ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DE JUNTAS SOLDADAS DE UM AÇO ARBL BIFÁSICO¹

William dos Santos Costa² Maria da Penha Cindra Fonseca³ Juan Manuel Pardal⁴ Leandro Dias Lima⁵ Sérgio Souto Maior Tavares⁶

Resumo

Uma das formas de redução de peso nos veículos automotores é a substituição do aço carbono convencional utilizado por aço de alta resistência e baixa liga (ARBL), que possibilita a utilização de chapas de menores espessuras. Este estudo faz uma avaliação das propriedades mecânicas (microdureza, tenacidade e resistência à tração) e microestruturais de juntas soldadas pelo processo de soldagem a arco elétrico TIG autógeno e com metal de adição, comparando-as com as propriedades apresentadas pelo metal de base. As superfícies de fratura foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura e a microestrutura, tanto do metal de base quanto das juntas soldadas, foi analisada por microscopia ótica.

Palavras-chave: Aços ARBL bifásicos; Juntas soldadas; Propriedades mecânicas.

MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES ANALYSIS OF DUAL-PHASE HSLA STEEL WELDED JOINTS

Abstract

Weight reduction of the automachine vehicles can be obtained by the substitution of the conventional carbon steel for the thicker shapes of high-strength low alloy (HSLA) steel. In this study mechanical and microstructural behavior are available of welded joints by GTAW arc welding process, with and without addition metal. The mechanical properties: microhardness, toughness and tensile strength of the welded joints are compared with the properties of the base metal. The fracture surfaces has been analyzed by scattering electronic microscopy (SEM). Obtained microstructures of each condition were analyzed by optical microscopy.

Key words: Dual-phase HSLA steel; Welded joints; Mechanical properties.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense – PGMEC.

³ Professora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense – PGMEC.

 ⁴ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense
 – PGMEC.

⁵ Aluno de iniciação científica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense – UFF.

⁶ Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense – PGMEC.

1 INTRODUÇÃO

Novos aços de alta resistência e baixa liga têm sido desenvolvidos nos últimos anos para atender a demanda por redução de peso dos veículos e a conseqüente melhoria da eficiência no consumo de combustível. Estes aços devem apresentar uma combinação de propriedades que alia boa conformabilidade com elevada resistência mecânica, possibilitando redução da espessura sem acarretar perda no desempenho do componente.⁽¹⁻²⁾

Como principais características, os aços bifásicos apresentam boa conformabilidade, alta taxa de encruamento inicial, limite de resistência elevado (similar ao dos aços de alta resistência baixa liga ferrítico-perlíticos) e ausência de patamar de escoamento. Todas essas características são bastante apreciadas para aplicação em componentes, tais como rodas, discos e longarinas.

Considerados aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), os aços bifásicos apresentam microestrutura constituída por 80% a 90% de ferrita poligonal, e 10 a 20% de "ilhas" de martensita dispersas na matriz ferrítica, obtidas durante a austenização na zona intercrítica (campo de estabilidade de ferrita e austenita no diagrama de equilíbrio Fe-C), seguida de resfriamento rápido para transformação da austenita previamente formada em martensita. Da predominância na microestrutura destas fases advém o termo bifásico; contudo pequenas quantidades de outras fases ou microconstituintes (como bainita, austenita retida e perlita) podem estar presentes. Apresentando teor de carbono próximo a 0,1 %, obtém-se nestes aços limite de resistência em torno de 600 MPa, e o limite de escoamento típico é de 310 a 345 MPa. Por apresentarem baixo limite de escoamento e ainda comportamento contínuo no escoamento, estes aços podem ser conformados como os aços de baixa resistência. Contudo, as pecas produzidas apresentam elevada resistência mecânica devido ao seu elevado coeficiente de encruamento. Além disso, apresentam um alongamento total superior a qualquer outro aço ARBL de resistência similar, além de alongamento uniforme superior a 18%.⁽³⁾

Embora a principal utilização destes aços ainda seja no setor automobilístico, aplicações no setor nuclear também têm sido experimentadas.⁽⁴⁻⁵⁾

O principal objetivo do presente trabalho foi a caracterização das juntas soldadas pelo processo TIG (GTAW), autógeno com proteção de Ar e He e com metal de adição com proteção de Ar, avaliando as propriedades mecânicas obtidas nas juntas soldadas em comparação com o metal de base e com as modificações microestruturais resultantes das alterações provocadas pela soldagem na microestrutura bifásica destes aços.

2 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

No presente trabalho foi utilizado um aço ARBL DP 600 produzido pela USIMINAS, em forma de chapa, com dimensões de 623 x 467 x 4,15 mm de espessura, cuja composição química é mostrada na Tabela 1.

С	Si	Mn	Р	S	Al	Cu	Nb	V	Ti	Cr	Ni
0,0522	0,98	1,19	0,014	0,001	0,040	0,001	0,004	0,002	0,002	0,07	0,02

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

O material foi soldado pelo processo manual TIG (GTAW), sob três condições distintas:

- Soldagem TIG autógena sob proteção de hélio;

- Soldagem TIG autógena sob proteção de argônio;

- Soldagem TIG com metal de adição e proteção de argônio.

Foram produzidas juntas de topo e o processo foi realizado em posição plana, mantendo-se o sentido de laminação do material. As chapas foram cortadas com as dimensões de 310 mm x 115 mm, chanfradas e presas por fixadores na operação de soldagem para evitar distorções. A soldagem foi cronometrada e a velocidade calculada a partir do comprimento da junta.

Na Tabela 2 são apresentadas as variáveis de soldagem especificadas para a condição de soldagem TIG autógena sob proteção de hélio. Esse procedimento foi realizado sem tratamento térmico de pré-aquecimento. Cabe destacar que nos processos sem material de adição foram realizados dois passes, um em cada lado de chapa soldada, sendo identificados como Lado 1 e Lado 2.

Região	Corre	ente	Tensão	Velocidade	Vazão He (I/min)	
	Tipo e Polaridade	(A)	(V)	(mm/min)		
Lado 1	CC-	143	13	255	11	
Lado 2	CC-	143	13	192	11	

 Tabela 2. Variáveis de Soldagem TIG autógena sob proteção de hélio.

Na Tabela 3 são apresentadas as variáveis de soldagem para a condição de soldagem TIG autógena sob proteção de gás argônio. O procedimento foi realizado sem tratamento térmico de pré-aquecimento.

Região	Corre	ente	Tensão	Velocidade	Vazão Ar (I/min)	
	Tipo e Polaridade	(A)	(V)	(mm/min)		
Lado 1	CC-	163	12	140	10	
Lado 2	CC-	163	12	139	10	

 Tabela 3. Variáveis de Soldagem TIG autógena sob proteção de argônio.

Na Tabela 4 são apresentadas as variáveis de soldagem para a condição de soldagem TIG com metal de adição e sob proteção de gás argônio. O procedimento foi realizado sem tratamento térmico de pré-aquecimento.

Tabela	4 . 1	Variáveis	de	Soldagem	TIG	com	metal	de	adic	:ão e	e prote	cão	de	Ar.
			~ ~			••••			~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~			30.0		

Metal de Adição			Corrente e	Tensão	Velocidade	Vazão ∆r
Arame	F-N°	Ø (mm)	Polaridade (A)	(V)	(mm/min)	(I/min)
ER			100 a 150			
80SD2	6	2,4	CC-	10	106,2	10

Foi usado um eletrodo de tungstênio toriado (EWTh-2) com diâmetro de 2,4 mm e ângulo de ponta de 60° com comprimento de arco de 3 a 4 mm. É necessário destacar que os passes em todos os processos foram efetuados sem oscilação do eletrodo.

Para esta condição de soldagem foram utilizadas varetas para solda da marca comercial Böhler Thyssen Welding, com composição química conforme Tabela 5.

abela 5. Composição dumica do metal de adição.										
С	Si	Mn	Р	S	Ni	Мо	Cu			
0,077	0,730	1,820	0,009	0,008	0,040	0,440	0,200			

Tabela 5. Composição química do metal de adição.

Do material como recebido e para cada condição de soldagem foram usinados 5 corpos-de-prova Charpy reduzidos para ensaio de impacto segundo a norma ASTM EB-23-94b com 55 x 10 mm e 2,5 mm de espessura. Eles foram confeccionados no sentido de laminação das chapas e o entalhe foi posicionado no centro do cordão de solda. Cinco corpos-de-prova de tração segundo a norma ASTM A 370-88. Para medidas de microdureza foi confeccionado um corpo-de-prova para cada condição de soldagem.

Os ensaios de tenacidade Charpy foram realizados à temperatura ambiente numa máquina do tipo pêndulo universal com capacidade máxima de 300J.

Os ensaios de tração foram realizados sob carregamento quase-estático em uma máquina servo-hidráulica, automatizada, com célula de carga de 100 KN.

Para a realização dos ensaios de microdureza pelo método Vickers foi utilizado um microdurômetro eletrônico com cargas de 0,5 kgf. As amostras foram preparadas pelo procedimento usual e atacadas com Nital a 2 % para a revelação do cordão de solda. As identações foram realizadas ao longo do metal de base, zona termicamente afetada (ZTA) e no metal de solda (MS) de cada condição de soldagem.

As amostras para análise metalográfica foram retiradas das juntas soldadas ou metal de base e preparadas pelo procedimento usual e atacadas com Nital a 2%. Por MEV foram realizadas fractografias das superfícies de fratura dos corpos-deprova dos ensaios Charpy.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O cálculo da energia de soldagem para cada processo foi feito conforme a equação 1 e os resultados são apresentados na Tabela 6. Os maiores valores foram encontrados para o processo TIG autógeno, com proteção de Ar.

$$E = \frac{n \times V \times I}{v} \tag{1}$$

onde:

E = energia de soldagem, em J/mm;

n = eficiência térmica do processo;

V = tensão no arco, em V;

I = corrente de soldagem, em A;

v = velocidade de soldagem, em mm/s.

Processo	Energia de Soldagem (J/mm)				
11006330	Lado 1	Lado 2			
TIG autógena sob proteção de He	284,32	377,61			
TIG autógena sob proteção de Ar	545,67	548,02			
TIG com metal de adição e proteção de Ar	459,04	459,04			

As medidas de microdureza foram determinadas para cada condição de soldagem e foram efetuadas no metal de base (MB), na zona termicamente afetada (ZTA) e no metal de solda ou zona fundida (ZF). As Figuras 1,2 e 3 apresentam os perfis de microdureza obtidos ao longo das juntas, onde os maiores valores de microdureza foram encontrados no centro dos cordões de solda, sendo que a condição que apresentou microdureza mais elevada foi a soldagem TIG com metal de adição e proteção de Ar, com 278 Hv no centro do cordão de solda.



Figura 1. Perfil de microdurezas obtido no processo de soldagem TIG autógeno com proteção de He.



Figura 2. Perfil de microdurezas obtido no processo de soldagem TIG autógeno com proteção de Ar.



Figura 3. Perfil de microdurezas obtido no processo de soldagem TIG com metal de adição e proteção de Ar.

Os resultados dos ensaios de tenacidade mostram que a condição de soldagem autógena com proteção de He apresentou valores levemente superiores de tenacidade, com uma média de 36J, entretanto, a soldagem autógena com proteção de Ar apresentou uma média de 35J. Os valores de tenacidade das amostras da condição de soldagem com metal de adição utilizando como proteção gas Ar foram em média 31 J. As amostras do metal de base apresentaram uma energia absorvida média de 33J.

Nos ensaios de tração os valores do limite de resistência das amostras do metal de base estão ligeiramente abaixo daqueles fornecidos pelo fabricante e encontrados por outros autores.^(1,2) Entretanto, para as juntas soldadas, em todas as condições de soldagem, estes valores são ainda menores, conforme mostra a Tabela 8. As modificações microestruturais devidas ao processo de soldagem influenciaram nos valores do limite de escoamento e ruptura do material, onde altos valores do coeficiente de encruamento são característicos neste tipo de aços. Destes fenômenos pode-se mensurar através do coeficiente *r*, da Tabela 8, como cada processo de soldagem afetou qualitativamente as propriedades mecânicas do aço bifásico, característico de possuir um *r* elevado. Da Tabela 8 pode-se concluir que todos os processos de soldagem afetaram quase da mesma maneira o coeficiente *r*.

Verifica-se também que, os menores valores nas tensões de escoamento e ruptura foram encontrados para a condição de soldagem com metal de adição. Os valores de limite de escoamento para todas as condições de soldagem estão acima dos previstos pelo fabricante, sendo que para as condições de soldagem autógena, tanto com proteção de Ar quanto com He, os valores são ainda mais elevados. Em relação ao alongamento, os resultados encontrados no metal de base são coerentes com o fabricante e a literatura, não se observando diferenças significativas com relação às juntas soldadas.

Condição	σ _{LE} (MPa)	σ _{LR} (MPa)	$r = \sigma_{LR} / \sigma_{LE}$	£ (%)
Metal de base	330	549	1,66	18,1
Soldagem Autógena He	422	510	1,20	17,9
Soldagem Autógena Ar	420	522	1,24	15,2
Soldagem com metal de adição	389	505	1,29	16,0

Tabela 8. Propriedades mecânicas.

As Figuras 4 a 7 apresentam fractografias das superfícies de fratura do metal de base, da zona fundida da soldagem TIG autógena sob proteção de He, da zona fundida da soldagem TIG autógena sob proteção de Ar e da zona fundida da soldagem TIG com metal de adição, respectivamente. Todas elas foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com aumento 2000 X. Estas fractografias são coerentes com os resultados apresentados de tenacidade ao impacto Charpy. Nestas fractografias são observados microvazios ou "*dimples*" característicos de fratura dúctil.



Figura 6. MEV, soldagem TIG autógena, com Ar. Figura 7. MEV, soldagem TIG, proteção de Ar.

A Figura 8 apresenta a microestrutura bifásica característica do aço estudado e soldado nas três condições, onde são observados grãos equiaxiais de ferrita com ilhas de martensita (regiões escuras) uniformemente distribuídas. As Figuras de 9 a 12 mostram as microestruturas da condição de soldagem TIG autógena, com proteção de He e Ar. É possível observar como a microestrutura bifásica original do metal de base foi modificada pela soldagem, em ambas as condições.



Figura 8. Microestrutura do Metal de Base: Aumento 960X.



autógena, com Ar. Aumento 960X. autógena, com Ar. Aumento 960X.

As microestruturas obtidas por microscopia ótica, das amostras soldadas pelo processo TIG, com metal de adição e proteção de Ar, são mostradas nas Figuras 13 e 14.

Todas as micrografias exibem as mesmas características e tendências, tanto na ZTA como no metal de solda. Nas micrografias 9, 11 e 13, observa-se um crescimento de grão considerável na ZTA, mas não evidenciaram modificações substanciais nas propriedades mecânicas, como indicaram as medições de microdureza. Nas Figuras 10 e 12, apesar de existir grãos grosseiros de ferrita poligonal verifica-se a provável formação nos contornos de ferrita acicular, o que justifica os altos valores de tenacidade do metal de solda. Entretanto, na Figura 14 é observada no metal de solda uma microestrutura mais refinada devido aos elementos de liga do metal de adição, atingindo valores de microdureza maiores em relação aos outros processos de soldagem, mas não se observaram modificações substanciais nos valores de tenacidade.



com metal de adição e proteção de Ar. Aumento: 960X. IIG com metal de adição e proteção de Ar. Aumento: 960X.

4 CONCLUSÕES

Os resultados encontrados no presente trabalho permitem concluir que:

- Os valores de microdureza do metal de solda nos processos estudados encontram-se acima dos valores obtidos para o metal de base. No que se refere à ZTA não houve mudanças substanciais na dureza em relação ao metal de base.
- 2. Os valores de tenacidade ao impacto experimentaram pequenas mudanças relativas, tanto no metal de base, quanto na ZTA e no metal de solda.
- Os resultados obtidos nos ensaios de tração permitem concluir que houve uma diminuição da relação entre a tensão de ruptura e tensão de escoamento das juntas soldadas destes aços, para os três processos de soldagem estudados.
- 4. As micrografias analisadas nos três processos de soldagem, exibem as mesmas características e tendências, tanto na ZTA, quanto no metal de solda. Nas micrografias referentes ao metal de solda, apesar de existir grãos grosseiros de ferrita poligonal, existe a provável formação nos contornos de ferrita acicular, o que justifica os altos valores de tenacidade encontrados no metal de solda.
- 5. Apesar da microestrutura do metal de solda não possuir a característica microestrutural bifásica destes aços, a mesma pode ser re-transformada mediante um adequado tratamento térmico pós-soldagem. Trabalhos futuros deverão ser realizados no sentido de viabilizar este tipo de tratamento térmico.

Estas conclusões permitem estabelecer que o aço ARBL DP 600 pode ser soldado pelos processos estudados no presente trabalho.

Agradecimentos

Os autores agradecem à USIMINAS, que gentilmente cedeu o material e à CAPES pelo suporte financeiro, que permitiram a realização do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 E.M. Rodrigues, R. H. Pedrini, J.R.B. Cruz, J.A. Gritti, L.C. Cândido, L.B. Godefroid, *Anais do 58° Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, 2003, pp.2524-2533.*
- 2 K.V. Sudhakar, E.S. Dwarakadasa, *Bulletin of Materials Science*, vol.23(3) (2000) pp.193-9.
- 3 G.R. Speich, R.L. Miller, Industrial Heating, January (1982) pp.23-6.
- 4 S. H. Kim, W. S. Ryu, I. H. Kuk, *Journal of the Korean Nuclear Society*, vol.31(6) (1999) pp. 561-71.
- 5 N. Igata, Journal of Nuclear Materials, vol.133-134 (1985) pp.141-8.