Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
06 a 10 de Novembro de 2022 | Águas de Lindóia – SP – Brasil

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E METALÚRGICA DA UNIÃO DE CHAPAS DE AÇOS DISSIMILARES SOLDADOS POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA A PONTO

Weslley P. Maia[1], Antônio J. Abdalla[1*], Milton S. F. Lima[1]

1 – Instituto de Estudos Avançados – IEAv/DCTA, Divisão de Fotônica EFO-O - Rodovia dos Tamoios, km 5,5 – São José dos Campos, SP. ajorgeabdalla@gmail.com e wespoleto@gmail.com

RESUMO

Com o avanço das tecnologias de fabricação de aços e o desejo da indústria, de maneira geral, em aços de maior qualidade com menores custos, se torna necessário o entendimento dos mecanismos de solda e união destes novos materiais. Este estudo utiliza de ensaios mecânicos e análises micrográficas previstas na literatura para analisar a influência do processo de soldagem por resistência elétrica a ponto (RSW) em chapas de aços dissimilares. O aço baixo carbono CR4, amplamente utilizado pela indústria automobilística para estampagem de painéis devido à boa ductilidade e tenacidade, foi soldado com o aço 300M, aço de alta liga e ultra alta resistência que surgiu como uma evolução do aço 4340 com melhores propriedades de tenacidade e soldabilidade para aplicações com altos requisitos mecânicos. As espessuras dos aços são, respectivamente, 1,2 mm e 3,3 mm. Para definir a carta de parâmetros utilizados para fabricar as amostras objeto de estudo, foram realizados ensaios preliminares variando valores de corrente (kA) e tempo (ciclos[1/60]s) para descobrir a fronteira de parâmetros capazes de formar juntas com falhas interfaciais e por arrancamento. Uma vez determinada a faixa de parâmetros, as amostras são fabricadas. Foram utilizadas 4 repetições de amostras para Peel Test, 4 amostras para tração-cisalhamento e 1 amostra para caracterização macro e micrográfica. Para a caracterização mecânica e definição dos limites de resistência mecânica foram utilizados os ensaios de peel test e tração-cisalhamento. Os dados para caracterização micrográfica são provenientes dos ensaios de microdureza Vickers (HV), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por dispersão de elétrons (EDS). Foram propostas 4 configurações de parâmetros. A, B, C e D. As amostras dos grupos A, B e C, no ensaio de tração-cisalhamento, apresentaram falhas interfaciais, tipo de falha não desejável em qualquer processo de fabricação. A falta de aporte energético e, consequentemente, de fusão no local da solda demonstrou nas análises micrográfica que o nugget não havia sido formado. As amostras do grupo D, fabricadas com 11 kA de corrente e 10 ciclos, demonstraram os maiores níveis de resistência à tração e, nas análises micrográficas foram identificados a presença de lentilhas que unem as chapas, levando ao modo de falha por arrancamento em todas as amostras analisadas.

Palavras-chave: *1. Soldagem por resistência elétrica a ponto. 2. Caracterização metalúrgica. 3. Automotivo.*

INTRODUÇÃO

Os aços de alta resistência utilizados na indústria automotiva e os de ultra alta resistência empregados na indústria aeroespacial, como o aço 300M utilizado neste trabalho, podem proporcionar ganhos em resistência mecânica, resistência à corrosão e dureza, e além de serem estratégicos para o desenvolvimento de novos produtos, são utilizados em vários conceitos de indústrias (SAKAI et al, 2015, SILVA, 2018). Na indústria automobilística estes aços podem ser utilizados em componentes que necessitem de elevados requisitos mecânicos e resistência ao desgaste, como por exemplo dobradiças, colunas e reforços estruturais por toda a carroceria (KAVAMURA, 2007).

Um dos processos globalmente empregado na união de peças metálicas é a soldagem por resistência elétrica a ponto, pois além de ser simples e rápida possui altas taxas de produção (SENA, 2019). Levando em consideração um automóvel popular, é habitual encontrar por volta de 4500 soldas por resistência elétrica a ponto, alguns metros de soldas MIG e MAG, e em alguns processos mais recentes também se encontram soldas Laser. A integridade estrutural e segurança do veículo, itens decisivos para a escolha do cliente, são determinadas pelas propriedades mecânicas das uniões entre as peças e a capacidade de absorção de energia da carroceria (CHABOK et al 2018).

A indústria enfrenta vários obstáculos na implementação de novas tecnologias, seja de produto ou processo, pois caso não seja bem aceito pela comunidade pode gerar prejuízos (KAVAMURA, 2007). Observando este cenário é visível que o estudo do comportamento de novos aços quando submetidos a novos processos é uma importante contribuição, visto que no dia a dia da indústria, raramente há espaço para estudos aprimorados.

As ligas de ferro carbono são amplamente empregadas nos setores de engenharia com aplicações importantes nos setores da indústria automotiva. Deseja-se maior eficiência, menor custo de produção e compromisso com o meio ambiente, neste sentido, estes novos materiais e processos vem sendo aplicados, por exemplo, em novos projetos de carros e componentes. O aço carbono, devido a sua grande versatilidade, torna-se importante nos projetos. Apesar dos desenvolvimentos constantes na indústria automobilística, como o atual conceito de "*Lightweighting*", que são projetos de carrocerias mais leves, os aços de médio e baixo carbono (HSLA – High Strength Low Alloy) reservam ainda um grande percentual dentro dos materiais utilizados nos veículos (FARIA NETO et al., 2021, Huetter, 2017).

Os aços de baixo carbono como o utilizado neste trabalho (CR4), embora não tenha altos níveis de resistência, tem elevada ductilidade, com um alongamento em torno de 38%, fato que o credencia para diversas aplicações, portanto mantém-se como um aço importante nas aplicações em veículos.

Nota-se, de acordo com os estudos observados, a necessidade de estudos voltados à soldagem de forma dissimilar, entre aços de alta resistência e baixa resistência, utilizando técnicas de união de metais pouco exploradas, como a soldagem a ponto por resistência elétrica, já que na aplicação final na linha de produção, em diversas situações, os aços precisam ser unidos em configurações dissimilares. Como já citado anteriormente, encontramos trabalhos recentes semelhantes, com solda dissimilares, porém, não com a utilização de solda a ponto por resistência, proposta desta pesquisa.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Para este estudo foram utilizados dois tipos de aços, um CR4 com espessura de 1,2 mm e um 300M com 3,3 mm. O aço 300M foi cedido pelo laboratório Multiusuário de Desenvolvimento e Aplicações de Lasers e Óptica (DedALO), do Instituto de Estudos Avançados (IEAv). Já o aço

CR4 foi disponibilizado pelo Centro de Competência em Manufatura (CCM) laboratório do Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA).

Soldagem por Resistência Elétrica a Ponto

O processo de fabricação do corpo amostral foi realizado nas dependências do Centro de Competência em Manufatura (CCM), laboratório de pesquisa aplicada do Instituto de Tecnologia de Aeronáutica (ITA).
No CCM foi utilizada uma máquina de soldagem por resistência elétrica a ponto de 60 HZ (baixa frequência) com acionamento manual modelo Easy Line – CB150 da fabricante Düring equipada com painel de solda Harms & Wende Ratia 73. Neste modelo, o avanço do eletrodo é realizado através de um sistema pneumático que opera em 6 bar e o sistema de arrefecimento dos eletrodos é composto por uma unidade dedicada de refrigeração que objetiva manter a água que circula no sistema em uma temperatura controlada, em torno de 23 °C.
Ao todo, foram soldados quatro grupos de amostras (A, B, C e D) com 9 repetições de cada parâmetro. Para realizar soldas de diferentes qualidades, foram variados os parâmetros de tempo (ciclos) e corrente (kA) na solda, parâmetros que, segundo a bibliográfica, possuem maior influência sobre o resultado da união. A força foi mantida em 2 kN.

Tabela 1 - Especificação dos parâmetros utilizados para soldar as amostras do estudo

ID	Corrente [kA]	Ciclos $[\frac{1}{60}]$s	Força [kN]
A	10	7	2
B	9	7	2
C	9	9	2
D	11	10	2

O grupo B, por apresentar dois modos de falha diferentes nos ensaios preliminares, indica estar na interface entre os parâmetros bons e ruins de solda para essas condições de materiais.

A divisão das amostras para a realização dos testes propostos foi feita da seguinte maneira:

- 4 Amostras para Peel Test;
- 4 Amostras para Tração-Cisalhamento;
- 1 Amostra para caracterização macro e microestrutural.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises químicas do aço 300 M foram realizadas nos laboratórios da AMR do IAE/DCTA, dosando-se os seguintes elementos: carbono e enxofre, pelo método de análise por combustão direta (ASTM E30); silício e níquel por gravimetria (ASTM E30); fósforo pelo método de fotometria (ultravioleta); manganês, cromo e molibdênio, cobalto, titânio, cálcio, alumínio e zircônio, por absorção atômica no equipamento Spectro fotômetro de Absorção Atômica modelo AA-Zv Plus, marca Varian. A composição química do aço 300M está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do aço 300M

ELEM.	C	AL	SI	P	S	CR	NI	MO	CU	V
(%P)	0,39	0,003	1,78	0,009	0,0005	0,76	1,69	0,4	0,14	0,08

O aço CR4, fabricado pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), é indicado para utilização em aplicações de estampagem com deformações até 25%. Por este motivo, é extensamente utilizado pela indústria automobilística para a formação de painéis internos e externos de carrocerias automotivas (NOVAIS, 2015). Na Tabela 2 é demonstrada a quantidade máxima permitida de cada elemento que compõe o aço CR4 (informação fornecida pelo fabricante).

Tabela 2 – Valores máximos de composição quimica do aço CR4

ELEM.	**C**	**Mn**	**P**	**S**
(%Pmax)	0,12	0,6	0,05	0,05

Além da união dos painéis metálicos internos e externos, que utilizam chapas de aço com boa deformabilidade, também são soldados componentes em aços mais resistentes que atuam como reforço estrutural. Esses reforços, compostos de aços de alta resistência, são dispostos em locais de grande solicitação mecânica em caso de colisões, como por exemplo em longarinas e colunas dos automóveis (KAVAMURA, 2007). Por consequência do uso de aços dissimilares na soldagem por resistência elétrica a ponto, se faz necessária a caracterização e entendimento do comportamento dessas uniões, a fim de garantir estruturas seguras para os condutores e passageiros.

Peel Test

As amostras dos grupos A, C e D mantiveram o comportamento dos ensaios preliminares mesmo quando executado em mais repetições, deste modo, todas atingiram o modo de falha por arrancamento. Já o grupo B, grupo de menor aporte energético entre as amostras avaliadas que mostrou variação do modo de falha durante os ensaios preliminares, manteve o modo de falha por arrancamento em 4 das 9 amostras ensaiadas. Isso indica que os parâmetros utilizados para fabricar as amostras do grupo B, de fato, estão na fronteira de parâmetros que determinam o modo de falha de um ponto de solda, tornando estes parâmetros não confiáveis. Consequentemente, soldas com menores níveis energéticos também se tornam não confiáveis.

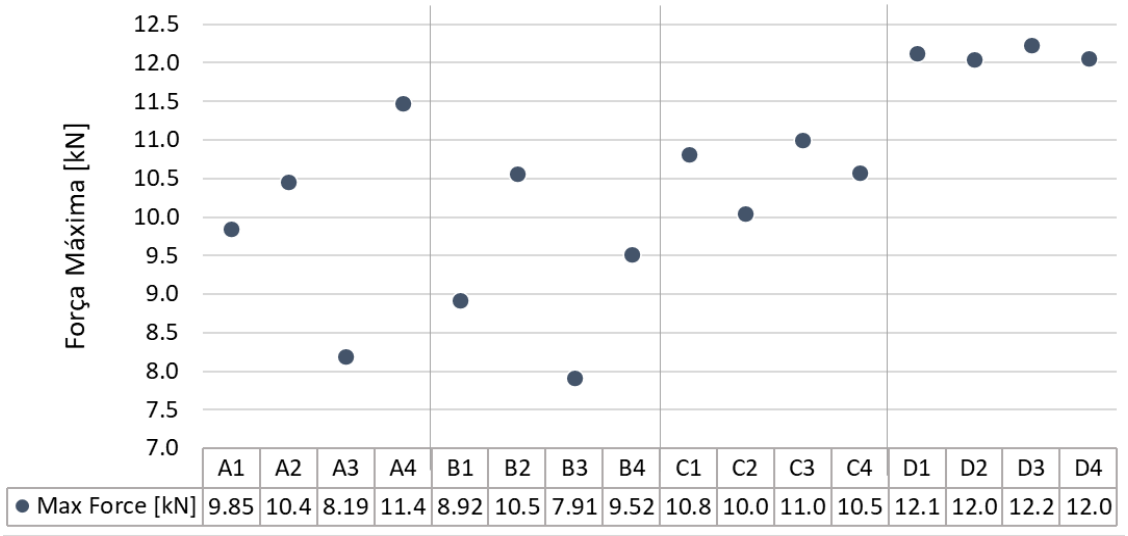
Tração-cisalhamento

Analisando as superfícies de fratura, os grupos A e B apresentaram três fraturas frágeis e uma fratura dúctil. Esta proporção, para o grupo B, reforça a flutuação de sucesso dos parâmetros escolhidos e, para o grupo A, indica que mesmo com a influência quadrática da corrente na equação do efeito Joule, a corrente de 10 kA não foi suficiente para garantir o distanciamento da zona de parâmetros instáveis.

Ao contrário dos grupos anteriores, o grupo C apresentou três fraturas dúcteis e apenas uma frágil. Este comportamento indica que, em relação ao grupo B, o incremento de apenas 2 ciclos no tempo levou a melhora no comportamento das soldas. Ainda assim, os grupos A, B e C demonstram estar na fronteira entre os parâmetros bons e ruins.

O grupo D foi o único que apresentou parâmetros com consistência para formar pontos de solda que falhassem apenas por arranchamento e de forma dúctil, em todos os ensaios. Este desempenho se dá pelo incremento de corrente e tempo (11 kA e 10 ciclos). Essa regularidade de resultados indica que este grupo pode ter saído da fronteira de parâmetros incertos e representar uma condição otimizada.

Nos ensaios de tração-cisalhamento, foram observadas a força máxima necessária para levar os componentes à fratura, conforme assinaladas na Figura 1.



	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4
Max Force [kN]	9.85	10.4	8.19	11.4	8.92	10.5	7.91	9.52	10.8	10.0	11.0	10.5	12.1	12.0	12.2	12.0

Figura 1 - Valores força máxima necessária para levar as soldas à fratura

Observando a Figura 1, nota-se que todas as amostras do grupo D apresentaram o modo de falha desejado para estruturas soldadas: arrancamento. Considerando que apenas o grupo D mostrou consistência nos modos de falhas dos ensaios *peel test* e tração-cisalhamento, o valor médio de resistência à tração observado é de 12,1 kN, o maior valor e o mais estável de todo o conjunto estudado.

Microdureza Vickers

A mapa obtido pode evidenciar a diferença da dureza entre o Metal Base (MB), aquele que não sofreu influência do calor, Zona Fundida (ZF), local onde ocorreu a fusão pontual do metal, e a Zona Termicamente Afetada (ZTA), que possui características intermediárias entre o MB e a ZF. No grupo em que pelo menos uma amostra falhou com fratura frágil no ensaio de Tração-Cisalhamento, como por exemplo nessas representantes dos grupos A, o mapa de dureza revelou que não houve calor suficiente para causar a fusão e difusão entre os materiais soldados. O aço 300M sofreu alteração na sua dureza com a passagem da corrente elétrica, formou uma ZTA (rosa), porém sem fusão e uma união efetiva entre os materiais. Também é possível ver a interface entre os metais de diferentes durezas, já que o material base do CR4 possui dureza por volta de 90 HV e o 300M cerca de 250 HV.

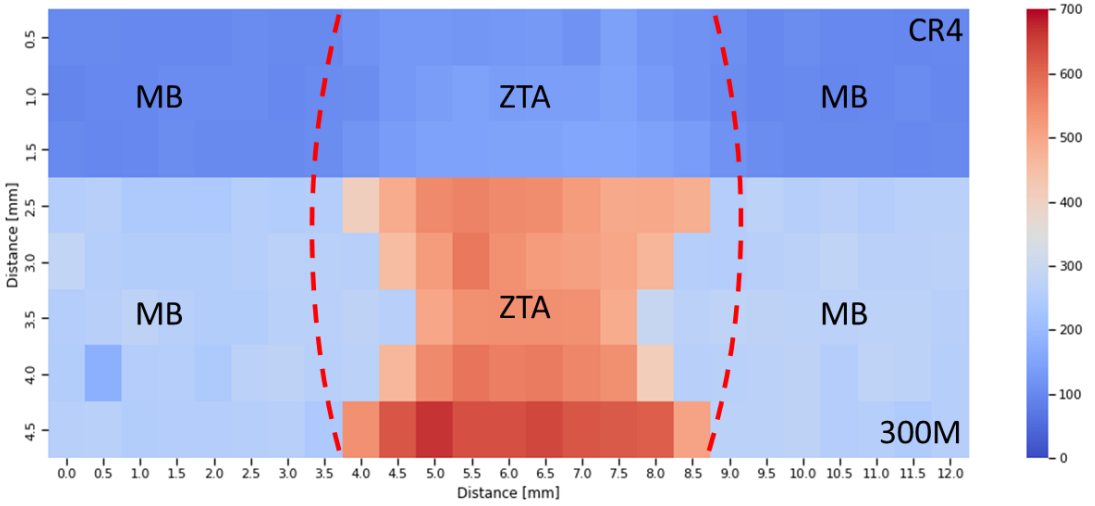


Figura 2 - Níveis de dureza em mapa de calor da amostra A

Já na amostra que representa o grupo D, grupo que alcançou os maiores valores de resistência à tração no ensaio de Tração-Cisalhamento, é possível ver a fusão e difusão entre os dois aços, com ~~e~~ a formação do ponto de solda unindo as duas chapas de aço. Este foi o único grupo que demonstrou tal comportamento.

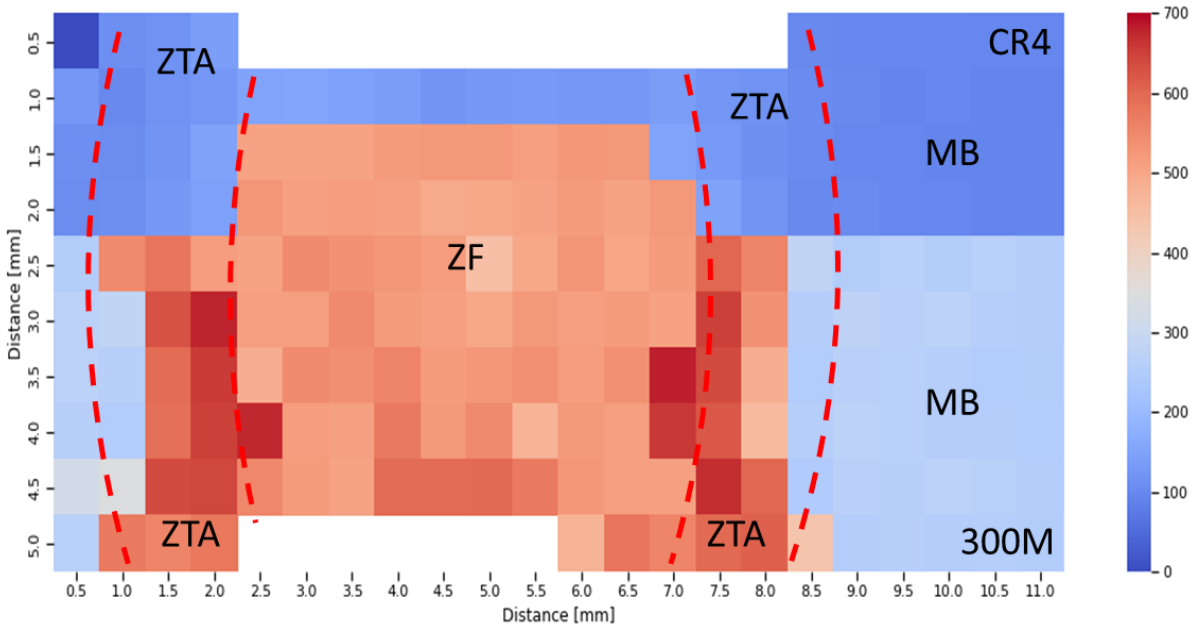


Figura 3 - Níveis de dureza em mapa de calor da amostra D.

Observando a relação entre os resultados dos ensaios *peel test*, tração-cisalhamento e mapas de dureza, é possível ver que os grupos que falharam de modo interfacial não tiveram o crescimento do nugget incidindo nas duas chapas, como visível nos mapas de dureza das amostras do grupo D. Em vista deste fato observado, é valido dizer que, para uma solda por resistência elétrica a ponto em aços dissimilares falhar de modo aceitável, é necessário que o crescimento do *nugget* seja propagado para duas ou mais chapas que compõem a união.

Microscopia Óptica

A microscopia revela com detalhes as particularidades das estruturas formadas após o processo de soldagem. A seguir estão representadas as micrografias das amostras A (Figura 4) e amostra D (Figura 5).

Figura 4 – Micrografia da solda sem fusão (amostra A)

De acordo com o observado anteriormente no ensaio de dureza, as amostras de menor aporte energético não sofreram fusão e difusão suficiente na interface da solda, deste modo, na Figura 4, é possível comprovar que após a passagem da corrente não houve a criação da zona fundida neste local, diferentemente das amostras do grupo D (Figura 5), em que é visível o crescimento do *nugget* entre as chapas.

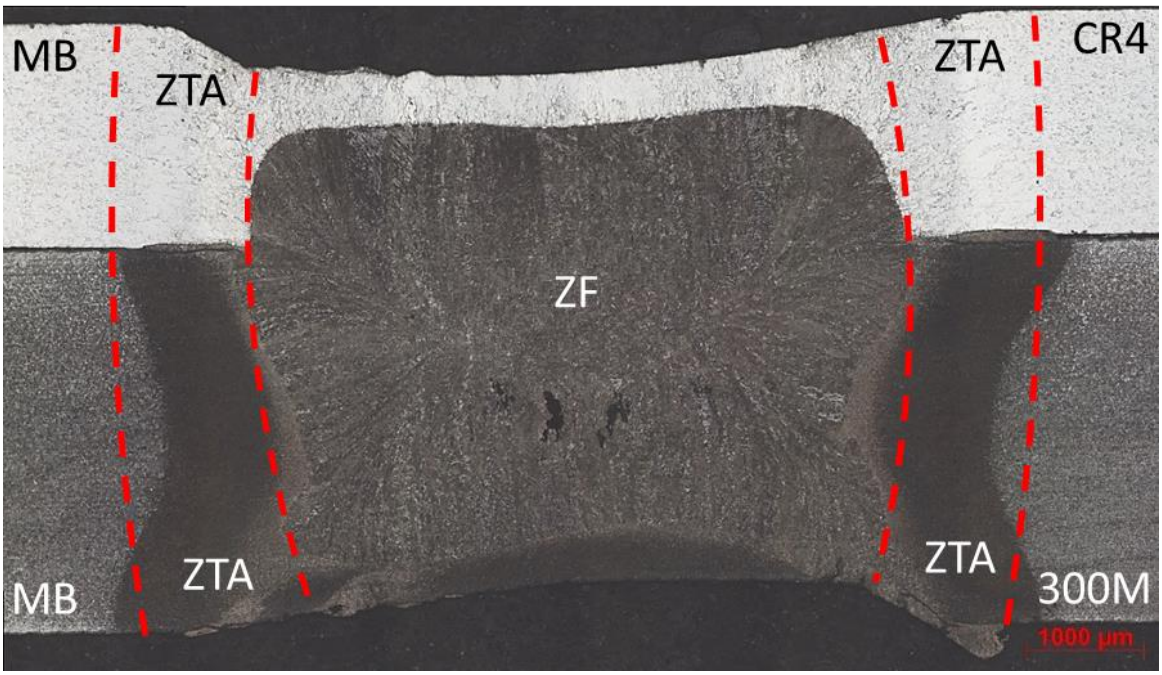


Figura 5 – Micrografia da solda com fusão (amostra D)

Na Figura 6 é possível ver a interface entre chapas, destacando todas as áreas da solda, ZF, ZTA e MB. No aço CR4 é possível visualizar os grãos crescendo e se alongando em direção ao *nugget*, efeito semelhante ao ocorrido no 300M. Na ZF é possível constatar a formação de martensita com

estrutura dendrítica e austenita retida, que se dá devido ao processo de fusão seguido de resfriamento.

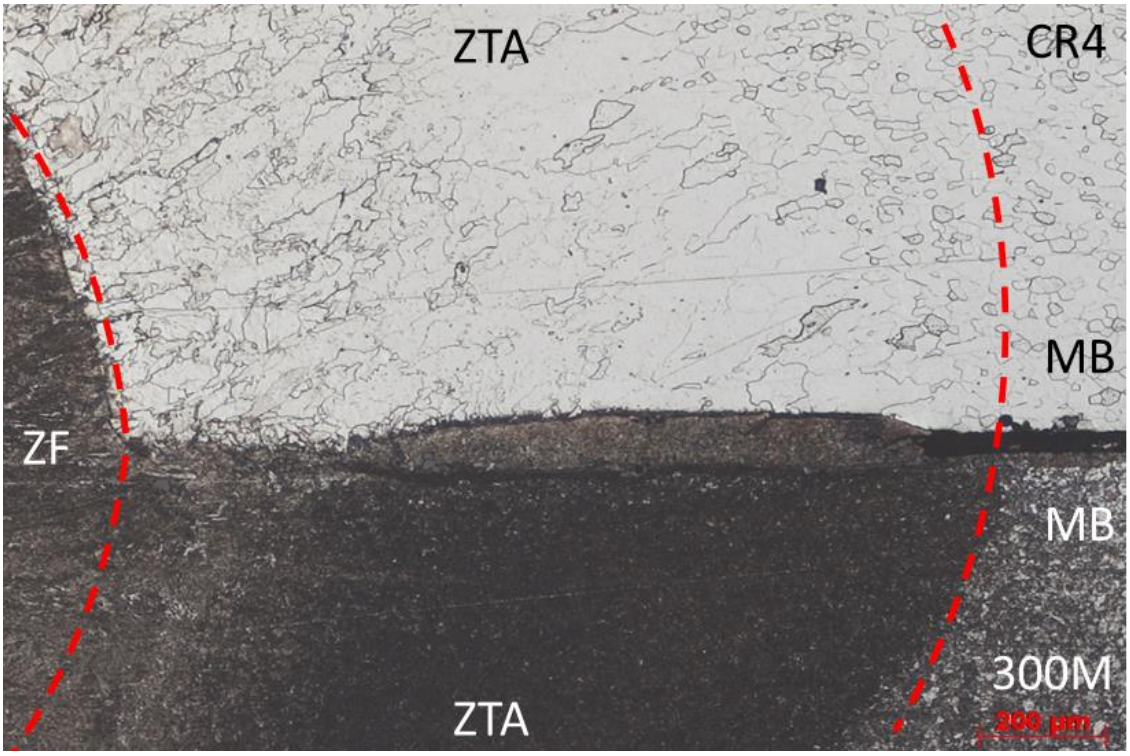


Figura 6 – Interface entre as chapas dos aços na região de passagem da corrente na solda de boa qualidade (amostra D)

Na interface entre a ZF e a ZTA ocorre um fenômeno de crescimento de grãos devido ao aquecimento e, por isso a falha do ponto de solda geralmente se inicia nesta região.

Qualidade das Soldas

Na Tabela 3 estão as indicações de qualidade de solda. Nos casos em que ocorreram fraturas interfaciais e frágeis, a classificação da solda é 'Ruim' (grupos A, B e C).
Somente o grupo D apresentou características aceitáveis para ser considerado uma solda 'boa'. A fabricação de uma segunda amostra do grupo sem poros foi determinante para evidenciar que o aparecimento de poros não é frequente.

Tabela 3 - Denominação da qualidade das uniões

ID	Corrente [kA]	Tempo [$\frac{1}{60}$]s	Força [kN]	Qualidade da Solda
A	10	7	2	Ruim
B	9	7	2	Ruim
C	9	9	2	Ruim
D	11	10	2	Boa

Deste modo, comprova-se que a soldagem com os parâmetros dos conjuntos A, B e C não são capazes de unir com eficácia chapas de aço CR4 e 300M com as espessuras utilizadas neste estudo.

CONCLUSÕES

Com os resultados analisados e discutidos anteriormente é possível apontar as seguintes conclusões:
É possível realizar soldas de qualidade entre aços CR4 e 300M.
O *peel test* não substitui uma análise metalúrgica aprofundada, pois, na faixa de parâmetros que determinam a fronteira entre os modos de falha ele tende a induzir a falhas por arrancamento, já que acontece em uma velocidade bem reduzida. Outro fator que implica sobre o *peel test* é não ser apropriado para detectar poros no interior das soldas.
O ensaio de Tração-cisalhamento é mais preciso em determinar a resistência mecânica do ponto de solda, já que transmite informações quantitativas a respeito da integridade e qualidade da união. A análise da superfície de fratura também contribui para a análise do resultado da solda.
Com ajuda do mapa de dureza, é possível notar que, mesmo que não ocorra a formação do nugget, a chapa do aço 300M sofreu maior influência da passagem da corrente de soldagem. Isso porque é um material com mais elementos de liga e sua resistência à passagem da corrente elétrica é maior. Esse fenômeno é observado em outros estudos da literatura, uma vez que na soldagem por resistência elétrica a ponto de aços de alta liga, é comum a utilização de parâmetros mais brandos quando comparados às soldas em materiais de baixa liga. Os valores obtidos com as análises de microdureza dos materiais estão próximos aos encontrados na bibliografia.
Os mapas de dureza já indicavam que, nos grupos A, B e C, não haviam ocorrido fusão localizada suficiente para a formação dos *nuggets*.
O grupo D se mostrou superior nos ensaios destrutivos de tração, esta condição suportou os maiores valores de carga. Nos testes de caracterização microestrutural ficou comprovado que os resultados mecânicos superiores se deram pelo maior crescimento do nugget, garantindo que este esteja presente entre as duas chapas soldadas.
A utilização de parâmetros mínimos garante que a união não falhe de modo interfacial. Para o presente estudo, a partir de 11 kA de corrente e 10 ciclos, é possível unir chapas de aço CR4 e 300M de maneira que o modo de falha por arrancamento prevaleça.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Estudos Avançados – IEAv, ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo apoio referente ao processo 2016/16683-8.

REFERÊNCIAS

CHABOK, Ali, et al. Micromechanical evaluation of DP1000-GI dual-phase high-strength steel resistance spot weld. Journal of materials science, 2019, 54.2: 1703-1715.

FARIA NETO, Antônio; FREITAS, Francisco Cappi De; FURTADO, Anderson Elias; FUKUGAUCHI, Cristina Sayuri; PEREIRA, Marcelo dos Santos; ABDALLA, Antônio Jorge. Desenvolvimento de aços avançados de alta resistência na indústria automobilística: importante alternativa para uma maior eficiência energética. In: Ciência e Engenharia de Materiais: conceitos, fundamentos e aplicação. [s.l.] : Editora Científica Digital, 2021. p. 194–215.

KAVAMURA, Haroldo Akira. Aplicação de solda laser em carrocerias automotivas: estudo comparativo entre a solda laser e a solda ponto por resistência /H.A. Kavamura. -- São Paulo, 2007

SAKAI, P. R., et al. Comparison of mechanical and microstructural characteristics in maraging 300 steel welded by three different processes: LASER, PLASMA and TIG. Procedia Engineering, 2015, 114: 291-297.

SENA, Fábio do Monte. Metodologia de inspeção par processo de soldagem por resistência a ponto via visão de máquina / Fábio do Monte Sena. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2019.

MECHANICAL AND METALLURGICAL CHARACTERIZATION OF THE JOINING OF DISSIMILAR STEEL SHEET WELDED BY ELECTRICAL RESISTANCE SPOTLIGHT

ABSTRACT

With the advancement of steel manufacturing technologies and the industry's desire, in general, for higher quality steels at lower costs, it is necessary to understand the welding and joining mechanisms of these new materials. This study uses mechanical tests and micrographic analyzes provided in the literature to analyze the influence of the electrical resistance spot welding (RSW) process on dissimilar steel sheets. CR4 low carbon steel, widely used by the automotive industry for stamping panels due to its good ductility and toughness, was welded with 300M steel, an ultra high strength high alloy steel that emerged as an evolution of 4340 steel with better toughness properties. and weldability for applications with high mechanical requirements. The thicknesses of the steels are, respectively, 1.2 mm and 3.3 mm. To define the parameter chart used to manufacture the samples under study, preliminary tests were performed varying values of current (kA) and time (cycles[1/60]s) to discover the boundary of parameters capable of forming joints with interfacial flaws and by pulling out. Once the parameter range is determined, the samples are fabricated. Four replicates of samples were used for Peel Test, 4 samples for traction-shear and 1 sample for macro and micrographic characterization. For mechanical characterization and definition of mechanical strength limits, peel test and tensile-shear tests were used. Data for micrographic characterization come from Vickers microhardness (HV), scanning electron microscopy (SEM) and electron scattering spectroscopy (EDS) tests. 4 parameter settings were proposed. A, B, C and D. The samples from groups A, B and C, in the tensile-shear test, showed interfacial failures, a type of failure not desirable in any manufacturing process. The lack of energy input and, consequently, of fusion at the weld site showed in the micrographic analysis that the nugget had not been formed. The samples of group D, manufactured with 11 kA of current and 10 cycles, showed the highest levels of tensile strength and, in the micrographic analysis, the presence of lentils that join the plates, leading to the pullout failure mode in all the analyzed samples.

Keywords: *1.Electric resistance spot welding. 2.Metallurgical characterization. 3.Automotive.*