

Estudo de Viabilidade da Soldagem de Termoplásticos por “Friction Spot Welding” (FSpW)

(Feasibility Study of the Friction Spot Welding (FSpW) Process in Thermoplastics)

Pedro Henrique Freiria de Oliveira¹, Sergio de Traglia Amancio Filho^{2,3}, Jorge Fernandes dos Santos³, Elias Hage Junior¹
¹ Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Departamento de Engenharia de Materiais, São Carlos, São Paulo, Brasil, pedrofreiria@yahoo.com.br

² HZG Helmholtz Zentrum Geesthacht, Institute of Materials Research, Materials Mechanics, Advanced Polymer-Metal Hybrid Structures, Geesthacht, Alemanha, sergio.amancio@hzg.de

³ HZG Helmholtz Zentrum Geesthacht, Institute of Materials Research, Materials Mechanics, Solid State Joining Processes, Geesthacht, Alemanha

Resumo

Os plásticos apresentam boa processabilidade, oferecendo uma grande liberdade de design. Porém, a fabricação de peças cada vez maiores e mais complexas tem exigido a busca por melhorias e desenvolvimento dos atuais processos de união e soldagem de polímeros. Friction Spot Welding (FSpW) é uma técnica de soldagem pontual por fricção inicialmente desenvolvida para ligas de alumínio, possibilitando soldas com excelentes propriedades mecânicas. Nesse trabalho a soldagem de termoplásticos através da técnica FSpW foi analisada. Para tal, utilizaram-se placas de polimetacrilato de metila (PMMA), um termoplástico amorfo com crescente importância na indústria automotiva e aeronáutica por seu bom balanço de propriedades, como baixa densidade, boa processabilidade, soldabilidade e resistência química e ao envelhecimento. As amostras soldadas foram analisadas por microscopia ótica, medições de microdureza Vickers e ensaio de resistência ao cisalhamento. Os resultados mostraram que a resistência mecânica ao cisalhamento alcançada (cerca de 9,5 MPa) é igual ou maior que a resistência de juntas sobrepostas de PMMA obtidas por outras técnicas convencionais como soldagem por ultra-som, por microondas e thermal bonding. O presente trabalho comprovou, dessa forma, a potencialidade da técnica FSpW para soldar termoplásticos.

Palavras-chaves: União; Polímeros; Fricção; FSSW, PMMA.

Abstract: The modern thermoplastics show a wide range of engineering applications, mainly due to its good processability and properties, such as stress-to-weight ratio and toughness. However, the manufacturing of larger products with complex geometries require advanced polymer welding techniques. Friction Spot Welding (FSpW) is a joining technique allowing the fabrication of joint with good mechanical properties. In this work, the feasibility of the FSpW of thermoplastics was investigated in polymethylmethacrylate (PMMA), an amorphous thermoplastic with increasing importance in the airspace and automotive industry due to its good processability, weldability, aging and chemical resistance. The welded samples were analyzed by optical microscopy and Vickers microhardness measurements and mechanically tested. Lap-shear testing showed ultimate shear resistance values of about 9,5 MPa, which were similar or higher than values obtained through current PMMA welding techniques, such as microwave welding, ultrasonic welding and thermal bonding. Therefore, the present work was able to demonstrate the potential of FSpW as an alternative welding process for thermoplastics.

Key-words: Union; Polymers; Friction; FSSW, PMMA

1. Introdução

Os plásticos têm substituído materiais tradicionais como madeira, metal e vidro em uma grande e variada gama de aplicações, em diferentes setores industriais, como automobilístico, aeronáutico, de construção civil, decoração de interiores, medicina entre outros [1].

Essa importância deve-se às características particulares dos plásticos, principalmente baixo custo de fabricação, facilidade

de processamento, versatilidade e excelente balanço de propriedades, que podem ser amplamente modificadas pelo uso de aditivos, elementos reforçantes ou pela formação de blindas com outros polímeros. Algumas características químicas, como boa resistência à corrosão, a solventes e à oxidação, aliadas a características físicas, como baixa densidade, baixos coeficientes elétrico e térmico, transparência, aumentam a atratividade dos plásticos em relação a outros materiais [2].

Essa crescente demanda por peças plásticas, em todos os setores, tem resultado na produção de partes cada vez maiores e das mais complexas formas [3]. Porém, apesar de se buscar um conceito de produtos sem a presença de soldas, que implicam em mais etapas de processos e podem reduzir a resistência dos

(Recebido em 09/11/2011; Texto final em 25/05/2012).

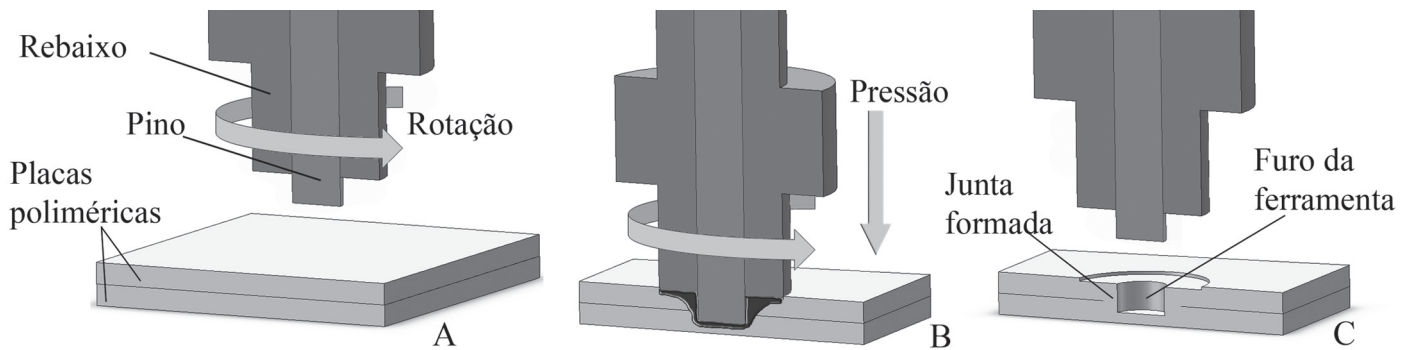


Figura 1. Etapas do processo de soldagem FSSW. A) Aproximação das ferramentas em alta rotação; B) Penetração das ferramentas na amostra, com geração de calor por fricção ao redor do pino e do rebaixo; C) Remoção das ferramentas e consolidação da junta após resfriamento.

elementos, esse objetivo, muitas vezes, não é possível de ser alcançado [4]. Por isso, diversas pesquisas têm sido realizadas em busca de melhorias e avanços nas técnicas atuais e no desenvolvimento de novos processos de soldagem de polímeros [3].

Inspirado pela boa qualidade e resistência mecânica das juntas de alumínio e magnésio soldadas por *Friction Spot Welding* (FSpW) [5], o objetivo do trabalho é avaliar a eficiência da técnica na soldagem de termoplásticos através da análise da interface, por meio de microscopia ótica, medição de microdureza Vickers e da resistência mecânica ao cisalhamento de juntas sobrepostas em poli- (metacrilato de metila), PMMA.

2. FSpW de termoplásticos

2.1. Técnicas de soldagem por fricção de termoplásticos

Na década de 1990 foi desenvolvida uma técnica inovadora de soldagem no estado sólido, aplicada inicialmente em ligas de alumínio, no Instituto de Soldagem da Inglaterra (TWI). O “Friction Stir Welding” (FSW) é um processo em que um pino não consumível rotaciona entre as partes a serem unidas, gerando calor por atrito. Esse calor é suficiente para plastificar e possibilitar a mistura de material de ambos os componentes. A ferramenta percorre toda a interface das placas, presas por um sistema de fixação, criando um cordão de solda sem a necessidade de material de adição [6].

Uma das principais vantagens do FSW sobre as técnicas de soldagem convencionais é ser um processo de união no estado sólido, ou seja, não ocorre fusão/solidificação das partes envolvidas e com isso tem-se a ausência de problemas relacionados, como fratura de solidificação e tensões residuais. Além disso, seu menor consumo de energia, ausência de material de adição e consumíveis, como fluxo ou gás protetor, e a não emissão de gases tóxicos fazem da técnica uma tecnologia ecologicamente favorável [6].

A variedade de componentes e materiais que podem ser soldados por FSW tem crescido de maneira rápida e contínua, ganhando grande importância industrial, nos setores automobilístico, aeronáutico e naval. Entretanto, nem sempre uma solda contínua é necessária para alcançar a resistência

mecânica adequada para certas aplicações. Assim, as técnicas de soldagem pontual se tornam uma alternativa em aplicações que necessitem de menores resistências, ou quando o produto tem pequena espessura ou ainda se o formato da área a ser unida é muito complexo [7].

Friction Stir Spot Welding (FSSW) é um processo derivado do FSW, em que é usada a mesma ferramenta rotacional, porém sem movimento transversal [8]. Aric e Mert [9], Amancio e colaboradores [10] e Bilici e colaboradores [11] demonstraram ser possível soldar termoplásticos com essa técnica. Na Figura 1, as principais etapas do processo estão descritas. Na Figura 1 (A), a ferramenta, em alta rotação, é forçada contra a superfície da placa superior, gerando calor por atrito. Na Figura 1 (B), a ferramenta penetra as placas até uma profundidade pré-determinada. Caso haja necessidade, a ferramenta pode permanecer um período rotacionando sem movimento vertical, chamado de período de recalque. Em seguida, mostrado Figura 1 (C), a ferramenta é retraída e, após resfriamento, a junta está consolidada. A solda formada caracteriza-se por uma região anelar na interface das placas, com um furo no centro da solda, que é uma característica desse processo.

Friction Spot Welding (FSpW) é uma adaptação do processo FSSW, desenvolvida e patenteada pelo HZG – Helmholtz Zentrum Geesthacht em 2005. A principal diferença dessa técnica está na ausência do orifício deixado no centro da região da solda. A ferramenta desenvolvida é composta por três componentes que possuem movimento axial independente: o pino, a camisa e o anel de fixação, com diâmetros de 6, 9 e 14,5 mm, respectivamente. O processo possui duas variantes: Camisa-Penetrante e Pino-Penetrante. Na Figura 2 são mostradas as etapas do processo para as duas variantes [7].

O processo ocorre de forma semelhante para as duas variantes. Primeiramente, a ferramenta, em alta rotação, é forçada contra a superfície da placa superior (Figura 2 (A)), de modo a gerar calor por fricção, amolecendo certa quantidade de material. Em seguida, um dos componentes penetra nas placas: a camisa, no caso da camisa-penetrante (Figura 2 (B)), e o pino, no caso do pino-penetrante (Figura 2 (E)). Simultaneamente, o outro componente é deslocado em sentido oposto, deixando uma cavidade onde o material removido pela ferramenta penetrante será acumulado. Quando a profundidade pré-determinada é

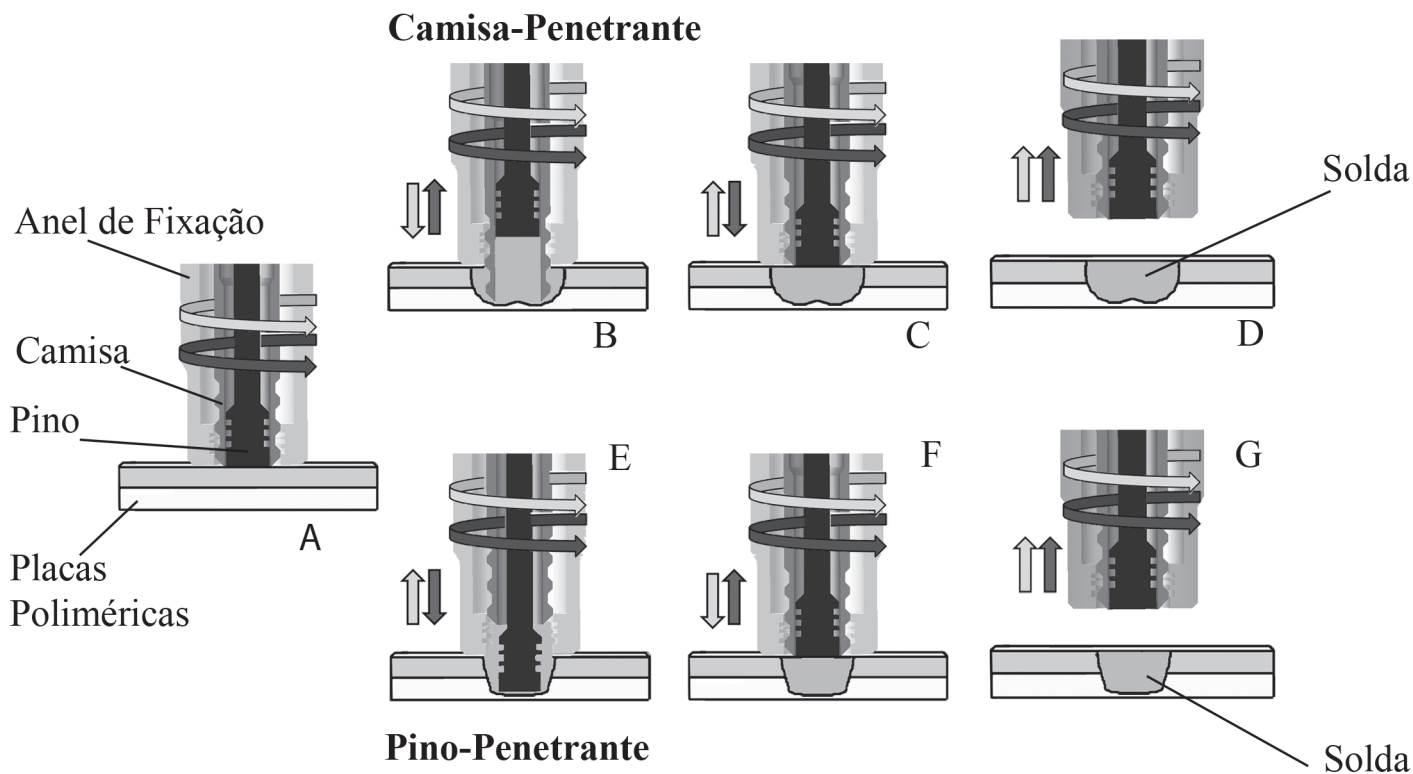


Figura 2. Sequência das etapas do processo de FSpW para as duas variantes: Camisa-Penetrante e Pino-Penetrante. A) Aproximação das ferramentas em alta rotação, gerando calor por atrito e amolecendo a camada superficial do material; B) e E) Penetração da ferramenta (camisa e pino, respectivamente); C) e F) Ferramentas voltam a sua posição original, levando ao preenchimento da solda pelo material acumulado durante a penetração; D) e G) Após o resfriamento tem-se a consolidação da junta e ausência de furo no centro da solda. Observa-se que a área soldada na variante Camisa-Penetrante é maior que na configuração Pino-Penetrante.

atingida, as ferramentas são deslocadas para suas posições originais, forçando o material acumulado a preencher o orifício deixado pela ferramenta (Figura 2 (C) e (F)). Após resfriamento sob pressão, a solda está consolidada (Figura 2 (D) e (G)). Na configuração pino-penetrante, os esforços da máquina são menores, levando a um menor consumo de energia e maior vida-útil da ferramenta. Por outro lado, na configuração camisa-penetrante, o tamanho da região da solda é maior, garantindo uma junta de maior resistência mecânica [8].

3. Materiais

O material utilizado nesse trabalho para demonstrar a viabilidade da técnica de soldagem pontual por fricção (FSpW) em termoplásticos foi o PMMA.

O polimetacrilato de metila, conhecido como PMMA é um dos mais famosos representantes da família dos acrilatos e, por isso, é comumente conhecido por acrílico. Amorfo e de baixa temperatura de transição vítrea (cerca de 105°C) é facilmente aquecido, além de ser apresentar boa soldabilidade por praticamente todas as técnicas de união de termoplásticos. Essas características fazem do acrílico um grande substituto de materiais como vidro (mais denso) e policarbonato (mais caro) em aplicações do setor automobilístico e aeronáutico [12].

A grande quantidade de informações a respeito das

propriedades mecânicas do acrílico possibilita a comparação direta com suas juntas formadas por diferentes técnicas de soldagem, como *thermal bonding* [13], soldagem por microondas [14] e soldagem por ultra-som [15].

Foram utilizadas chapas de PMMA do tipo *casting*, (Plexiglas® GS) da Evonik. Esse tipo de PMMA possui a maior resistência entre os acrílicos, devido ao altíssimo peso molecular, obtido durante a polimerização que ocorre simultaneamente à moldagem [16]. Na Tabela 1, são mostradas as principais propriedades desse material.

4. Metodologia

Foram utilizadas placas de PMMA Plexiglas® GS de 3 mm de espessura usinadas nas dimensões de 25,4 mm de largura e 100 mm de comprimento, baseadas na norma ASTM D-3163 [18].

Selecionou-se uma ferramenta de titânio, ao invés das tradicionais ferramentas de aço, devido ao seu menor coeficiente de condutividade térmica. Essa escolha baseia-se na intenção de reduzir as perdas por condução do calor gerado durante a fricção entre a ferramenta e o material [19].

Foram produzidas soldas, sempre na configuração camisa-penetrante, variando-se os seguintes parâmetros: velocidade de rotação entre 500 e 2000 RPM, tempo de ciclo entre 5,5

Tabela 1. Propriedades do acrílico Plexiglas® GS, da Evonik [17].

Propriedades Plexiglas® GS		
Propriedades Mecânicas		Normas
Densidade	1,19 g.cm ⁻³	ISO 1183
Resistência ao Impacto Charpy	15 kJ.m ⁻²	ISO 179
Resistência Final à Tração (23 °C)	80 MPa	ISO 527-2
Deformação na Ruptura	5,5 %	ISO 527-2
Módulo Elástico	3,3 GPa	ISO 527-2
Propriedades Térmicas		
		Normas
Coef. de Expansão Térmica Linear α , (0-50°C)	$7 \cdot 10^{-5}$ mm.m ⁻¹ .°C ⁻¹	DIN 53752
Coef. de Condutividade Térmica	0,19 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	DIN 52612
Temperatura de Transição Vítrea *	110°C	ISO 11357-2
Processamento	160-175°C	

*Determinado pelo autor, via DSC

e 12 segundos e penetração da ferramenta de 3,5 e 4 mm. A pressão de fixação ficou constante em 3 bar. As soldas foram produzidas em um equipamento de FSpW (RPS 100, Harms & Wende, Alemanha) no HZG Helmholtz Zentrum Geesthacht, Geesthacht, Alemanha.

Para avaliar o preenchimento e presença de defeitos das amostras soldadas, e, então, realizar a investigação microestrutural, as amostras foram seccionadas e embutidas em resina de cura a frio (*Buehler Epoxicure*). Num passo seguinte, as amostras foram preparadas através de procedimento metalográfico padrão de lixamento e polimento. A análise microscópica foi realizada em um microscópio ótico de luz refletida (Leica Q550IW). Para a caracterização mecânica das soldas, assim como do material de base, foram efetuados ensaios de microdureza, em um microdurômetro Zwick/Roell ZHV, usando carga HV 0,05 (50 gramas), tempo de indentação de 15 segundos e distância entre indentações de 300 μ m. Para determinação da resistência da junta, foram realizados ensaios de cisalhamento das amostras soldadas, em uma máquina de ensaios mecânicos universal Zwick/Roell 1478, de acordo com a norma ASTM D-3163, com velocidade de 2 mm.min⁻¹, à temperatura ambiente. Uma área nominal circular de 63,2 mm², calculada pelo diâmetro externo da camisa, foi considerada para os cálculos de resistência. Esse é um procedimento normal adotado para juntas pontuais.

5. Resultados e discussões

Para investigação da estrutura e características da junta, foi selecionada uma das condições soldadas (500 RPM, 5,5 segundos e 4 mm de penetração). Na Figura 3 é mostrada a superfície da amostra soldada.

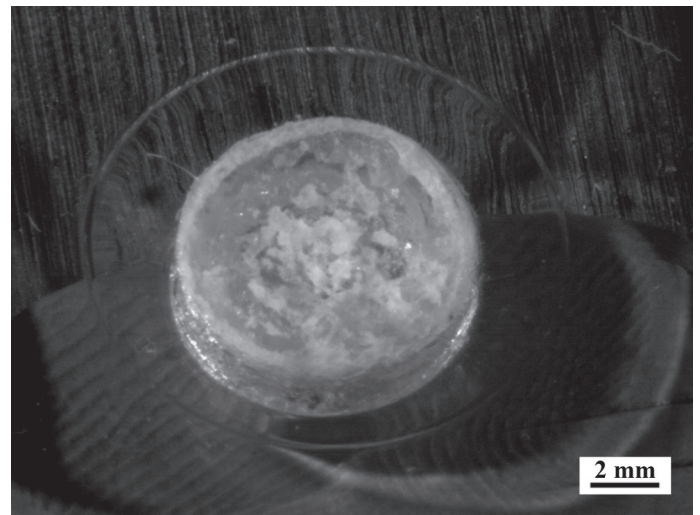


Figura 3. Superfície de amostra de PMMA soldada por FSpW.

Na Figura 4, a região central da junta de PMMA soldada por FSpW é exibida. É possível observar, na Figura 4 (A), a região preenchida pelo polímero que foi amolecido graças à ação da ferramenta penetrante (camisa). Na Figura 4 (B), nota-se a presença de alguns defeitos e vazios na região de união entre as placas. Embora esses defeitos estejam sob investigação, acredita-se que estes estejam relacionados à performance de re-preenchimento devido a alterações na viscosidade do polímero, acúmulo de ar, encolhimento térmico ou até a formação de vapor de água. Na Figura 4 (C), é possível observar a presença de um defeito que ocorre ao redor de toda a região da solda, na interface das duas placas. Esse defeito é devido à contração

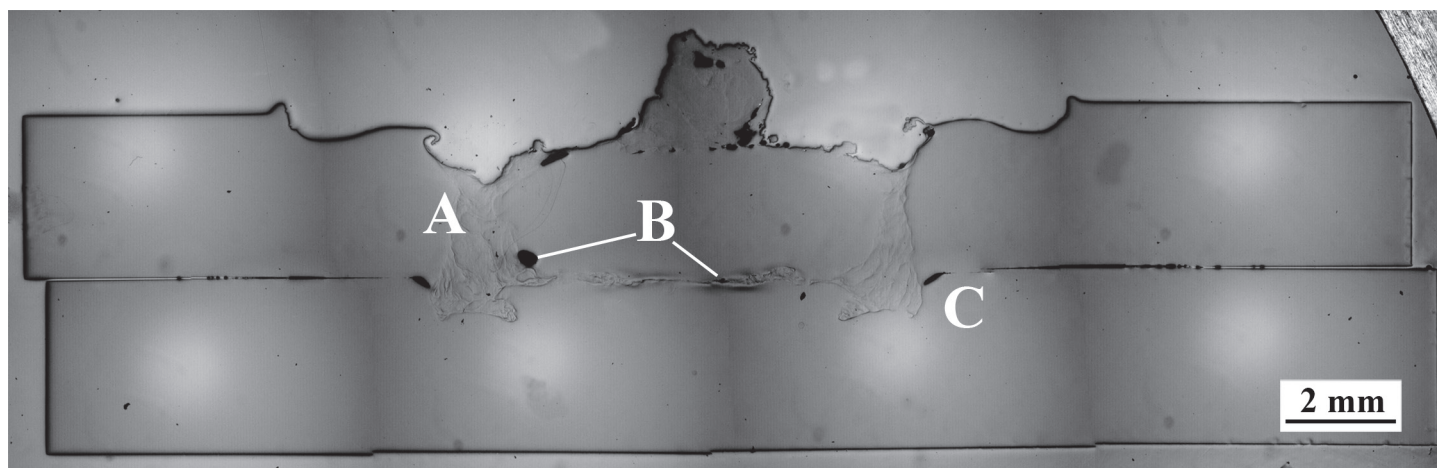


Figura 4. Seção transversal de uma amostra de PMMA soldada por FSpW (500 rpm, 5,5 segundos e 4 mm de penetração). (A) região em que ocorreu preenchimento pelo polímero amolecido. (B) presença de defeitos e vazios na região de interface das placas. (C) defeito anelar presente ao redor da região da solda

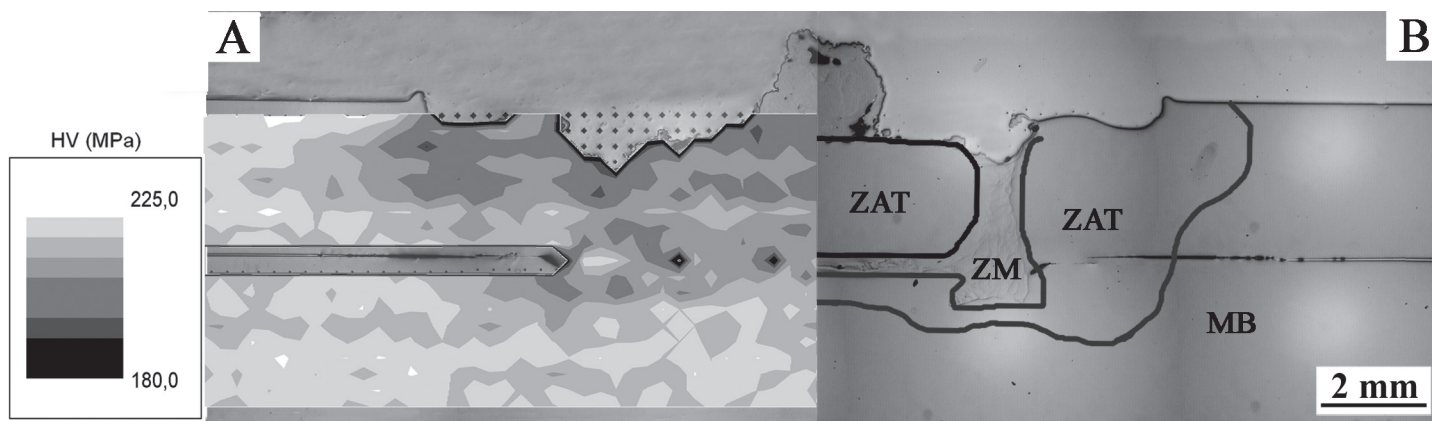


Figura 5. (A) mapa de distribuição de valores de microdureza. (B) regiões da solda de FSpW. Adaptado de [20]

térmica sofrida pelo polímero amolecido que preencheu a região da solda.

Por ser um polímero amorfo, além da região de preenchimento e defeitos, não foi possível observar diferenças estruturais na região da junta.

Através do ensaio de microdureza buscou-se identificar alterações na resistência mecânica local do polímero. A Figura 5 (A) exibe um mapa de distribuição de valores obtidos enquanto a Figura 5 (B) é mostra as diferentes regiões da junta de FSpW.

Considerando que o valor de microdureza médio obtido da amostra de material de base foi de $(217,8 \pm 3)$ MPa, é possível observar, na Figura 5 (A), que uma ampla região apresentou uma queda de 5 a 10% nos valores de microdureza.

A dureza está relacionada ao módulo de rigidez do material, e este, por sua vez, pode ser relacionado ao peso molecular médio das cadeias poliméricas, ou ao grau de cristalinidade ou ainda à orientação das cadeias. Por isso, tal propriedade é importante para o entendimento das relações processo-estrutura-propriedades das juntas relacionadas ao tratamento termomecânico oriundo da soldagem.

Ensaio preliminares de microdureza no material de base indicaram que não há diferenças significativas entre os valores

obtidos na seção transversal e na seção longitudinal, confirmando que não há orientação preferencial das cadeias poliméricas nesse *grade* de PMMA. Somado ao fato de o acrílico ser um polímero amorfo (ou seja, não apresenta cristalinidade), é possível afirmar que nessas regiões houve alguma degradação com redução de peso molecular. Como o processo de depolimerização do PMMA inicia-se em temperaturas acima de 250°C, por quebra de cadeias, pode-se assumir que a temperatura do processo alcançou a temperatura de degradação [21–23]. Estudos complementares, via técnicas de análise térmica, estão sendo realizadas para esclarecimento dessas mudanças.

Nota-se que a área que apresentou redução de microdureza engloba regiões de polímero amolecido, regiões que tiveram contato com as ferramentas e regiões afastadas da ferramenta, revelando que tanto o trabalho mecânico da ferramenta quanto à alta temperatura tiveram influência nos valores de microdureza obtidos.

Através da seção transversal (Figura 4) e do mapa de distribuição de microdureza (Figura 5 (A)), foram identificadas três regiões distintas na junta polimérica soldada por FSpW, exibidas na Figura 5 (B).

A região do material de base (MB), ou região não-afetada,

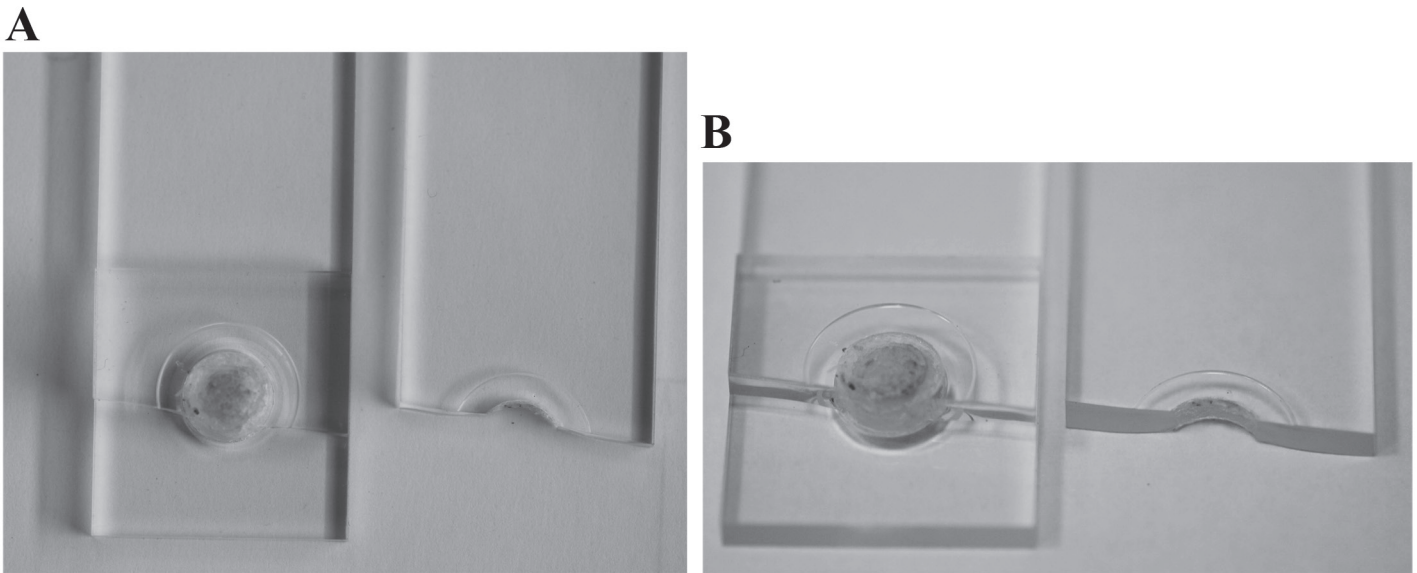


Figura 6. Amostra fraturada: (A) Vista superior. (B) perspectiva.

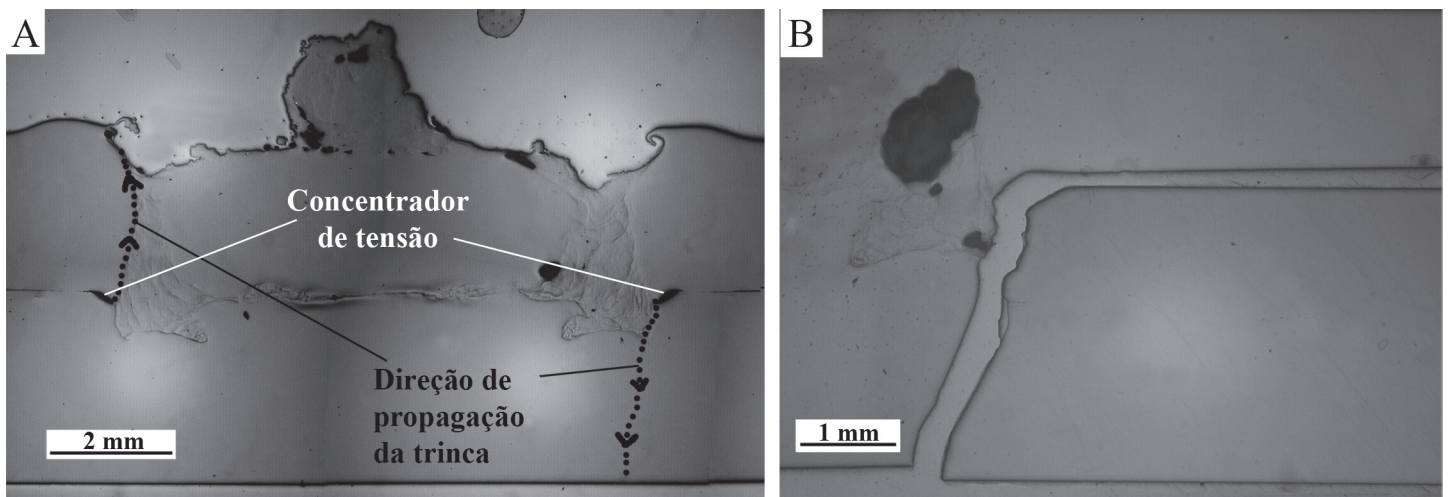


Figura 7. (A) Mecanismo de fratura. (B) Amostra fraturada, com falha na placa inferior.

compreende o volume mais afastado da área de atuação das ferramentas, em que não são observadas mudanças estruturais e de redução do valor de microdureza. A zona afetada termicamente (ZAT) compreende o volume em que houve redução da dureza devido às altas temperaturas experimentadas. No entanto, não é possível identificar diferenças entre a estrutura do MB e ZAT.

A região que compreende o polímero, amolecido pela ação termo-mecânica, que fluiu para preencher a cavidade deixada pela ferramenta foi chamada de zona de mistura (ZM).

Para avaliar a resistência das juntas ao cisalhamento, foram testadas três réplicas de cada uma das duas condições: velocidade de rotação de 500 RPM, tempo de soldagem de 5,5 segundos e profundidade de penetração variando de 3,5 mm e 4 mm de penetração.

A fratura final de todas as réplicas ocorreu através do material de base, com início propagação da trinca na transição da ZTA e ZM da solda. Esse é um indicativo de uma junta de boa qualidade, em que a região central da solda suportou a tensão

aplicada, de modo a transferi-la, eficientemente, para o material de base. Porém uma análise aprofundada é necessária para o entendimento completo dos mecanismos de falha em uma junta termoplástica de FSpW. A Figura 6 exhibe a região de fratura de uma amostra cisalhada.

Observou-se que a fratura ocorreu tanto na placa superior quanto na placa inferior, sem que houvesse nenhuma relação parâmetro - posição de fratura. O defeito anular (devido ao fenômeno de encolhimento do fundido), presente ao redor da região da solda, entre a ZAT e ZM, foi identificado como um grande concentrador de tensão e ponto de nucleação da trinca. A partir desse defeito, a trinca propagou entre a ZM e ZAT de maneira frágil, sem nenhuma deformação plástica.

O fato de a trinca percorrer a interface das regiões ZM e ZAT revela que não houve um alto grau de interdifusão das cadeias poliméricas nesse ponto, devido ao rápido tempo de processo e ao pequeno volume de material amolecido.

A Figura 7 (A) exhibe o local de iniciação da trinca, e as

direções de propagação e, em Figura 7 (B), uma micrografia de uma amostra fraturada, em que a falha ocorreu na placa inferior.

A resistência média para a amostra de 3,5 mm de penetração foi de $(6,6 \pm 0,6)$ MPa, enquanto para a amostra de 4 mm de penetração foi de $(8,3 \pm 1,2)$ MPa. O fato de a resistência média das amostras de maior profundidade de penetração ser superior se deve à maior área de união entre as placas – ZM.

No gráfico da Figura 8 estão resumidos os maiores valores de resistência ao cisalhamento encontrados na literatura em juntas de PMMA, formadas por diversas técnicas.

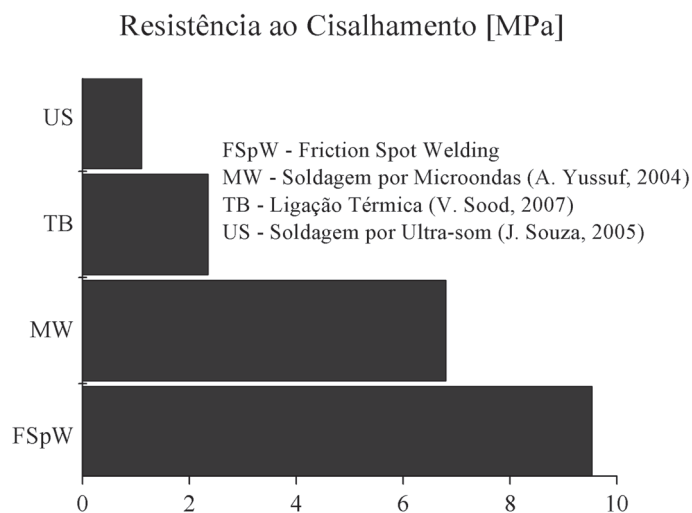


Figura 8. Máxima resistência ao cisalhamento de juntas sobrepostas de PMMA encontradas na literatura.

Souza [15] obteve uma resistência média de 1,10 MPa na melhor condição de soldagem por ultra-som. Apesar de o tempo total de soldagem (menos de 1 segundo) ser menor, a resistência máxima chega a apenas 10% do valor alcançado. Sood [13] alcançou resistência máxima de 2,35 MPa nas amostras soldadas por Ligação Térmica. Além da baixa resistência, o tempo de soldagem é muito longo, dentro do qual o polímero precisa permanecer sob alta temperatura e pressão, levando a um consumo de energia, que na soldagem *FSpW* não ocorre.

Yussuf et al. [14] chegaram a valores máximos de 6,8 MPa. O tempo de soldagem não foi muito maior que para as amostras de *FSpW* (15 segundos *versus* 7 segundos). Entretanto, a técnica de soldagem por microondas, no caso de soldagem de PMMA, necessita da adição de um material que absorva a radiação emitida. Isso implica também na confecção de microcanais, ou seja, mais etapas no processo.

6. Conclusões

O presente trabalho mostrou a viabilidade e potencialidade da técnica de soldagem pontual por fricção (*FSpW*) aplicada à termoplásticos. Baseando-se nos resultados de resistência ao cisalhamento, conclui-se que o método é bastante eficaz, já que, mesmo em níveis iniciais de desenvolvimento, os valores obtidos superam técnicas de soldagem de termoplásticos já estabelecidas.

Como vantagens, o método apresenta: (a) curto tempo de soldagem, (b) baixo consumo de energia, (c) processo totalmente automatizado, (e) não é necessária adição de outros materiais, (f) pequena ou nenhuma necessidade de preparação da superfície, e (g) alta resistência da junta formada.

As principais desvantagens estão relacionadas ao recente desenvolvimento da técnica. A qualidade do preenchimento e da superfície de região da solda precisam ser otimizadas, o que levará a uma maior resistência mecânica devido à eliminação de concentradores de tensão.

7. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao HZG Helmholtz Zentrum Geesthacht, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos (PPGCEM) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte oferecido durante essa pesquisa.

8. Referências Bibliográficas

- [1] CHAWLA, K.K. Composite Materials: Science and Engineering. 2 ed. New York: Springer, 1998. 496 p.
- [2] WISE, R.J. Thermal welding of polymers. Cambridge: Woodhead Publishing, 1999. 104 p.
- [3] STOYNOV, L. A feasibility study into joining of engineering thermoplastics utilising concentrated beam solar radiation, Renewable Energy, vol. 21, pp. 333-361, Nov. 2000.
- [4] AMANCIO-FILHO, S.; DOS SANTOS, J. Joining of polymers and polymer-metal hybrid structures: Recent developments and trends, Polymer Engineering & Science, vol. 49, p.1461-1476, Ago. 2009.
- [5] SCHILLING, C.; DOS SANTOS, J. Method and Device for Linking at Least Two Adjoining Work Pieces by Friction Welding, U.S. Patent WO/2001/036144, 2005.
- [6] MISHRA, R.S.; MAHONEY, M.W. Friction stir welding and processing. Ohio: ASM International, 2007. 360 p.
- [7] DA SILVA, A. et al. Friction Spot and Friction Stir Spot Welding Processes – A Literature Review. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF ISIM, 8º, 2007, Romênia.
- [8] ROSENDO, T.D.S. Estudo do Desempenho Mecânico de Solda(s) Ponto por Fricção (*FSpW*) da Liga AA6181-T4: 2009. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- [9] ARICI, A.; MERT, S. Friction Stir Spot Welding of Polypropylene, Journal of Reinforced Plastics and Composites, vol. 00, p. 1-4, Mai. 2008.
- [10] AMANCIO-FILHO S.T. et al. Recent advances in joining of polymer and polymer-metal hybrid structures by Friction-based Spot Welding techniques. In: ANTEC, 2010, Orlando, EUA. Proceedings: 2010, vol. 1, p. 439-445.
- [11] BILICI, M. K.; YÜKLER, A. I.; KURTULMUS, M. The optimization of welding parameters for friction stir spot welding of high density polyethylene sheets, Materials & Design, vol. 7, p. 4074-4079, Ago. 2011.
- [12] TROUGHTON, M.J. Handbook of Plastics Joining. 2 ed.

Norwich: William Andrew, 2008. 600 p.

[13] SOOD, V. An Experimental Study on Thermal Bonding Effects of PMMA based Micro-device Using Hot Embossing: 2007. Dissertação (Mestrado), University of Texas, Arlington.

[14] YUSSUF, A.A. et al. Rapid microwave welding of two polymethylmethacrylate (PMMA) substrates. In: ANTEC, 2004, Chicago, EUA. Proceedings: 2004, vol. 1, p. 1256-1260.

[15] SOUZA, J.M. Estudo e Avaliação Mecânica das Juntas Soldadas por Ultra-som de Policarbonato e Poli(metacrilato de metila): 2005. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

[16] MARK, H.F. Encyclopedia of Polymer Science and Technology. 3 ed. Wiley-Interscience, 2004.

[18] ASTM, D3163-01(2008) Standard Test Method for Determining Strength of Adhesively Bonded Rigid Plastic Lap-Shear Joints in Shear by Tension Loading, 2008.

[19] OLIVEIRA, P.H.F.; Influence Of Tool Material On Structure And Mechanical Properties Of Thermoplastic Joints Welded By Fspw, In: ANTEC, 2011, Boston, EUA.

[20] OLIVEIRA, P.H.F. et al. Preliminary study on the feasibility of friction spot welding in PMMA, Materials Letters, vol. 64, p. 2098-2101, Out. 2010.

[21] KANDARE, E. et al. Thermal stability and degradation kinetics of poly(methyl methacrylate)/layered copper hydroxy methacrylate composites, Polymers for Advanced Technologies, vol. 17, nº. 4, p. 312-319, Jan. 2006.

[22] GINZBURG, B. et al. The effect of fullerene C60 on the thermooxidative degradation of a free-radical PMMA studied by thermogravimetry and calorimetry, Technical Physics Letters, vol. 27, nº. 10, p. 806-809, Out. 2001.

[23] MONTAUDO, G.; PUGLISI, C.; SAMPERI, F. Chemical reactions occurring in the thermal treatment of PC/PMMA blends, Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, vol. 36, nº. 11, p. 1873-1884, Ago. 1998.