

# Rebitagem por Fricção (“FricRiveting”). Desenvolvimento de uma Nova Técnica de União para Juntas Híbridas do Tipo Polímero-Metal. Parte I: Processo e Microestrutura<sup>1</sup>

(Friction Riveting (FricRiveting). Development of a New Joining Technique for Polymer-Metal Hybrid Joints. Part I: Process and Microstructure

Sergio T. Amancio-Filho

Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Institute of Materials Research, Materials Mechanics, Solid-State Joining Processes Department, Advanced Polymer-Metal Hybrid Structures Group, Geesthacht (Alemanha), sergio.amancio@hzg.de

## Resumo

A rebitagem por fricção (do Inglês “Friction Riveting”) é uma nova técnica de união pontual desenvolvida para a fabricação de estruturas híbridas do tipo polímero-metal. Nesta técnica, um rebite metálico cilíndrico é usado para unir um ou mais componentes termoplásticos. O processo de união ocorre através da plastificação e forjamento da extremidade do rebite via calor friccional, oriundo da rotação e pressão axial do rebite em contato com os componentes a serem unidos. Vantagens dessa nova técnica de união são, entre outras, ciclos de união curtos associados com a ausência ou diminuição do tempo de preparação das superfícies dos componentes, ausência de emissões tóxicas, e simplicidade operacional. Juntas rebitadas por fricção apresentam elevada resistência mecânica. Nesse artigo a viabilidade da técnica foi demonstrada através de um estudo de caso em juntas de polieterimida com rebites de alumínio 2024-T351. Juntas com elevada resistência mecânica (com valores médios de até 93% da resistência à tração do rebite) foram produzidas e caracterizadas em termos de microestrutura (microscopia ótica, de varredura e por microtomografia computadorizada).

**Palavras-chave:** estruturas híbridas, rebitagem, soldagem por fricção, termoplásticos, ligas leves.

**Abstract:** The Friction Riveting (FricRiveting) technique is a new alternative spot joining process developed for polymer-metal hybrid structures. In the technique, a cylindrical metallic rivet is used to join one or more thermoplastic-metal components by means of plasticizing and deforming the tip of the rotating rivet through frictional heating. Advantages of this new technique are short joining cycles, minimal sample preparation, absence of environmental emissions and simple operability. Friction riveted joints have enhanced mechanical performance. This study demonstrates the feasibility of FricRiveting by analyzing a case-study joint on polyetherimide / aluminum alloys. Sound joints on polyetherimide/aluminum 2024-T351 with elevated mechanical strength (up to 93% of the rivet strength) were successfully produced and characterized in terms of microstructure (light optical and scanning microscopy and computer microtomography).

**Key-words:** hybrid structures, riveting, friction welding, thermoplastic polymers, lightweight alloys.

## 1. Introdução

Nos últimos anos, o uso de estruturas multimateriais do tipo polímero-metal (também conhecidas como macrocompósitos polímero-metal) tem crescido em aplicações industriais, principalmente devido à melhor performance, redução de peso e de custos [1]. Essa classe de materiais é caracterizada pela presença de interface(s) sólida(s), normalmente com um acentuado gradiente de propriedades – em outras palavras, caracterizada por elevada heterogeneidade interfacial. Exemplos de aplicação podem ser encontrados nos setores industriais automotivos [2], naval [5], aeroespacial [6], ferroviário [8] e de engenharia civil [9].

Um componente ideal não deveria conter juntas, as quais geralmente levam a uma redução na resistência mecânica devido a mudanças locais térmicas, estruturais ou geométricas relacionadas ao processamento. No entanto, o tamanho de um componente é comumente limitado pelo seu processo de fabricação, e no caso de multimateriais o conceito de componente livre de juntas é irreal. A união polímero-metal é alvo recente de pesquisas e há pouca informação disponível a respeito. Recentemente Messler Jr. [11] reportou que os processos de união para estruturas multimateriais são por fixação (ou ancoramento) mecânica, colagem, e alguns processos de soldagem (nesse caso, apenas para estruturas com juntas similares). Além disso, outras técnicas como métodos híbridos de união (colagem com adesivo combinada com ancoramento mecânico ou soldagem),

---

(Recebido em 27/10/2011; Texto final em 27/10/2011).  
Artigo originalmente publicado no CONSOLDA 2009

<sup>a</sup> Manuscrito traduzido e adaptado do trabalho vencedor do prêmio “Henry Granjon 2009 Categoria A do International Institute of Welding, publicado originalmente em “Welding in the World n° 01-02, vol. 55, pp. 13-24, 2010.

rebitagem de polímeros e moldagem de plásticos sobre partes metálicas perfuradas são atualmente exploradas [13].

Esses métodos são geralmente específicos para uma dada aplicação, apresentando elevados custos operacionais relativos a procedimentos pré e pós-união, ou ainda gerando conseqüências nocivas ao meio ambiente devido ao descarte de substâncias químicas ou geração de emissões gasosas. Além do mais, as técnicas atuais ainda estão buscando seus nichos de mercado sem êxito total. Como conseqüência disso o mercado de pesquisa e desenvolvimento está aberto a técnicas inovadoras de união e fabricação, como a Rebitagem por Fricção (do Inglês “Friction Riveting” ou na sua forma abreviada, FricRiveting), novo processo de união pontual descrito no presente artigo. A técnica de FricRiveting foi desenvolvida recentemente [16] e patenteada pela Helmholtz-Zentrum Geesthacht (Alemanha) em 2007 [17]. O método exhibe potencial para satisfazer as necessidades tecnológicas e de mercado no âmbito das estruturas híbridas polímero-metal, oferecendo juntas resistentes obtidas de uma maneira simples, rápida e menos danosa ao ambiente, devido à ausência de emissões gasosas. A técnica atraiu recentemente a atenção da comunidade internacional de pesquisa e desenvolvimento em processos de união com polímeros [18], da indústria européia [19] e mundial [20], o que reitera o caráter inovador do FricRiveting como uma técnica alternativa de união e fabricação.

O objetivo desse artigo é reportar os princípios da técnica e a aplicabilidade do FricRiveting através da análise dos resultados das juntas de materiais comercialmente disponíveis: polieterimida (PEI) amorfo e liga de alumínio AA2024-T351. Os principais aspectos do processo de Friction Riveting são descritos nesse artigo sob a ótica dos parâmetros e variáveis do processo e da microestrutura. As análises em termos de história térmica do processo e propriedades mecânicas serão apresentadas em uma segunda parte desse artigo (Parte II).

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1. Materiais

Placas de polieterimida (PEI ULTEM 1000, GE Plastics) extrudadas, de 5 e 13,4 milímetros de espessura, e rebites cilíndricos (com ou sem rosca) de AA2024-T351 foram usados para produção de juntas pontuais em uma placa (para teste de tração) e juntas de placas sobrepostas (para testes de cisalhamento). O PEI é um termoplástico de engenharia amorfo (Figura 1) caracterizado por elevada resistência mecânica e rigidez, tanto à temperatura ambiente (em torno de 100 MPa) quanto a temperaturas superiores (em torno de 50% da resistência à temperatura ambiente quando submetido a temperaturas entre 170 e 190 °C [21]), boa resistência térmica a longo prazo (entre 35 e 160 °C [22]), excelente estabilidade dimensional e boa resistência química a uma ampla gama de substâncias, incluindo hidrocarbonetos, alcoóis não-aromáticos e fluidos halogenados [23]. Adicionalmente, apresenta elevada temperatura de transição vítrea (215 a 220°C [23]), elevado Índice de Oxigênio (aproximadamente 47%) e baixa formação de fumaça [22]. As temperaturas de processamento normalmente variam de

350 a 425 °C para moldagem por injeção, com encolhimento consideravelmente baixo (0,005 a 0,007 cm/cm [24]). Essas propriedades tornam o PEI uma boa escolha para estruturas de aeronaves [25], principalmente em painéis de assoalho, iluminação, assentos e outras estruturas secundárias e terciárias.

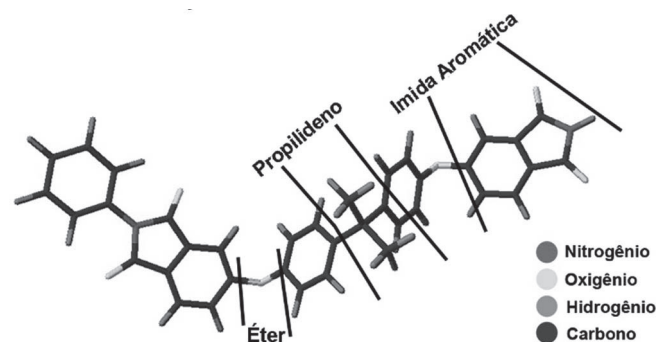


Figura 1. Estrutura molecular do PEI.

A liga comercial de alumínio AA2024-T351 é uma liga ternária (Al-Cu-Mg) endurecível por precipitação. Essa liga é comumente utilizada para fabricação de chapas, barras, componentes forjados e anéis laminados [27]. A liga 2024-T351 geralmente exhibe resistência à corrosão razoável, médias a boas resistência ao trincamento por corrosão sob tensão e trabalhabilidade, e boa usinabilidade. Para o presente trabalho, rebites de 5 milímetros de diâmetro, com perfil de rosca M5, foram usinados de barras de 10 milímetros de diâmetro de AA2024-T351 trefiladas. A composição química dos rebites produzidos pode ser vista na Tabela 1. A resistência à tração média nominal das barras utilizadas para produção dos rebites usinados é 425 MPa, com alongamento média de 8% [27].

Tabela 1. Composição química nominal das barras de AA2024-T351 utilizadas para fabricação dos rebites

% peso	Cu	Mg	Si	Mn	Fe	Zn	Cr	Ti	Al
	4,2	1,6	0,15	0,8	0,25	0,03	0,01	0,01	bal.

A microestrutura dos rebites de AA2024-T351 é mostrada na Figura 2. Os grãos são notadamente alongados e orientados na direção de trefilação (Figuras 2A e 2B). Pontos pretos vistos na Figura 2B, principalmente no interior dos grãos, são relativos a partículas secundárias e a intermetálicos. Essas partículas são identificadas como compostos intermetálicos de  $Al_2Cu-\theta$  e partículas secundárias de  $AlMgCuC$  (0,93% Mg; 0,73% Cu; 0,20% C) [16]. O PEI é um polímero amorfo e transparente, não sendo possível desse modo nenhuma visualização microestrutural através de microscopia ótica.

### 2.2. Métodos

#### 2.2.1. Técnicas Analíticas

As micrografias das amostras foram obtidas da secção transversal do centro das juntas, preparadas através de

procedimento metalográfico tradicional de lixamento, polimento e ataque químico, e analisadas por microscopia ótica de luz refletida/polarizada. Amostras cilíndricas de 15 milímetros de diâmetro foram usinadas do centro das juntas, para Microtomografia Computadorizada ( $\mu$ CT) por Luz Síncrotron, no Hamburger Synchrotronstrahlungslabor (HASYLAB-DESY, Hamburg, Alemanha). A reconstrução volumétrica das amostras e a análise quantitativa foram realizadas com o software VGstudiomax (Volume Graphics, Alemanha). A Figura 3 apresenta a esquematização do teste microtomográfico.

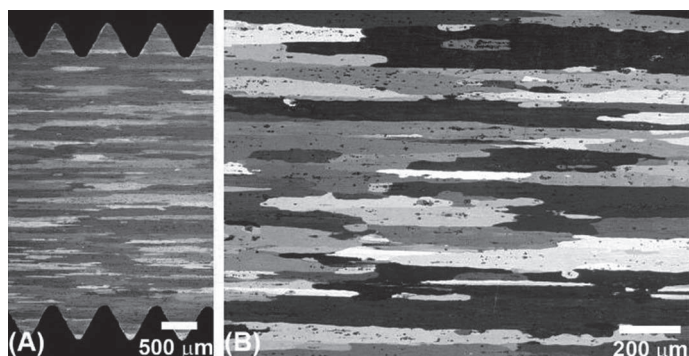


Figura 2. Microestrutura dos rebites de AA2024-T351 com rosca M5: aumento de 50X (A) e 200X (B). Ataque eletrolítico: “Barker”, 200 mL de água destilada, 5 g de ácido fluobórico.

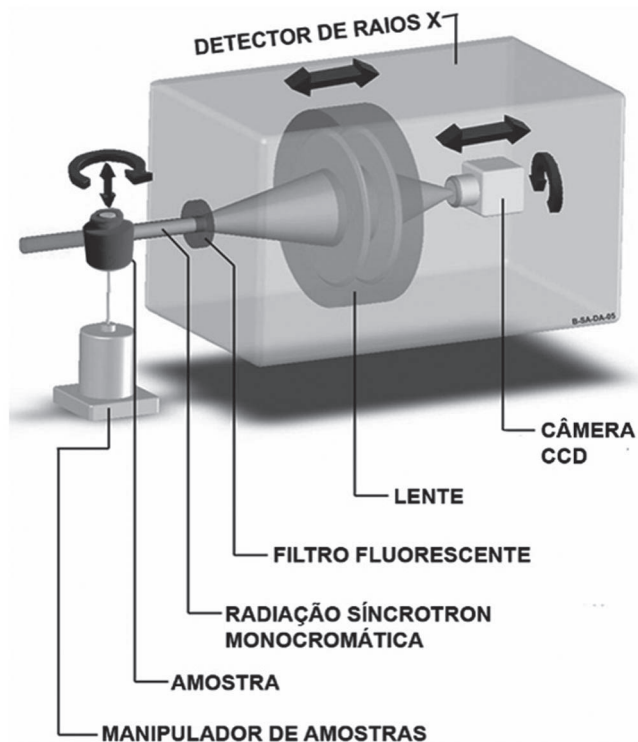


Figura 3. Esquematização do teste de microtomografia utilizado.

## 2.2.2. Equipamento e Procedimento de União

O equipamento utilizado para produção das juntas consiste em uma máquina de soldagem por fricção (RSM 200, Harms & Wende, Alemanha) conectada a um sistema de medição de força (Kistler GmbH, Alemanha) para medidas de torque. A Figura 4 ilustra o equipamento descrito.

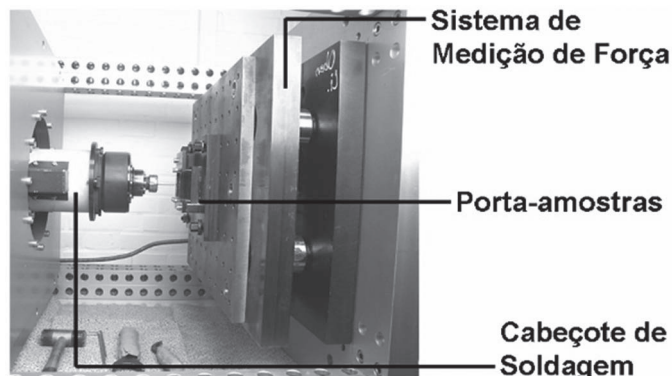


Figura 4. Esquema do equipamento utilizado.

Juntas de PEI / AA2024-T351 por FricRiveting foram produzidas adotando-se a seguinte faixa de parâmetros: 10000 a 21000 rpm (1050 a 2200 rad/s); 0,3 a 5 s; e 8 a 19,5 bar. A qualidade das juntas foi avaliada em termos da razão de aspecto do rebite (quociente entre a profundidade atingida pelo rebite no interior do polímero e a largura de sua ponta deformada) e do grau de defeitos térmicos na região da junta.

## 3. FricRiveting: Princípios da Técnica

O conceito do FricRiveting é baseado nos princípios de interação (ou ancoramento) mecânico somados aos de soldagem por fricção, em que a energia sob a forma de calor friccional é fornecida através da rotação de um dos elementos da junta (normalmente o rebite cilíndrico).

O processo é esquematicamente descrito na Figura 5, através de uma junta pontual, onde um rebite metálico cilíndrico (com ou sem rosca) pode ser inserido em uma ou mais placas poliméricas. Essa configuração poderia ser adotada, por exemplo, na produção de insertos metálicos em produtos plásticos. Antes da união, os componentes são fixados no equipamento. Em seguida inicia-se a rotação do rebite, e sua pressão contra a superfície do componente polimérico (Figura 5A). Na fase de aquecimento, a elevada velocidade de rotação e a força axial aplicada aquecem o polímero por fricção, e uma fina camada plastificada/amolecida é criada em torno da ponta do rebite (Figura 5B). Este começa a penetrar na placa polimérica, expelindo uma rebarba de polímero plastificado/amolecido para fora da região da junta. Quando a fase de aquecimento está completa, a ponta do rebite torna-se plastificada (amolecida à temperaturas abaixo do temperatura de fusão da liga metálica). Isto ocorre devido a um aumento local de temperatura sustentado pela baixa condutividade térmica e alto coeficiente de expansão térmica do polímero plastificado/amolecido em contato com a área friccional.

Nesse estágio a força axial é aumentada (dando início à fase de forjamento), enquanto que a rotação do rebite é desacelerada. A ponta plastificada do rebite expulsa o resto de material amolecido em direção à rebarba, e encontra resistência da parte fria da placa polimérica; desse modo, o rebite se deforma, assumindo um diâmetro maior do que o diâmetro inicial (Figura 5C). Após o resfriamento sob pressão, a junta é consolidada através do ancoramento devido à deformação do rebite dentro do componente plástico, assim como pelas forças de adesão na interface polímero-metal (Figura 5D). O material na rebarba pode tanto permanecer oculto em cavidades feitas na cabeça do rebite, ou removido posteriormente. É possível se obter geometrias de juntas polímero-metal sobrepostas hermeticamente seladas através de perfurações adicionais na parte metálica, as quais permitem a penetração do rebite e criação de linhas de solda entre o rebite e os componentes metálicos para ancoramento adicional (Figura 6).

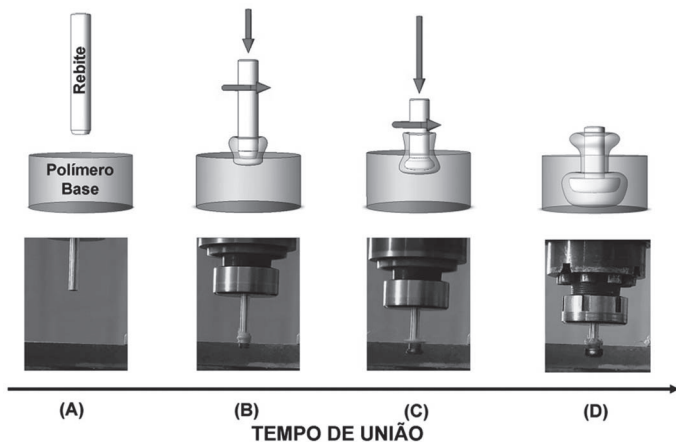


Figura 5. Etapas do processo de FricRiveting para juntas sobrepostas monorrebitadas: Posicionamento das partes a serem unidas (A); penetração do rebite nos componentes de base (B); desaceleração da velocidade de rotação e forjamento da ponta plastificada do rebite (C); e consolidação da junta após resfriamento do material plastificado (D).

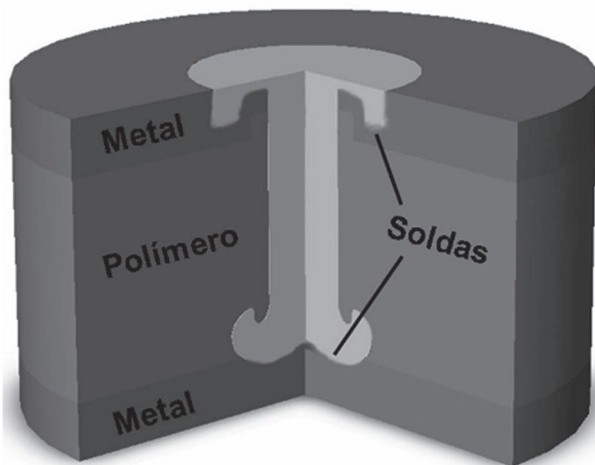


Figura 6. Esquema de uma possível configuração metal-polímero fabricada por FricRiveting.

### 3.1. FricRiveting: Parâmetros e Variáveis de Processo

Os parâmetros e variáveis de processo no FricRiveting são análogos àqueles comumente encontrados na soldagem por fricção [28], [29], devido à similaridade entre esses processos. Os principais parâmetros de processo para o FricRiveting são Velocidade de Rotação, Tempo de União e Pressão de União. As principais variáveis são Tempo de Aquecimento, Razão de Penetração (“Burn-Off”), Taxa de Penetração (“Burn-Off-Rate”), Temperatura e Torque Friccional.

#### 3.1.1. Parâmetros de Processo

A Velocidade de Rotação é a velocidade angular do rebite cilíndrico. É um parâmetro importante na evolução da temperatura e nos fenômenos associados (controle da viscosidade do polímero fundido/amolecido, formação de defeitos térmicos, etc.), auxiliando na geração de calor friccional. O Tempo de União compreende a soma dos tempos de fricção (segmento  $t_0 - FT$  no diagrama da Figura 7) e de forjamento (segmento  $FT - FOT$  da Figura 7); além de ser um fator determinante para a velocidade de união, também influencia o nível de defeitos volumétricos relacionados ao processamento termomecânico, através do controle da energia térmica aplicada na camada polimérica fundida/amolecida. A Pressão de União é a soma da pressão de fricção (segmento  $t_f - FP$  no diagrama da Figura 7) e de forjamento (segmento  $FP - FOP$  da Figura 7). Esse parâmetro está relacionado com a distribuição de pressão normal aplicada sobre a área friccional. Assim como a Velocidade de Rotação e o Tempo de União, é um parâmetro que também contribui para o aquecimento da região friccional e para o controle da velocidade de união, apesar de que seu papel principal reside nas fases de controle do forjamento do rebite e de consolidação.

#### 3.1.2. Variáveis de Processo

O Tempo de Aquecimento é o intervalo entre o contato inicial entre o rebite e o componente de base (“touch down”), e o momento em que a velocidade de rotação cessa (segmento  $t_0 - HT$  da Figura 7). Essa variável é representativa do regime de aporte térmico e proporciona uma estimativa do grau de plastificação do material; é também um indicativo do grau de mudanças estruturais induzidas termicamente no material (por exemplo, degradação ou envelhecimento físico no polímero, e fenômenos de recozimento no metal). A Razão de Penetração (“Burn-Off”) é uma variável correspondente ao nível de inserção do rebite nos componentes de base e seu comprimento consumido (deformado); é obtido da curva de monitoramento do deslocamento axial, desde o contato inicial do rebite até o fim do curso de união (segmento  $t_f - BO$  da Figura 7). Juntamente com o Tempo de Aquecimento, essa variável propicia uma boa estimativa do grau de plastificação do rebite durante a união. A Taxa de Penetração (“Burn-Off-Rate”) pode ser interpretada como sendo a velocidade de união média durante a rebiteagem por fricção. É calculada pelo quociente entre a Razão de Penetração e o Tempo de Aquecimento, proporcionando uma aproximação média da velocidade real de união.

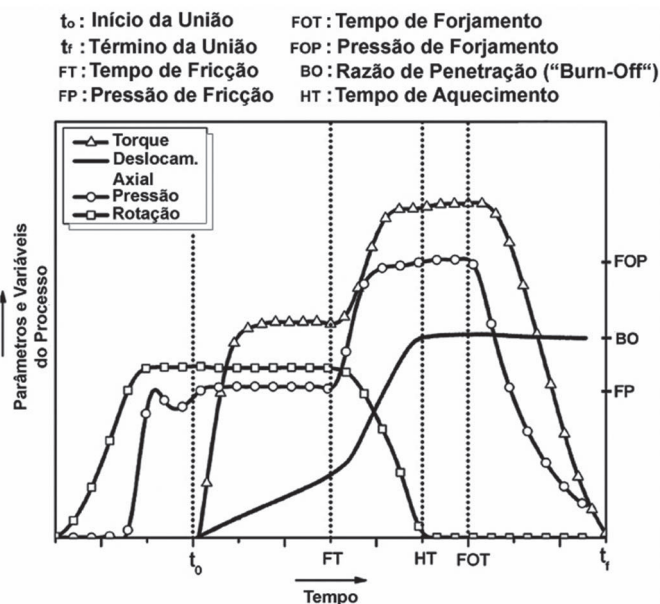


Figura 7. Esquemática do diagrama de monitoramento experimental, indicando os principais parâmetros e variáveis do FricRiveting.

A Temperatura Média de Processo fornece uma estimativa das mudanças na viscosidade do polímero amolecido, a qual é – juntamente com a taxa de deformação – diretamente relacionada com as condições de fricção e a geração de calor. Essa é uma variável chave para explicar mudanças microestruturais e das propriedades na área de união. O Torque Friccional não apenas é uma ferramenta de estimativa do comportamento reológico do polímero amolecido e do grau de plastificação do rebite.

Este serve também para ajudar na identificação de anomalias no processo tais como o mau funcionamento do equipamento ou mau acabamento superficial (por exemplo, restos de fluidos remanescentes da fabricação das chapas, os quais alteram as condições friccionais) dos componentes antes da união.

### 3.2. FricRiveting: Propriedades das Juntas

#### 3.2.1. Microestrutura

O perfil tridimensional das juntas de PEI/AA2024 foi determinado através de testes de microtomografia ( $\mu$ CT). A Figura 8 mostra a estrutura 3D interna de uma junta rebitada. Três segmentos volumétricos distintos puderam ser separados através análise computadorizada de imagens. O volume de PEI representou o maior volume; uma segunda porção com tamanho intermediário contém a ponta deformada do rebite (também chamada de zona de ancoramento – AZ), como mostra a Figura 8. Um terceiro e diminuto volume contendo falhas termomecânicas (vazios relacionados à material termicamente alterado, evolução de voláteis e ar aprisionado) foi observado no volume de PEI principalmente em volta da espessura não deformada do rebite.

Ao longo desses três volumes tridimensionais, há cinco zonas microestruturais típicas: a zona do polímero termicamente afetada (PHAZ), a zona do polímero termomecanicamente afetada (PTMAZ), a zona do metal termicamente afetada (MHAZ), a zona do metal termomecanicamente afetada (MTMAZ) e a zona de ancoramento (AZ). A Figura 9 ilustra as diferentes zonas microestruturais em uma junta de FricRiveting.

As zonas microestruturais do FricRiveting podem ser melhor compreendidas através de análise metalográfica. A Figura 10 exhibe a secção transversal de metalografia para a

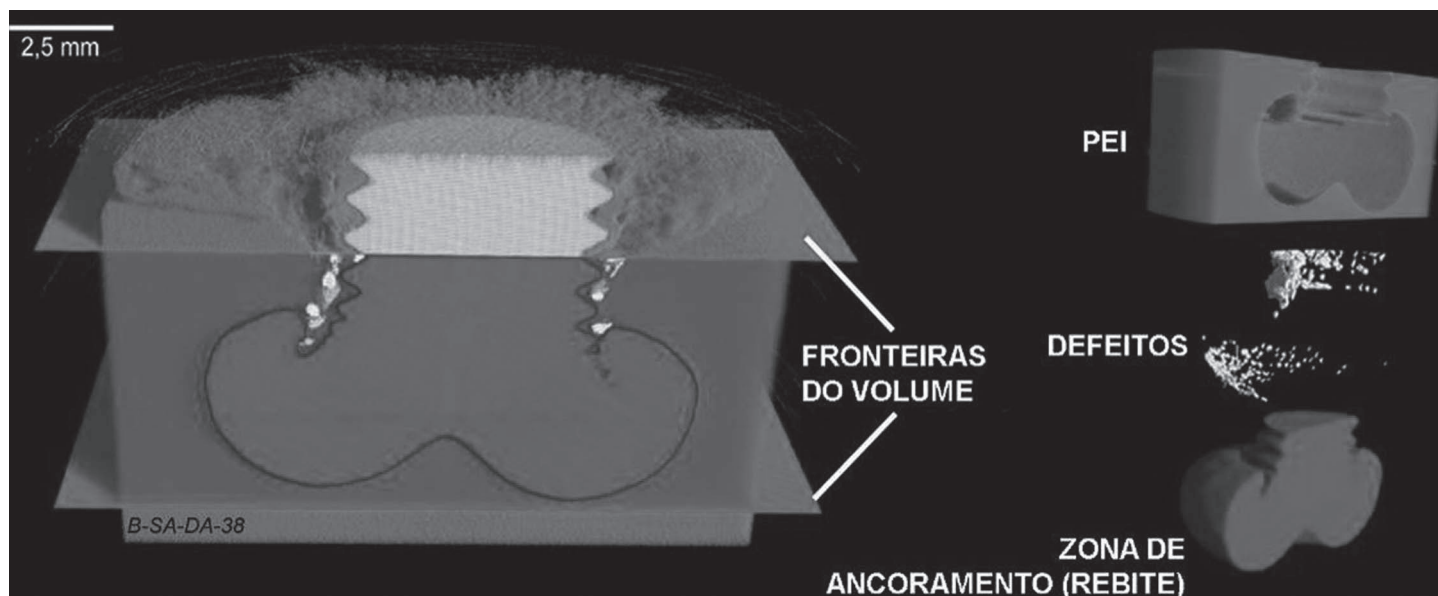


Figura 8. Resultados dos testes de  $\mu$ CT mostrando junta com inserção metálica, em PEI/AA2024. Três diferentes subdivisões volumétricas são representadas do topo à base da figura, no lado direito: o volume não afetado de PEI, o volume de PEI contendo polímero termomecanicamente afetado e a ponta deformada do rebite de AA2024-T351 (zona de ancoramento).

junta produzida com 21000 rpm, 3 s e 11 bar. Uma primeira observação é a identificação de duas interfaces distintas: uma metal-polímero, e uma polímero-polímero (linha pontilhada esquematizada na Figura 10D). Enquanto a interface metal-polímero é composta pela interface formada entre a MTMAZ na zona de ancoramento e a PTMAZ, a interface polímero-polímero é marcada pela presença de uma linha de solda entre a PHAZ e o polímero consolidado na PTMAZ. Segundo análise prévia [30], considera-se que as interfaces são ancoradas por forças de adesão. Investigações mais profundas estão sendo conduzidas com o intuito de se compreender esses mecanismos de adesão.

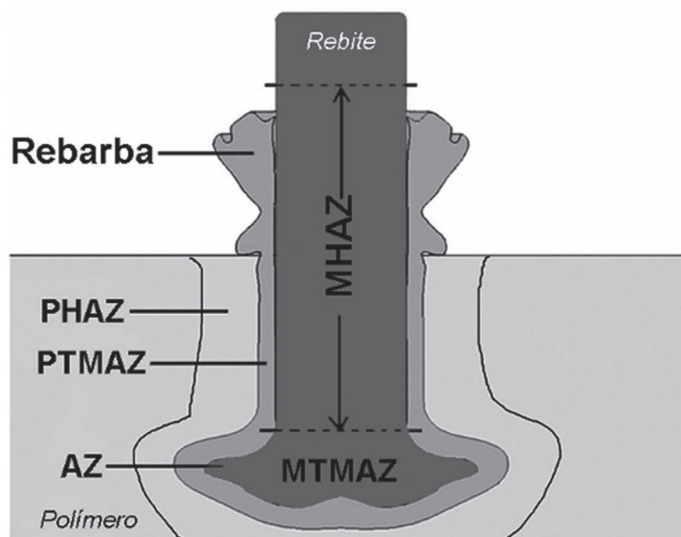


Figura 9. Esquematização das zonas microestruturais típicas encontradas em juntas de FricRiveting.

Na MHZ, a estrutura do metal do rebite é apenas tratada termicamente. Nessa zona, diferentes fenômenos de recozimento podem ocorrer, como recuperação, recristalização e superenvelhecimento, assim como alguns mecanismos de endurecimento tal qual envelhecimento e reprecipitação, dependendo do tipo de liga, tempo de aquecimento e temperatura máxima. A microestrutura pode não se alterar visualmente, apesar das propriedades mecânicas locais poderem ser modificadas pelo calor.

Por outro lado, a microestrutura da MTMAZ se altera como resultado do aquecimento e da severa deformação imposta. Nessa zona o material plastificado do rebite pode sofrer recuperação e/ou recristalização dinâmica ou mesmo reprecipitação, dependendo das temperaturas críticas e deformações a que o material é submetido por um determinado período de tempo. A fusão do material em larga escala geralmente não é observada, apesar de fusão incipiente poder ocorrer nas superfícies friccionadas. A microestrutura ótica é normalmente caracterizada por refinamento parcial de grãos, característica da recristalização e recuperação dinâmicas (Figura 10B), e pelo realinhamento dos

grãos do material de base na direção do fluxo de material forjado e plastificado (Figura 10C).

A AZ é a zona onde a ponta deformada do rebite está localizada. Devido à deformação plástica severa, geralmente assume um formato parabolóide (Figuras 8 e 10A), cujo diâmetro externo é maior do que o diâmetro original do rebite. Essa região geralmente suporta cargas impostas à junta através de interferência mecânica (ancoramento) com o polímero do elemento de base. Para ligas com ponto de fusão mais elevado, o calor friccional pode não ser suficiente para plastificação total da ponta do rebite e a formação da AZ. Nesse caso, elementos de encaixe ou de protrusão adicionados ao rebite podem contribuir para o maior ancoramento do mesmo.

Na PHAZ (Figura 10D) as temperaturas de processo não atingiram a temperatura de amolecimento do polímero (temperatura de transição vítrea -  $T_g$  - para polímeros amorfos, ou de fusão -  $T_m$  - para os semi-cristalinos). Geralmente essa zona não pode ser identificada por microscopia, no caso de polímeros amorfos como o PEI. No entanto, a estrutura do polímero é afetada pelo calor, e conseqüentemente as propriedades mecânicas locais como a microdureza (resultados apresentados na Parte II desse trabalho). Exemplos dessas possíveis alterações são: cristalização/crescimento de cristalitos induzidos pelo aquecimento (no caso de polímeros semi-cristalinos) e envelhecimento físico (no caso de polímeros amorfos).

A PTMAZ forma-se como consequência da deformação cisalhante e do calor. Essa zona compreende a fina camada de polímero fundido/amolecido consolidada em torno do rebite. Como a PTMAZ forma uma linha de solda com a PHAZ, geralmente pode ser visualizada por microscopia (Figura 10D). Nessa região a temperatura atinge valores bem mais altos do que  $T_g$  ou  $T_m$ , freqüentemente próximos da temperatura de degradação termomecânica do polímero, porém com tempos curtos de duração, o que reduz a quantidade de material degradado.

Os vazios e defeitos associados aos altos níveis de temperatura e deformação na PTMAZ (Figura 8) podem ser originados da formação de voláteis (como água absorvida), ar aprisionado devido à elevada viscosidade de alguns polímeros fundidos/amolecidos, do encolhimento devido a diferenças no coeficiente de expansão linear, e da degradação térmica [31]. Esses defeitos podem prejudicar a resistência mecânica, e podem ser reduzidos através da otimização dos parâmetros de processo. Apesar dos defeitos na PTMAZ das juntas de PEI/AA2024 freqüentemente existirem, eles não afetam determinantemente a performance mecânica da junta (como demonstrado em [32]). Adicionalmente, as propriedades mecânicas locais na PTMAZ podem ser ligeiramente influenciadas por reorientação das cadeias poliméricas devido ao fluxo de material.

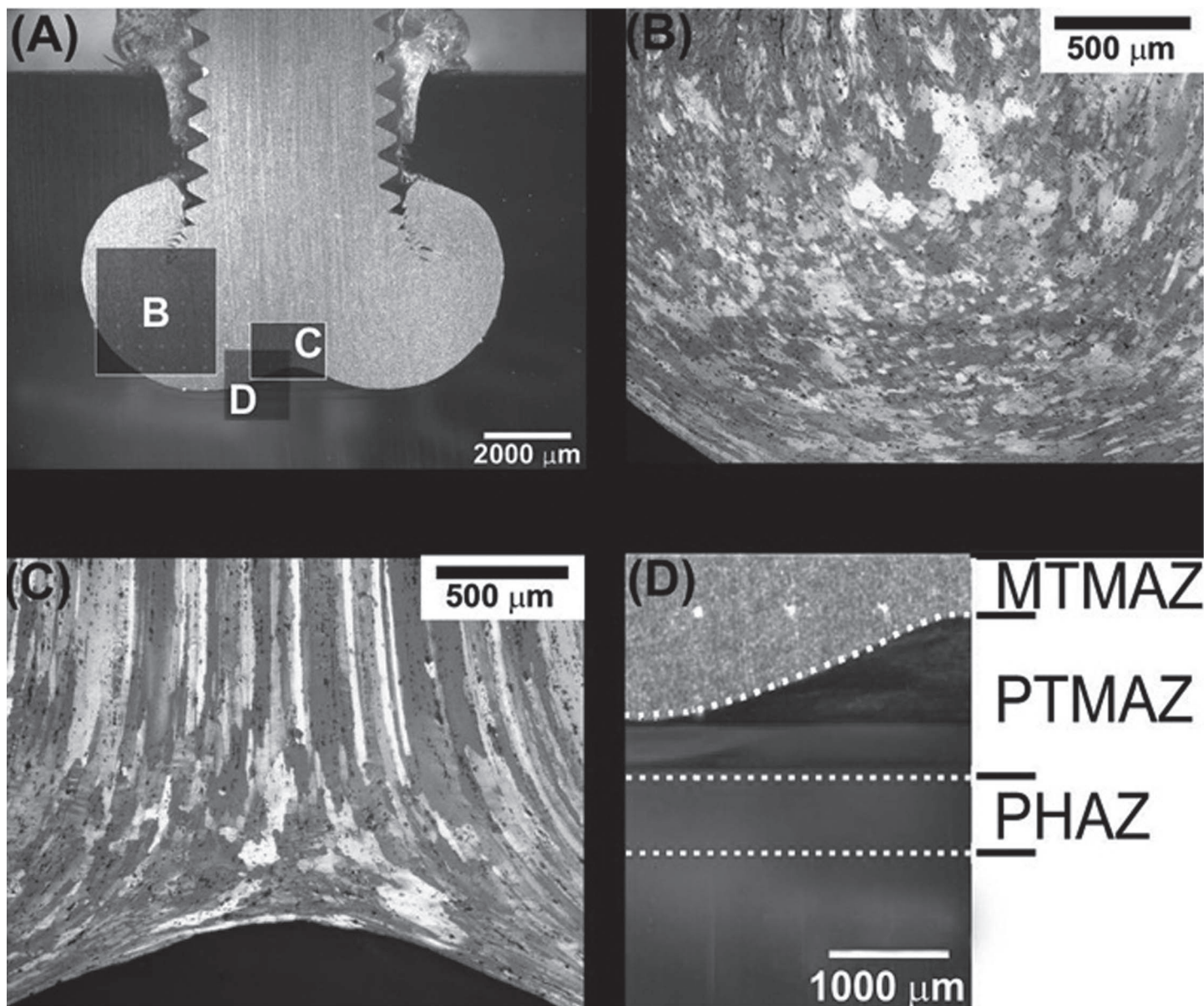


Figura 10. Microestrutura de uma secção transversal de PEI/AA2024-T351 rebitada por fricção (21000 rpm, 3 s e 11 bar): macrografia da secção transversal sem ataque químico obtida com microscópio ótico (A); foto detalhada da região B indicada em A, mostrando a distribuição de grãos parcialmente recristalizados dinamicamente na MTHAZ (ataque eletrolítico em solução de Barker – 200 mL de água destilada, 5 g de ácido fluorobórico 35%) (B); ampliação da região C em A, mostrando o realinhamento de grãos do material base na direção de fluxo do material no rebite metálico forjado e plastificado (C); e micrografia detalhando a região D em A (D) – as zonas de transição (linhas de interface) para MTMAZ, PTMAZ e PHAZ estão indicadas pelas linhas tracejadas.

#### 4. Conclusões

A viabilidade da nova técnica de FricRiveting (rebitagem por fricção) para estruturas multimateriais polímero-metal foi demonstrada no presente estudo. Através da análise de um estudo de caso para juntas de PEI/AA2024-T351, em que as variáveis e parâmetros de processo foram estudadas juntamente com os seus fenômenos microestruturais típicos.

A microestrutura do conjunto é altamente influenciada pela temperatura, deformação resultante da rotação do rebite

e pela força axial imposta durante o processo. Exemplos disso, são transformações metalúrgicas estáticas e dinâmicas (recristalização e recuperação) e alterações macromoleculares (por exemplo a degradação térmica) presentes nas diferentes zonas microestruturais na área de união.

Na segunda parte desse artigo (Part. II), a temperatura processual (via termometria e termografia) e desempenho mecânico (ensaios de tração, cisalhamento e microdureza) serão discutidos visando complementar o entendimento dos fenômenos que ocorrem no FricRiveting.

## 5. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o apoio financeiro proporcionado pelo Conselho Nacional de Pesquisa CNPq – Brasil e à DAAD (Alemanha). Os autores ainda são gratos ao Engenheiro C. Bueno e a Engenheira Camila Rodrigues (UFSCar, São Carlos) pela ajuda com a tradução dos termos técnicos e formatação do artigo.

## 6. Referências

- [1] HECHT J.L., Macrocomposites made by injection moulding, *Polymer Composites*, v.7, n.3, pp. 186-190, 1986.
- [2] CAFARO H., HOFFNER J., World's first metal/plastic composite car seat debuts on Mercedes-Benz minivan in Europe, Bayer Polymer Division Report, Leverkusen, 07004, pp. 1-4, 1998.
- [3] VOLKSWAGEN AG., Environmental Report 2003-2004, 2004, pp. 1-122, Wolfsburg.
- [4] Composites in... Automotive, *Composite Technology*, pp. 13, Dez. 2005.
- [5] BARSOUM R.G.S., The best of both worlds: hybrid ship hulls use composite and steel, *Advanced Materials and Process Technology Information Analysis Center, AMPTIAC-Quarterly*, pp. 7, 2003.
- [6] GAVINE A., Dream Team: an efficient test program is underway to create an efficient aircraft, *Aerospace Testing International*, pp. 39-43, Mar. 2005.
- [7] WRIGHT N., LUTZ M.: Bolt out of the blue, *Aerospace Testing International*, pp. 76-78, Jun. 2005.
- [8] Composite materials for the railway industry. Disponível em <<http://www.hexcel.com/Markets/Rail/RailMatr.htm>>. Acesso em Setembro 2006.
- [9] CHALAYE H., Composite materials, drive and innovation, *Le 4 Pages des statistiques industrielles (Sessi-Digitip, Min. de l'Economie des Finances et de l'Industrie)*, n. 158, pp. 1-4, 2002.
- [10] KELLY A., Composite materials after seventy years, *Journal of Materials Science*, v. 41, n. 3, pp. 905-912, 2006.
- [11] MESSLER JR. R.W., Trends in key joining technologies for the twenty-first century, *Assembly Automation*, v. 20, n. 2, pp. 118- 128, 2000.
- [12] MESSLER JR. R.W., Joining composite materials and structures: some thought-provoking possibilities, *Journal of Thermoplastic Composites Materials*, v. 17, n. 1, pp. 51-75, 2004.
- [13] RINK M., US 005940949:1999, Device for producing bonded parts, U.S. Patent, 1999.
- [14] Hybrid technique (Hybridtechnologie), Bayer AG, Germany. Disponível em <<http://plastic.bayer.de/AG/DE/technology/1012/59/index.jsp>>. Acesso em Janeiro 2003.
- [15] KWEON J.-H., JUNG J.-W., KIM T.-H., CHOI J.-H., KIM D.-H., Failure of carbon composite-to-aluminium joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding, *Composite Structures*, v. 75, n. 1-4, pp. 192-19 AMANCIO FILHO S.T., Friction riveting: development and analysis of a new joining technique for polymer-metal multi-material structures, Technical University Hamburg-Harburg / GKSS Research Center, Germany 2007, ISSN 0344-9629.
- [16] AMANCIO FILHO S.T., BEYER M., DOS SANTOS J.F., US 2007.575.149: Method of connecting a metallic bolt to a plastic piece (Verfahren zum Verbinden eines metallischen Bolzens mit einem Kunststoff-Werkstück), US Patent, 2007.
- [17] AMANCIO S.T., DOS SANTOS J.F., FricRiveting: a new technique for joining thermoplastics to Lightweight alloys, In: Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers (SPE), Maio 2008, Proceedings of the ANTEC08, Milwaukee, USA, Tech Papers 0340, pp. 841-845.
- [18] AMANCIO FILHO S.T. is the winner of "Metal & Electric Industry Prize 2008" of the Nordmetall Stiftung (<http://www.nordmetall.de>), Germany, Nov. 2008.
- [19] AMANCIO FILHO S., Granjon Prize Category –A of the International Institute of Welding, Singapore, Julho 2009
- [20] MITTAL K.L., Polyimides: Synthesis, Characterization and Application, vol. 1, Plenum Press, New York, 1984.
- [21] CATSMAN P., Polyetherimide (PEI): Substituting metal (Metall substituieren), *Kunststoffe, Alemanha*, v. 95, n.10, pp.143-147, 2005.
- [22] ASM International, Handbook of Engineering Plastics, USA, v. 2, 1998.
- [23] BRYDSON J.A., Plastic materials, 7ª ed., Butterworth Heinemann, USA, 1999.
- [24] Westland 30-300 thermoplastic tailplane, *Plastics and Rubber International*, v. 12, pp. 23, 1987.
- [25] GINGER G., Thermoplastic composites gain leading edge on the A380, *High Performance Thermoplastics*, pp. 50-55, Mar. 2006.
- [26] ASM International, Handbook of Aluminium & Aluminium Alloys, 3ª ed., USA, 1996.
- [27] EN ISO 15620:1999: Welding – friction welding of metallic materials (Schweißen – Reibschweißen von metallischen Werkstoffen, Comité Européen de Normalisation, Belgium, 1999.
- [28] Welding, Brazing and Soldering Handbook, v. 6, ASM International, USA, 1994.
- [29] AMANCIO FILHO S.T., DOS SANTOS J.F., Development of FricRiveting as a new joining technique for polymer and lightweight alloys, *Materials Science and Engineering Technology*, v. 39, n. 11-12, 2008.
- [30] AMANCIO FILHO S.T., ROEDER J., NUNES S.P., DOS SANTOS J.F., BECKMANN F., Thermal degradation of polyetherimide joined by friction riveting (FricRiveting). Part I: Influence of rotation speed, *Polymer Degradation and Stability*, v. 93, n. 8, pp. 1529–1538, 2008.
- [31] AMANCIO FILHO S.T., ROEDER J., NUNES S.P., DOS SANTOS J.F., BECKMANN F., Thermal degradation of polyetherimide joined by friction riveting (FricRiveting). Part I: Influence of rotation speed, *Polymer Degradation and Stability*, v. 93, n. 8, pp. 1529–1538, 2008.



[32] AMANCIO S.T., BECKMANN F., DOS SANTOS J.F., Synchrotron X-ray computer microtomographic and light optical microscopic investigation of strength and microstructure of polymer-metal joints produced by FricRiveting, In: TMS 2009 Annual Meeting & Exhibition, 2009, San Francisco, CA, USA, 15 Fevereiro 2009, pp. 5-13.