

AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS COMPORTAMENTAIS DE UM AÇO SILICIOSO DE GRÃOS ORIENTADOS SOLDADO PELO PROCESSO TIG¹

Sheila Medeiros de Carvalho²
Paulo Sérgio de Sairre Bálamo³
Ronie Magno Pinheiro de Souza⁴
Leonardo Barbosa Godefroid⁵
Luiz Cláudio Cândido⁵

Resumo

Neste trabalho foram soldadas chapas de aços siliciosos de grão orientado (GO), empregando-se o processo ao arco elétrico, com proteção gasosa, TIG (*Tungsten Inert Gás*), com metal de adição de aço inoxidável austenítico do tipo AISI 308L. Os materiais foram caracterizados química, mecânica e metalograficamente. Utilizou-se o sistema de microscopia eletrônica de varredura, através de EDS, para caracterização de fases presentes nos materiais. Verificou-se a presença de martensita na região da zona fundida e a presença de óxidos na região da zona termicamente afetada. Foi verificado nas análises microfratográficas de corpos-de-prova das bobinas a quente, ensaiados por tração, que os mesmos romperam na região do metal base, e sofreram fratura semi-frágil; no entanto, os corpos-de-prova das bobinas a frio, romperam na zona fundida e sofreram fratura semi-frágil e frágil. A decorrência da variação de propriedades mecânicas do material soldado deve-se a heterogeneidade microestrutural do mesmo. Procurou-se estabelecer especificações de procedimentos de soldagem que apresentavam melhor desempenho da união em termos de resistência à fratura.

Palavras-chave: Aços siliciosos; Soldagem; Propriedades mecânicas

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

² Engenheira Metalurgista; RDM; sheila_mcarvalho@yahoo.com.br

³ Engº Mecânico.; M.Sc.; D.Sc; ACESITA; pbalsamo@acesita.com.br

⁴ Engenheira Metalurgista; ACESITA S.A.; ronie@acesita.com.br

⁵ Engº Metal.; M.Sc.; D.Sc; Membro da ABM; Prof. Adjunto; Grupo de Estudos sobre Fratura de Materiais; Dep. Eng. Metalúrgica e de Materiais – Escola de Minas/UFOP; candido@em.ufop.br; leonardo@demet.em.ufop.br

INTRODUÇÃO

Os aços ao silício GO, são ligas Fe-Si com um teor de aproximadamente 3,10 a 3,20 % de Si, e um baixíssimo teor de carbono (inferior a 30 ppm). Estes materiais se caracterizam por apresentar uma grande orientação preferencial de grãos, o que proporciona uma forte anisotropia em relação às propriedades magnéticas. São aplicados principalmente em núcleos de transformadores.

Sabe-se que, atualmente, não existe um estudo crítico sobre a melhor condição de soldagem de aços siliciosos, sendo utilizado apenas o metal de adição do tipo ER308L. Além disto, existem problemas de trincamento após a soldagem com este material, o que leva a necessidade de conhecer melhor a soldabilidade do mesmo.

A fragilização da junta soldada causa ruptura na etapa de laminação gerando “sucatamento”, retrabalho e atraso de produção. A maior incidência de ruptura da solda está no rolo defletor da bobinadeira, onde há solicitação conjunta esforços de dobramento e tração.

Este trabalho avaliou as características comportamentais de um aço ao silício de grão orientado, soldado, através do processo de soldagem TIG, com metal de enchimento de um aço inoxidável austenítico do tipo AISI 308L.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Realizou-se a soldagem pelo processo TIG, em chapas de aços siliciosos de grão orientado (GO), de várias bobinas, usando como metal de enchimento o aço inoxidável do tipo AISI 308L. As chapas foram divididas em duas categorias: as de espessura de 2,7 mm, corpo-de-prova 1 (CP₁), que foram somente laminadas a quente (denominadas BQs) e as de espessura de 0,70 mm, corpos-de-prova 2, 3, 4 e 5, que após serem laminadas a quente, foram laminadas a frio (BFs).

Este trabalho foi dividido em dois procedimentos de soldagem: A 1ª etapa consistiu na soldagem de diferentes bobinas de aço ao silício de grão orientado com os parâmetros de soldagem industriais [250A; gás: argônio (98%); vazão de 25 CFH]. Os materiais para as análises foram divididos em CP_{1a}, CP_{1b} e CP_{1c} (lado de acionamento, meio e lado de operação da bobina, respectivamente) para os corpos-de-prova vindo das BQs e CP₂, CP₃, CP₄ e CP₅ para os CPs vindo das BFs. Na 2ª etapa foram realizadas oito soldas em uma única chapa de aço ao silício GO, onde variou-se a corrente aplicada e a vazão de gás, mantendo os outros parâmetros de soldagens constantes. Após o procedimento de soldagem nas BQs, retiraram-se amostras para ensaios (CPs₆₋₉), em seguida o material foi laminado a frio (BFs) dando origem aos CPs₍₁₀₋₁₂₎.

As Tabelas 1 e 2 apresentam a composição química dos aços. A Figura 1 mostra fotomicrografias do material. A Tabela 3 mostra as variações utilizadas em alguns parâmetros de soldagem, e os seus respectivos corpos-de-prova. As Tabelas 4 e 5 mostram algumas propriedades mecânicas obtidas destes materiais, para os CPs com espessura de 2,7 mm (BQs) e 0,70 mm (BFs), respectivamente.

Tabela 1. Composição química nominal do material (% peso).

C (ppm)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Al (%)	Cu (%)	N ₂ (ppm)
400	0,05	3,15	0,008	0,03	0,04	0,01	0,008	0,001	0,003	20

Tabela 2. Composição química do metal de enchimento – AISI 308L (% peso).

C (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mn (%)	P (%)
0,022	0,010	20,120	10,000	1,600	0,020

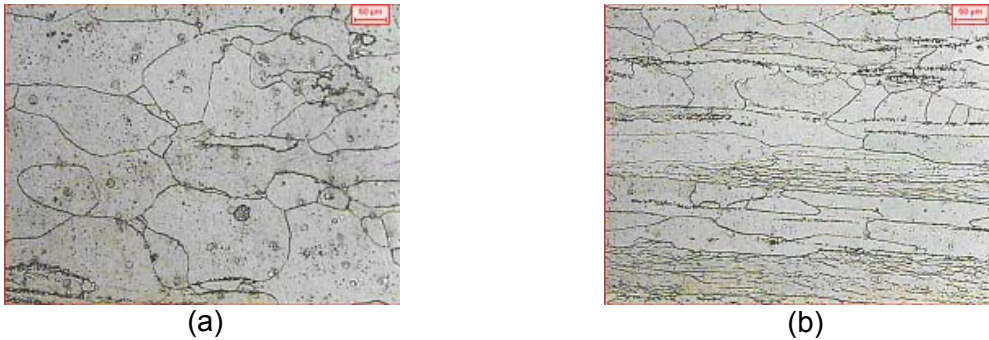


Figura 1. Fotomicrografias de um aço ao silício (BQs); (a) sentido transversal, 200X; b) sentido longitudinal, 200X; ataque: nital (2%).

Tabela 3. Parâmetros de soldagens que foram variados na 2ª etapa.

Corrente (A)	Vazão de Gás (CFH)	BQs	BFs
230	25	CP ₆	CP ₁₀
250	17	CP ₇	CP ₁₁
250	25	CP ₈	CP ₁₂
270	25	CP ₉	CP ₁₃

Tabela 4. Propriedades mecânicas das chapas (BQs) soldadas - 1ª etapa.

CPs	σ_{uts} (MPa)	σ_{ys} (MPa)	ϵ (%)	A (%)
CP _{1a}	523	449	14,86	51,06
CP _{1b}	563	452	14,29	52,68
CP _{1c}	588	493	16,19	52,11

Onde,

a - lado de acionamento da bobina; b - meio da bobina; c - lado de operação da bobina.

σ_{uts} - limite de resistência do material;

σ_{ys} - limite de escoamento do material;

ϵ - deformação uniforme;

A - estrição;

Tabela 5. Propriedades mecânicas das chapas (BFs) soldadas - 1ª etapa.

CPs	σ_{uts} (MPa)	σ_{ys} (MPa)	ϵ (%)	A (%)
CP ₂	734	720	*	*
CP ₃	422	422	*	*
CP ₄	870	843	*	*
CP ₅	778	778	*	*

*) - aproximadamente zero.

Tabela 6. Propriedades mecânicas das BQs soldadas - 2ª etapa.

CPs	σ_{uts} (MPa)	σ_{ys} (MPa)	ϵ (%)	A (%)
CP ₆	573,2	464,7	17,14	52,48
CP ₇	553,3	429,3	17,24	44,15
CP ₈	557,4	440,3	16,95	47,42
CP ₉	559,0	436,4	20,36	44,80

Tabela 7. Propriedades mecânicas das BFs soldadas - 2ª etapa.

CPs	$\sigma_{\text{uts.}}$ (MPa)	σ_{ys} (MPa)	ε (%)
CP ₁₀	1.015,7	663,2	0,9
CP ₁₁	1.004,3	689,4	0,9
CP ₁₂	947,3	744,3	0,4
CP ₁₃	1.004,7	805,3	1,2

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pode-se notar, nas Tabelas 4 e 5, que materiais oriundos das BQs as propriedades mecânicas foram diferentes, com pequena variação. O material apresentou boa tenacidade. No entanto, para a condição das BFs os valores foram mais distintos. Por exemplo, o CP₃ apresentou limites de escoamento e de resistência muito inferiores aos outros CPs. Destaca-se ainda a baixa ductilidade do material, onde os limites de escoamento e de resistência foram muito próximos. Nas análises metalográficas é possível verificar a presença de martensita e maclas nos materiais soldados e laminados a frio, o que poderia explicar o comportamento mecânico encontrado.

Pode-se notar nos CPs provenientes das BQs que os valores foram relativamente próximos, apesar das condições de soldagem serem diferentes; ou seja, por exemplo, para a mesma vazão de gás e amperagens diferentes (CP₆ e CP₈) os valores de algumas propriedades mecânicas foram semelhantes (Tabela 6). E ainda, para a mesma amperagem aplicada e vazão de gás diferente (CP₇ e CP₈), também não foi observada muita diferença. Isso mostra que em termos de propriedades mecânicas a variação dos parâmetros citados não foi significativa no material. Daí pode-se verificar que o emprego de parâmetros limites de amperagem (230A e 270A) não influenciou nas propriedades mecânicas analisadas. Entretanto, ressalta-se que em termos microestruturais notaram-se alterações na região do cordão de solda.

Nota-se na Tabela 7 um valor relativamente alto para o limite de resistência e escoamento do material. Esses valores certamente não correspondem a realidade, pois houve um problema de usinagem dos CPs, onde os raios de concordância dos mesmos não se encontravam de acordo com as normas para ensaios de tração, o que deve ter alterado os resultados. Por esse motivo, os CPs romperam na região do raio de concordância, fora da área útil do corpo-de-prova.

As Figuras 2 e 3 mostram os valores de dureza Vickers dos materiais, aplicando carga de 20 kg (BQs) e 10 kg (BFs), nas regiões do metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF), para os CPs das BQs e 0,70 mm das BFs.

Nota-se, na Figura 2, que o MB apresentou menores valores de dureza em relação a ZTA e a ZF, onde essas tiveram valores próximos. E ainda, que independentemente da posição de onde foram medidos os valores de dureza, ou seja, a - lado de acionamento da bobina; b - meio da bobina; c - lado de operação da bobina, os valores foram praticamente iguais.

No caso do material laminado a frio (BFs da 1ª etapa), Figura 3, notam-se grandes diferenças nos valores das regiões do cordão de solda. É preciso lembrar que esta condição foi para soldagem de materiais provenientes de bobinas diferentes, em decorrência de condições operacionais diferenciadas em termos de graus de resfriamento na armazenagem. Salienta-se que para esta condição os valores de dureza para as 3 regiões foram distintos, onde a ZTA correspondente aos CPs_(2,4,5)

apresentou-se mais macia. E ainda, em decorrência da microestrutura gerada no material, correspondente ao CP₂, o valor de dureza na ZF foi relativamente alto. No entanto, nos CPs_(3,4,5) os valores de dureza foram maiores no MB.

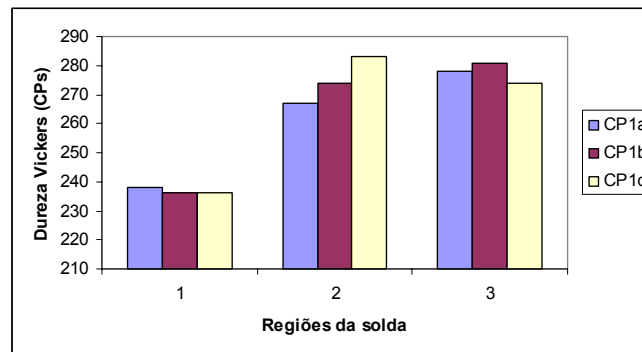


Figura 2. Dureza Vickers dos CPs das BQs, sentido transversal, carga 20 kg, nas regiões do MB (1), ZTA (2) e ZF (3) – 1ª etapa.

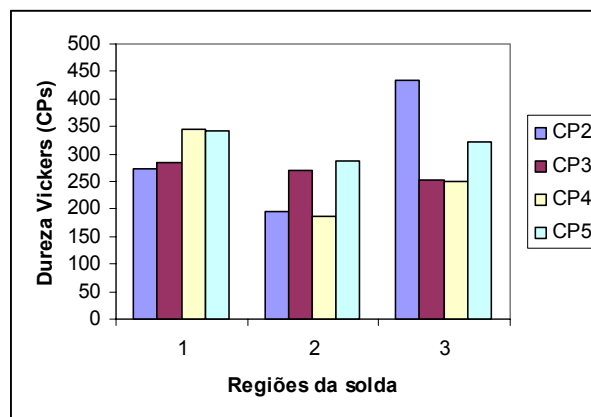


Figura 3. Dureza Vickers dos CPs das BFs, sentido transversal, carga 10 kg, nas regiões do MB (1), ZTA (2) e ZF (3) – 1ª etapa.

A partir das Figuras 4 e 5, pode-se verificar que o efeito do aumento da vazão do gás de proteção (CP₇ e CP₈) implicou num aumento de dureza nas regiões do cordão de solda (dados do CP₈). Provavelmente, o aumento da vazão do gás influenciou negativamente na blindagem (proteção) da poça de fusão, ocasionando arraste de gases para a mesma. Destaca-se o efeito da corrente elétrica na soldagem do material correspondente ao CP₉ onde ocorreu um aumento muito significativo da dureza ao longo do perfil do cordão. É importante ressaltar que, para esta condição de 270A, o eletrodo de tungstênio chegou a danificar (fundir) contaminando a poça de fusão. Pode-se notar na Figura 5 um aumento geral nos valores de dureza do material em decorrência do encruamento do mesmo.

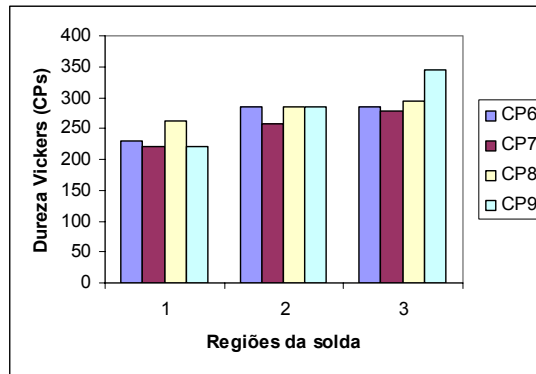


Figura 4. Dureza Vickers dos CPs das BQs, sentido transversal, carga 20 kg, nas regiões do MB (1), ZTA (2) e ZF (3) – 2ª etapa.

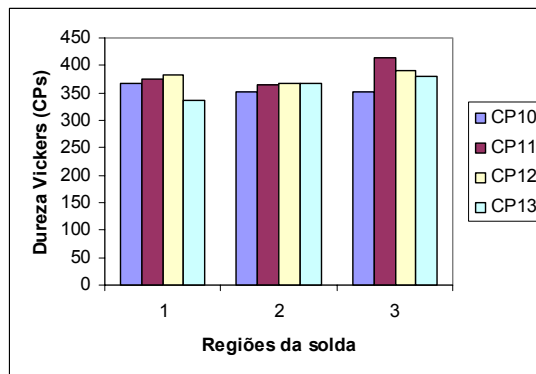


Figura 5. Dureza Vickers dos CPs das BFs, sentido transversal, carga 10 kg, nas regiões do MB (1), ZTA (2) e ZF (3) – 2ª etapa.

A Figura 6 mostra a fotomicrografia de um dos CPs₁ soldados. Observa-se na Figura 7 (a,b) a diferença no metal base das chapas soldadas, das bobinas correspondentes aos CPs da Figura 2. Destaca-se a recristalização na Figura 7 (b). A Figura 8 (a,b,c,d,) apresenta as fotomicrografias dos CPs₂. A Figura 9 (a,b,c) apresenta as fotomicrografias dos CPs₃₋₄. Nota-se presença de maclas de recozimento e martensita em contornos de grão, nas Figuras 9 (b) e 9 (c), respectivamente. A Figura 10 (a,b,c,d) apresenta as fotomicrografias dos CPs₅, nota-se a presença de trincas.



Figura 6. Fotomicrografia dos aços siliciosos GO soldados com aço inoxidável AISI 308L, CP_{1b}; MB₁ = metal base 1; MB₂ = metal base 2; ZF = zona fundida; reativo: Nital 2%; 25X.

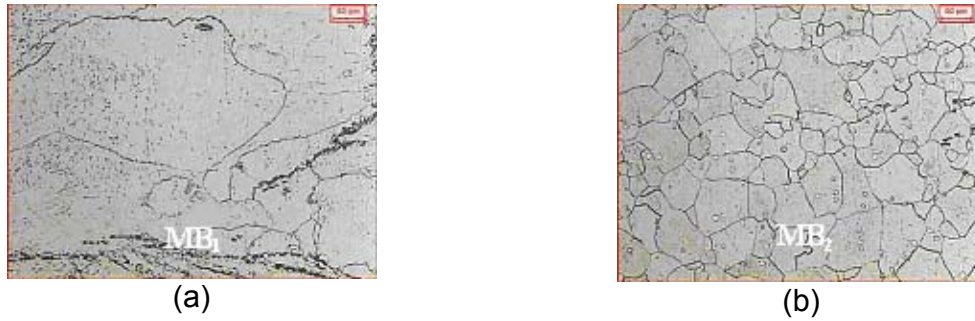


Figura 7. Fotomicrografias do CP_{1b} na região do MB; (a) bobina 1 (MB₁) e (b) bobina 2 (MB₂) – observa-se que o material foi recristalizado; 200X.

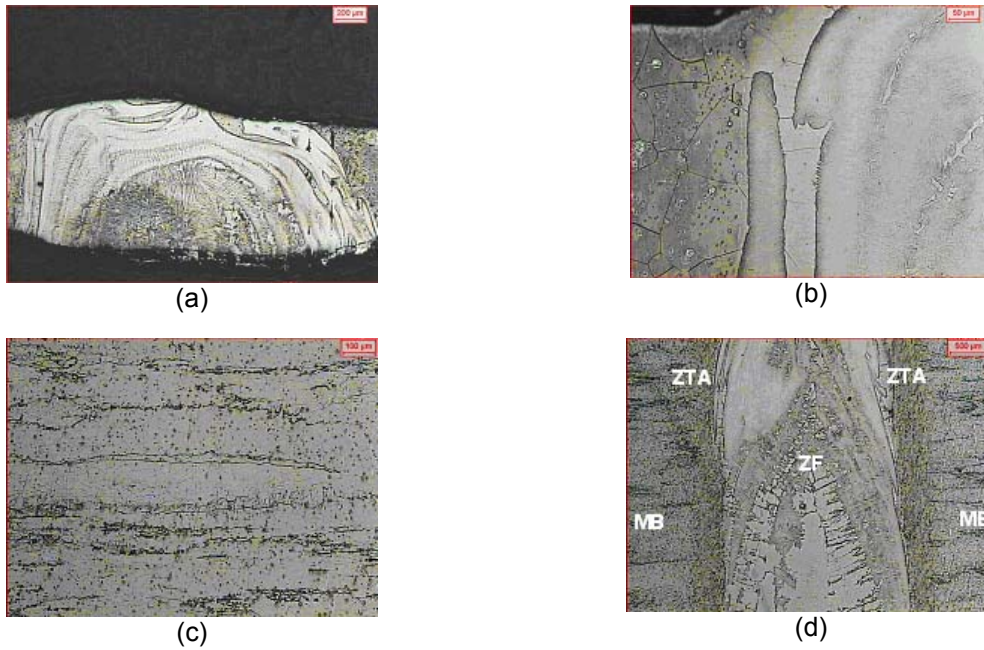


Figura 8. Fotomicrografias dos aços siliciosos GO soldados com aço inoxidável AISI 308L, CP₂; reativo: Nital 2%; (a) ZF, 50X; (b) ZF, 200X; (c) MB, sentido longitudinal, 100X; (d) ZF-ZTA-MB, sentido longitudinal, 25X.

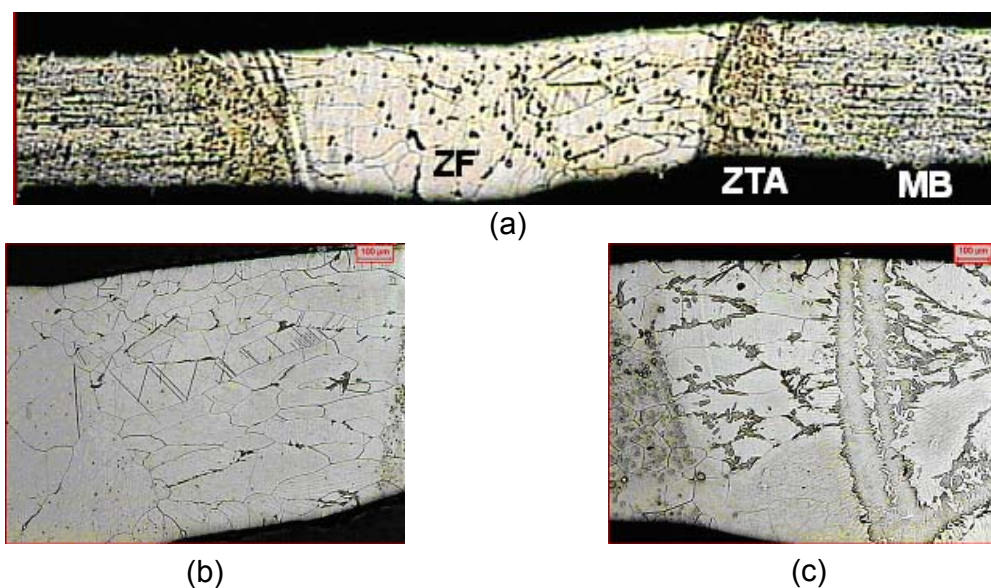


Figura 9. Fotomicrografias dos aços siliciosos GO soldados com aço inoxidável AISI 308L; reativo: Nital 2%; (a) CP₃, MB-ZTA-ZF, 25X e (b) ZF, presença de maclas, 100X; (c) CP₄, ZF, martensita em contornos de grão, 100X.

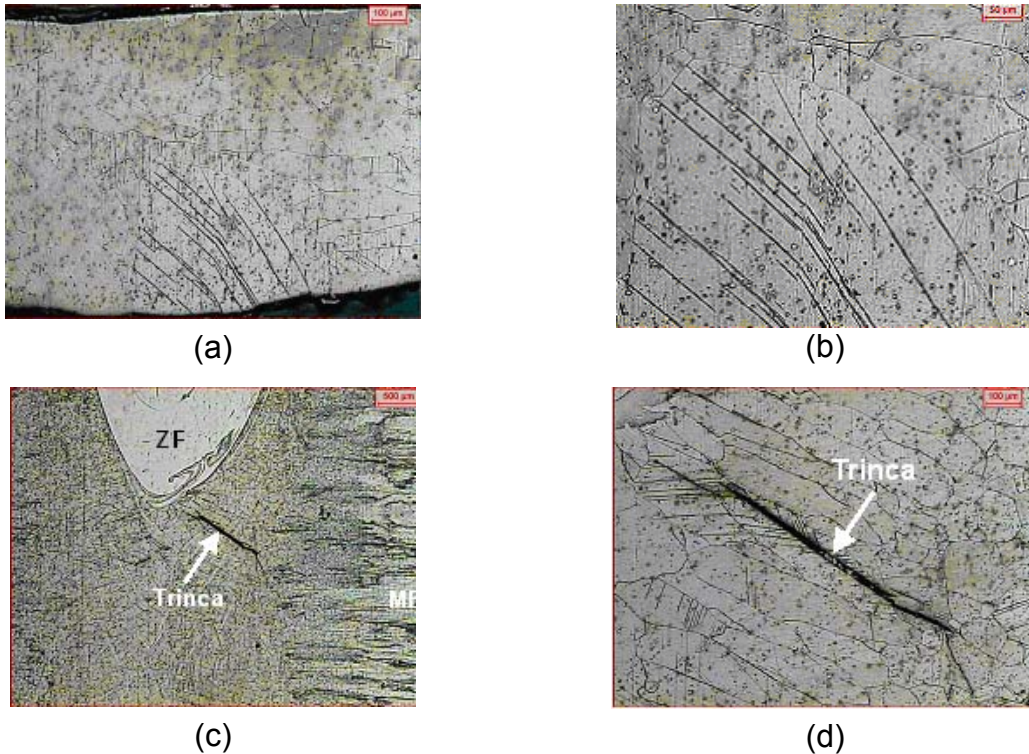


Figura 10. Fotomicrografias dos aços siliciosos GO soldados com aço inoxidável AISI 308L, CP₅; reativo: Nital 2%; (a) ZF; 100X; (b) ZF; 200X; (c) ZF, nota-se a trinca na mesma, 25X; (d) ZF; 100X.

A Figura 11(a,b), mostra fotomicrografias dos CPs ensaiados na 2^a etapa do trabalho. Para esta condição ressalta-se a presença mais intensa de martensita na ZF, particularmente, quando foi empregado um aporte térmico com maior corrente elétrica (270A).

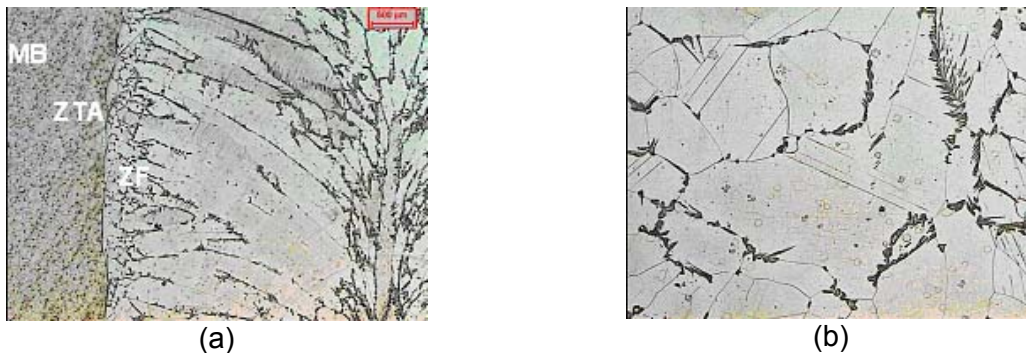


Figura 11. Fotomicrografias dos aços siliciosos GO soldados com aço inoxidável AISI 308L (BQs), 2^a etapa; reativo: Nital 2%; sentido longitudinal; (a) MB-ZTA-ZF, CP₆, 25X; (b) ZF, CP₆, ZF, 100X.

As Figuras 12 (a,b,c,d) e 13 (a,b) apresentam microfotografias dos CPs das BFs ensaiados em tração, obtidas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV). Destaca-se o aspecto frágil da fratura, através de facetas de clivagens e uma região com característica dúctil.

Os CPs das BQs da 1^a e 2^a etapas romperam na região do metal base. Já os CPs das BFs da 1^a e 2^a etapas romperam respectivamente na região da ZF e na região do MB próximo ao raio de concordância do corpo-de-prova.

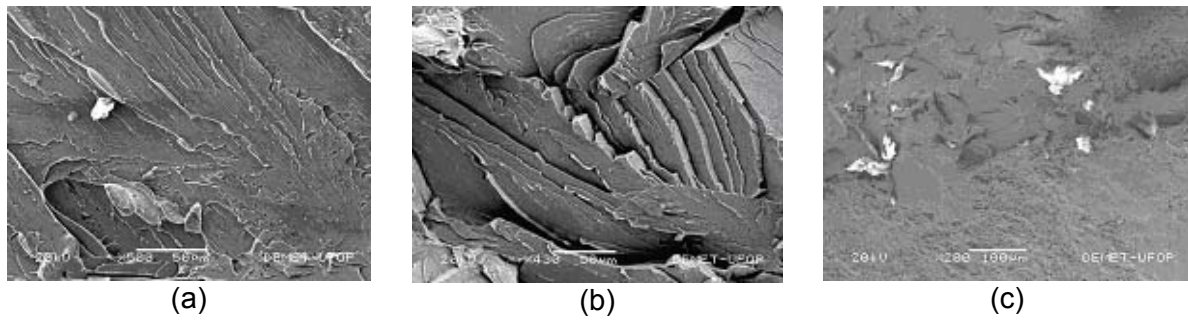


Figura 12. Fotomicrografias dos CPs ensaiados em tração, fratura frágil e semi-frágil; 1ª etapa; (a) facetas de clivagem, 500X; (b) idem, 430X; (c) clivagem e uma região com característica dúctil, 200X; MEV.

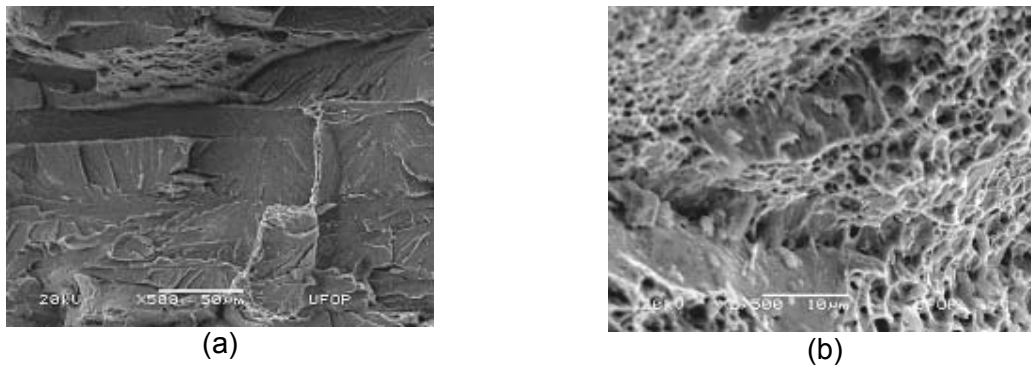


Figura 13. Fotomicrografias dos CPs ensaiados em tração, fratura frágil e semi-frágil; 2ª etapa; (a) facetas de clivagem, 500X; (b) região com característica dúctil, 2.500X; MEV.

Foram feitas análises dos CPs no MEV/EDS, onde obtiveram-se as fotomicrografias dos aços estudados e a composição química em um ponto específico dos CPs. Nota-se na Figura 14 (a) a presença de agulhas de martensita na região da solda, para o CP_{1b}. Foram feitas análises da composição química por EDS empregando-se aumentos maiores em determinadas regiões. Por exemplo, através da Figura 14 (b), com aumento de 16.000X, pôde-se caracterizar as agulhas de martensita com composição química dada por: C = 0,95 %; Si = 2,61 %; Cr = 1,37 %; Fe = 95,07 %. Analogamente, na Figura 14 (c), CP_{1b} com aumento de 700X, notam-se partículas de segunda fase na região da ZTA, que provavelmente são óxidos de silício. Por EDS obteve-se a composição de C = 0,96%; O = 1,90%; Si = 2,26%; Fe = 94,88%, com aumento de 7.000X [Figura 14 (d)], indicando que as partículas são provavelmente de óxidos de silício. A Figura 14 (e), CP₅, mostra a oxidação que o material sofreu na região da ZF. A Figura 14(f) mostra ranhuras que o CP₅ apresenta na região da ZF. O EDS indicou a composição química das ranhuras de C = 1,75%, Si = 3,12% e Fe = 95,13%.

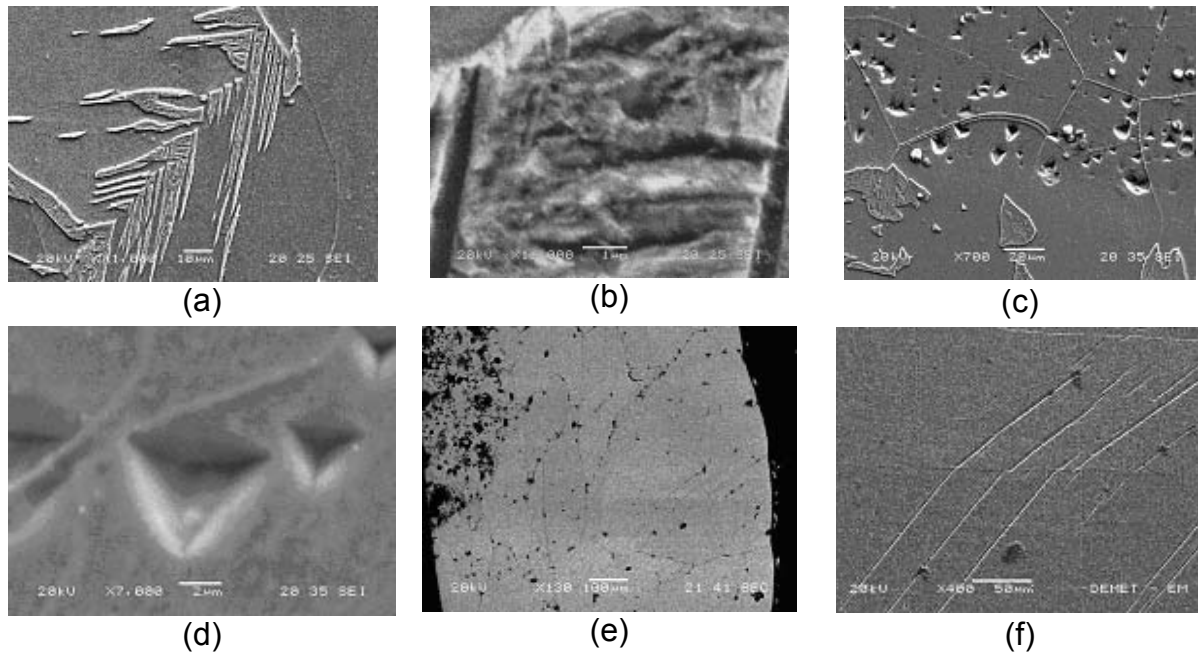


Figura 14. Fotomicrografias dos CPs, ataque: Nital 2%, 20s, MEV/EDS: (a) CP_{1b}, 1.000X; (b) CP_{1b}, 16.000X; (c) CP_{1b}, 700X; (d) CP_{1b}, 7.000X; (e) CP₅, 130 X; (f) CP₅, 400 X.

CONCLUSÕES

- Verificou-se, através de ensaios mecânicos, que os corpos-de-prova com mesma condição de soldagem apresentaram variações comportamentais;
- Notou-se que o material apresentou microestrutura muito heterogênea na zona fundida, inclusive com presença de martensita e óxidos de silício;
- Nas análises microfratográficas dos CPs da 1^a etapa das BQs, ensaiados por tração, indicaram que a fratura ocorreu na região do MB; no entanto, os CPs, das BFs, romperam na ZF;
- Não foi observado um efeito significativo nas propriedades mecânicas do material com a variação dos limites de amperagem (230A e 270A);
- Verificou-se que o efeito do aumento da vazão do gás de proteção (25 CFH) implicou num aumento de dureza nas regiões do cordão de solda. Provavelmente, o aumento da vazão do gás influenciou negativamente na blindagem da poça de fusão, ocasionando arraste de partículas para a mesma.

REFERÊNCIAS

- 1 BECKLEY, P. Electrical Steels for rotating machines. The Institution of Electrical Engineers, 2002, 315p.
- 2 WAINER, E. , BRANDI, S.D. , MELLO, F.D.H., Soldagem Processos e Metalurgia, Editora Edgard Blocher Ltda., 1992, 492p.
- 3 ACESITA/Grupo Arcelor. Curso sobre Aços Siliciosos. 2004.
- 4 MODENESI, P.J., Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis, SENAI/ACESITA, 100p., 2001.
- 5 AWS, Welding Handbook, 1989.