

INFLUÊNCIA DE RUGOSIDADES NA RESISTÊNCIA ADESIVA NA FABRICAÇÃO DE COMPÓSITOS ESTRUTURAIS DO TIPO SANDUICHE METAL/POLÍMERO/METAL

Luiz Antonio Machado, luizantonio_machado@yahoo.com.br¹

Jefferson F. C. Lins, jfclins@id.uff.br¹

Fábio J. B. Brum, fabiobrum@id.uff.br¹

¹ Universidade Federal Fluminense – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica - Avenida dos Trabalhadores, 420, Vila Santa Cecília – Volta Redonda / RJ - Brasil CEP 27255-125

Resumo: Estruturas sanduíche metal-polímero-metal são de particular interesse, visto que permitem combinar várias funções, tais como: alta rigidez e comportamento de conformabilidade, propiciado pela camada de cobertura metálica e um bom amortecimento graças ao polímero do núcleo. O objetivo deste trabalho experimental é apresentar uma análise em relação à influência da rugosidade provocada nas superfícies metálicas, utilizadas na fabricação de compósito tipo sanduíche metal/polímero/metal. As amostras foram produzidas a partir de folhas metálicas de aço baixo carbono como substrato, polipropileno (PP) como núcleo e adesivo acrílico bicomponente para junção das partes. Foram utilizadas lixas para ferro de diferentes granulometrias tais como: 50; 80; 100 e jato de granalhas de cobre para promover as rugosidades. As amostras foram produzidas sem utilização de aquecimento durante o processo de fabricação. Microscopia Confocal foi utilizada para investigar a superfície metálica após lixamento e jateamento, para medir a profundidade das rugosidades provocadas. A resistência adesiva foi estimada pelo teste T-peel (180°) segundo a norma ASTM 1876 e a resistência ao cisalhamento das superfícies adesivadas segundo a norma ASTM 3164. Os resultados experimentais mostram que a principal fonte de aumento de resistência, causada por modificações na topografia da superfície do metal, em juntas coladas polímero/metal é a transição interfacial de falha coesiva. A força de adesão é aumentada pelo aumento da rugosidade da superfície de um substrato apenas se o aumento da rugosidade provoca a transição no modo de falha de adesão. Como melhor resultado encontrou-se 4,056 N/mm para resistência à força de descolamento e 2890 N para resistência ao cisalhamento. Este estudo tenta explicar por que a força de adesão das juntas de polímero/metal, mostra significativa variação de acordo com a topografia da superfície dos substratos de metal. É importante ressaltar que intertravamento mecânico é um dos aspectos que regem o fenômeno de adesão. Intertravamento mecânico promovido por adsorção provoca gasto energético durante a fratura, o que praticamente constitui a força de aderência.

Palavras-chaves: Compósito sanduíche, compósito metal/polímero/metal, materiais compósitos.

Abstract: Metal-polymer-metal sandwich structures are of particular interest, since they allow combining various functions, such as: high rigidity and conformability behavior, provided by the metallic cover layer and a good damping due the polymer core. The objective of this experimental work is to present an analysis in relation to the influence of roughness provoked on the metallic surfaces used in the manufacture of metal/polymer/metal sandwich composites. The samples were produced from low carbon steel sheets such as substrate, polypropylene (PP) as a core and bicomponent acrylic adhesive for joining the parts. Sands were used for iron of different granulometries such as: 50; 80; 100 and Copper grits jet to promote roughness. Samples were produced without the use of heating during the manufacturing process. Confocal microscopy was used to investigate the metal surface after sanding and abrasive blasting, to measure the depth of the roughness caused. The bond strength was estimated by the T-peel test (180 °) according to ASTM 1876 and the shear strength of the adhesive surfaces according to ASTM 3164. The experimental results show that the main source of increase of resistance, caused by modifications in the topography of the metal surface, in polymer/metal bonded joints is the interfacial transition of cohesive failure. The adhesion strength is increased by increasing the roughness of the surface of a substrate only if the increase of the roughness causes the transition in adhesion failure mode. The best result was 4.056 N/mm for strength to peel strength and 2890 N for shear strength. This study attempts to explain why the adhesion strength of the polymer/ metal joints shows significant variation according to the topography of the surface of the metal substrates. It is important to emphasize that mechanical interlocking is one of the aspects that govern the phenomenon of adhesion. Mechanical interlocking promoted by adsorption causes energy expenditure during the fracture, which practically constitutes the force of adhesion.

Keywords: Sandwich composite, composite metal / polymer / metal, composite materials

1. INTRODUÇÃO

Novos requisitos de construção em engenharia mecânica, indústria automotiva e construção naval, bem como na aviação e tecnologia espacial continuamente aumentam. Com os perfis complexos e com estruturas de multifuncionalidades, os componentes muitas vezes não podem ser preenchidos por mono materiais, sistemas sanduíche são cada vez mais utilizados. Compósitos sanduíche metal/polímero/metal são de particular interesse, uma vez que combinam várias funções em si, tais como: alta rigidez e comportamento de formabilidade exibido pela camada metálica e bom comportamento de amortecimento graças ao polímero do núcleo. Diferentes combinações de revestimentos com metal e núcleos de polímero, podem ser fabricados com a utilização de um agente de colagem(adesão indireta) ou sem o agente de colagem(adesão direta). Kim, W.-S. Et al (2010), investigam o efeito topográfico da superfície sobre a resistência à Epoxi/aço. Concluíram que a adesão entre um metal específico com uma certa morfologia superficial e um polímero específico é conseguida por adsorção. As características da fratura dependerão da interação entre a topografia superficial do substrato metálico e as propriedades mecânicas do polímero por intermédio de bloqueio mecânico. Este estudo procura explicar por que a força de adesão de polímero/metal apresenta uma grande variação de acordo com a topografia superficial dos substratos metálicos e o modo de carregamento. Palkowski et al (2014), com folhas sanduíche 316L/polipropileno/316L, fabricadas num processo com pré-aquecimento e *roll bonding*(processo de soldagem, obtido através de laminação plana de chapa), estudam o comportamento mecânico e a formabilidade. Carradò et al (2010), utilizando o processo *roll bonding* produz folhas de sanduíche de três camadas com polímeros sem reforço e reforçado, onde estuda também o comportamento mecânico e formabilidade por estampagem profunda. Kim, K.J et al (2003), através da técnica de prensagem com calor de folhas de alumínio, compósitos tipo sanduíche AA5182/polipropileno/AA5182 foram fabricados. Neste experimento analisam o efeito do parâmetro de defeito inicial para a rugosidade da superfície, antes da construção do diagrama de limite de conformação. Weiss et al (2007), avaliam a influência da temperatura sobre as propriedades mecânicas no comportamento de formação de uma laminada alumínio/polipropileno/alumínio, mostram que a alteração nas propriedades do material plástico visco-elástico do núcleo sobre a temperatura é significativa. Mas isto tem menor influência sobre as propriedades de tensão e a capacidade de formação do material. Sancaktar et al (2012), como uma nova abordagem, apresentam o trabalho que se propuseram a correlacionar a rugosidade da superfície com o grau de falha interfacial vs. coesiva em juntas simples. Atribuíram isso à melhor ancoragem obtida em superfícies laminadas a quente tratadas que produziram valores de rugosidade mais altos. Os resultados para compósitos obtidos por prensa aquecida não foram promissores para a variação de núcleos, mais trabalhos para melhorar as condições adesivas são necessários utilizando este processo. No entanto, em condições menos rigorosas de formabilidade, esses tipos de compósitos podem ser utilizados. Carradò et al (2011), avaliam a formabilidade dos compósitos *roll bonding*, sendo este mais favorável do que a dos compósitos feitos pela técnica de prensa de calor comparado. Os resultados mostraram um potencial promissor para a aplicação de *roll bonding* aquecido para fabricar laminados compósitos híbridos de

metal/polímero. Os estudos citados acima estão focados na conformabilidade de combinações de materiais e processos utilizando aquecimento dos componentes. O presente estudo tem o foco voltado à adesão entre as camadas dos materiais. O objetivo é analisar o efeito provocado pela rugosidade no metal (aço), na adesão entre substrato e núcleo de compósito tipo sanduíche metal/polipropileno/metal, sem a utilização de pré-aquecimento durante o processo de fabricação (prensagem a frio).

2. MATERIAL E MÉTODO

2.1 Material

O aço de baixo carbono tem sido bastante utilizado como reforço estrutural em peças de compósito no uso automotivo, devido às suas boas propriedades mecânicas e custo relativamente baixo. A Tabela (1) apresenta a composição química do aço utilizado neste trabalho. Material adquirido no comércio local.

Tabela 1. Composição química do aço SAE 1006

Norma Técnica	Grau	Composição Química (%)			
		C	Mn	P máx	S máx
SAE	1006	0,054	0,226	0,021	0,013

O polipropileno utilizado no estudo tem o nome comercial de PP H301, fornecido pela Braskem, e será denominado neste estudo de PP. De acordo com o fabricante, este possui um índice de fluidez médio, indicado para moldagem por injeção e é um produto atóxico, com excelente processabilidade, boa estabilidade do fundido e baixa transferência de sabor e odor. A Tabela (2) apresenta as propriedades do PP informadas pelo fabricante.

Tabela 2. Propriedades do Polipropileno

Propriedades	Norma ASTM	Valor	Unidade
Índice de Fluidez (230°C/ 2,16 Kg)	D 1238	10	g/10 min
Densidade (23°C)	D 792-A	0,905	g/cm ³
Resistência no Escoamento	D 638	33	Mpa
Alongamento no Escoamento	D 638	11	%
Resistência ao impacto IZOD (23°C)	D 256-A	25	J/m

O adesivo DP 8005 da 3M é um adesivo plástico estrutural acrílico bicomponente, que podem unir plásticos com superfície de baixa energia e metal. A Tabela (3) apresenta suas principais características antes da cura.

Tabela 3. Propriedades físicas do adesivo

Propriedade	Acelerador (Parte A)	Base (Parte B)
Cor	Branco	Branco/Translúcido
Densidade kg/l (lbs/gal)	0,70 - 0,73 (8,75 - 9,15)	0,6 - 0,67 (8 - 8,4)
Viscosidade (cps)	35000 - 55000	17000 - 30000
Resina Base	Amina	Metil Metacrilato
Relação de mistura		
Volume	1	10
Peso	1	9,16
Tempo para Resistência de Manuseio (50psi @ 23°C (73°F))	2 horas	
Tempo para cura Total @ 23°C (73°F)	8 horas	
Tempo de Trabalho a @ 23°C (73°F)	2,5 min	

As lixas para ferro utilizadas neste trabalho são: Lixa 50, 80 e 100 e jatos de granalha de cobre, que promoveram as diferentes rugosidades nas superfícies metálicas das amostras.

O álcool isopropílico foi o material utilizado para limpeza das superfícies.

2.2 Método

Na fabricação dos compósitos SMS (System Material Sandwich) metal/polímero/metal, utilizou-se como substrato o Aço SAE 1006 com a espessura de 0,45 mm e como núcleo Polipropileno (PP) com 0,6 mm. As amostras de Aço foram fabricadas a partir de uma única chapa de material conforme Fig. (1), seguindo a direção de grão longitudinal, com o objetivo de se evitar possíveis efeitos de anisotropia do material.

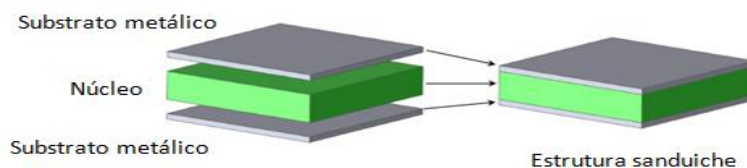


Figura 1. Estrutura do compósito sanduíche SMS. Fonte: www.autosteel.org

Normalmente, a superfície das folhas metálicas são contaminadas por camadas tais como: filmes de óxido, íons adsorvidos, graxas e umidade. A fim de remover-se o óxido e as camadas contaminadas da superfície dos metais, as amostras foram desengorduradas com álcool isopropílico. Para nós investigarmos o efeito da rugosidade superficial sobre a resistência à aderência, foram utilizadas lixas para ferro com grãos 50, 80, 100 e granalha de cobre (Copper slag), para tornar áspero as superfícies metálicas de folhas de aço SAE 1006. As lixas para ferro foram utilizadas de forma manual e na direção paralela a da largura (25,4 mm). A granalha de cobre (Copper slag) é um material granulado, de cor negra, seco, constituído de silicatos estáveis e livre de materiais voláteis. É um material não higroscópico (não absorve água) e com maior dureza que a areia, mais eficaz no processo de jateamento. A aplicação foi realizada pela empresa ECILA Construções e Montagens LTDA. Após a utilização das lixas para ferro e granalha de cobre, novamente as superfícies metálicas foram limpas com álcool isopropílico para remover os resíduos remanescentes. As superfícies das amostras de polipropileno também foram limpas com álcool isopropílico. Para evitar qualquer formação de óxido e interferência com a colagem, o SMS foi fabricado imediatamente após o processo de limpeza. O ensaio para determinação de rugosidades das amostras executou-se com base na NORMA DIN 4768, utilizando-se o microscópio CONFOCAL LEICA DCM 3D. Ensaio este, realizado no Laboratório de Materiais no Departamento de Física da Universidade Federal Fluminense – UFF.

2.2.1. Processo de colagem a frio

Na maior parte dos casos, quanto mais espesso o adesivo, maior o nível de tensões e deformações. Neste estudo, a camada adesiva é limitada a uma espessura mínima determinada por nanopartículas contidas no adesivo. O comportamento das tensões e deformações do adesivo não foi objeto de estudo neste trabalho. O adesivo DP 8005 foi aplicado com auxílio de uma pistola aplicadora em uma das faces do substrato, garantindo a espessura do filme de adesivo recomendado pelo fabricante. Dentro do tempo estipulado como tolerância conforme Tab. (2), o substrato e núcleo são unidos por sobreposição de forma manual e deixado sob uma prensa com leve pressão (6 psi), recomendada pelo fabricante para assegurar o contato entre as partes. Este procedimento é repetido com a outra face do substrato. As amostras foram confeccionadas em ambiente de temperatura controlada, entre 22 °C e 25 °C no Laboratório de Materiais no Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense - UFF. Após o tempo de cura conforme Tab. (2), o compósito foi cortado com uma guilhotina nas dimensões estipuladas, segundo as respectivas normas conforme Fig. (3-4).

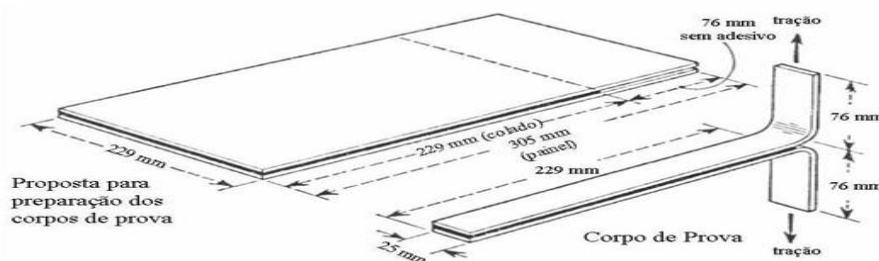


Figura 3. Dimensões para ensaio T-PEEL segundo ASTM 1876

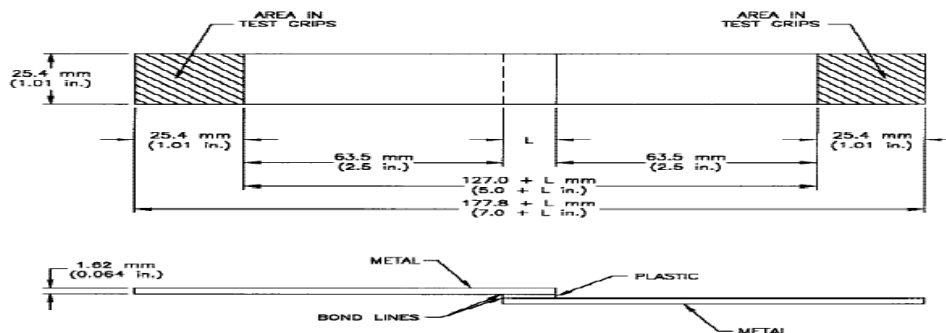


Figura 4. Dimensões para ensaio de Cisalhamento segundo ASTM 3164

2.2.2. Ensaio de desprendimento (T-PEEL)

O teste de adesão T-Peel (180°) entre o substrato e o núcleo, foi executado com base na NORMA ASTM 1876. Ensaio este, realizado no Laboratório de Materiais no Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense – UFF. Após preparação dos corpos de prova, realizou-se a preparação da máquina de tração para o início dos ensaios conforme Fig. (6).

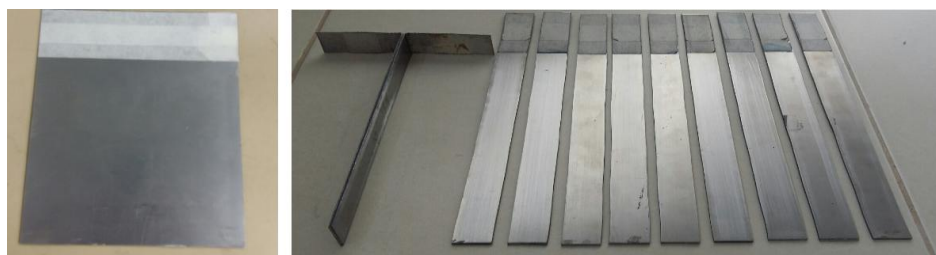


Figura 6. Corpos de prova para ensaio T-PEEL

Máquina universal para ensaios mecânicos de tração, compressão, flexão, modelo EMIC 23-20, eletromecânica, marca INSTRON/EMIC. Célula de carga CCE20KN com resolução de leitura de 1 N, conforme Fig. (7) onde foram executados os ensaios.



Figura 7. Ensaio de desprendimento na máquina de tração

2.2.3. Ensaio de cisalhamento

O teste de cisalhamento entre o substrato e o núcleo, foi executado com base na NORMA ASTM 3164. Ensaio este, realizado no Laboratório de Materiais no Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense – UFF. Após preparação dos corpos de prova, preparou-se a máquina de tração para o início dos ensaios conforme Fig.(10).

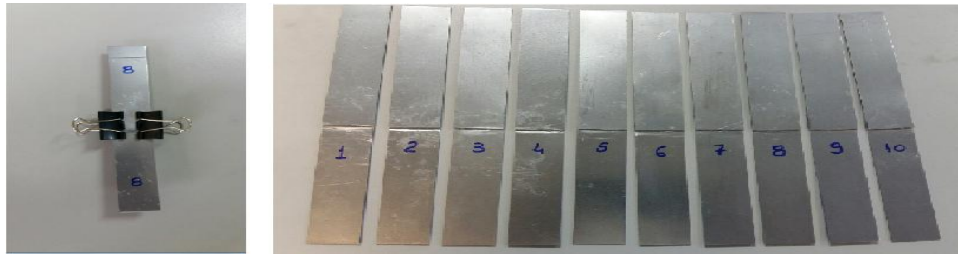


Figura 10. Corpos de provas para ensaio de cisalhamento

Máquina universal para ensaios mecânicos de tração, compressão, flexão, modelo EMIC 23-20, eletromecânica, marca INSTRON/EMIC. Célula de carga CCE20KN com resolução de leitura de 1 N, conforme Fig. (11) onde foram executados os ensaios.



Figura 11 – Ensaio de cisalhamento na máquina de tração

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

3.1 Efeito da força de desprendimento – (T-Peel)

Observação morfológica de superfície realizou-se na amostra do substrato utilizando-se o microscópio Confocal LEICA, antes da confecção do compósito SMS para analisar-se e medir as diferentes rugosidades na superfície metálica. A Fig. (12) apresenta as amostras metálicas com cinco diferentes valores de rugosidade na superfície. A rugosidade superficial inicial da amostra tal como recebida foi $Ra = 1,1166 \mu m$. Após o uso de lixas para ferro com grãos 50, 80 e 100, os valores de rugosidade das superfícies mudaram para $Ra = 1,2666 \mu m$, $Ra = 1,0895 \mu m$ e $Ra = 1,0548 \mu m$, respectivamente. Para a superfície onde foi aplicada a granalha de cobre o valor da rugosidade de superfície teve uma mudança acentuada para $Ra = 7,9176 \mu m$. Na imagem topográfica das superfícies metálicas apresentadas na Fig. (12), mostram a geometria dos picos e vales, que podem ser estreita ou larga, simétrica ou assimétrica, côncava ou convexa.

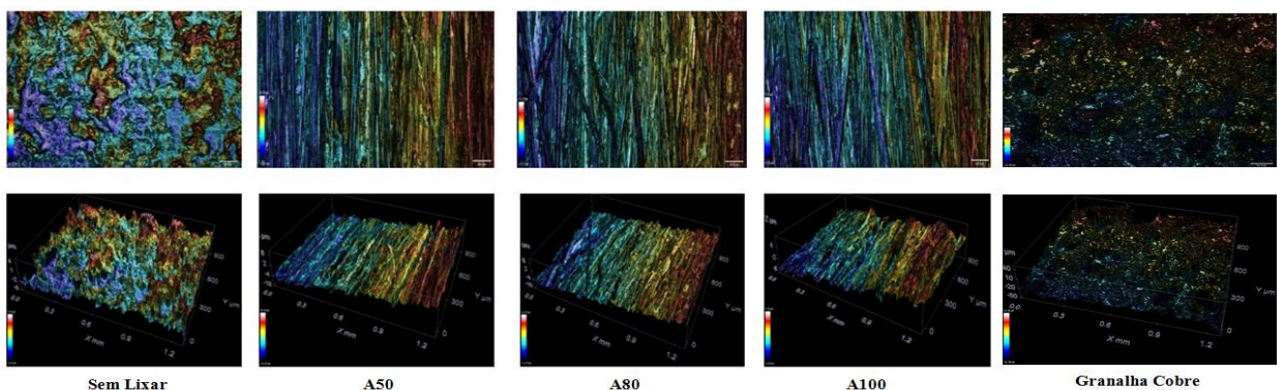


Figura 12. Imagem obtida com microscópio Confocal para diferentes superfícies: (A) Sem Lixar($Ra=1,1166 \mu m$), (B) Lixa 50($Ra=1,2666 \mu m$), (C) lixa 80($Ra=1,0895 \mu m$), (D) lixa 100($Ra=1,0548 \mu m$) e (E) Granalha de cobre($Ra= 7,9176 \mu m$) .

A topografia da amostra sem lixar é diferente das amostras que sofreram aplicação das lixas 50, 80 e 100, embora sua rugosidade seja maior que A80, A100. Este é um dos fatores que levou a utilização de lixas para ferro para avaliar seu efeito na resistência a adesão do compósito SMS. Prolongo et al (2006), concluem que duas superfícies com mesmo valor de rugosidade podem apresentar diferentes densidades de picos e vales que, por sua vez, poderia mostrar diferentes formas e orientações. Por esta razão, uma grande variedade de descritores estatísticos de superfície foram definidos para descrever completamente a superfície. Estes são geralmente classificados como parâmetros de superfície de altura, comprimento de onda, forma e suas combinações, conhecidos como parâmetros híbridos. Utilizando-se o microscópio Confocal LEICA, para analisar a interface do SMS como mostra a Fig. (13), constatou-se que a mesma está bem definida, o que comprova que a resina acrílica foi efetiva na adesão entre o substrato de metal e o núcleo de polímero. Não foram detectadas micro fraturas ou delaminação.

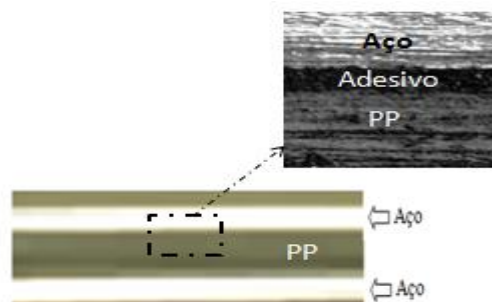


Figura 13. Corte transversal do compósito SMS com detalhe da interface

A Figura (14) mostra o efeito das rugosidades nas superfícies sobre a resistência à aderência de Aço/PP/Aço(SMS). A resistência média à aderência dos compósitos SMS neste estudo, sem a utilização de recurso para provocar rugosidade na superfície(Sem Lixar), foi de 2,420 N/mm. Comparada com as outras amostras, as resistências adesivas com (A50) Ra = 1,2666 μ m, (A80) Ra = 1,0895 μ m, (A100) Ra = 1,0548 μ m e (Granalha Cobre) Ra = 7,9176 μ m aumentaram em 68%, 41%, 28% e 21%, respectivamente. Para cada grupo utilizou-se dez amostras para investigação e com os resultados calculou-se a média e o desvio padrão. O melhor resultado foi obtido para a rugosidade Ra = 1,2666 μ m com 4,056 N/mm, com base no material e condições consideradas neste estudo.

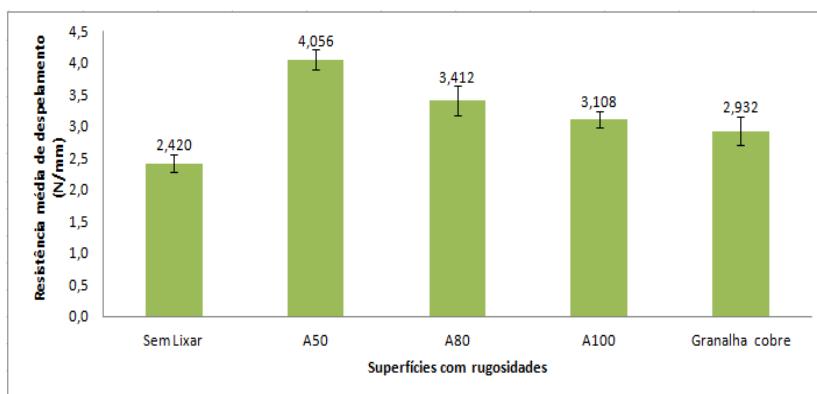


Figura 14. Resistência à força de deslocamento para diferentes rugosidades. Dados: média $\pm$ DP(n=10)

Na Figura (15) a observação das superfícies de fratura revelou que falhas adesivas e coesivas ocorreram em todos os espécimes em diferentes graus. A análise das superfícies de fratura interfacial metal / polímero no entanto, mostra diferenças a partir da superfície com rugosidade provocadas e as com a superfície relativamente lisa, tal como adquirida. Uma tendência foi que os espécimes de maior resistência de adesão sofreram uma área com falha adesiva menor e área com falha coesiva maior. O que melhorou a resistência de aderência de uma forma geral.

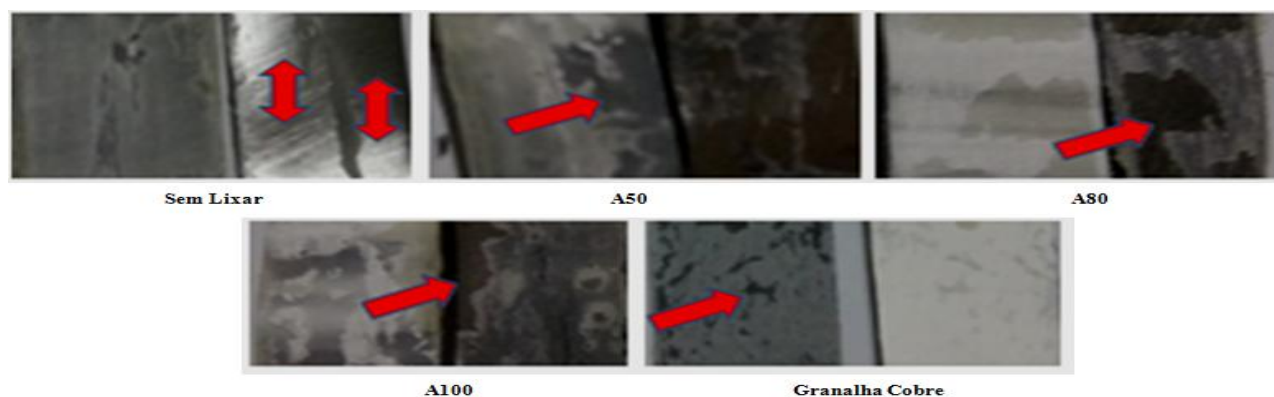


Figura 15. Superfície após o teste de descolamento para diferentes superfícies: (A) Sem Lixar ($R_a=1,1166 \mu\text{m}$), (B) Lixa 50 ($R_a=1,2666 \mu\text{m}$), (C) lixa 80 ($R_a=1,0895 \mu\text{m}$), (D) lixa 100 ($R_a=1,0548 \mu\text{m}$) e (F) Granalha de cobre ($R_a= 7,9176 \mu\text{m}$)

Resultados experimentais mostram que a principal fonte de aumento da força de união é causada pela modificação da topografia superficial em juntas metal-polímero e a transição interfacial para falha coesiva, que também é controlada pelo modo de carregamento. Kim, W.-S. Et al (2010), avaliam que a força de adesão é aumentada pela rugosidade superficial de um substrato, somente se a rugosidade aumentada faz com que ocorra a transição do modo de falha de adesiva para coesiva. É importante ressaltar que o bloqueio mecânico não é o único aspecto que regula o fenômeno da adesão. A utilização da granalha de cobre na superfície metálica apresentou um aumento acentuado da rugosidade e não proporcionou um aumento significativo na resistência a adesão. Conforme apresentado na Fig. (15) a área de falha adesiva é pequena, mas o comportamento em relação a resistência a adesão não foi satisfatório em comparação com outras amostras que sofreram abrasão por lixas para ferro. Verificou-se deformações na amostra devido espessura utilizada de aço (0,45 mm). Deformações estas que poderão afetar em outros possíveis ensaios mecânicos que não fazem parte deste estudo. Os picos e vales da superfície aumentam a força de adesão devido ao aumento na área efetiva. Contudo, uma superfície demasiado áspera pode resultar em fraca penetrabilidade do polímero, na formação de vazios e na concentração de tensões. Baldan, A., 2012, conclui que vales profundos podem levar ao aprisionamento do ar entre o polímero e a superfície metálica. Além disso, podem desenvolver-se regiões de concentração de tensões na interface do polímero entorno das projeções metálicas, o que pode levar a uma adesão fraca.

3.2. Efeito da força de cisalhamento (vertical)

Os ensaios de cisalhamento simples com corpos de provas para avaliar-se o nível de adesão do polipropileno ao substrato de aço no compósito SMS obtiveram a resistência limite da área colada em função do nível de adesão, desprezando-se a influência da uniformidade da espessura do adesivo, tipo ou processo de falha. O nível de adesão da área colada foi avaliado pela máxima força de cisalhamento obtida nas superfícies de contato. As juntas foram projetadas para que o carregamento predominante fosse o de cisalhamento, resultando em uma junta econômica e mais resistente à falha. As peças de aço foram tracionadas nas mesmas condições de teste com corpos de provas de cisalhamento até a falha da união. O que determina o modo de falha de um corpo de prova é a diferença entre as forças coesiva, adesiva e a resistência do substrato. A falha ocorrerá primeiramente sobre a menor das forças.

A Figura (16) mostra o efeito das rugosidades nas superfícies sobre a resistência ao cisalhamento do compósito SMS. A resistência média de cisalhamento dos compósitos neste estudo, sem a utilização de recurso para provocar rugosidade na superfície (Sem Lixar), foi de 1813 N. Comparando com as outras amostras, as resistências de cisalhamento com (A50) $R_a = 1,2666 \mu\text{m}$, (A80) $R_a = 1,0895 \mu\text{m}$, (A100) $R_a = 1,0548 \mu\text{m}$ e (Gralalha Cobre) $R_a = 7,9176 \mu\text{m}$ aumentaram em 59%, 47%, 44% e 32%, respectivamente. Para cada grupo utilizou-se dez amostras para investigação e com os resultados foram calculados a média e o desvio padrão. Obteve-se o melhor resultado para a rugosidade $R_a = 1,2666 \mu\text{m}$ com 2890 N, com base no material e condições consideradas neste estudo.

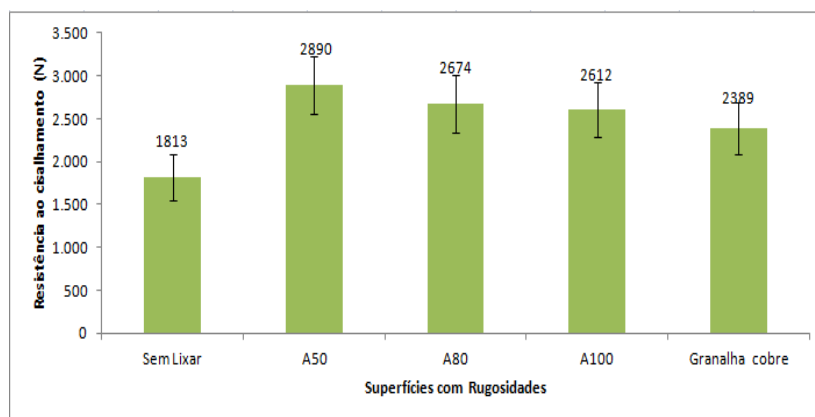


Figura 16 – Resistência à força de cisalhamento para diferentes rugosidades. Dados: média $\pm$ DP(n=10)

Li, G et al (1999), conclui que no caso de cisalhamento puro, as tensões máximas ocorrerão nas bordas da junta e a magnitude das tensões de cisalhamento são distribuídas simetricamente ao longo da sobreposição. Nota-se que o resultado máximo da tensão de cisalhamento foi obtida com a lixa para ferro (A50) $R_a = 1,2666 \mu\text{m}$ equivale a aproximadamente **9%** acima dos corpos de provas utilizando lixa para ferro (A80) $R_a = 1,0895 \mu\text{m}$, (A100) $R_a = 1,0548 \mu\text{m}$. Podemos observar que a variação na rugosidade entre as amostras de aço as quais foram utilizadas lixas (A80) $R_a = 1,0895 \mu\text{m}$, (A100) $R_a = 1,0548 \mu\text{m}$ tem uma variação de 2% na resistência ao cisalhamento. Compatível com a pequena variação entre as rugosidades das respectivas amostras. Este fato demonstrou-se que a utilização do recurso mecânico da lixa para provocar rugosidades na superfície metálica, teve um bom desempenho no conjunto.

Defeitos e imperfeições associadas à dificuldade de aplicação do adesivo na montagem dos corpos de provas também podem ter causado diminuição na eficiência da união, por exemplo, a excentricidade e o desalinhamento. Em muitos casos parte do adesivo permaneceu colado, ocorrendo cisalhamento entre a primeira e a segunda camada (substrato/núcleo) conforme Fig. (17). Isto demonstra que o nível de adesão obtido pela união foi suficientemente alto para alcançar a resistência do polímero na região próxima ao contato com o adesivo.

A utilização da granalha de cobre na superfície metálica apresentou um aumento acentuado da rugosidade e não proporcionou um aumento significativo na resistência ao cisalhamento. -



Figura 17 – Superfície após o teste de cisalhamento para diferentes rugosidades.

Na Figura 17 podemos observar a forma de ruptura do SMS ocorrida por delaminação. Após a separação das partes do corpo de prova, pode-se verificar a predominância da falha adesiva em diferentes graus. Podemos observar também o início da transição adesiva para coesiva nas amostras A50, A80 e A100.

3.3. Conclusões

Este artigo apresenta investigações experimentais sobre o comportamento do compósito sanduíche aço/polipropileno/aço aos esforços de cisalhamento e descolamento, utilizando-se um adesivo de cura fria. As seguintes conclusões foram encontradas: Observou-se uma tendência geral que as amostras de maior resistência de adesão sofreram uma região de falha adesiva menor e região de falha coesiva maior, coerente com avaliação de outros artigos. Para o material e as condições consideradas neste estudo, os melhores resultados obteve-se para a rugosidade da superfície de $1,2666 \mu\text{m}$ com lixa para ferro de grãos 50. Porém, as demais lixas com grãos 80 e 100, tiveram também

um bom desempenho em relação a superfície metálica sem abrasão. As amostras com jateamento de granalha de cobre não apresentaram um comportamento adequado, comparado as demais amostras quanto ao manuseio e as deformações provocadas. Embora tenha apresentado resistência a adesão e cisalhamento acima das amostras sem abrasão, não recomenda-se utiliza-lá com igual ou menor espessura do material metálico utilizado neste estudo. As falhas de modo misto são difíceis de quantificar-se em termos da perda de resistência da interface, pelo que é impossível avaliar-se a extensão da perda de resistência adesiva dos componentes. No estudo apresentou-se progressos significativos relacionados à avaliação do compósito sanduiche aço/polipropileno/aço sem utilizar-se de aquecimento para cura do adesivo plástico estrutural acrílico. Este fato possibilitará a continuidade da pesquisa para avaliar-se outros parâmetros para o mesmo conjunto.

4. REFERÊNCIAS

- Baldan, A., 2012. Adhesion phenomena in bonded joints. *Int. J. Adhesion & Adhesives*. 38, 95–116.
- Carradò, A., Sokolova, O., Ziegmann, G., Plalkowski, H., 2010. Press joining rolling process for hybrid systems. *Key Eng. Mater.* 425, 271–281.
- Carradò, A., Faerber, J., Niemeyer, S., Ziegmann, G., Palkowski, H., 2011. Metal/polymer/metal hybrid systems: towards potential formability applications. *Compos. Struct.* 93, 715–721.
- Kim, K.J., Kim, D., Choi, S.H., Chung, K., Shin, K.S., Barlat, F., Oh, K.H., Youn, J.R., 2003. Formability of AA5182/polypropylene/AA5182 sandwich sheets. *J. Mater. Process. Technol.* 139, 1–7.
- Kim, K., Rhee, M., Choi, B.-I., Kim, C.-W., Sung, C.-W., Han, C.-P., Kang, K.-W., Won, S.-T., 2009. Development of application technique of aluminum sandwich sheets for automotive hood. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 10, 71–75.
- Kim, W.-S., Yun, I.-H., Lee, J.-J., Jung, H.-T., 2010. Evaluation of mechanical interlock effect on adhesion strength of polymer–metal interfaces using micro-patterned surface topography. *Int. J. Adhesion & Adhesives*. 30, 408–417.
- Li, G., Lee-Sullivan, P. and Thring, R.W. 1999 Nonlinear finite element analysis of stress and strain distributions across the adhesive thickness in composite single-lap joints. *Journal of Composite Structures*. 46, 395–403.
- Palkowski, H., Carradò, A., 2014. Three-layered sandwich material for lightweight applications. *Emerging Materials Research*, 1-6.
- Prolongo, S.G., Rosario, G., Ureña, A., 2006. Study of the effect of substrate roughness on adhesive joints by SEM image analysis. *J. Adhes. Sci. Technol.* 20, 457–470.
- Sancaktar, E., Gomatam, R., 2012. A study on the effects of surface roughness on the strength of single lap joints. *J Adhes Sci Technol* 2001;15(1):97–117.
- Weiss, M., Dingle, M.E., Rolfe, B.F., Hodgson, P.D., 2007. The Influence of temperature on the forming behavior of metal/polymer laminates in sheet metal forming. *J. Eng. Mater. Technol.* 129, 530–537.
- www.autosteel.org/~media/Files/Autosteel/Great%20Designs%20in%20Steel/GDIS%202014/Doug%20Cox-Fabien%20Ebnoether.pdf
- www.quimica.com.br/adesivos-cientistas-explicam-o-fenomeno-da-adesao/

5. DIREITOS AUTORAIS

INFLUENCE OF ROUGHNESS IN ADHESIVE RESISTANCE IN THE MANUFACTURE OF STRUCTURAL COMPOSITES OF THE SANDUICHE METAL / POLYMER / METAL TYPE

Luiz Antonio Machado, luizantonio_machado@yahoo.com.br¹

Jefferson F. C. Lins, jfclins@id.uff.br¹

Fábio J. B. Brum, fabiobrum@id.uff.br¹

¹ Postgraduate Program in Metallurgical Engineering - PPGEM - Universidade Federal Fluminense - UFF - 420 Avenida dos Trabalhadores ave, Vila Santa Cecília, Zip Code: 27255-125, Volta Redonda, RJ - Brasil

Abstract: Metal-polymer-metal sandwich structures are of particular interest, since they allow combining various functions, such as: high rigidity and conformability behavior, provided by the metallic cover layer and a good damping due the polymer core. The objective of this experimental work is to present an analysis in relation to the influence of roughness provoked on the metallic surfaces used in the manufacture of metal/polymer/metal sandwich composites. The samples were produced from low carbon steel sheets such as substrate, polypropylene (PP) as a core and bicomponent acrylic adhesive for joining the parts. Sands were used for iron of different granulometries such as: 50; 80; 100 and Copper grits jet to promote roughness. Samples were produced without the use of heating during the manufacturing process. Confocal microscopy was used to investigate the metal surface after sanding and abrasive blasting, to measure the depth of the roughness caused. The bond strength was estimated by the T-peel test (180 °) according to ASTM 1876 and the shear strength of the adhesive surfaces according to ASTM 3164. The experimental results show that the main source of increase of resistance, caused by modifications in the topography of the metal surface, in polymer/metal bonded joints is the interfacial transition of cohesive failure. The adhesion strength is increased by increasing the roughness of the surface of a substrate only if the increase of the roughness causes the transition in adhesion failure mode. The best result was 4.056 N/mm for strength to peel strength and 2890 N for shear strength. This study attempts to explain why the adhesion strength of the polymer/ metal joints shows significant variation according to the topography of the surface of the metal substrates. It is important to emphasize that mechanical interlocking is one of the aspects that govern the phenomenon of adhesion. Mechanical interlocking promoted by adsorption causes energy expenditure during the fracture, which practically constitutes the force of adhesion.

Keywords: Sandwich composite, composite metal / polymer / metal, composite materials