

# EFEITO DA APLICAÇÃO DA TÉCNICA DA DUPLA CAMADA SOBRE A MICROESTRUTURA, MICRODUREZA E TENSÕES RESIDUAIS DO AÇO ESTRUTURAL ASTM A516 G70<sup>1</sup>

George Luiz Gomes de Oliveira<sup>2</sup>  
Hélio Cordeiro de Miranda<sup>3</sup>

## Resumo

O objetivo desse trabalho é avaliar o efeito da utilização da técnica da dupla camada, quando aplicada na soldagem do aço estrutural ASTM A516 G70, sobre a microestrutura e a microdureza encontradas nas regiões da solda. Adicionalmente, pretende-se avaliar o efeito da aplicação desta técnica de soldagem sobre as tensões residuais transversais geradas na junta. Amostras foram soldadas com duas configurações de chanfro empregando os mesmos parâmetros, sendo que as amostras soldadas utilizando a técnica da dupla camada foram submetidas a um processo de amanteigamento prévio de suas faces. Todas as amostras foram levadas a um difratômetro de raios-x para levantamento dos perfis de tensão residual. As mesmas foram posteriormente submetidas a ensaios metalográficos. A técnica da dupla camada mostrou-se uma ferramenta bastante útil à soldagem do aço ASTM A516 Gr70, pois além de promover o refinamento e o revenimento da ZAC-GG das amostras soldadas, acrescentou tensões residuais compressivas ao longo do metal de solda e da ZAC das amostras analisadas nesse trabalho.

**Palavras-chave:** Tensões residuais; Integridade estrutural; Transformações de fase adifusionais.

## EFFECT OF USING THE DOUBLE LAYER TECHNIQUE ON THE MICROSTRUCTURE, MICROHARDNESS AND RESIDUAL STRESS OF WELDED ASTM A516 GR70 STRUCTURAL STEEL

## Abstract

The aim of this work is to evaluate the effect of using the double layer technique on the microstructure, microhardness and residual stresses of welded ASTM A516 Gr70 structural steel. Samples were welded with the same welding parameters and two types of chamfers, while the samples welded using the double layer technique underwent a buttering process on their chamfer face. Residual stress measurement was accomplished through x-ray diffraction, using a minidiffractometer for measurement in field. Metallographic analysis was accomplished in the transverse section of the welded joint, using optic microscopy and scanning electron microscopy. The double layer technique showed that can be used in the welding of ASTM A516 Gr70 steel, because, besides promote a refinement and a drawing back of the CG-HAZ, it increased compressive residual stress in the whole surface of the analyzed samples.

**Key words:** Residual stress; Structural integrity; Phases transformation.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 65<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade Federal do Ceará (UFC)–Fortaleza-CE.

<sup>3</sup> Doutor e professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará (UFC)–Fortaleza-CE.

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de tratamentos térmicos pós-soldagem (TTPS) pode minimizar os níveis de tensões residuais em uma junta soldada. No entanto, o emprego dos mesmos acarreta em custos diretos e indiretos para o equipamento soldado, além de muitas vezes a aplicação destes tratamentos não serem possíveis devido a limitações físicas.

Uma alternativa para redução dos níveis finais das tensões residuais de soldagem, sem a necessidade de TTPS, é a utilização de estratégias de controle destas tensões através do procedimento de soldagem empregado. Dentre estas estratégias, destacam-se o emprego adequado da técnica de soldagem.

A utilização de técnicas de soldagem que minimizem efeitos microestruturais nocivos (regiões fragilizadas, por exemplo) produzidos durante a soldagem de uma determinada junta, pode ser uma boa opção para o controle das tensões residuais geradas, pois mesmo que estas tensões venham a ser da mesma magnitude das geradas pela utilização de uma técnica de soldagem convencional, o efeito microestrutural benéfico produzido pela técnica já garante um incremento positivo na resistência à fissuração da junta.

Dentre as técnicas de soldagem que possuem eficácia comprovada na redução de regiões frágeis e de elevada sensibilidade à fissuração, destaca-se a técnica da dupla camada.

A técnica da dupla camada tem como objetivo promover uma adequada sobreposição dos ciclos térmicos de soldagem, de modo que a segunda camada depositada venha a promover o refinamento e o revenimento da zona afetada pelo calor (ZAC) com granulação grosseira da primeira camada, melhorando assim as propriedades da junta.

O conhecimento do efeito da aplicação desta técnica sobre as tensões residuais geradas pode além diminuir a sensibilidade à fissuração da junta, auxiliar no controle do estado de tensões final da mesma, aumentando consideravelmente a confiabilidade e a integridade estrutural do componente soldado.

Desta forma, o objetivo desse trabalho é avaliar o efeito da utilização da técnica da dupla camada, quando aplicada na soldagem do aço estrutural ASTM A516 G70, sobre a microestrutura e a microdureza encontradas nas regiões da solda e, além disso, avaliar o efeito da aplicação desta técnica de soldagem sobre as tensões residuais transversais geradas na junta.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Foi utilizado o aço ASTM A516 Gr. 70 como metal de base e o eletrodo E8018G como metal de adição. A composição química dos materiais utilizados é mostrada nas Tabela 1 e 2.

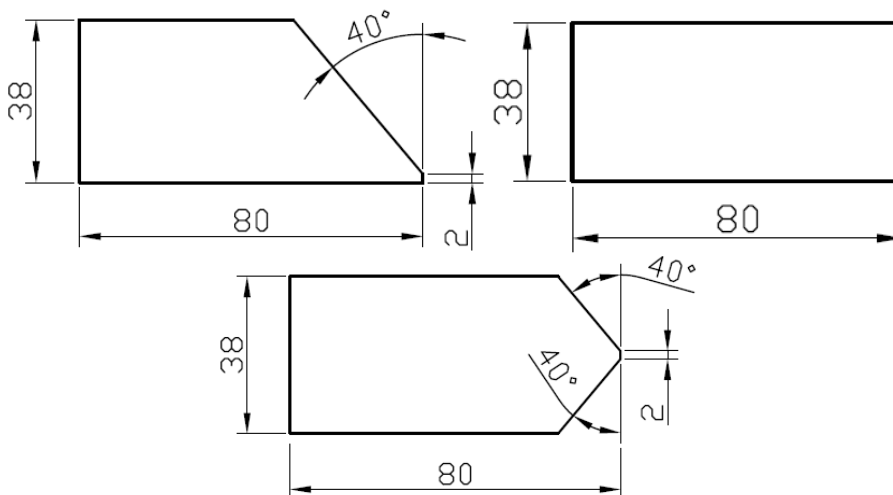
**Tabela 1.** Composição química do metal de base utilizado

	Composição, massa %							
	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb
ASTM A516 Gr. 70	0,23	0,24	1,11	0,016	0,01	0,043	0,01	0,002
	V	Ti	Cr	Ni	Mo	Sn	N	As
	0,002	0,003	0,02	0,02	0,01	0,001	0,0056	0,002

**Tabela 2.** Composição química do metal de adição utilizado

E8018G	Composição, massa %			
	C	Si	Mn	Ni
	0,06	0,4	1,10	1,65

Foram confeccionadas juntas chanfradas em meio-v e em x seguindo as especificações mostradas na Figura 1.



**Figura 1.** Desenho técnico dos chanfros confeccionados.

As amostras foram soldadas utilizando o processo eletrodo revestido. Em todos os ensaios, os dados de corrente e de tensão de soldagem foram adquiridos e as temperaturas de preaquecimento e de interpasse foram monitoradas em 150°C.

Todas as amostras foram soldadas utilizando os mesmos parâmetros de soldagem (10 kJ/cm, 165 A e 20 cm/min), no entanto, aquelas onde a técnica da dupla camada foi aplicada foram submetidas a um processo de amanteigamento de suas faces e só então foram soldadas utilizando os parâmetros de soldagem citados.

Os parâmetros empregados para o amanteigamento (Tabela 3) foram adquiridos através de trabalhos anteriores que se basearam no teste de Higuchi e no teste de Higuchi modificado para obtenção dos mesmos.<sup>(1)</sup> A

Tabela 4 apresenta todas as amostras utilizadas neste trabalho.

Durante todo o processo de amanteigamento a tensão de soldagem foi mantida em 24 V. A Figura 3 mostra a etapa inicial e final do processo de amanteigamento de uma das amostras soldadas com dupla camada.

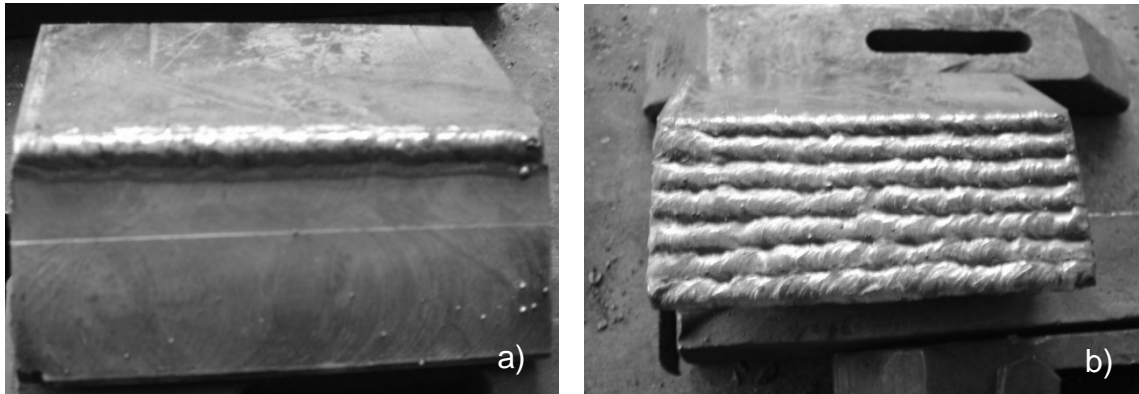
**Tabela 3.** Parâmetros de soldagem utilizados durante o amanteigamento dos corpos de prova soldados com dupla camada

Camada	Diâmetro do eletrodo(mm)	Corrente (A)	Velocidade (cm/min)	Energia (kJ/cm)
1º	3,25	80	24	4,8
2º	4,0	150	36	6,0



**Tabela 4.** Amostras soldadas para a análise da técnica da dupla camada

Amostra	Técnica de Soldagem	Tipo de chanfro
1	C	meio-V
2	DC	meio-V
3	C	X
4	DC	X



**Figura 2.** Exemplo do amanteigamento das amostras soldadas com dupla camada. a) início. b) final

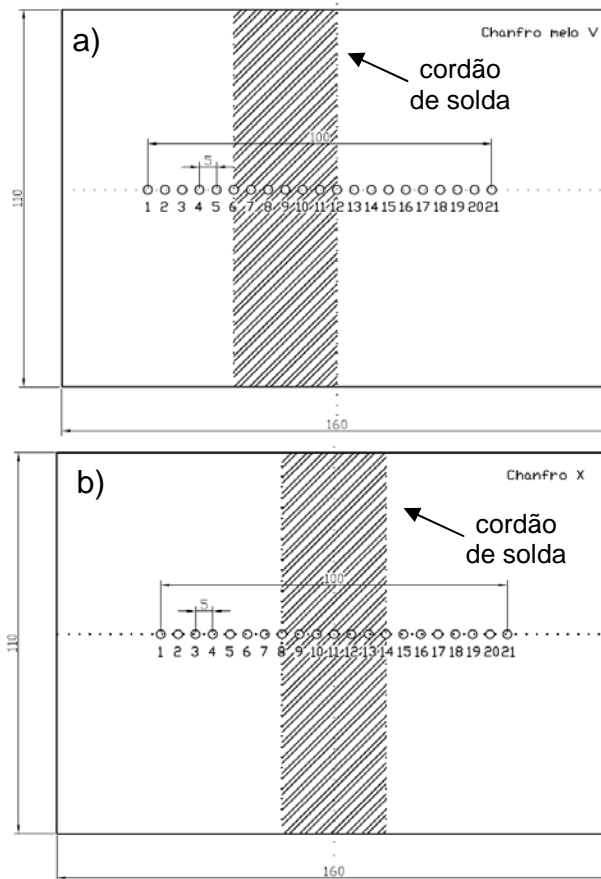
Todas as juntas foram soldadas com auxílio de referência de velocidade e com uma completa restrição imposta as mesmas, por meio de uma mesa de restrição, vista na Figura 3. Assim, foi garantida uma maior aproximação da condição real de soldagens em campo, onde a junta faz parte de uma estrutura bem maior e pesada, que promove um alto grau de restrição à solda.



**Figura 3.** Mesa para restrição das juntas meio-V e sistema de referência de velocidade.

Após a soldagem dos corpos de prova, os mesmos foram submetidos a um processo de remoção eletrolítica, onde foi removida uma fina camada superficial da região a ser analisada, de modo que efeitos de usinagem e de processamentos anteriores, como laminação, fossem minimizados e que fosse permitido medir tensões residuais oriundas apenas do processo de soldagem.

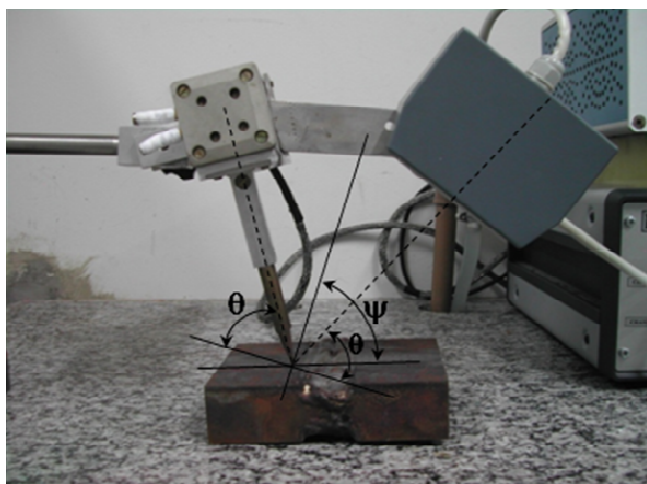
Cada amostra foi levada a um difratômetro de raios-x portátil, onde foi levantado o perfil de tensões residuais na superfície de enchimento e na raiz de todas as amostras soldadas. A disposição dos pontos analisados pode ser vista na Figura 4.



**Figura 4.** Disposição dos pontos onde foi feita a medição de tensões residuais.

As medições de tensões residuais foram realizadas utilizando-se o método do  $\sin^2\psi$ , com medidas realizadas para  $\psi = 0^\circ, 20^\circ, 35^\circ$ , e  $50^\circ$ . De forma a obter uma melhor sensibilidade do método, ou seja, a maior variação possível de pico  $\Delta\theta$  para uma dada deformação no reticulado cristalino  $\Delta d/d$ , foi escolhido o pico de difração em um ângulo  $\theta$  maior possível.<sup>(2)</sup>

Uma vez que o material utilizado neste trabalho possui uma estrutura ferrítica, a análise foi feita nos planos  $\{211\}$ , utilizando um feixe monocromático com comprimento de onda  $\lambda=2,2911 \text{ \AA}$ , obtido através de um tubo de raios-x com anodo de cromo. A tensão e a corrente utilizada foi de 20 kV e 50 mA, respectivamente. Todos os pontos foram medidos transversalmente ao cordão de solda. A Figura 5 mostra o conjunto (corpo de prova + difratômetro) onde podem ser vistos os ângulos ajustados para execução da análise de tensões residuais.



**Figura 5.** Montagem do difratômetro na amostra analisada.

Foi utilizado um programa comercial para construção dos difratogramas, interpolação dos mesmos e a conseqüente localização dos picos de difração. Foi usado o software Phillips X`pert Stress para calcular as tensões residuais e para elaboração dos perfis de tensões residuais e de microdureza foi utilizado programa gráfico comercial.

Feitas as medições de tensões residuais, os corpos de prova foram cortados em sua região central transversalmente aos cordões de solda e as regiões compreendendo a zona fundida (ZF), zona afetada pelo calor (ZAC) e metal base (MB) foram analisadas por ensaio metalográfico.

As regiões analisadas foram lixadas utilizando granulometria de 80 a 1200. Depois de lixadas as amostras foram então polidas utilizando pastas de 3  $\mu$ , 1  $\mu$  e  $\frac{1}{4}$   $\mu$  e finalmente foram atacadas quimicamente utilizando uma solução de Nital 2%.

O perfil de microdureza Vickers das juntas soldadas foi levantado na região analisada metalograficamente. A análise foi executada na zona fundida (ZF), zona afetada pelo calor (ZAC) e metal de base (MB), para verificar o efeito do ciclo térmico de soldagem, bem como da aplicação da técnica da dupla camada, sobre a dureza resultante no aço ASTM A516 Gr70.

### 3 RESULTADOS

Os perfis de tensões residuais transversais medidos ao longo das superfícies das amostras soldadas utilizando a técnica da dupla camada são mostrados na Figura 6.

Como pode ser visto os perfis de tensão residual encontrados nas amostras 2 e 4 possuem características semelhantes aos perfis encontrados em amostras do aço ASTM A516 g70 soldadas com multipasse,<sup>(3)</sup> e amostras soldadas com multipasse em geral<sup>(4-6)</sup> apresentando tensões trativas na ZAC e tensões compressivas no metal de solda das superfícies medidas, além de tensões trativas na raiz da Amostra 2 (chanfrada em meio-v).

Na Figura 7 pode ser visto o efeito da aplicação da técnica da dupla camada sobre a distribuição das tensões residuais resultantes.

Como pode ser visto, a aplicação da técnica da dupla camada resultou em um deslocamento da curva de distribuição das tensões residuais para baixo, ou seja, um determinado valor de tensões residuais compressivas foi adicionado aos perfis de tensões residuais obtidos com soldagem multipasse convencional.

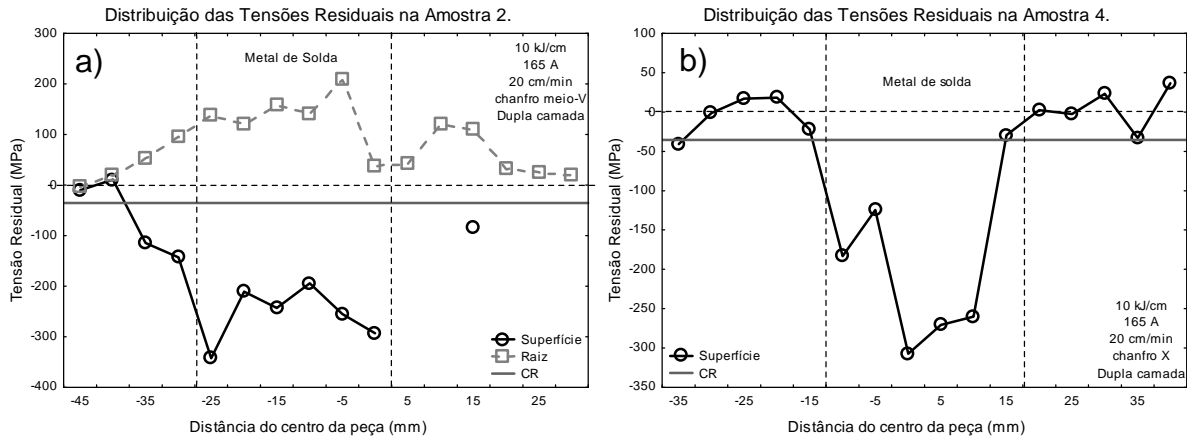


Figura 6. Distribuição das Tensões Residuais a) na Amostra 2 e b) na Amostra 4.

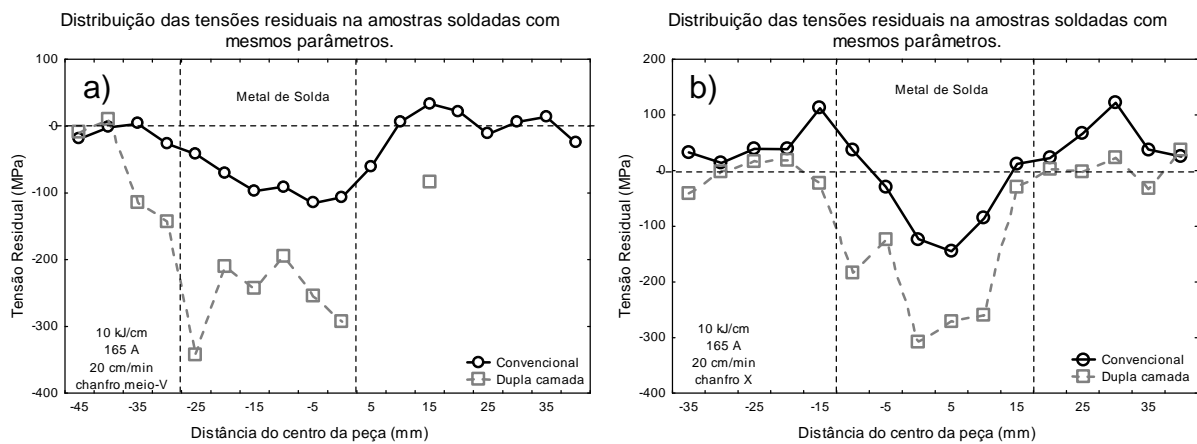
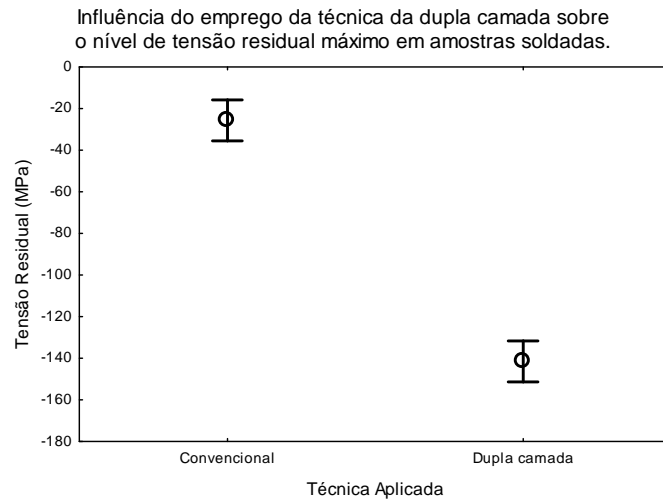


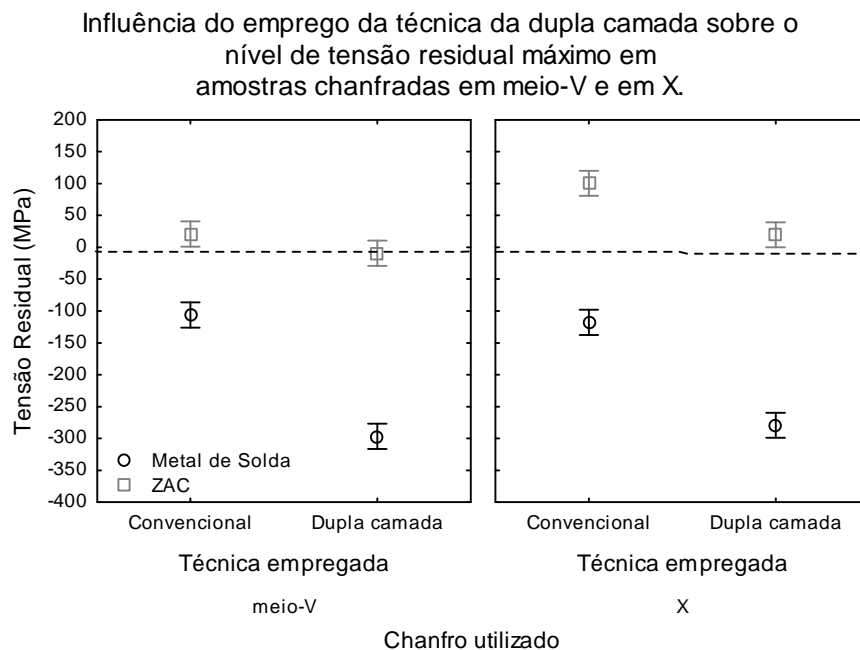
Figura 7. Distribuição das tensões residuais em amostras soldadas utilizando o método convencional e a técnica da dupla camada. a) chanfro meio-v. b) chanfro x.

A Figura 8 mostra a influência da aplicação da técnica da dupla camada sobre as tensões máximas nas amostras analisadas, independente do tipo de chanfro empregado e da região analisada. Como pode ser visto, a aplicação da técnica da dupla camada resultou de uma forma geral, em uma redução relevante dos níveis de tensão residual máximos da junta.

A Figura 9 mostra a influência da aplicação da técnica da dupla camada agora de forma dependente do tipo de chanfro empregado e da região analisada, confirmando o resultado mostrado na Figura 8, exceto para a ZAC da Amostra 2, que não apresentou variação significativa provavelmente devido ao menor número de pontos medidos nesta amostra.



**Figura 8.** Comparação do nível de tensão residual máxima em amostras soldadas utilizando técnica de soldagem convencional e dupla camada.

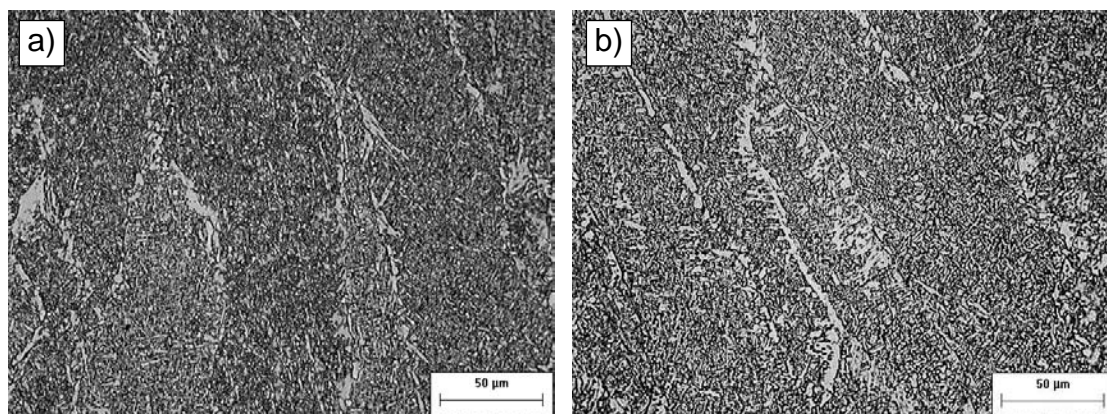


**Figura 9.** Comparação do nível de tensão residual máxima em amostras soldadas utilizando técnica de soldagem convencional e dupla camada para as diferentes regiões e tipos de chanfro analisados.

A microestrutura predominante no metal de solda das amostras analisadas é apresentada na Figura 10.

O metal de solda apresentou uma microestrutura composta basicamente por ferrita acicular - AF e ferrita de contorno de grão - PF(G). A Figura 12a, obtida através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), mostra a o comportamento microestrutural da ferrita acicular. Na Figura 12a pode ser visto também a ferrita de contorno de grão que envolve o grão da austenita prévia.

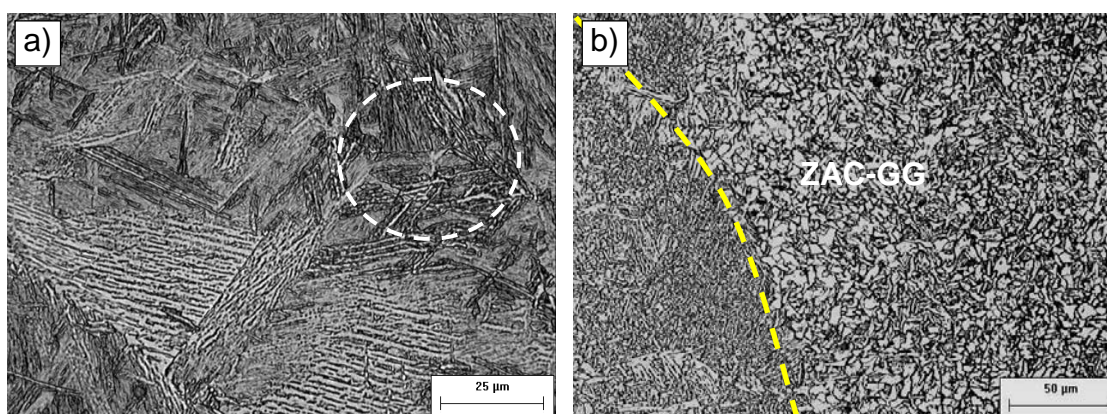




**Figura 10.** Microestrutura predominante no metal de solda das amostras analisadas. a) Amostra 2 (convencional). b) Amostra 11 (dupla camada). 500x. Ataque Nital 2%.

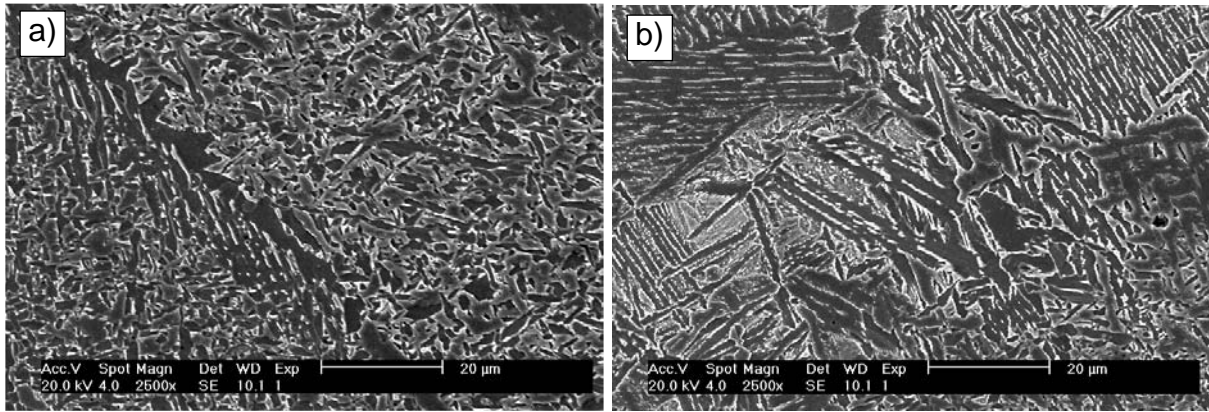
A Figura 11 mostra a região da ZAC-GG mais próxima da zona de ligação das amostras analisadas. Para a amostra soldada utilizando a técnica convencional pode ser observada a formação de microestruturas agulhadas (Figura 11a), onde por meio de MEV (Figura 12b), pode ser constatada a presença de Ferrita com segunda fase alinhada (bainita superior).

Para as amostras soldadas utilizando a técnica da dupla camada ocorreu o refinamento microestrutural da ZAC-GG, sendo a mesma substituída por uma região altamente refinada, mostrada na Figura 11b (interface entre a dupla camada aplicada e a ZAC do aço estrutural).

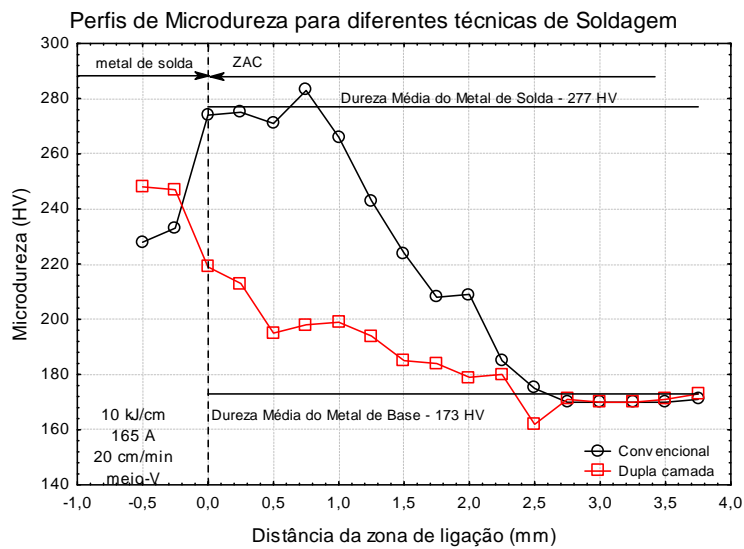


**Figura 11.** Microestrutura predominante na ZAC-GG das amostras analisadas. a) Amostra 2 (convencional) - 500x. b) Amostra 11 (dupla camada) - 1000x. Ataque Nital 2%.

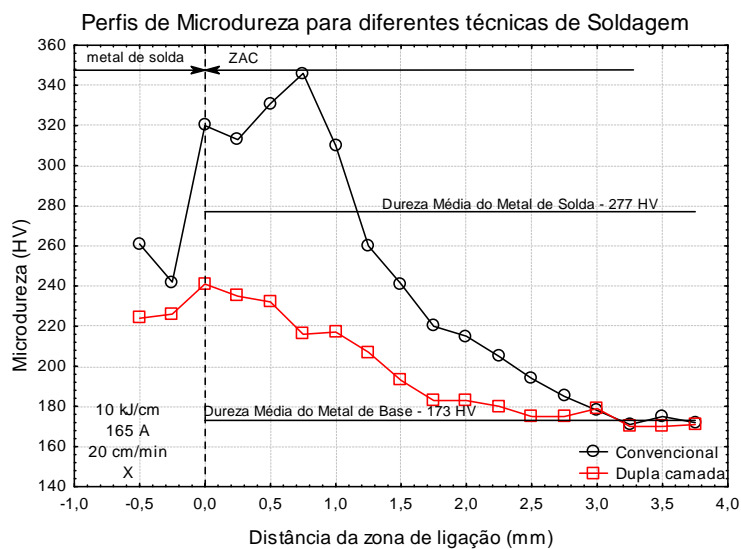
O refinamento microestrutural obtido na ZAC-GG das amostras soldadas utilizando a técnica da dupla camada (Figura 11b) foi acompanhado por um revenimento da microestrutura como pode ser comprovado na Figura 13 e Figura 14, que mostra os perfis de microdureza levantado nas amostras soldadas com e sem a aplicação da técnica da dupla camada.



**Figura 12.** Micrografias obtida em MEV. a) Metal de solda mostrando a estrutura entrelaçada da ferrita acicular - AF e a ferrita de contorno de grão - PF(G). b) Ampliação da região em destaque apresentada na Figura 11a. 2500x. Ataque Nital 2%.



**Figura 13.** Perfis de microdureza para as amostras soldadas com e sem a aplicação da técnica da dupla camada. Chanfro meio-v.



**Figura 14.** Perfis de microdureza para as amostras soldadas com e sem a aplicação da técnica da dupla camada. Chanfro x.

Como pode ser visto, uma considerável redução de dureza foi conseguida através da eliminação de microconstituintes como a Ferrita com segunda fase alinhada (bainita superior) na ZAC-GG, mostrando a eficácia da técnica da dupla camada.

#### **4 DISCUSSÃO**

O refinamento e o revenimento microestrutural obtido nas amostras soldadas utilizando a técnica da dupla camada, resultado este já encontrado por alguns autores,<sup>(7-10)</sup> pode estar ligado ao alívio de tensões percebido nas regiões da ZAC-GG das amostras analisadas.

Esta possível relação ainda não é bem clara e sua análise não se torna simples devido aos vários fatores que envolvem o estudo das tensões residuais. Por exemplo, a substituição de uma microestrutura mais dura (ferrita acicular) e possivelmente com menor ductilidade, por uma estrutura mais refinada e de provavelmente maior ductilidade, como ocorreu nas amostras soldadas com a técnica da dupla camada, pode estar ligada a redução nos níveis de tensão residual tratativa encontrada nas regiões próximas aos limites do metal de solda/metal de base (ZAC-GG) das mesmas, uma vez que uma microestrutura com maior ductilidade e menor limite de escoamento, permite maior deformação plástica e assim um possível alívio de tensões nesta região. Outros fatores devem estar associados ao resultado encontrado, no entanto, estudos mais aprofundados devem ser realizados de modo a esclarecer melhor a influência dos mesmos sobre as tensões residuais geradas na juntas.

O refinamento e o revenimento microestrutural conseguido através da aplicação da técnica da dupla camada por si só já auxilia na prevenção de falhas por fissuração, pois, em muitos casos, níveis elevados de tensões residuais não são suficientes para nucleação e propagação de uma trinca, já que se o material soldado apresentar microestruturas com boa ductilidade e tenacidade, provavelmente a falha não ocorrerá.

Desta forma, a comprovação de que a técnica da dupla camada além de promover todos os benefícios microestruturais já conhecidos, pode ajudar na redução dos níveis de tensões residuais resultantes na junta, indicará que o emprego da mesma pode aumentar a confiabilidade de estruturas de elevado risco, a segurança do equipamento e diminuir os custos gerados por manutenção.

#### **5 CONCLUSÃO**

A técnica da dupla camada mostrou-se uma ferramenta bastante útil à soldagem do aço ASTM A516 Gr70, pois além de promover o refinamento e o revenimento da ZAC-GG das amostras soldadas, acrescentou tensões residuais compressivas ao longo do metal de solda e da ZAC das amostras analisadas nesse trabalho.

#### **Agradecimentos**

Os autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Engenharia de Soldagem e Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Federal do Ceará pela realização dos experimentos, além do CNPq e FINEP pelo suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS

- 1 RELATÓRIOS TÉCNICOS ENGESOLDA. Aplicação da dupla camada na soldagem de aços ASTM A516 Gr.70 – Etapa Teste de Higuchi. 2008.
- 2 NOYAN I. C.; COHEN, J. B. Residual stress: measurement by diffraction and interpretation. New York: Springer. 1987.
- 3 OLIVEIRA, G. L. G. ; SILVA, T. F. ; MIRANDA, H. C. ; MOTTA, M. F. . Avaliação das tensões residuais em amostras de aço ASTM A516 Gr70 soldadas com multipasse. In: 64 Congresso da ABM, 2009, Belo Horizonte. Anais do 64 Congresso da ABM, 2009.
- 4 LU, J. Handbook of measurement of residual stress. Society of Experimental Mechanics. 1992.
- 5 LEE, H. W.; KANG, S. W. The relationship between residual stresses and transverse weld cracks in thick steel plate. Welding Journal. 225-S to 230-S. 2003.
- 6 SHIM, Y. et. al. Determination of residual stresses in thick-section weldments. Welding Journal 71(9): 305-s to 312-s. 1992.
- 7 AGUIAR, W. M. Soldagem do aço ABNT 4140 sem tratamento térmico posterior. 2001. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará - CE.
- 8 AZEVEDO, A. G. L., Aplicação da técnica da dupla camada na soldagem do aço ABNT 1045. 2002. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará - CE.
- 9 CRUZ, R. L. S. Avaliação dos efeitos da técnica da dupla camada na soldagem do aço ASTM A516 Gr60. 2006. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará - CE.
- 10 TEIXEIRA, J.C.G.; POPE, A.M. Técnica de Deposição em Dupla Camada para Reparos e Modificações sem Tratamento Térmico Pós-soldagem de Aço 1 Cr-0.5Mo. Soldagem e Materiais vol.4n2. p.23-27. 1992.