

EFEITO DA VARIAÇÃO DA CORRENTE NA SOLDAGEM DE LIGAS FE CR-MO COM DIFERENTES TEORES DE MOLIBDÊNIO

Natasha LOPES GOMES (1); Nathália CÂNDIDO FIGUEIREDO (2); Fernando Henrique COSTA SABOIA (3); Rodrigo FREITAS GUIMARÃES (4); Hamilton FERREIRA GOMES DE ABREU (5)

1. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). Campus Maracanaú. Av. Contorno Norte, 10 – Parque Central, Distrito Industrial – Maracanaú/CE - CEP: 61925-315, (85) 38786316, e-mail: natashalopesgomes@gmail.com
2. Universidade Federal do Ceará. Campus Universitário do Pici – Bloco 702 – Pici – Fortaleza/CE - CEP 60.455-760 – Fone: (85) 3366-9644 – Fax: (85) 3366-9969, e-mail: nathaliacfigueiredo@gmail.com
3. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). Campus Maracanaú. Av. Contorno Norte, 10 – Parque Central, Distrito Industrial – Maracanaú/CE - CEP: 61925-315, (85) 38786316, e-mail: fernandocosta.ifce@gmail.com
4. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). Campus Maracanaú. Av. Contorno Norte, 10 – Parque Central, Distrito Industrial – Maracanaú/CE - CEP: 61925-315, (85) 38786316, e-mail: rodrigofg@ifce.edu.br
5. Universidade Federal do Ceará. Campus Universitário do Pici – Bloco 702 – Pici – Fortaleza/CE - CEP 60.455-760 – Fone: (85) 3366-9644 – Fax: (85) 3366-9969, e-mail: hamilton@ufc.br

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da variação da corrente durante a soldagem de três diferentes ligas de aço Fe-Cr-Mo, empregando o processo TIG sem adição de material, e identificar quais mudanças podem ocorrer na microestrutura dessas ligas quando submetidas a dois diferentes parâmetros de soldagem aqui estudados. Amostras das ligas foram utilizadas na condição solubilizada para a realização da soldagem na posição plana, com eletrodo toriado, corrente contínua eletrodo negativo, em dois diferentes níveis de energia, variando os valores de corrente. Após a soldagem as ligas foram submetidas a caracterização microestrutural através de microscopia ótica e medição de dureza Vickers para determinar qual das ligas apresentou maior dureza de acordo com os parâmetros estabelecidos. A análise das microestruturas revelou que uma das ligas apresentou a formação de martensita. A energia de soldagem com menor corrente gerou uma zona fundida com menor área para as três ligas. Contudo, as soldagens realizadas não apresentaram mudanças prejudiciais na microestrutura e na dureza das ligas estudadas.

Palavras-chave: Molibdênio, Corrente de soldagem, Microdureza Vickers.

1 INTRODUÇÃO

Ligas de aço Cr-Mo, geralmente contendo 1-2% de Mo e 2,5-11% de Cr, têm sido amplamente empregados na indústria do setor Petróleo e Gás Natural. Apesar destes aços apresentarem boa resistência à corrosão por sulfetos e a altas temperaturas, eles têm apresentado problemas devido à corrosão naftênica na presença de fluidos com alta velocidade e turbulência. Estes aços Cr-Mo são empregados como tubos de fornos de destilação na condição como soldado.

Uma possível estratégia para enfrentar esse problema seria o uso de metalurgia especial, tendo como ação a melhoria das propriedades destes aços pela adição de elementos de liga. Dentre estes elementos de liga destaca-se o Mo.

Segundo Souza (1989), o Mo aumenta a resistência do material a atmosferas ácidas não oxidantes, à corrosão localizada e a resistência a altas temperaturas. O aumento do teor de Molibdênio melhora sensivelmente a resistência à corrosão naftênica nos aços austeníticos. Esta melhoria se deve ao aumento da resistência à corrosão por pites devido a melhorias na microestrutura e na dureza (Wu et al, 2004).

O Mo, assim como o Cr, favorece a uma microestrutura ferrítica. Um maior teor de Mo proporciona uma maior resistência mecânica e aumenta a dureza do aço, além de favorecer a formação de precipitados do tipo sigma (σ), chi (χ) e mu (μ), prejudicando a soldabilidade dos aços, devido à perda de ductilidade (Cunha, 2006; Laffler, 1999; Wu et al, 2004).

O aço ferrítico, por ser monofásico e devido ao seu tipo de reticulado, possui uma mobilidade atômica, que favorece uma maior velocidade de crescimento de grão. Segundo Pickering (1976) e Ohashi (1980), esse crescimento de grão favorece a fragilização e a queda na tenacidade das regiões soldadas, responsável pela maior dificuldade na soldagem de aços ferríticos.

Uma vez que maiores teores de Mo podem prejudicar a soldagem das ligas, comprometendo sua aplicação, torna-se fundamental uma criteriosa avaliação do efeito da soldagem em ligas com maiores teores de Mo. Diante desse contexto, torna-se necessário determinar o efeito dos parâmetros de soldagem, principalmente da corrente, e como eles influenciam na microestrutura dessas ligas, tendo em vista a submissão destes aços ao processo de soldagem quando empregadas na indústria petroquímica.

O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento da corrente na soldagem de três diferentes ligas analisando suas respectivas microestruturas e microdurezas para dois diferentes parâmetros de soldagem.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram empregadas três composições com diferentes teores de Mo mesmo teor de Cr, na condição como solubilizada, conforme mostrado na Tabela 1, denominadas E1, E2 e E3.

Tabela 1 - Composição química (% em massa) das ligas avaliadas.

Liga	C	Mn	Si	Cr	Mo
E1	0,030	0,37	0,34	9,5	5,3
E2	0,031	0,38	0,37	9,5	7,3
E3	0,041	0,41	0,45	9,6	9,3

Inicialmente foi realizada a caracterização microestrutural das ligas E1, E2 e E3 na condição solubilizada, através de microscopia óptica, utilizando o reagente Vilella (Voort, 1992), para revelar a microestrutura. Em seguida, foram realizados ensaios de microdureza Vickers.

Posteriormente, foi realizada a soldagem autóloga, empregando o processo TIG automático. As soldagens na posição plana foram realizadas com eletrodo, não consumível, toriado de 2,4 mm de diâmetro em corrente contínua eletrodo negativo (CCEN), utilizando argônio (Ar) como gás de proteção (vazão de gás de 14 L/min), sobre chapas com dimensões de 10,00 mm x 40,00 mm x 80,00 mm.

Na deposição dos cordões de solda foram empregados dois níveis diferentes de corrente de soldagem, resultando em duas diferentes condições de energia, como mostra a Tabela 2. Buscou-se manter a tensão constante (17 V) regulando a distância da ponta do eletrodo para a peça em 4 mm.

Tabela 2- Parâmetros de soldagem empregados.

Condição	U (V)	I (A)	Vs (cm/min)	E (kJ/cm)
P1	17	150	25,0	6,0
P2	17	250	25,0	10,0

As amostras soldadas passaram pela caracterização das regiões da solda e do metal de base através de exames metalográficos, por microscopia ótica, para verificar o efeito da energia de soldagem na microestrutura das mesmas. Foram ainda realizados ensaios de dureza Vickers visando levantar um perfil de microdureza das ligas estudadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização microestrutural das ligas submetidas à solubilização.

A Figura 1 apresenta a microscopia ótica da seção transversal das ligas E1, E2 e E3, após a solubilização.

Analisando as microestruturas mostradas na Figura 1 pode-se verificar um comportamento característico de ligas ferríticas, assim como a presença de alguns precipitados, provavelmente formados devido a presença de carbono nestas ligas. Outra característica que pode ser visivelmente notada nas ligas E1, E2 e E3 é o tamanho de grão, ASTM 1,5, ASTM 1,5 e ASTM 1,4, respectivamente, sendo assim considerados grãos grandes. Segundo Pickering (1976) e Ohashi (1980), o aumento do tamanho de grão é um dos fatores responsáveis pela perda de ductilidade na solda de ligas ferríticas.

Os valores de microdureza Vickers das amostras E1, E2 e E3 solubilizadas foram de 196 HV, 232 HV e 297 HV, respectivamente. O valor de dureza aumenta com o aumento do teor de Mo, confirmando o apresentado na literatura (Souza, 1989; Edström, 1964; Pickering, 1976).

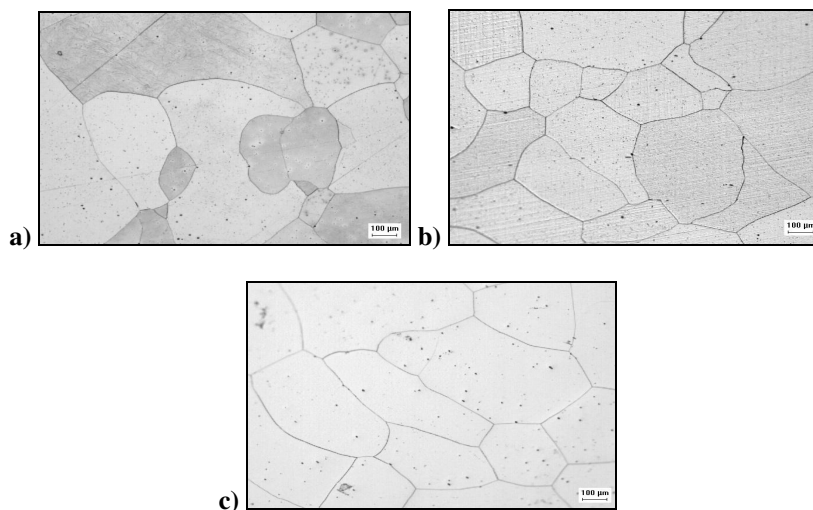


Figura 1- Micrografia ótica dos três tipos de ligas após a solubilização. Aumento 100X. a) Liga E1. b) Liga E2. c) Liga E3.

3.2 Ensaios de soldagem

Na Tabela 3 encontram-se os valores resultantes da aquisição durante a realização da soldagem autógena para as Ligas E1, E2 e E3.

Como pode ser verificado, foi possível manter a corrente em valores bem próximos aos que são apresentados na Tabela 2, independente do parâmetro ou da liga soldada.

A exceção do parâmetro P2 para as ligas E1 e E2, a tensão ficou abaixo do que era esperado (17 V), o que refletiu na alteração da energia de soldagem do parâmetro P1 para ambas as ligas estudadas, que ficou abaixo de 6 kJ/cm. Contudo, como pode ser observado na Tabela 3, os valores de energia para o parâmetro P1 ficaram em torno de 5 kJ/cm, não prejudicando os experimentos.

Tabela 3- Valores obtidos pelo sistema de aquisição de dados da soldagem para cada liga.

Liga	Condição	Vs (cm/min)	Uef (V)	Ief (A)	Eef (kJ/cm)
E1	P1	25,0	15,1	150,2	5,4
	P2	25,0	17,3	247,8	10,1
E2	P1	25,4	14,6	149,5	5,2
	P2	25,4	16,7	249,4	9,8
E3	P1	25,0	15,0	151,7	5,4
	P2	25,0	15,0	248,8	9,8

Na Figura 2 podem ser vistas as micrografias da zona fundida (ZF) da liga E1 após as soldagens para os dois parâmetros estudados. A linha vertical de pontos escuros corresponde às impressões do ensaio de microdureza Vickers. Tanto no parâmetro P1 (Figura 2a) quanto no parâmetro P2 (Figura 2b) observa-se uma ZF com microestrutura do tipo ferrítica, formada por grãos colunares. Tem-se ainda que a ZF para o parâmetro P2 ($I = 250$ A), apresenta uma maior área do que para a ZF do parâmetro P1 ($I = 150$ A). Este resultado está coerente uma vez que quanto maior a corrente maior a energia de soldagem, favorecendo a uma maior ZF (Bracarense, 2000).

Resultado semelhante foi obtido tanto para a ZF da Liga E2 como para a ZF da Liga E3, como pode ser verificado na Figura 3 e na Figura 4, onde tem-se uma microestrutura ferrítica na ZF para ambos os parâmetros e ligas estudadas. Como era esperado, a maior corrente (parâmetro P2) resultou em uma maior ZF, como foi observado na Figura 2.

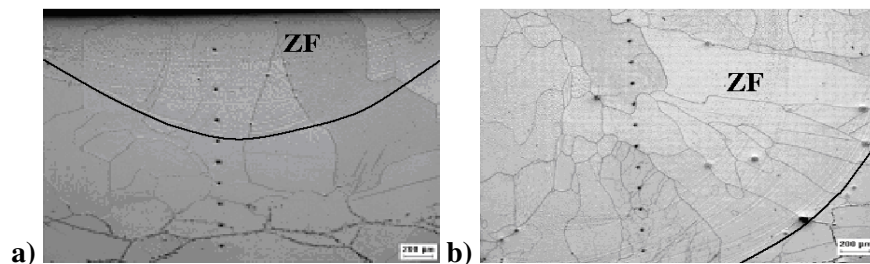


Figura 2 - Micrografias da ZF da liga E1. Aumento 50X. a) Condição P1. b) Condição P2.

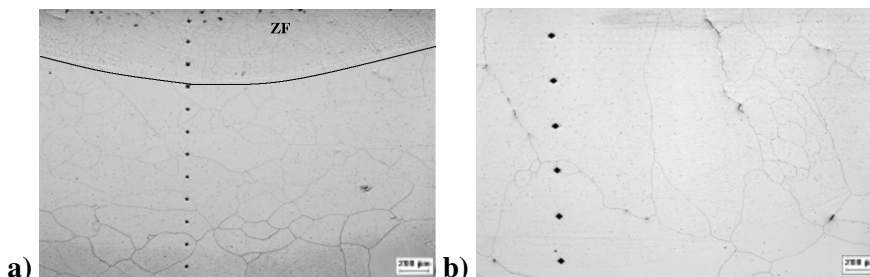


Figura 3- Micrografias da ZF da liga E2. Aumento 50X. a) Condição P1. b) Condição P2.

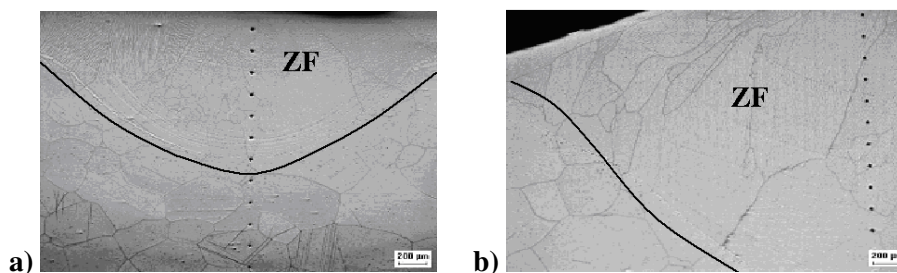


Figura 4 - Micrografias da ZF da liga E3. Aumento 50X. a) Condição P1. b) Condição P2.

Na Figura 5 pode ser vista a região da zona afetada pelo calor (ZAC) da liga E1 para os dois parâmetros estudados. Observa-se que houve a formação de outra fase além da fase ferrítica, para os parâmetros empregados. Essa fase já foi determinada por Figueiredo (2009), que a identificou como sendo martensita.

Neste mesmo estudo Figueiredo *et al* (2009) levantou os diagramas de fases para a liga com 9% de Cr e diferentes teores de Mo (5%, 7% e 9%) e verificou que somente a liga com 5% de Mo (Liga E1) apresenta formação de austenita e ferrita (dependendo da faixa de temperatura), sendo as demais ferríticas. Dentre as várias microestruturas que podem ser produzidas para uma dada liga de aço, a martensita é a mais dura, a mais resistente e, além disso, a mais frágil (Callister, 2007).

Verifica-se que a distância da ZF onde a martensita tem início muda com o parâmetro empregado, onde se observa que para o nível mais baixo de energia (6 kJ/cm, parâmetros P1) e maiores velocidades de resfriamento, a martensita forma-se a uma certa distância do final da ZF. Já para o outro nível de energia (parâmetro P2), com maior velocidade de resfriamento, a martensita se forma bem próximo da ZF e início da ZAC.

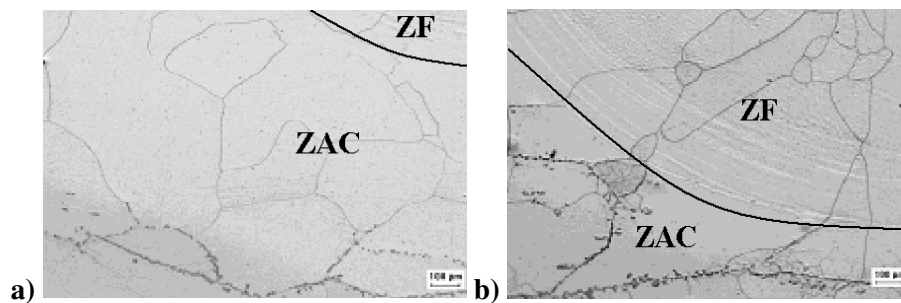


Figura 5. Micrografias da ZAC da liga E1 após a soldagem. Aumento 100X. a) Condição P1. b) Condição P2.

Na Figura 6 e na Figura 7 podem ser vistas as regiões da ZAC para as ligas E2 e E3 respectivamente, que diferente da Liga E1 não apresentaram a formação de martensita, uma vez que estas não são passíveis de austenitização. Para os dois parâmetros de corrente empregados não verificou-se uma mudança na microestrutura da ZAC, não havendo a formação de fases prejudiciais a soldabilidade das Ligas E2 e E3.

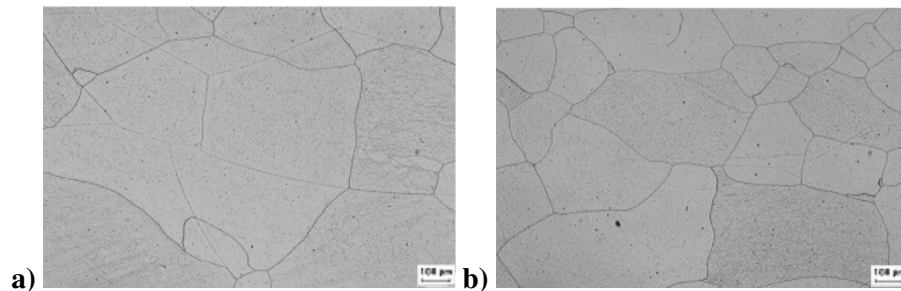


Figura 6. Micrografias da ZAC da liga E2 após a soldagem. Aumento 100X. a) Condição P1. b) Condição P2.

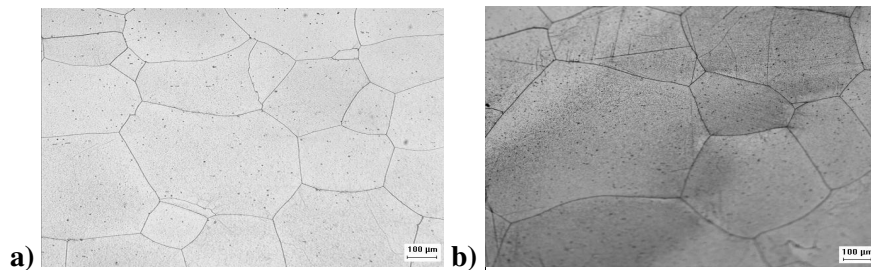


Figura 7. Micrografias da ZAC da liga E3 após a soldagem. Aumento 100X. a) Condição P1. b) Condição P2.

Os perfis de microdureza para cada liga (E1, E2 e E3) podem ser vistos na Figura 8, Figura 9 e Figura 10, respectivamente. A dureza de cada uma delas foi medida a partir da zona fundida até o metal de base. No caso da liga E1 (Figura 8) verifica-se que para ambos os parâmetros soldados o perfil de microdureza foi superior a dureza da liga solubilizada, contudo os valores são próximos. Tem-se ainda a presença de alguns picos de dureza medidos na região onde havia a presença da martensita. Quando são comparados os perfis de microdureza para os dois parâmetros empregados na solda da Liga E1, observa-se que a variação no valor da

corrente, apesar de ter resultado em alterações nas extensões da ZF e da formação da martensita na ZAC, não apresentou mudanças significativas nos valores de dureza.

Com a presença da martensita na Liga E1, era de se esperar um aumento considerável nos valores de dureza. Os resultados apresentados na Figura 8 mostram que a dureza nas regiões onde existe martensita realmente aumenta, mas com valores não tão elevados, pouco superiores a 300 HV.

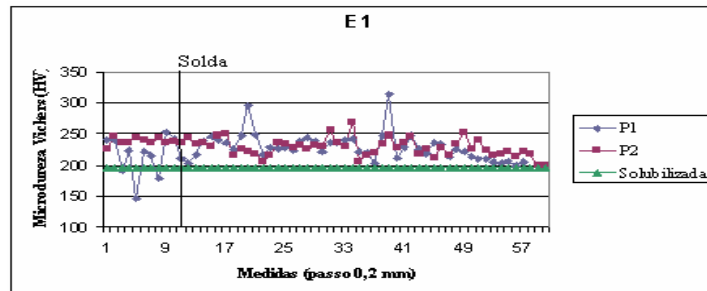


Figura 8. Perfil de microdureza Vickers da liga E1 para os parâmetros de soldagem empregados.

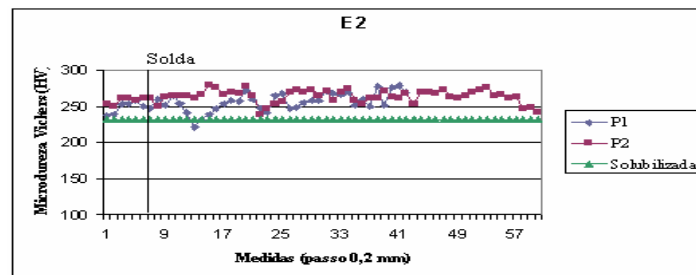


Figura 9. Perfil de microdureza Vickers da liga E2 para os parâmetros de soldagem empregados.

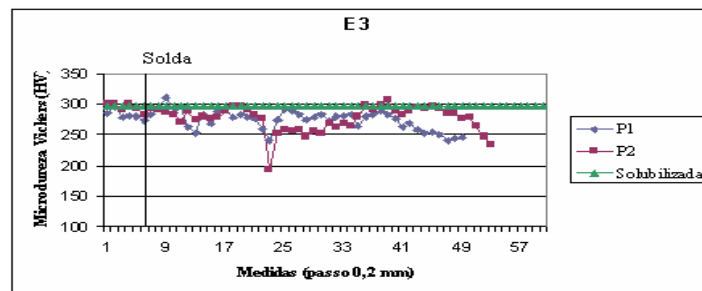


Figura 10. Perfil de microdureza Vickers da liga E3 para os parâmetros de soldagem empregados.

Analisando as microdurezas das Ligas E1, E2 e E3 para cada parâmetro (Figura 11 e Figura 12), observa-se que a Liga E3 possui uma microdureza maior que as Ligas E1 e E2. Isso está associado ao maior teor de Mo presente na Liga E3, justificando a influência do molibdênio na dureza das ligas. O mesmo acontece quando comparamos os valores de microdureza para apenas as ligas E1 e E2. A liga E2 apresenta microdureza maior que a Liga E1. Apenas alguns pontos do gráfico de microdureza da Liga E1 possuem valores maiores que as Ligas E2 e E3. Essa característica deve-se à presença da martensita no ponto medido.

Ressalta-se que a diferença nos perfis de microdureza considerando a variação de 2% de Mo não foi tão significativa. Esta diferença é mais clara para as ligas com maior (Liga E3) e menor (Liga E1) percentual de Mo.

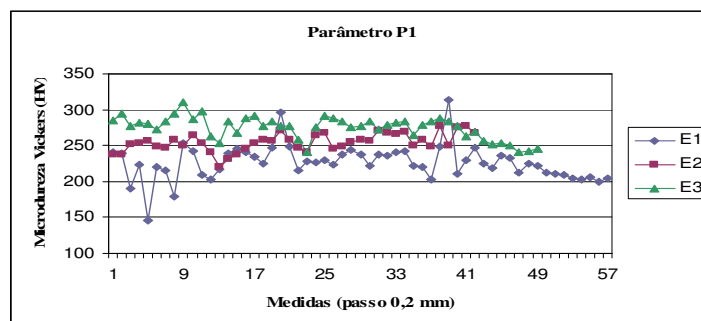


Figura 11. Comparativo entre o perfil de microdureza Vickers para o parâmetro P1 das ligas E1, E2 e E3.

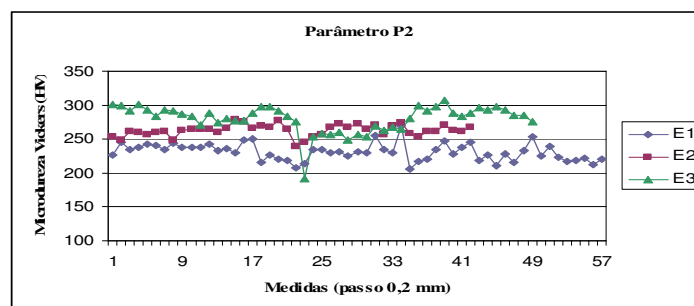


Figura 12. Comparativo entre o perfil de microdureza Vickers para o parâmetro P2 das ligas E1, E2 e E3.

4 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados apresentados neste trabalho destacam-se as seguintes conclusões:

- A energia de soldagem com menor corrente (150 A) gerou uma zona fundida com menor extensão do que a energia com maior valor de corrente (250 A) nas três ligas estudadas.
- A ZAC da Liga E1 apresentou a formação de Martensita.
- As ligas E2 e E3 não apresentaram mudanças significativas na ZAC para os dois parâmetros empregados.
- Quando comparados, para um mesmo parâmetro, verifica-se que a Liga E3 apresentou um perfil de microdureza com valores superiores aos da Liga E1.
- As diferentes correntes de soldagem empregadas não acarretaram em mudanças nos perfis de microdureza para as ligas estudadas.
- As soldagens realizadas com os diferentes parâmetros empregados não resultaram em mudanças prejudiciais, tanto na microestrutura quanto na dureza das ligas estudadas, apesar do alto percentual de Mo presentes nas ligas.
- Apesar da Liga E1 apresentar a formação de martensita, a dureza da mesma não foi elevada quando comparada com a dureza das ligas solubilizadas.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) e ao Laboratório de Engenharia de Soldagem da Universidade Federal do Ceará (ENGESOLDA) pela realização dos experimentos, ao Grupo de Inspeção e Análise de Falhas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (GIAF), além do CNPQ, CAPES e PETROBRAS pelo suporte financeiro.

6 REFERÊNCIAS

BRACARENSE, A. Q. “Processo de soldagem TIG-GTAW”. Universidade Federal de Minas Gerais: Escola de Engenharia: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Minas gerais, 2000.

CALLISTER, W.D. Materials Science and Engineering: An Introduction, 7th Ed., USA, 2007.

CUNHA, B. R. M. da. “Soldabilidade Da Nova Geração De Aços Ferríticos Cr-W Resistentes A Altas Temperaturas”. Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro – RJ, 2006.

EDSTRÖM, H. Q.; LJUNDBERG, L. “Rost- und säurebeständige Chrom-Nickel-Stäle mit max. 0,030% Kohlenstoff als Konstruktionsmaterial für die chemische Industrie”. Werkst. u. Korrosion 15, 743-753, 1964.

FIGUEIREDO, N. C. ; GUIMARÃES, R. F. ; ABREU, H. F. G. ; PINHEIRO, V. M. “Influência do Teor de Mo na Microestrutura de Ligas Fe-9Cr-xMo”. In: CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM – CONSOLDA, 35., 2009, Piracicaba.

LAFFLER, B. ”Stainless-Stainless Steel and their Properties”.pp.1-44, 1999.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. “Soldagem: Fundamentos e Tecnologia”. Ed. UFMG, Belo Horizonte 363p, 2005.

OHASHI, N.; KINOSHITA Y.; ONOJ, N.; YOSHIKA, K. “Effects of metallurgical and mechanical factors on Charps impact toughness of extra low interstitial ferritic stainless steels”. In: SYMPOSIUM ON FERRITIC STAINLESS STEELS, San Francisco, 1979. Philadelphia, ASTM, p.202-220, 1980.

PICKERING, F. B. “Physical metallurgy of stainless steel developments”. International Metals Reviews, Review 211, p.227-249, December, 1976.

SOUZA, S. A. “Composição Química dos Aços”. São Paulo, Edgard Blücher, 1989.

VOORT, G.F.V.; JAMES, H.; MILLS, M. K.; DAVIS, J.R.; DESTEFANI, J. D.; DIETERICH, D. A.; CRANKOVIC, G. M.; FRISSELL, M.J. (Eds.). ASM Handbook: “Metallography and Microstructures”. Vol, 9, USA: ASM International, p. 284, 1992.

WU, X. Q.; JING, H. M.; ZHENG, Z. M.; YAO, W.K. “Resistance of Mo-bearing stainless-steel coating to naphthenic acid corrosion and erosion-corrosion”. Corrosion Science 46, p1013-1032, 2004.