

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO ANTES E APÓS ENSAIO DE CORROSÃO EM JUNTAS DE ALUMÍNIO-AÇO UNIDAS POR SOLDA A PONTO E ADESIVO ESTRUTURAL¹

*Paula Emília de Souza Prates²
Juliana Lopes Hoehne³
Bruno Barreira Fragoso⁴*

Resumo

A redução de peso é um grande desafio para a indústria automotiva. Neste cenário, o uso do alumínio em substituição a componentes inicialmente fabricados em aço é uma realidade, porém muitas dificuldades ainda são encontradas para a utilização deste material. Uma das maiores dificuldades é a união do alumínio com o aço, suas limitações e controles de produção. Com o intuito de entender um pouco mais sobre o tema este trabalho avaliou o desempenho mecânico, através do ensaio de resistência ao cisalhamento, de juntas unidas por solda a ponto por resistência e por adesivo estrutural bi-componente de base acrílica com cura a temperatura ambiente, antes e após ensaio de corrosão em névoa salina. Os resultados mostram que a união do alumínio pelas duas técnicas é satisfatória. A soldagem garante maior valor de resistência ao cisalhamento, podendo ser prescrita em projetos cujo foco seja estrutural. O adesivo apresentou resistência ao cisalhamento conforme as exigências de desempenho comumente solicitadas pela indústria automotiva, sendo ele uma boa alternativa para projetos que exijam qualidade estética, como as partes móveis dos veículos. Os resultados do trabalho apresentam alternativas satisfatórias para a união de chapas de alumínio tornando-o potencial material para substituir integral ou parcialmente o aço em aplicações onde a redução de peso faz-se necessária.

Palavras-chave: Alumínio; Aço; Solda a ponto; Adesivo estrutural

EVALUATION OF LAP SHEAR RESISTANCE BEFORE AND AFTER CORROSION TEST ON ALUMINUM/STEEL JOINTS ASSEMBLED BY USING WELD AND STRUCTURAL ADHESIVES

Abstrat

Reduction of weight is a big challenge for automotive industry. In this scenario, using aluminum for switching components initially built using steel is a reality however a lot of difficulties are still found when using this material. One of the biggest issues is the union between aluminum and steel, its limitations and productions controls. With the objective of understanding a few more regarding the theme, this work evaluated the mechanical performance through a lap shear resistance test on joints assembled using spot weld and using a two components acrylic base structural adhesive with room temperature cure, before and after corrosion test using salt spray. Results showed that the union of aluminum by two techniques is satisfactory. The welding ensures higher shear resistance value and can be prescribed in projects whose focus is structural. The adhesive presented shear resistance as requested by automotive industry, being a good alternative for projects that require aesthetic quality, such moving parts of vehicles. The paper's results are satisfactory alternatives to union of aluminum, that makes it a potential alternative for fully or partially switching steel on applications where weight reductions is required.

Key words: Aluminum; Steel; Spot weld, Structural adhesive.

¹ *Contribuição técnica ao 12º Seminário de Metais Não-ferrosos, 31 de outubro a 1 de novembro de 2011, São Paulo, SP.*

² *Eng. Metalúrgica; M.Sc. em Eng. de Materiais. Pesquisadora Fiat Automóveis S.A., Betim, MG.*

³ *Bacharel em Química com ênfase em Materiais; Mestranda em Eng. de Materiais (UFMG); Supervisora Técnica da Lord Industrial.*

⁴ *Eng Controle e Automoação; M.Sc. em Eng. Mecânica (Unicamp). Gerente Técnico da Lord Industrial Ltda. e Professor da Veris – Grupo Ibmecc.*

1 INTRODUÇÃO

A redução de peso é um grande desafio para a indústria automotiva, este é o melhor caminho para o aumento de desempenho e da competitividade dos veículos, em um mercado com ampla gama de modelos disponíveis. A substituição por materiais mais leves que não comprometam a qualidade, conforto e segurança são o foco dos desenvolvimentos atuais, além disso, tecnologias que colaboram para um processo de fabricação mais “enxuto” e ecologicamente correto estão sendo pesquisadas.

Neste cenário, o uso do alumínio em substituição a componentes inicialmente fabricados em aço é uma realidade,^(1,2) porém muitas dificuldades ainda são encontradas para a utilização deste material. Uma das maiores dificuldades é a união do alumínio com o aço, suas limitações e controles de produção.

No que diz respeito a processos de produção mais rápidos tem-se como alternativa ao processo de soldagem a união de chapas de aço por adesivo estrutural.⁽³⁻⁵⁾ Este processo reduz drasticamente o número de pontos de solda em uma carroceria e apesar de sua crescente utilização ele não é tão recente,⁽⁶⁾ em 1984 uma montadora anunciou o uso de adesivo estrutural em substituição a pontos de solda na construção de chassis e estes passaram de 4.000 pontos para 500 pontos.⁽³⁾

Apesar dos avanços na utilização de adesivo estrutural em carrocerias de veículos leves poucos são os avanços na utilização de componentes da carroceria fabricados em alumínio.

Com o intuito de obter maiores esclarecimentos sobre a união de materiais dissimilares e compreender melhor as possibilidades de união de chapas de alumínio com alumínio e chapas de alumínio com aço, avaliou-se neste trabalho o desempenho mecânico, através do ensaio de resistência ao cisalhamento, de juntas unidas por solda a ponto e por adesivo estrutural bi-componente de base acrílica, antes e após ensaio de corrosão em névoa salina.

Espera-se que com os resultados obtidos novas possibilidades de aplicações para chapas de alumínio sejam consideradas no desenvolvimento de novos projetos de veículos de passeio e utilitários, afinal o alumínio apresentou comportamento semelhante ao do aço no que se refere à resistência ao cisalhamento antes e após ensaio de corrosão. As chapas de alumínio foram unidas por processo similar ao realizado para as chapas de aço, sendo desnecessária a inserção de novas etapas no processo de união e a avaliação final das juntas que utilizam alumínio também é similar a avaliação realizada nas juntas de aço.

Todos esses fatores tornam a substituição do aço por alumínio uma proposta viável para a redução de peso e para manutenção ou redução dos custos envolvidos no processo, quando se considera a resistência ao cisalhamento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do trabalho utilizou-se chapas de alumínio de 0,8 mm de espessura e de aço⁽⁷⁾ também com 0,8 mm de espessura com e sem o revestimento HDG (*Hot-Dip Galvanizing*) de 7,5 μm de espessura.

A composição química das chapas utilizadas está descrita na Tabela 1. A composição química do alumínio foi obtida através de um espectrômetro por energia dispersiva de raios-x, modelo EDX 720 da *Shimadzu* e a do aço por um espectrômetro de emissão ótica, modelo 3460 fabricado pela ARL.

Tabela 1. Composição química, em percentual m/m, das chapas utilizadas

Alumínio *		Aço **			
Elemento	Encontrado	Elemento	Encontrado	Elemento	Encontrado
Al	98,738	C	0,0030	Mo	0,011
Si	0,653	S	0,005	Nb	0,004
Fe	0,426	Mn	0,10	V	0,004
K	0,078	Si	0,02	Cu	0,020
Cr	0,056	Cr	0,037	Co	0,001
Zn	0,017	P	0,006	Ti	0,036
Ni	0,014	Al	0,033	Fe	99,6
Ga	0,011	W	0,020		
Mn	0,007	Ni	0,020		

Fonte: * Laboratório da Qualidade da Denso Sistemas Térmicos do Brasil. ** Laboratório Químico da Engenharia de Materiais da Fiat Automóveis S.A.

Os corpos de prova, esquematizados na Figura 1, foram retiradas no sentido transversal à laminação da chapa.

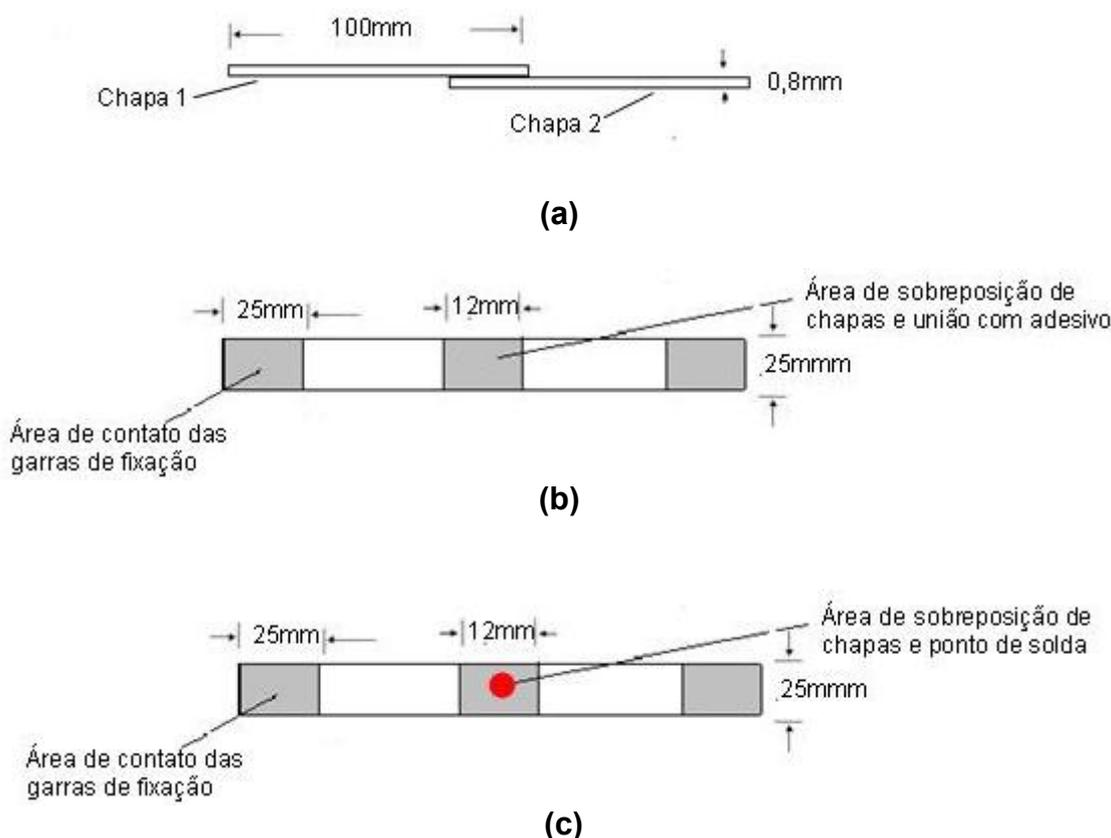


Figura 1. Dimensional e configuração dos corpos de prova. (a) Vista de perfil da sobreposição das chapas. (b) Representação dos corpos de prova unidos por adesivo estrutural. (c) Representação dos corpos de prova unidos por solda a ponto.

Para a união dos corpos de prova por adesivo foi utilizado o adesivo estrutural bicomponente de base acrílica, com cura a temperatura ambiente, *Versilok 265/245*, fornecido pela *Lord Industrial*. A aplicação foi realizada conforme instruções dadas pelo fabricante. Esferas de vidro, de 3mm de diâmetro, compõem o adesivo para garantir a espessura mínima de camada. Posterior à união das chapas os corpos de prova foram submetidos ao processo de cura em uma estufa com circulação

mecânica MOD 320E, fabricante FANEM, simulando a linha de pintura convencional de uma indústria automotiva ou de “linha branca”:

- 20 min em estufa a 160°C seguido de 30 min a temperatura ambiente;
- 20 min em estufa a 140°C seguido de 30 min a temperatura ambiente;
- 20 min em estufa a 135°C seguido de 2 h a temperatura ambiente.

A soldagem dos corpos de prova foi realizada obedecendo dois conjuntos de parâmetros, um para união de chapas de alumínio com alumínio e outro para união de chapas de alumínio com aço revestido ou sem revestimento (Tabela 2).

Tabela 2. Parâmetros da solda a ponto por resistência realizadas nos corpos de prova de Alumínio-Alumínio, Alumínio- Aço revestido e Alumínio-Aço chapa nua

Parâmetro	Alumínio-Alumínio	Alumínio-Aço revestido	Alumínio-Aço sem revestimento
Tempo de solda (ms)	13	13	13
Impulso	2	2	2
Potência (kA)	23	10	10
Pressão (N)	3200	2800	2800
Transformador (kVA)	160	160	160
Pinça	Pneumática	Pneumática	Pneumática
Eletrodo	Cu / Cr	Cu / Cr	Cu / Cr

Para os testes de cisalhamento, antes e após ensaio de corrosão, foram utilizados corpos de prova com três configurações diferentes (Tabela 3). Os corpos de prova que foram submetidos a testes de corrosão permaneceram por 500 horas a temperatura de 35°C com umidade de 95% UR e solução de cloreto de sódio 5% em uma câmara de névoa salina modelo USC-MP-03 (Modernizado-2004) fabricada pela BASS Equipamentos.

Tabela 3. Configuração dos corpos de prova para teste de cisalhamento

Corpo de prova	Processo de união	Teste de cisalhamento
Alumínio-Alumínio	Adesivo estrutural	Conforme recebimento Após 500h de névoa salina
	Soldado	Conforme recebimento Após 500h de névoa salina
Alumínio-Aço revestido	Adesivo estrutural	Conforme recebimento Após 500h de névoa salina
	Soldado	Conforme recebimento Após 500h de névoa salina
Alumínio-Aço chapa nua	Adesivo estrutural	Conforme recebimento Após 500h de névoa salina
	Soldado	Conforme recebimento Após 500h de névoa salina

Os ensaios de cisalhamento para determinação da tensão máxima (MPa), foram realizadas conforme norma Fiat 9.55712/02⁽⁸⁾ em um dinamômetro modelo 5867R, com célula de carga estática de 30 kN, fabricante *Instron* (Figura 2).

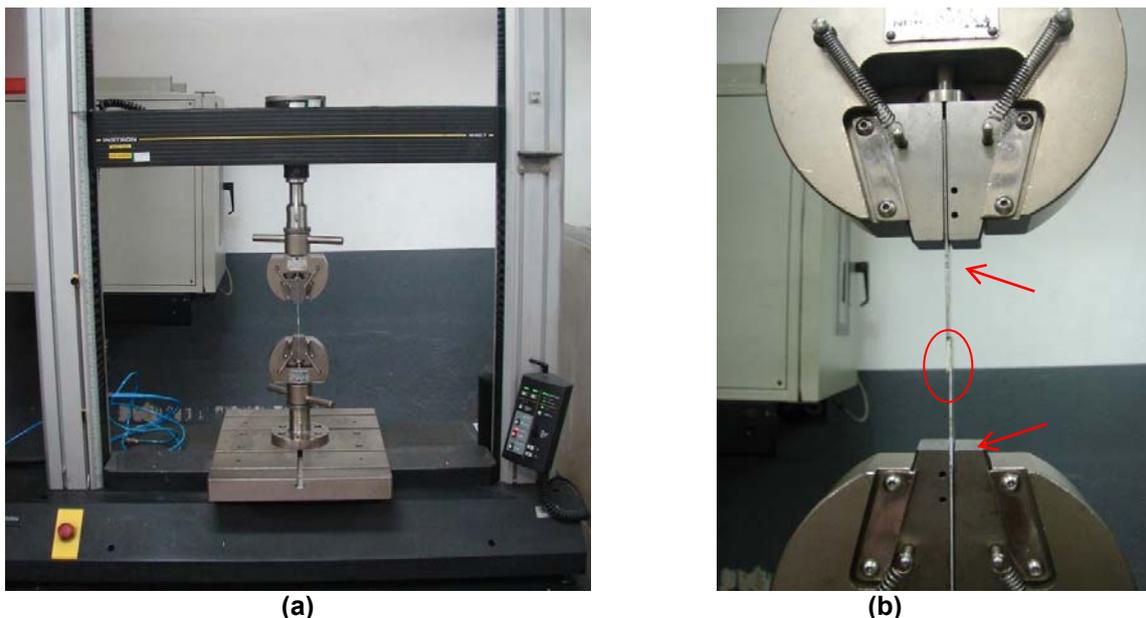


Figura 2. Equipamento utilizado para os testes de cisalhamento. (a) Dinamômetro com os dispositivos e acessórios utilizados para a realização dos ensaios. (b) Detalhe da região de contato entre as garras e o corpo de prova (↑) e da região de união do corpo de prova com adesivo (○).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em exame visual, após os processos de união das chapas com adesivo estrutural e com solda a ponto por resistência, não foi observado nenhuma modificação na superfície em relação ao observado nas chapas logo após o seu recebimento. Os corpos de prova soldados com chapas de alumínio apresentaram lentes de solda de formato e aspecto similar às dos corpos de prova de aço. O aspecto dos corpos de prova após união com adesivo e após processo de soldagem foi registrado (Figura 3), observa-se que a solda resulta em uma marcação na chapa, a lente de solda, que para determinadas aplicações pode provocar um comprometimento estético.

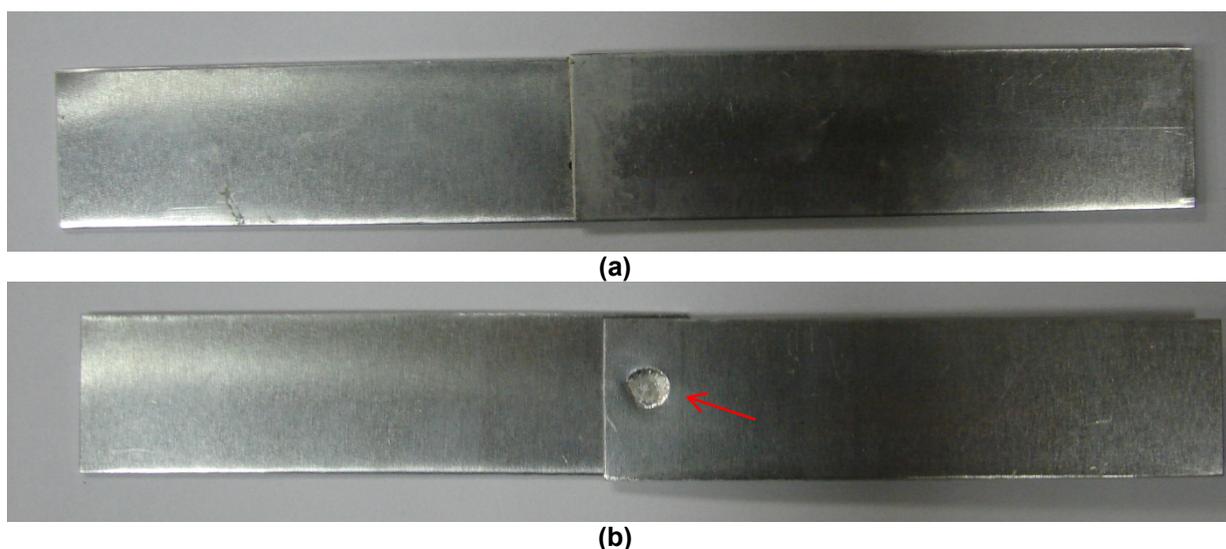


Figura 3. Corpos de prova para ensaio de cisalhamento. (a) Corpo de prova “alumínio-alumínio” unido com adesivo estrutural. (b) Corpo de prova “alumínio-alumínio soldado”, detalhe para a região da lente de solda (↑).

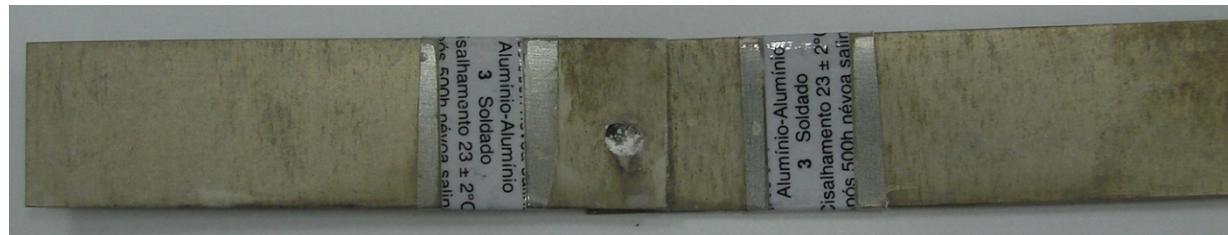
Após ensaio de corrosão, de 500 horas em névoa salina, verificou-se que os corpos de prova de “alumínio-aço chapa nua” apresentaram intensa corrosão ferrosa generalizada na superfície do aço e que os corpos de prova “alumínio-aço revestido” também apresentaram corrosão ferrosa na superfície do aço, porém em menor intensidade. Os corpos de prova “alumínio-alumínio” apresentaram apenas um leve escurecimento de sua superfície.

Ao comparar os corpos de prova unidos por adesivo estrutural com os soldados não é observada variação significativa em seus aspectos, porém nos corpos de prova soldados verificou-se a formação de um material branco e pastoso próximo à lente de solda.

Os corpos de prova submetidos ao ensaio de corrosão foram lavados com água e escova para remoção do produto de corrosão, evitando afetar o contato entre a garra do equipamento e o corpo de prova, o que poderia provocar seu escorregamento durante a realização do teste. As Figuras 4, 5 e 6 apresentam, respectivamente, o aspecto dos corpos de prova “alumínio-alumínio”, “alumínio-aço revestido” e “alumínio-aço chapa nua” submetidos ao ensaio de corrosão.



(a)



(b)

Figura 4. Corpos de prova “alumínio-alumínio” para ensaio de cisalhamento após teste de corrosão. (a) Unido com adesivo estrutural antes da lavagem. (b) Soldado antes da lavagem.



(a)



(b)

Figura 5. Corpos de prova “alumínio-aço revestido” para ensaio de cisalhamento após teste de corrosão. (a) Unido com adesivo estrutural antes da lavagem. (b) Soldado antes da lavagem, atentar para o material branco e pastoso formado (↑).



(a)



(b)

Figura 6. Corpos de prova “alumínio-aço chapa nua” para ensaio de cisalhamento após teste de corrosão. (a) Unido com adesivo estrutural antes da lavagem. (b) Soldado antes da lavagem, atentar para o material branco e pastoso formado (↑).

Dos testes de cisalhamento verificou-se que não existem variações significativas dos valores de resistência ao cisalhamento quando se compara as três configurações de corpos de prova unidos por adesivo estrutural, no estado como recebido, e que as juntas de “alumínio-aço chapa nua” foram as que apresentaram maior resistência ao cisalhamento seguido das juntas de “alumínio-aço revestido” e “alumínio-alumínio”. Após ensaio de corrosão as juntas unidas por adesivo estrutural apresentaram uma diminuição média de 3,5 MPa em sua resistência ao cisalhamento. As juntas de “alumínio-aço revestido” foram as que apresentaram maior diminuição de resistência e as juntas de “alumínio-alumínio” as que sofreram menor redução no valor. Verificou-se também que as juntas de “alumínio-alumínio” unidas por adesivo estrutural no estado como recebido e após teste de corrosão apresentaram menor desvio do valor médio do que as demais configurações dos

corpos de prova o que sugerem uma maior homogeneidade na união de materiais similares.

Após ensaio de corrosão os corpos de prova soldados apresentaram maiores variações de resistência ao cisalhamento que os unidos por adesivo estrutural, média de 5,3 MPa, o que indica ser o processo de união por adesivo estrutural mais estável que a soldagem. Dos corpos de prova soldados os de “alumínio-alumínio” foram os que apresentaram menor valor de resistência ao cisalhamento antes e após ensaio de corrosão e os corpos de prova de “alumínio-aço revestido” os que apresentaram maior resistência, além de menor redução de valor comparando-se amostras antes e após ensaio de corrosão. As amostras de “alumínio-aço chapa nua” foram as que apresentaram a maior variação na resistência ao cisalhamento após o ensaio de corrosão.

A Tabela 4 apresenta os valores de tensão máxima (MPa) e seu respectivo desvio padrão, obtido nos ensaios de cisalhamento. Os valores referem-se à média de três corpos de prova cisalhados para cada configuração de teste.

Tabela 4. Valores de tensão máxima (MPa), média \pm desvio padrão, obtidos pelos testes de cisalhamento antes e após ensaio de corrosão a 500 horas em névoa salina

Configurações	Alumínio-Alumínio	Alumínio-Aço revestido	Alumínio-Aço chapa nua
Adesivo estrutural como recebido	9,17 \pm 0,16	9,95 \pm 0,36	10,39 \pm 0,25
Adesivo estrutural após 500 horas de névoa salina	6,58 \pm 0,12	5,33 \pm 0,45	6,48 \pm 0,64
Soldado como recebido	54,06 \pm 5,78	66,82 \pm 18,96	63,77 \pm 3,10
Soldado após 500 horas de névoa salina	47,92 \pm 5,87	65,83 \pm 4,09	54,91 \pm 0,96

Considerando que os valores usuais de resistência ao cisalhamento para as chapas de aço unidas por adesivo estrutural na indústria automotiva é cerca de 9MPa antes e 8MPa⁽⁸⁾ após ensaio de corrosão, as juntas de alumínio com alumínio ou de alumínio com aço, sendo este último revestido ou não, no estado como recebido, atendem as exigências dessa indústria, o que torna o alumínio um material de grande aplicabilidade quando o assunto é redução de peso.

4 CONCLUSÃO

O alumínio é uma proposta viável para a redução de peso e para manutenção ou redução dos custos envolvidos no processo, quando se considera a resistência ao cisalhamento. O trabalho realizado apresenta duas opções de técnicas para a união de alumínio com alumínio ou alumínio com chapa, nua ou revestida: soldagem e adesivagem. Os resultados obtidos demonstram que as duas técnicas são robustas e devem ser utilizadas em diferentes situações. Em aplicações estruturais, onde se exigem elevadas tensões de resistência ao cisalhamento, à solda apresenta-se como a melhor alternativa, porém quando se trata de partes externas, como por exemplo as partes móveis do veículo, onde deve-se preocupar com as características estéticas a união por adesivo se apresenta como solução mais adequada.

Os corpos de prova de “Alumínio-Alumínio”, “Alumínio-chapa nua” e “Alumínio-chapa zincada” unidos por adesivo estrutural não apresentaram variações significativas nos valores de resistência ao cisalhamento no estado de fornecimento.

Após 500 horas de névoa salina, a queda no valor da resistência ao cisalhamento dos corpos de prova unidos com adesivo estrutural é menor do que nas amostras soldadas.

Os corpos de prova soldados apresentaram maiores variações nos valores de resistência ao cisalhamento antes e após ensaio de corrosão. Esta variação sugere ser a união por adesivo estrutural a forma mais homogênea das duas avaliadas, porém a solda, considerando a área de colagem testada, é o processo de união que garante maior valor de resistência ao cisalhamento.

Os valores de resistência ao cisalhamento encontrados nas amostras testadas no estado de fornecimento atendem as exigências de desempenho comumente solicitadas pela indústria automotiva.

Os resultados obtidos permitiram uma melhor compreensão sobre o processo de união de chapas de alumínio, com similares ou dissimilares, além de evidenciar que o alumínio é uma alternativa para substituir integral ou parcialmente o aço em aplicações onde a redução de peso faz-se necessária.

REFERÊNCIAS

- 1 BARNES, T.A.; PASHBY, I.R. Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles Part II – adhesive bonding and mechanical fasteners. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 99, p. 72-79, 2000.
- 2 BIRCH, S. Aluminium spaceframe technology. *Automotive Engineering*, v. 102, p. 8-12, 1994.
- 3 SANTOS, A.F.; SCHÖN, C.G. Determinação das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural epóxi. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17., Foz do Iguaçu. CBECIMat, 2006.
- 4 MARRA, K.M.; PEREIRA, J.F.B.; VIEIRA, S.L. Avaliação de juntas unidas por weldbonding em aços destinados a automóveis. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO, 58., Rio de Janeiro. ABM, 2003.
- 5 SATOH, T.; MIYAZAKI, Y.; SUZUKAWA, Y.; NAKAZATO, K. On the development of structural adhesive technology for the automotive body in Japan. *JSAE Review*, v. 17, p. 165-178, 1996.
- 6 COTERR, J.L.; HOCKNEY, M.G.D. Metal joining with Adhesive. *International Metallurgical Reviews*, v.19, p. 103-115, 1974.
- 7 ASTM A1008:2003, Standard Specification for Steel, Sheet, Cold-Rolled, Carbon, Structural, High-Strength Low-Alloy and High-Strength Low-Alloy with Improved Formability. American Society for Testing and Materials. United States, 2003.
- 8 9.55712/02, Adesivi per incollaggio lamiera resistenti al “dilavamento”. Fiat Group Automobiles – Normazione. Itália, 2007.