

CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DAS TENSÕES RESIDUAIS EM JUNTAS SOLDADAS DE AÇO IF A LASER E A PLASMA

Maria Cindra Fonseca¹; Joanes S. Dias^{1,2}; Mateus C. Martins¹; Hector R. M. Costa²

¹Universidade Federal Fluminense – UFF; ²CEFET/RJ
Universidade Federal Fluminense – UFF, Escola de Engenharia / PGMEC, Rua
Passo da Pátria, 156, São Domingos, Niterói-RJ CEP 24210-240
mcindra@vm.uff.br

RESUMO

Os aços Interstitial Free foram desenvolvidos com o objetivo de melhorar a estampabilidade das chapas laminadas a frio usadas na indústria automobilística. Embora os processos tradicionais de soldagem ainda sejam usados, há uma crescente demanda por novos processos, como a soldagem a laser e a plasma. As tensões residuais são intrínsecas aos processos de soldagem e podem alterar significativamente o comportamento das estruturas e componentes soldados com relação à vida em serviço. O objetivo deste trabalho foi o estudo das propriedades mecânicas e a caracterização microestrutural de juntas soldadas a laser e a plasma de aço IF, com a análise das tensões residuais por difração de raios-X. Os resultados mostraram tensões residuais muito semelhantes na superfície e na raiz das juntas, sendo que em algumas regiões da superfície, as tensões longitudinais foram trativas e de elevada magnitude. A microdureza das juntas soldadas a laser foram significativamente maiores das juntas soldadas a plasma.

Palavras-chave: Aços IF, Tensões residuais, Propriedades mecânicas, Metalografia colorida, Difração de raios-X.

INTRODUÇÃO

Os aços *Interstitial Free* (IF) apresentam elevados níveis de estampabilidade em função dos seus baixos percentuais de elementos intersticiais, como o carbono e o nitrogênio, o que os torna particularmente apropriados para inúmeras aplicações na indústria automotiva (Sarathi, 2014).

As tensões residuais são auto-equilibradas e influenciadas por diversos fatores, tais como temperatura, carregamentos, deformação e microestrutura. Bhadeshia, (2002) e Teng *et al.*, (2002) mencionam que as tensões residuais podem reduzir a vida em fadiga das estruturas soldadas, particularmente quando uma tensão residual de tração da magnitude do limite de escoamento exista nas regiões da raiz da solda. Desta forma, as propriedades mecânicas influenciadas pelas tensões residuais, particularmente a resistência à fadiga de estruturas e componentes são influenciadas pelo estado de tensões residuais nas camadas superficiais do material. A constatação do efeito benéfico das tensões residuais compressivas no aumento da resistência à fadiga contribuiu para o desenvolvimento de vários métodos de tratamentos superficiais, sendo o mais importante o método *shot peening*.

Os processos de soldagem como a soldagem a laser (LBW – *Laser Beam Welding*) e a soldagem a plasma (PAW – *Plasma Arc Welding*) se destacam para soldagem de componentes estruturais da indústria automobilística. O processo de soldagem a plasma tem se tornado mais acessível, principalmente para aplicações automatizadas, diante da crescente demanda do mercado por técnicas de fabricação cada vez mais competitivas, tornando-se uma alternativa, com grande potencial, em relação a outros processos convencionais.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo o estudo das propriedades mecânicas e das tensões residuais, bem como a caracterização microestrutural de juntas soldadas de aço IF pelos processos laser e plasma.

MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foi estudado um aço IF, estabilizado ao titânio, fornecido em forma de chapa galvanizada com 2 mm de espessura. A composição química e as propriedades mecânicas do aço são mostradas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Composição química do aço IF (% em peso).

C	Mn	P	S	Si	Al	Ti	Ni	Cu	Cr	N
0,002	0,080	0,011	0,006	0,040	0,050	0,060	0,010	0,010	0,020	0,002

Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço estudado.

Tensão Limite de Escoamento (MPa)	Tensão Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)
215	317	55

Para a soldagem, as amostras foram cortadas com dimensões de 200 x 150 mm, com chanfro reto. O processo de soldagem a laser consistiu na passagem das peças a serem unidas por uma esteira, com espaçamento entre elas de cerca de 1,5 mm. O processo foi realizado em atmosfera de gás hélio, com vazão de 100 L/min, velocidade de 4,0 mm/s e distância focal de 1,6 mm.

As juntas foram soldadas a plasma, no modo *keyhole* automatizado, com um robô *Motoman SSF2000*. Foi utilizado argônio como gás de plasma e gás de proteção com a vazão de 2,0 L/min e 13,5 L/min, respectivamente. A velocidade de soldagem utilizada foi de 4,7 mm/s. As juntas soldadas por ambos os processos estão apresentadas na Figura 1. Após o processo de soldagem algumas amostras foram submetidas ao tratamento superficial de *shot peening*, para introdução de tensões residuais compressivas na superfície do material.

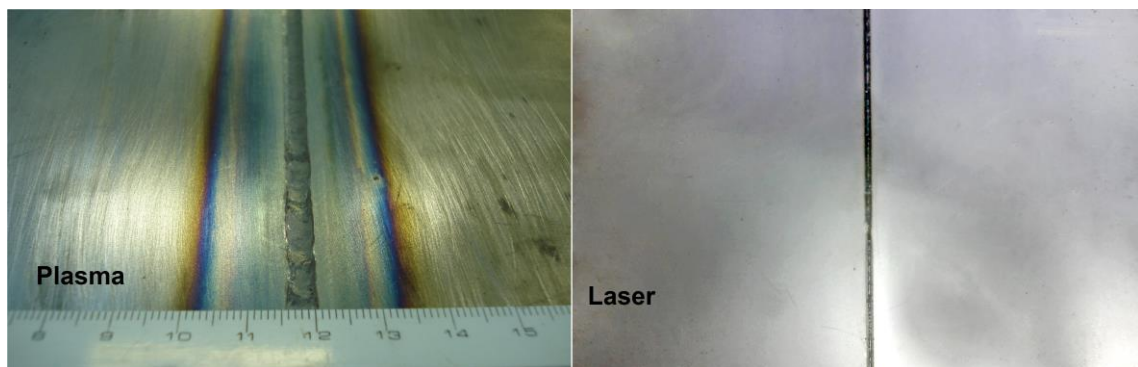


Figura 1 – Juntas soldadas.

As tensões residuais foram analisadas por difração de raios-X, pelo método do $\text{sen}^2\psi$, com radiação $\text{CrK}\alpha$ ($\lambda = 2,2909 \text{ \AA}$) difratando o plano (211) da ferrita no ângulo de difração $2\theta = 156,41^\circ$ com um analisador de tensões, modelo *XStress 3000* (30 kV; 6,7 mA), utilizando um colimador de 1 mm e ângulo ψ variando de 0° a 45° . Foi realizado ainda um perfil das tensões residuais através da espessura do material com a finalidade de verificar a profundidade da camada atingida pelo

tratamento de *shot peening*, pela técnica de remoção de camadas por polimento eletrolítico.

As tensões residuais foram analisadas em locais pré-definidos na junta soldada, no sentido longitudinal (L) e transversal (T) ao cordão de solda, na face e na raiz do mesmo, no metal base (MB), na zona termicamente afetada (ZTA) e na zona fundida (ZF), conforme a Figura 2.

Para as análises microscópicas, as amostras foram preparadas utilizando técnicas convencionais de metalografia com polimento final em pasta de diamante de 1 μm em solução de Nital 2%, seguido da aplicação de novo ataque químico, para a metalografia colorida, o ataque foi feito com solução aquosa de tiosulfato de sódio (50 g) e metabisulfito de potássio (1 g) em 50 ml de água destilada.

Para a caracterização das propriedades mecânicas, corpos de prova foram confeccionados de acordo com a norma ASTM A370 para a realização dos ensaios de tração, e seguindo a norma ASTM E384-11 para o ensaio de microdureza.

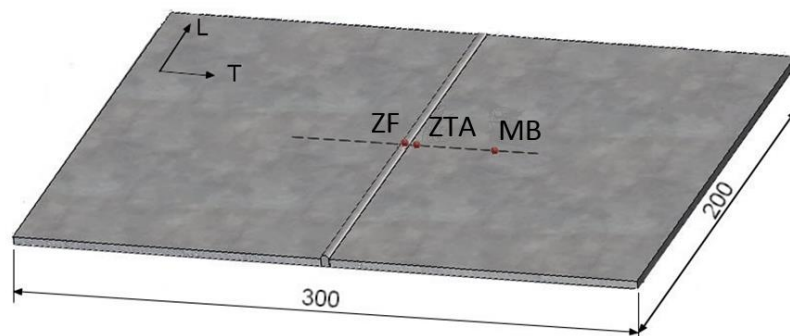


Figura 2. Representação esquemática dos pontos para medição das tensões residuais (dimensões em mm).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As tensões residuais superficiais foram analisadas nas direções, longitudinal (L) e transversal (T), no metal base (MB), na zona termicamente afetada (ZTA) e na zona fundida (ZF) conforme Figura 2 com resultados apresentados na Figura 3.

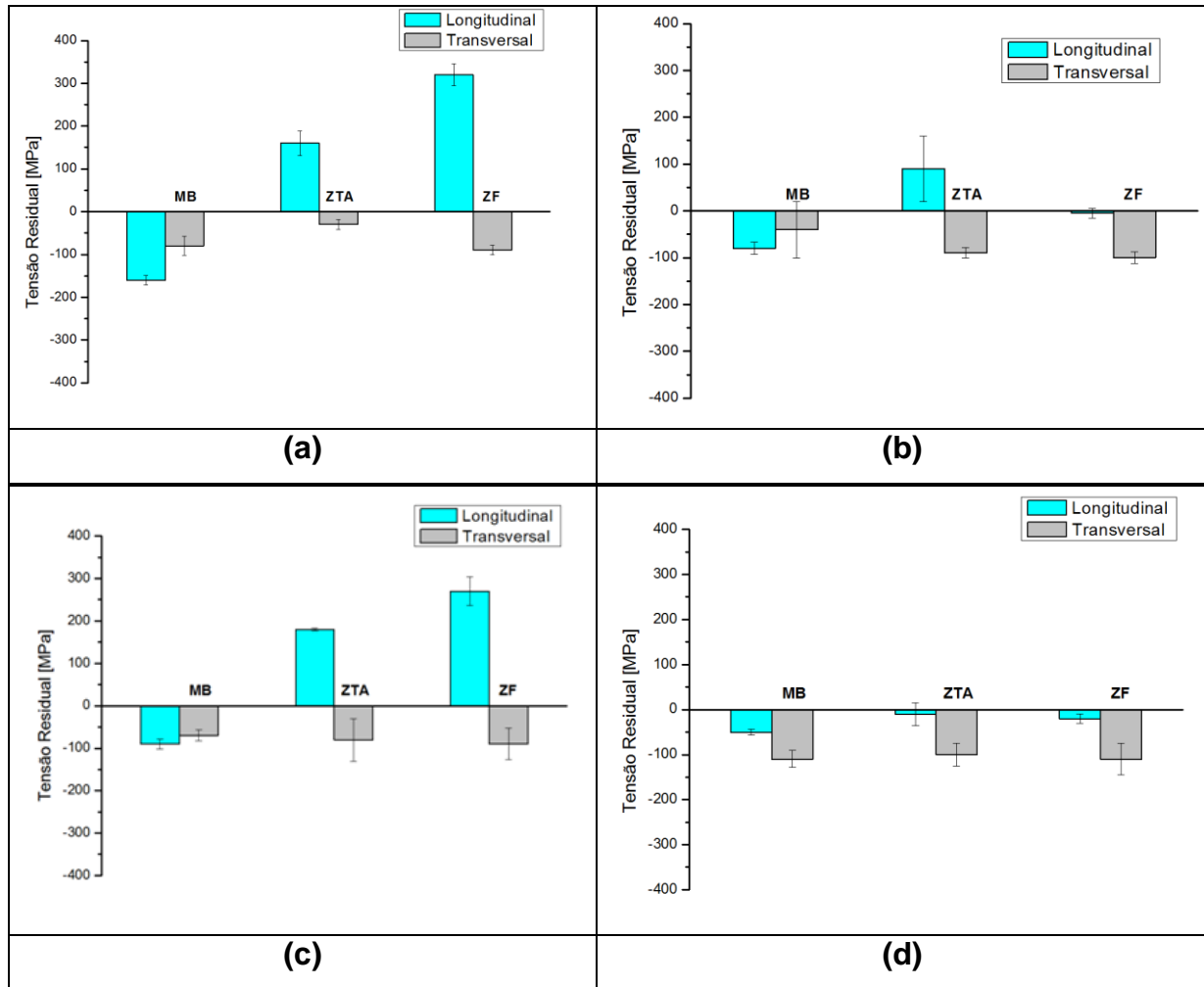


Figura 3. Tensões residuais nas juntas soldadas: Laser: a) face e b) raiz; Plasma: c) face e d) raiz.

Analisando os valores das tensões residuais na Figura 3, na condição como soldada, em ambos os processos, na face e na raiz das juntas, é possível verificar que as tensões residuais foram compressivas nas direções analisadas, exceto na face da ZF e ZTA em ambos os processos e na raiz da ZTA da soldagem a laser na direção longitudinal. Na ZF a tensão residual é máxima e próxima à tensão limite de resistência à tração do metal base, obtido no ensaio de tração com o corpo de prova transversal ao cordão de solda, provavelmente devido à incidência direta da fonte de calor na face da junta e ao processo de resfriamento rápido não-homogêneo. Apesar das elevadas tensões residuais trativas estarem localizadas apenas na direção longitudinal, elas podem afetar a vida de serviço da junta soldada levando à falha prematura da estrutura. No entanto, estes resultados estão coerentes com os

encontrados por Coelho *et al.* (2013). As tensões residuais, após ambos os processos de soldagem a laser e a plasma, apresentaram um perfil típico e coerente com os encontrados na literatura (Macherauch & Wolhart, 1987), em que tensões trativas superficiais de elevada magnitude estão presentes no centro do cordão de solda, a ZTA com menores tensões trativas, enquanto que o metal de base possui tensões compressivas, devido ao processo de laminação na fabricação, da ordem de -100 MPa.

A análise dos resultados das tensões residuais geradas por ambos os processos de soldagem mostra que não há diferença nas tensões residuais geradas nestas juntas e que portanto, não há superioridade de um método sobre o outro.

O tratamento de *shot peening* introduziu tensões residuais compressivas da ordem de -300 MPa em ambas as juntas. Na Figura 4 é mostrado o comportamento subsuperficial destes campos de tensão residual na região da zona fundida.

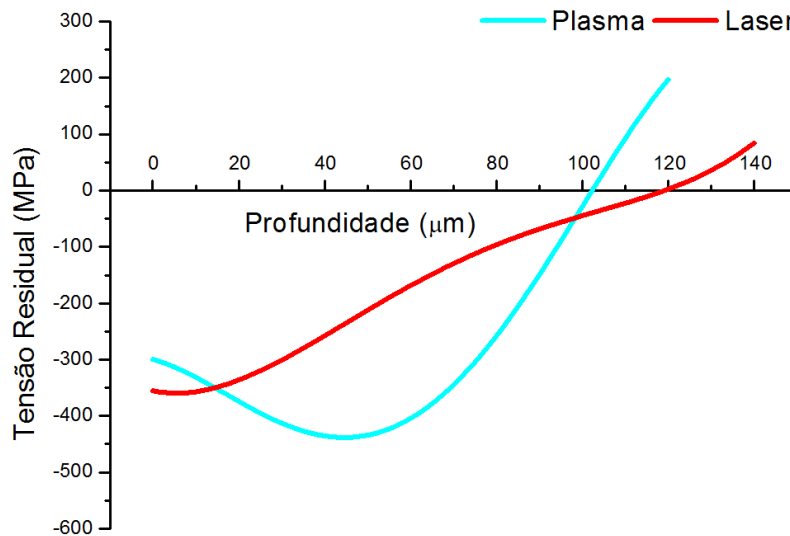


Figura 4. Perfil do comportamento das tensões residuais através da espessura nas juntas soldadas.

O tratamento de *shot peening* gerou, na junta soldada a plasma, tensões residuais subsuperficiais mais elevadas do que no processo a laser. O maior gradiente entre elas ocorre à profundidade de 50 μm onde as tensões no cordão a plasma atingem seu ponto máximo, com cerca de 450 MPa em compressão. As tensões permaneceram compressivas até a profundidade de 120 μm e 100 μm para

a soldagem a laser e plasma respectivamente, ocorrendo então, uma inversão na natureza das tensões.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados das propriedades mecânicas obtidas nas juntas soldadas e no metal de base. É possível verificar que a soldagem a plasma provocou uma leve diminuição na resistência mecânica das juntas, enquanto que as juntas soldadas a laser obtiveram valores mais próximos ao metal de base. Conforme Cantergiani *et al.* (2016) e Čížek *et al.* (2016).

Tabela 3. Propriedades mecânicas do aço e das juntas soldadas.

	Tensão Limite de Escoamento (MPa)	Tensão Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)	Microdureza (HV)
Metal Base	215	320	55	85
Laser	210	320	51	130
Plasma	200	280	47	190

A análise dos locais onde os corpos de prova fraturaram no ensaio de tração, permitiu observar que as regiões das juntas soldadas se mantiveram íntegras e que as trincas de fratura iniciaram no metal de base (Figura 5), o que está coerente com os resultados encontrados em juntas soldadas de aço IF por Panda *et al.* (2007).

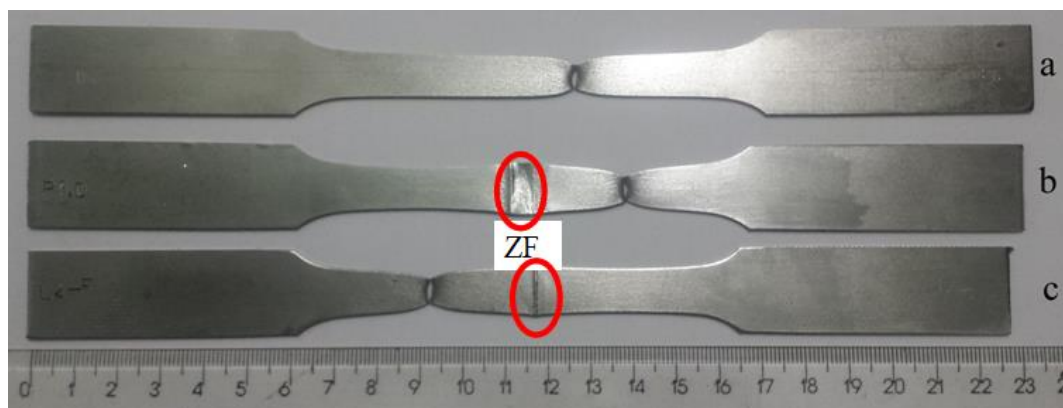


Figura 5. Corpos de prova fraturados após ensaio de tração. a) Metal base; b) Junta soldada a plasma; c) Junta soldada a laser.

Na Figura 5 são observados os perfis de microdureza Vickers e seus valores correspondentes nas juntas soldadas a laser e a plasma na seção transversal.

Observou-se que a microdureza no metal base, foi de 85 HV_{0,5}, já na região da zona fundida na junta soldada a plasma foi próxima aos 130 HV_{0,5}, enquanto na junta a laser 190 HV_{0,5}, sendo verificado uma diferença cerca de 40% entre os processos nesta região, coerente com Kumar *et al.* (2013), Ramesh *et al.* (2015) e Gong *et al.* (2016).

Também é possível verificar que a largura da ZTA/ZF na junta soldada a laser possui aproximadamente 0,65 mm, enquanto na junta a plasma 4,5 mm, com uma diferença de 4 mm, provavelmente devido ao aporte térmico nesta região, conforme Neto *et al.* (2015).

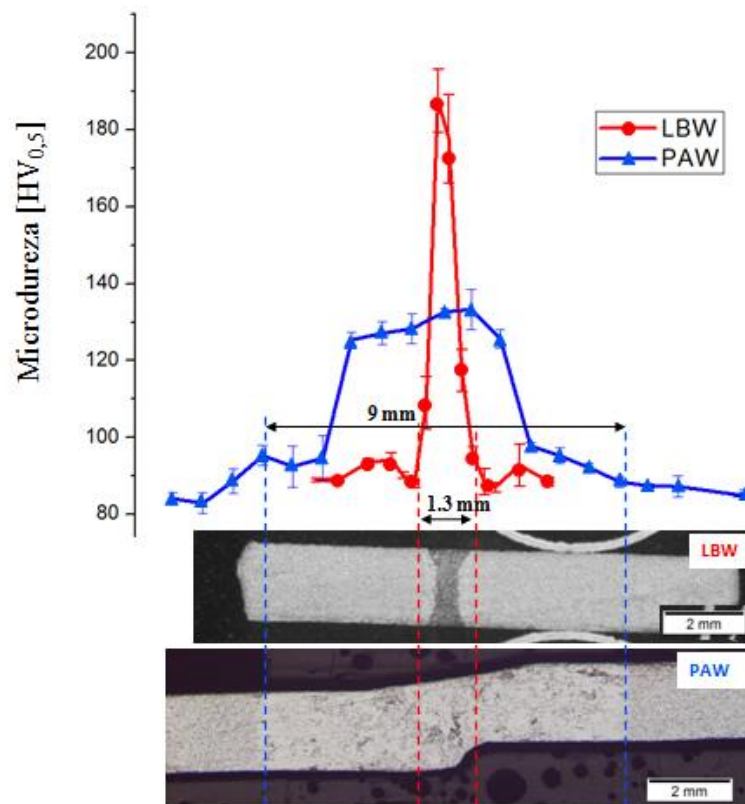


Figura 5. Perfil de Microdureza Vickers na junta soldada a laser e plasma.

Na Figura 6 é mostrado a microscopia óptica aço IF estabilizado ao titânio estudado, apresentando uma microestrutura constituída de uma matriz ferrítica, com morfologia de grãos equiaxiais e tamanho de grão de 23 µm, coerente com Basak *et al.* (2016). Na microestrutura da zona de transição MB-ZTA, Figura 7, é possível observar a região da ZTA com grãos alongados. O aumento dos grãos na região da ZTA também foi observado por Bayraktar *et al.*, (2007) relacionado com os elevados gradientes térmicos localizados e as transformações de fase. Na microestrutura da

zona fundida, Figura 8, é possível verificar formas e tamanhos de grãos irregulares principalmente na ZF do processo de soldagem a laser, devido às condições de resfriamento não equilibradas durante a soldagem conforme também reportado por Panda *et al.* (2007) e Hamidinejad *et al.* (2012).

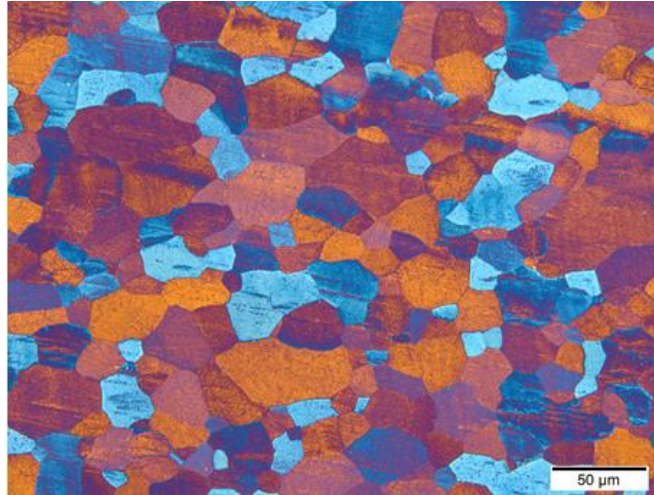


Figura 6. Microestrutura do aço IF estudado. Aumento 500X. Reagente tiosulfato de sódio e metabisulfito de potássio.

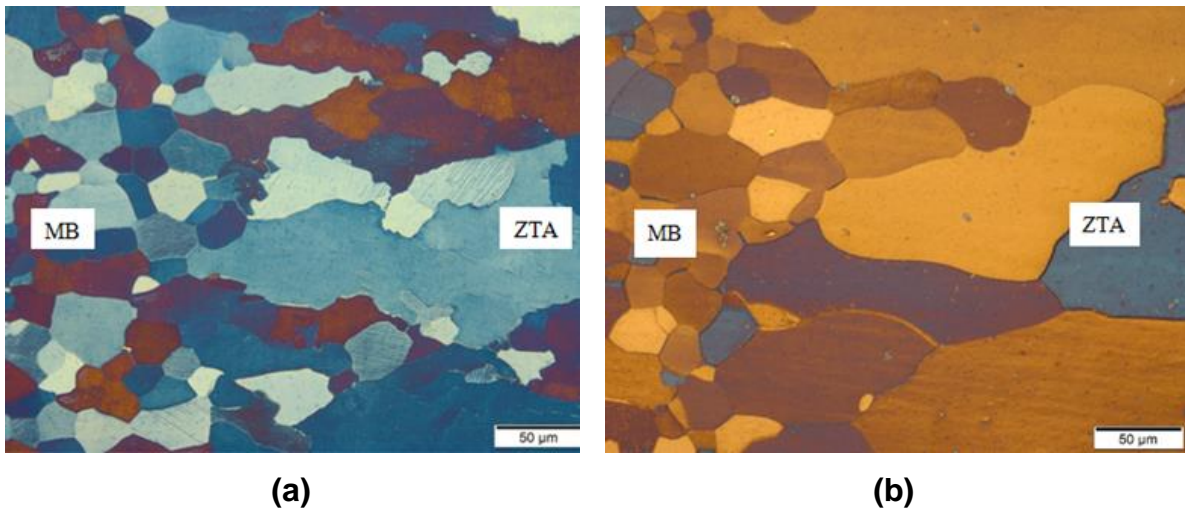


Figura 7. Microestruturas da zona de transição MB-ZTA. Reagente tiosulfato de sódio e metabisulfito de potássio. Aumento 500X: a) LBW e b) PAW.

Com a caracterização das superfícies de fratura por MEV foi observado o micromecanismo de fratura alveolar associado à deformação plástica devido ao coalescimento de vazios, formando microcavidades (dimples) sobre a superfície da

fratura conforme pode ser observado na Figura 9. A fratura do tipo dúctil foi formada na região do metal de base, conforme foi observado na Figura 5, devido a esta região ser a de menor dureza da junta soldada.

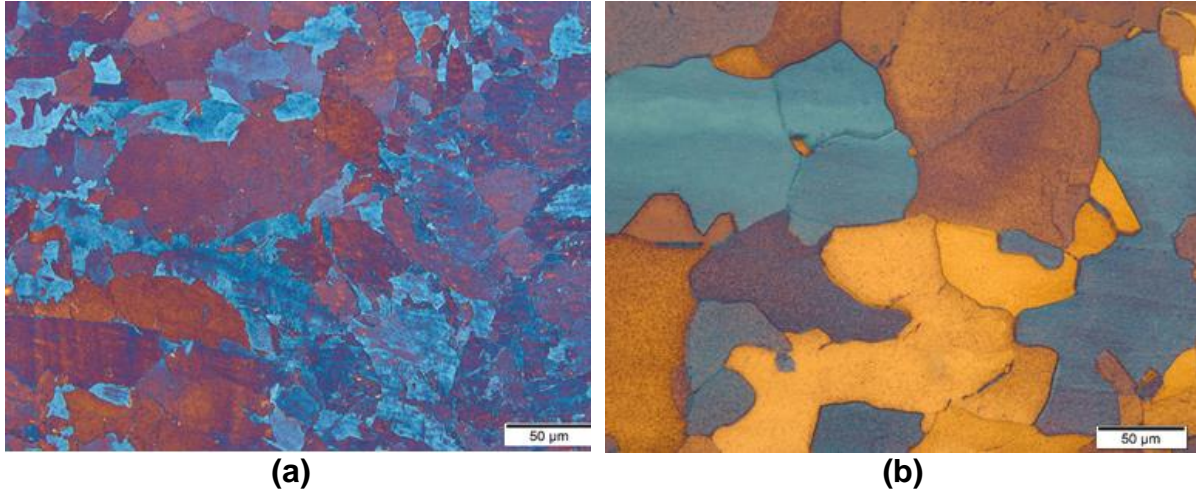


Figura 8. Microestrutura da zona fundida. a) LBW e b) PAW. Reagente tiosulfato de sódio e metabisulfito de potássio. Aumento 500X.

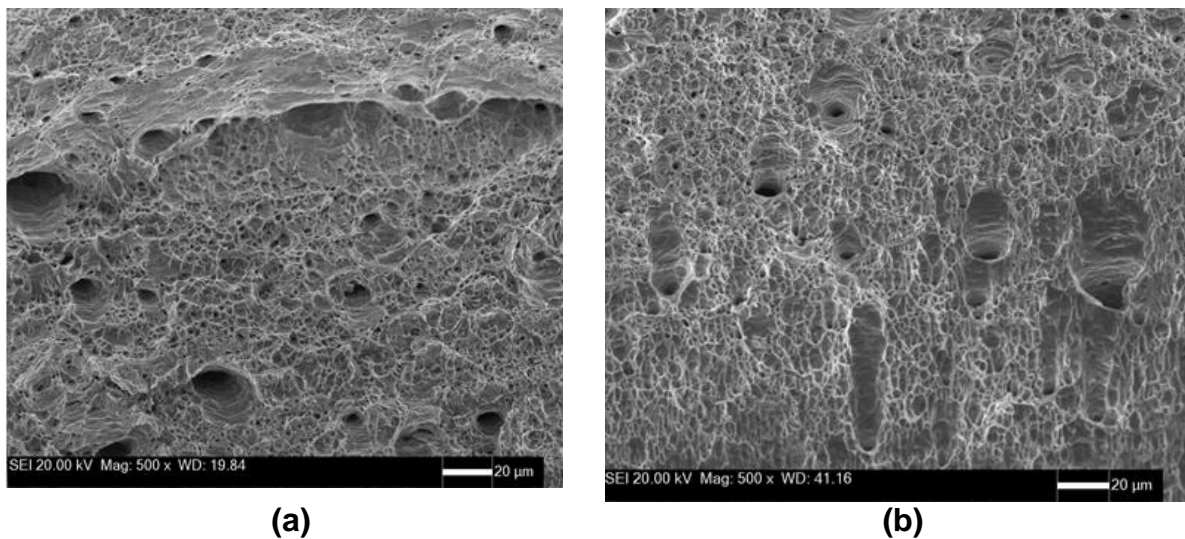


Figura 9. MEV da superfície de fratura: a) LBW e b) PAW 500X.

CONCLUSÕES

O estudo das tensões residuais em juntas soldadas de aço IF, a laser e a plasma, bem como a caracterização das propriedades mecânicas e microestruturais destas juntas, permitem as seguintes conclusões:

1. As tensões residuais geradas na soldagem por ambos os processos, na face e na raiz das juntas, são de natureza compressiva, exceto na face da ZF e ZTA e na raiz da ZTA da soldagem a laser, na direção longitudinal.
2. Na condição como soldado em ambos os processos e na face das juntas, a tensão residual na ZF (~290 MPa) é máxima e próxima à tensão limite de resistência do metal base (317 MPa) devido à incidência direta da fonte de calor nesta face e ao resfriamento rápido não-homogêneo.
3. Os perfis do comportamento das tensões residuais subsuperficiais em profundidade demonstraram que as tensões permaneceram compressivas até a profundidade de cerca de 110 µm, a partir desta ocorreu uma inversão na natureza das tensões, que se tornaram trativas.
4. A soldagem a plasma provocou uma leve diminuição na resistência mecânica, nas tensões limite de escoamento e limite de resistência, das juntas, enquanto que as juntas soldadas a laser produziram valores mais próximos aos do metal de base.
5. A dureza na região da zona fundida foi cerca de 2,2 e 1,5 vezes maior que no metal de base, para a junta soldada a laser e plasma, respectivamente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES e à FAPERJ pelo suporte financeiro que permitiu a realização do presente trabalho, às empresas Ferrolene e White Martins pelo material e pela soldagem das amostras.

REFERÊNCIAS

- 1) BASAK, S., DAS, H., PAL, T. K., SHOME, M. Characterization of intermetallics in aluminum to zinc coated interstitial free steel joining by pulsed MIG brazing for automotive application. *Materials Characterization*, vol. 112, pp. 229–237, 2016.
- 2) BAYRAKTAR, E., KAPLAN, D., DEVILLERS, L., CHEVALIER, J. P. Grain growth mechanism during the welding of interstitial free (IF) steels. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 189, pp.114-125, 2007.
- 3) BHADESHIA, H. K. D. H. Residual Stress: Material Factors - Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, ASM International, pp. 3-10, 2002.

- 4) CANTERGIANI, E., FILLON, A., LAWRENCE, B., SAUVAGE, X., PEREZ, M., SCOTT, C. P., WECK, A. Tailoring the mechanical properties of steel sheets using FeC films and diffusion annealing. *Materials Science & Engineering A*, vol. 657, pp. 291–298, 2016.
- 5) COELHO, R. S., CORPAS, M., MORETO, J. A., JAHN, A., STANDFUB, J., KAYSSER-PYZALLA, A., PINTO, H. Induction-assisted laser beam welding of a thermomechanically rolled HSLA S500MC steel: A microstructure and residual stress assessment. *Materials Science & Engineering A*, vol. 578, pp. 125-133, 2013.
- 6) ČÍŽEK, J., JANEČEK, M., KRAJŇÁK, T., STRÁSKÁ, J., HRUŠKA, P., GUBICZA, J., KIM, H. S. Structural characterization of ultrafine-grained interstitial-free steel by severe plastic deformation. *Acta Materialia*, vol. 105, pp. 258-272, 2016.
- 7) GONG, H., WANG, S., KNYSH, P., KORKOLIS, Y. P. Experimental investigation of the mechanical response of laser-welded dissimilar blanks from advanced- and ultra-high-strength steels. *Materials and Design*, vol. 90, pp. 1115–1123, 2016.
- 8) HAMIDINEJAD, S. M., KOLAHAN, F., KOKABI, A. H. The modeling and process analysis of resistance spot welding on galvanized steel sheets used in car body manufacturing. *Materials and Design*, vol. 34, pp. 759-767, 2012.
- 9) KUMAR, S., KUNDU, A., VENKATA, K.A., EVANS, A., TRUMAN, C. E., FRANCIS, J. A., BHANUMURTHY, K., BOUCHARD, P.J., DEY, G. K. Residual stresses in laser welded ASTM A387 Grade 91 steel plates. *Materials Science & Engineering A*, vol. 575, pp. 160-168, 2013.
- 10) PANDA, S.K., KUMAR, D. R., KUMAR, H., NATH, A.K. Characterization of tensile properties of tailor welded IF steel sheets and their formability in stretch forming. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 183, pp. 321-332, 2007.
- 11) RAMESH M.V.L, RAO P. S., RAO V. V., PRABHAKAR K. V. P. Properties Evaluation in Laser Beam Welds of High Strength Low Alloy Steel. *Materials Today: Proceedings*, vol. 2, pp. 2532 – 2537, 2015.
- 12) SARATHI DE, P., KUNDU, A., CHAKRABORTI, P.C. Effect of prestrain on tensile properties and ratcheting behaviour of Ti-stabilised interstitial free steel. *Materials and Design* 57, pp. 87–97, 2014.
- 13) TENG, T.L., FUNG, C.P., CHANG, P.H. Effect of Weld Geometry and Residual Stress on Fatigue in Butt Welded Joints, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 79, pp. 467–482, 2002.

STUDY OF RESIDUAL STRESS GENERATED IN GTAW WELDING OF AISI 316L STEEL

ABSTRACT

Interstitial free steel has an extensive application in the automotive industry where the Laser Beam Welding process is widely used due to its high productivity. Similarly, the other used process, Plasma Arc Welding, is characterized by a greater energy concentration and current density and therefore lower distortion, higher welding speeds and higher penetration may be obtained. However, while the traditional welding processes have been extensively studied with regard to the generation of residual stresses, there are few studies about residual stresses analysis and characterization of LBW and PAW joints. Therefore, the aim of the present work is to analyze residual stresses resulting from LBW and PAW processes by X-ray diffraction technique in IF steel butt joints. For both joints, macro and microstructure were characterized and mechanical properties were determined. Tensile residual stresses in the heat-affected zone (HAZ) and in the fusion zone were verified for both welding processes.

Key-words: interstitial free steels, laser beam welding (LBW), plasma welding (PAW), residual stresses, X-ray diffraction