebite não deformado. Sabe-se que a zona de ancoragem afeta diretamente o desempenho mecânico sob tração das juntas: o cálculo dessa eficiência através da razão volumétrica de ancoragem mostrou que, quanto maior for essa razão, maior será a resistência mecânica da junta (3-6). Assim éssa é uma boa estimativa da resistência à tração da junta.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Influência do perfil da superfície de atrito do rebite na temperatura do processo de rebiteagem por fricção

A temperatura máxima média atingida durante o processo de rebiteagem por fricção foi $376 \pm 8^\circ\text{C}$ para as juntas produzidas com rebites do tipo R1 e $330 \pm 10^\circ\text{C}$ com rebites do tipo R2. Portanto para uma variação de 30% na área de atrito do rebite (Fig. 3), observou-se uma variação de aproximadamente 12% na temperatura processual, indicando, conseqüentemente, variação na geração de calor. As juntas produzidas com rebites do tipo R2 apresentaram menor temperatura processual provavelmente devido à menor área superficial da extremidade do rebite ($33,0 \pm 2,0 \text{ mm}^2$) em comparação com rebites do tipo R1 ($46,7 \pm 10,1 \text{ mm}^2$). Neste caso, a área de polímero em contato com o metal e afetada pela fricção é menor, gerando assim menos calor friccional tanto em estado sólido quanto viscoso.

Influência do perfil da superfície de atrito do rebite na zona de ancoragem

A formação da zona de ancoragem é diretamente dependente do calor gerado durante o processo de rebiteamento por fricção (2). Em condições de união de maior aporte térmico, a ponta do rebite se deforma plasticamente com maior facilidade, resultando em juntas com maiores razões volumétricas de ancoragem e mais resistentes (3-6). A Figura 5 apresenta as seções transversais da zona de ancoragem das juntas produzidas com os dois tipos de rebites (R1 e R2), com superfícies de atrito diferentes.

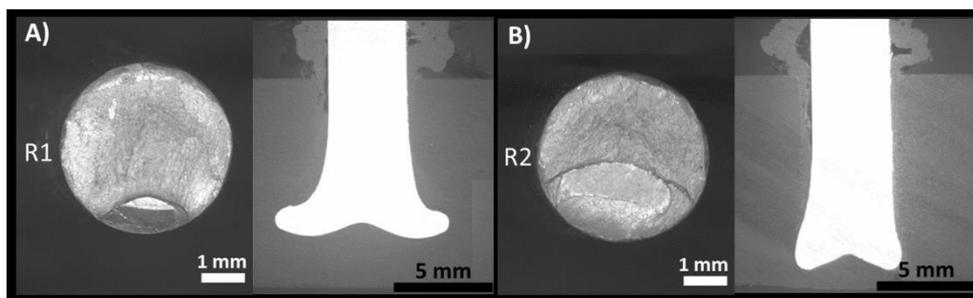


Figura 5. Exemplos das seções transversais da zona de ancoragem de juntas PA6-30FV/AA6056-T6 produzidas com rebites do tipo R1 (A) e tipo R2 (B).

Os valores de profundidade de penetração (H), diâmetro da extremidade deformada do rebite (W), espessura da extremidade deformada (B) e razão volumétrica de ancoragem (VR) são apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Tabela 1. Valores da profundidade de penetração (H), diâmetro da ponta deformada do rebite (W), espessura da ponta deformada (B) e razão volumétrica para as juntas AA6056-T6/ PA6-30FV

Tipos de rebite	H [mm]	W [mm]	B [mm]	VR
R1	$8,2 \pm 0,1$	$8,8 \pm 0,2$	$0,83 \pm 0,11$	$0,71 \pm 0,02$
R2	$10,0 \pm 0,4$	$5,9 \pm 0,4$	$1,02 \pm 0,20$	$0,48 \pm 0,05$

A partir das imagens da Figura 5 e parâmetros geométricos da **Erro! Fonte de referência não encontrada..**, observa-se que as juntas produzidas com rebites do tipo R1 apresentaram maior razão volumétrica de ancoragem em comparação às juntas produzidas com rebites do tipo R2. Juntas produzidas com rebites do tipo R1 atingiram temperatura máxima média ($T_{max} = 376 \pm 8^{\circ}C$) maior em relação à juntas

produzidas com rebites do tipo R2 ($T_{\max} = 330 \pm 10^{\circ}\text{C}$) resultando em maior deformação plástica do metal e, conseqüentemente, maior deformação da extremidade do rebite ($W_{R1} = 8,8 \pm 0,2 \text{ mm}$) em relação à juntas com rebites R2 ($W_{R2} = 5,9 \pm 0,4 \text{ mm}$). Estudos anteriores (6) com a mesma combinação de material, porém com a superfície do rebite usinada, mostraram que juntas com $VR = 0,69 \pm 0,02$ fraturaram no rebite metálico atingindo $4931 \pm 121 \text{ N}$ de força máxima de tração ($93 \pm 3\%$ da força máxima de tração do rebite metálico). Espera-se que as juntas produzidas com o rebite R1 apresentem resistência mecânica igual ou superior ao do estudo. Esses resultados serão abordados em publicações futuras.

CONCLUSÕES

Este estudo analisou a influência da topografia da superfície de atrito do rebite na formação de juntas de alumínio 6056-T6 e compósito PA6-30FV rebitadas por fricção. Verificou-se que *o aumento da superfície de atrito do rebite de $33,0 \pm 2,0 \text{ mm}^2$ para $46,7 \pm 10,1 \text{ mm}^2$ ocasionou aumento de $330 \pm 10^{\circ}\text{C}$ para $376 \pm 8^{\circ}\text{C}$ na temperatura máxima processual média e aumento de $0,48 \pm 0,05$ para $0,71 \pm 0,02$ na razão volumétrica de ancoragem*. Sendo assim, pela primeira vez, rebites com a superfície de atrito não usinada - acabamento superficial tal como obtida após sua fabricação - foram utilizados com sucesso no processo de rebitagem por fricção. Isso é de extrema importância aplicação futura da técnica pois demonstra a possibilidade da redução de custo e tempo relacionados a etapa de usinagem da extremidade dos rebites.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro e técnico da Helmholtz Association da Alemanha através do Young Investigator Group “Advanced Polymer-Metal Hybrid Structures” (Grant No. VH-NG-626), ao material fornecido pela EJOT GmbH, ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa concedida ao Prof. Dr. Leonardo B. Canto (Processo 304169/2014-5) e pela bolsa de mestrado do Bruno C. de Proença.

REFERÊNCIAS

- (1) AMANCIO-FILHO, S.T.; BEYER M.; DOS SANTOS, J.F. *Method of connecting a metallic bolt to a plastic workpiece*, US7575149 B2, 2007.

- (2) AMANCIO-FILHO, S.T. Rebitagem por Fricção ('FricRiveting'). Desenvolvimento de uma Nova Técnica de União para Juntas Híbridas do Tipo Polímero-Metal. Parte I: Processo e Microestrutura, *Soldag e Insp.*, vol. 16, nº 4, pp. 387–395, 2011.
- (3) RODRIGUES, C. F. et al., FricRiveting of aluminum 2024-T351 and polycarbonate: Temperature evolution, microstructure and mechanical performance, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 214, nº 10, pp. 2029–2039, 2014.
- (4) PROENCA, B. et al., Friction Riveting of Aluminum Alloy 6056 T6 and Polyamide 6: Role of the Rotation Speed on the Formation of the Anchoring Zone and Mechanical Performance”, *Soldag. Amp Insp.*, vol. 20, nº 4, p. 489–500, Dez. 2015.
- (5) BLAGA, L. et al., Friction Riveting of glass-fibre-reinforced polyetherimide composite and titanium grade 2 hybrid joints, *Mater. Des.*, vol. 50, pp. 825–829, 2013.
- (6) PROENCA, B. et al., Force controlled Friction Riveting of glass fiber reinforced polyamide 6 and aluminum alloy 6056 hybrid joints. In: ANTEC 2015- Society of Plastics Engineers, Annual Technical Conference Proceedings, Orlando, USA, 2015.
- (7) ALTMAYER, J.; DOS SANTOS, J. F.; AMANCIO-FILHO, S.T. Effect of Friction Riveting Process Parameters on the Joint Formation and Performance of Ti alloy/ Short-fibre Reinforced Polyether Ether Ketone Joints, *Mater. Des.*, vol. 60, pp. 164–176, 2014.
- (8) BORBA, N.Z. et al., Influence of Rotational Speed on the Microstructure and Mechanical Performance of Friction-riveted Thermosetting Composite Joints, *Soldag. Amp Insp.*, vol. 21, nº 1, p. 30–43, mar. 2016.

INFLUENCE OF THE RIVET FRICTION SURFACE TOPOGRAPHY ON THE JOINT FORMATION OF ALUMINUM 6056-T6 AND COMPOSITE PA6-30GF FRICTION RIVETED JOINTS

ABSTRACT

Friction Riveting is a joining process for metal-polymer hybrid structures. Frictional heat is generated between the parts to anchor a metallic rivet into the polymeric part. Previous works have investigated machined flat rivet tips with uniform friction surfaces resulting in stable frictional heat generation and rivet anchoring during the process. This study investigates the effects of the topography of the rivet friction surface area on the maximum process temperature and formation of the anchoring zone (rivet volumetric ratio) in aluminum 6056-T6/polyamide 6 reinforced with 30% short glass fibers joints. Changes in the friction surface from $33.0 \pm 2.0 \text{ mm}^2$ to $46.7 \pm 10.1 \text{ mm}^2$ increased the maximum average process temperature from $330 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ to $376 \pm 8 \text{ }^\circ\text{C}$ and the volumetric ratio from 0.48 ± 0.05 to 0.71 ± 0.02 . Therefore the

bigger the friction area the higher the process temperature and rivet anchoring performance.

Key-words: Friction Riveting, FricRiveting, PA6-30GF, AA6056-T6, hybrid metal-polymer joints