

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NA MICROESTRUTURA DA ZONA AFETADA TERMICAMENTE - ZAT DA JUNTA SOLDADA DE UM AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA

José Francisco dos REIS SOBRINHO (1); Nelson Guedes de ALCÂNTARA (2);

(1) Centro Federal de Educação Tecnológica do Piauí – CEFET- PI, Rua Álvaro Mendes, 1597 – Centro – Teresina, 86 32155208, fax:32155206, e-mail: reissobrinho@gmail.com

(2) Universidade Federal do Piauí – UFSCar-DEMa;PPG-CEM, e-mail: nelson@power.ufscar.br

RESUMO

A identificação dos constituintes microestruturais da zona afetada termicamente-ZAT e sua correlação com as propriedades mecânicas é utilizada quando se pretende avaliar a soldabilidade de um aço, o que é uma atividade complexa e polêmica, pois exige cuidados com a preparação de amostras, e ainda assim corre-se o risco de não estar analisando a região desejada. Neste trabalho, procurou-se concentrar as análises na região de grão grosseiro-RGG da ZAT onde as propriedades da junta soldada são mais críticas. O material utilizado foi o aço de alta resistência e eletrodo AWS ER 70S-6. A soldagem foi feita pelo processo a arco elétrico com proteção gasosa - SAMG(MAG) semi-automatizado, variando-se a energia de soldagem, espessura e temperatura de pré-aquecimento da chapa. Foi feita análise de dureza pelo método Vickers e da microestrutura via microscopia ótica. Observou-se que as chapas de mesma espessura, utilizando a mesma energia de soldagem apresentaram uma ligeira variação na microestrutura da ZAT, isso quando soldadas com pré-aquecimento, o mesmo observou-se com o aumento na energia de soldagem mantendo-se constante a espessura e o pré-aquecimento. Chapas com mesma espessura e energia de soldagem também apresentaram menor e maior dureza na ZAT, quando soldadas com e sem pré-aquecimento respectivamente. Também foi verificado que os valores de dureza aumentaram com a elevação da energia de soldagem.

Palavras-chave: Aço de Alta Resistência, Soldabilidade, Microestrutura, Dureza.

1. INTRODUÇÃO

O processo de soldagem afeta a extensão da ZAT em função da energia de soldagem. Processos de alta energia, tais como: ao arco submerso - SAS conduzem a uma ZAT mais extensa do que os processos como o da soldagem a arco tungstênio com atmosfera gasosa - SATG (TIG), soldagem a arco com eletrodo revestido - SAER e soldagem a arco metálico com proteção gasosa - SAMG (MIG/MAG).

Na soldagem por fusão, parte do MB funde juntamente com o material de adição, e parte próxima à região fundida é afetada pelo calor da solda e denominada ZAT, a qual depende do material soldado (MB) e do processo e procedimento de soldagem. Sua extensão está em função do gradiente térmico na região, que, por sua vez, depende: da temperatura de pré-aquecimento, da espessura e geometria da peça, das características térmicas do MB e do processo de soldagem (1,2).

Na seleção de um aço estrutural, a soldabilidade e propriedades mecânicas de juntas soldada são itens tão importantes quanto as propriedades individuais do aço. Recentemente, fatores como elevada resistência mecânica do MB, utilização de processos de soldagem caracterizados por alta taxa de diluição, uso generalizado de elementos microligantes e especificações cada vez mais restritivas no que concerne aos valores de impacto, deram ênfase à responsabilidade da operação de soldagem na integridade final da estrutura (3).

As estruturas mais susceptíveis às trincas a frio induzidas pelo hidrogênio são as microestruturas formadas a baixas temperaturas de transformação de fase no estado sólido e resultantes de altas taxas de resfriamento, como é caso das estruturas martensíticas (2,4). Entretanto, a ferrita acicular, por ser uma microestrutura constituída de grãos de tamanho muito reduzidos variando de 0,1 a 1 μ (4,5), juntamente com seus contornos de alto ângulo e alta densidade de discordância, dificulta a nucleação e propagação de trincas e, ao mesmo tempo, propicia uma excelente combinação de resistência e tenacidade, o que a torna uma microestrutura bastante desejável no controle das trincas a frio em metais de solda de aços de alta resistência (5,6). De modo geral, para aços C-Mn e de alta resistência, quanto mais frágil a microestrutura do MS e/ou da ZAT, maior a susceptibilidade às trincas a frio (2,4).

É possível minimizar ou mesmo evitar a ocorrência destas trincas, mantendo-se a temperatura da junta suficientemente alta para que o hidrogênio possa difundir para fora do MS ou ZAT. Isso pode ser feito por meio de tratamentos térmicos de pré ou pós soldagem. Com estes tratamentos, pode-se fazer também um controle da taxa de resfriamento, proporcionando-se microestruturas de baixa dureza, e assim, diminuir a susceptibilidade das trincas induzidas pelo hidrogênio tanto no MS quanto na ZAT (2).

O efeito das curvas de resfriamento a partir dos ciclos térmicos mostra que a microestrutura produzida em qualquer tipo de aço é dependente da sua composição química e da taxa de resfriamento. Logo, uma microestrutura menos susceptível às trincas a frio pode ser obtida a partir do controle das taxas de resfriamento por meio da determinação do ciclo térmico (7,8).

Já a identificação das microestruturas da ZAT é utilizada quando se pretende avaliar a soldabilidade de um aço, o que é um dos objetivos deste trabalho e, é mais complexa e polêmica, pois exige maiores cuidados com relação à preparação de amostras, e ainda assim corre-se o risco de não estar analisando a região desejada (9,10). Embora se encontre na literatura proposta de utilização de uma terminologia mais específica, a maior parte dos trabalhos que discutem a microestrutura da ZAT mantém a nomenclatura usualmente adotada para o MB, onde esta relação é melhor estabelecida (9).

Todas as regiões da ZAT podem ter suas propriedades alteradas em relação ao MB devido ao ciclo térmico. Entretanto, de uma maneira geral, a região que maior alteração sofre e, portanto, onde as propriedades mecânicas podem ser mais prejudicadas, é a região de grãos grosseiros. Exceções podem ocorrer em aços sensíveis à fragilização por envelhecimento por deformação, onde a região subcrítica pode ser fragilizada, e em aços temperados e revenidos, onde todas as regiões podem sofrer o amaciamento (2,11).

As grandes variações microestruturais ocorridas na ZAT devidas aos diferentes ciclos térmicos sofridos por pontos muito próximos à linha de fusão trazem, como consequência, mudanças nas suas propriedades de região para região, dificultando as suas medidas em uma delas e resultando em dispersão nos resultados do ensaio (11).

As taxas de resfriamento, quando muito elevadas, proporcionam microconstituintes de baixa temperatura de transformação e de alta dureza. Por outro lado, taxas muito lentas conduzem à formação de estruturas

ferríticas grosseiras e frágeis, principalmente na região de grãos grosseiros da zona afetada termicamente - ZATRGG próximo à linha de fusão. Esta fragilização torna-se mais acentuada em aços de alta resistência devido à sua maior temperabilidade. Portanto, devem-se aplicar taxas ou tempo de resfriamento adequados ao tipo de aço que está sendo soldado, de acordo com a sua curva CCT (12).

Na maioria dos casos, a região de grãos grosseira sofre uma fragilização mais intensa durante a soldagem. Processos de baixa energia de soldagem, que causam velocidades de resfriamento relativamente altas, geram uma estrutura mais fina e, portanto, de menor fragilidade em aços de baixa temperabilidade. Em aços de temperabilidade mais elevada, a formação de martensita pode mascarar essa tendência. Nessas condições, quanto maior for o teor de carbono mais frágil será a estrutura a ser formada, sendo a martensita maclada a estrutura mais frágil a se formar na ZAT. Entretanto, martensita auto-revenida é um produto tenaz, quando comparado, por exemplo, com a bainita superior. Assim, em certos aços de baixa liga e baixo carbono, altas velocidades de resfriamento podem gerar uma ZAT mais tenaz devido à formação deste microconstituente. Processos de alta energia de soldagem tendem a gerar uma ZAT excessivamente grosseira e, portanto, de baixa tenacidade (11,13).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O processo de soldagem utilizado foi SAMG com energias de soldagem de 0,8 kJ/cm² e 1,3 kJ/cm² obtidas conforme tabela 1, um sistema de análise térmica constituído de termopar, interface analógico digital e um microcomputador, chapas de aço ASTM 514 com composição química e propriedades mecânicas ligeiramente variadas, nas espessuras de 8,3 e 16mm, composição química 0,153C; 1,105Mn; 0,023P; 0,010S; 0,251Si; 0,042Al; ≤0,005Nb; ≤0,005V; ≤0,005Ti, 0,009Cu; 0,015Cr; ≤0,005Mo; 0,0004B; 0,022Ni em peso percentual, Carbono Equivalente 0,34, arame de classificação AWS ER 70S-6 com diâmetro de 1,2 mm e composição química 0,060C; 1,507Mn; 0,009P; 0,010S; 0,424Si, 0,040Al; 0,006Nb; ≤0,005V; ≤0,005Ti; 0,181Cu; 0,031Cr; 0,252Mo; 0,0004B; 1,881Ni.

Tabela 1 - Parâmetros de soldagem utilizados para a realização dos ensaios.

Parâmetros de Soldagem							
H KJ/mm	e mm	T °C	Ensaio	Tensão V	Corrente A	Velocidade de Soldagem mm/s	Velocidade do arame mm/s
0,87	8,3	30	S-1	19,0 ± 0,7	182 ± 2,0	4,0	86,5
		100	S-5				
	16	30	S-8				
		100	S-2				
1,23	8,3	30	S-3	26,0 ± 2,0	187,5 ± 12,0	4,0	86,5
		100	S-6				
	16	30	S-7				
		100	S-4				

Foram confeccionadas oito juntas soldadas tipo tekken com um cordão de solda (cordão de raiz) de boa penetração e sem provocar a fusão da abertura da raiz do corpo de prova, na qual foi feito um furo preestabelecido onde foi introduzido um termopar do tipo B Pt-Rh (6%)/Pt-Rh (30%), com 0,5 mm de diâmetro, protegido com tubo capilar cerâmico na ZAT, para determinação das curvas de resfriamento, conforme ilustrado na Figura 1.

Amostras do metal de base e do metal de adição foram retiradas para análise química via espectrometria do

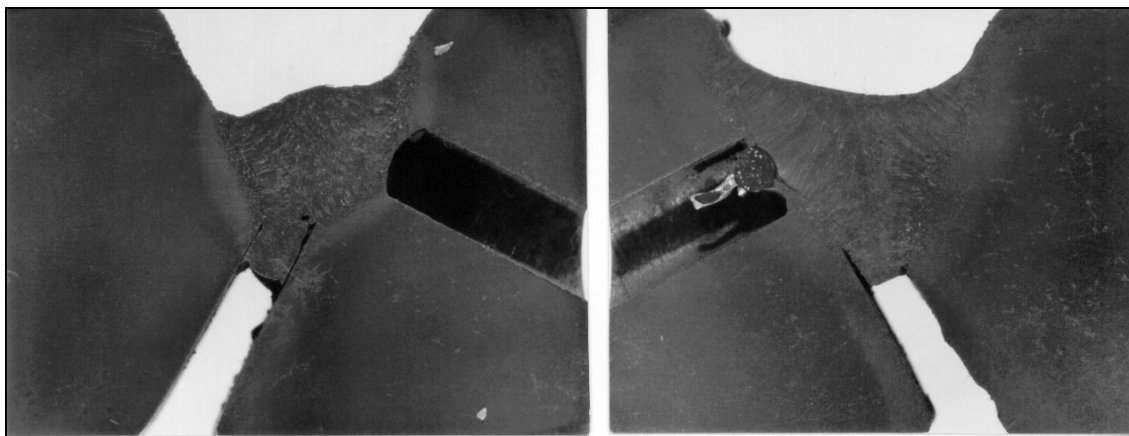


Figura 1- Macrografia do perfil da junta soldada

plasma num aparelho ICP OPTIMA 300, com exceção do C e S, que foram determinados através de um aparelho LECO CS 444LS, e para avaliação microestrutural com microscopia ótica. A identificação dos microconstituintes presentes foi executada, com aumentos de 500X e a classificação dos constituintes foi feita conforme o documento IX-1533-88 do Instituto Internacional de Soldagem (IIW/ISS). Foram realizadas também medidas de dureza vickers empregando – se carga de 5 kgf e um penetrador piramidal, seguindo orientações da norma ASTM E 92-82.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A ZATRGG, é a região onde as propriedades mecânicas da junta soldada sofrem alterações significativas, e podem ocorrer as trincas a frio. Portanto, essa é a região analisada quando se quer avaliar a soldabilidade de um aço. A análise microestrutural apresentada, foi realizada nesta região, a 0,5 mm da linha de fusão, próximo da extremidade do furo do termopar, onde a temperatura máxima atingiu valores entre 1195 e 1570 oC, e pode ser observada nas figura 2 e 3.

3.1. Microestrutura

Até a presente data, não consta na literatura um método com terminologia padronizada para caracterizar a microestrutura da zona afetada termicamente da junta soldada de aços de alta resistência e microligados.

Considerando que não existe um documento definitivamente estabelecido para caracterizar microestruturalmente a ZAT da junta soldada, e que a proposta em andamento adota uma terminologia similar à do documento IIW Doc. No IX – 1533 – 88, adotou-se este documento para realizar as caracterizações apresentadas neste trabalho. Portanto a microestrutura observada nesta região varia conforme os parâmetros utilizados.

Para a mesma energia de soldagem de 0,87 kJ/mm ou 1,23 kJ/mm, mesma espessura de 8,3 ou 16 mm, parte inferior e superior das figuras 2 e 3 respectivamente, analisando da esquerda para a direita das figuras citadas observa-se que a microestrutura varia com o pré-aquecimento, ou seja, chapas de mesma espessura e energia de soldagem apresentaram uma ligeira variação na microestrutura quando soldadas com uma temperatura de pré-aquecimento de 100o C. Observa-se também, variação na microestrutura com aumento da energia de soldagem, conforme apresentado nas figuras 2 e 3, mantendo constante a espessura da chapa e temperatura de pré-aquecimento.

O mesmo comportamento pode ser observado nas microestruturas onde foi mantida constante a energia de soldagem e variou-se a espessura e o pré-aquecimento.

Isso deve-se ao fato de que a energia de soldagem e o pré-aquecimento exercem influencia sobre o tempo de resfriamento, fazendo variar a taxa de resfriamento e conseqüentemente a microestrutura resultante.

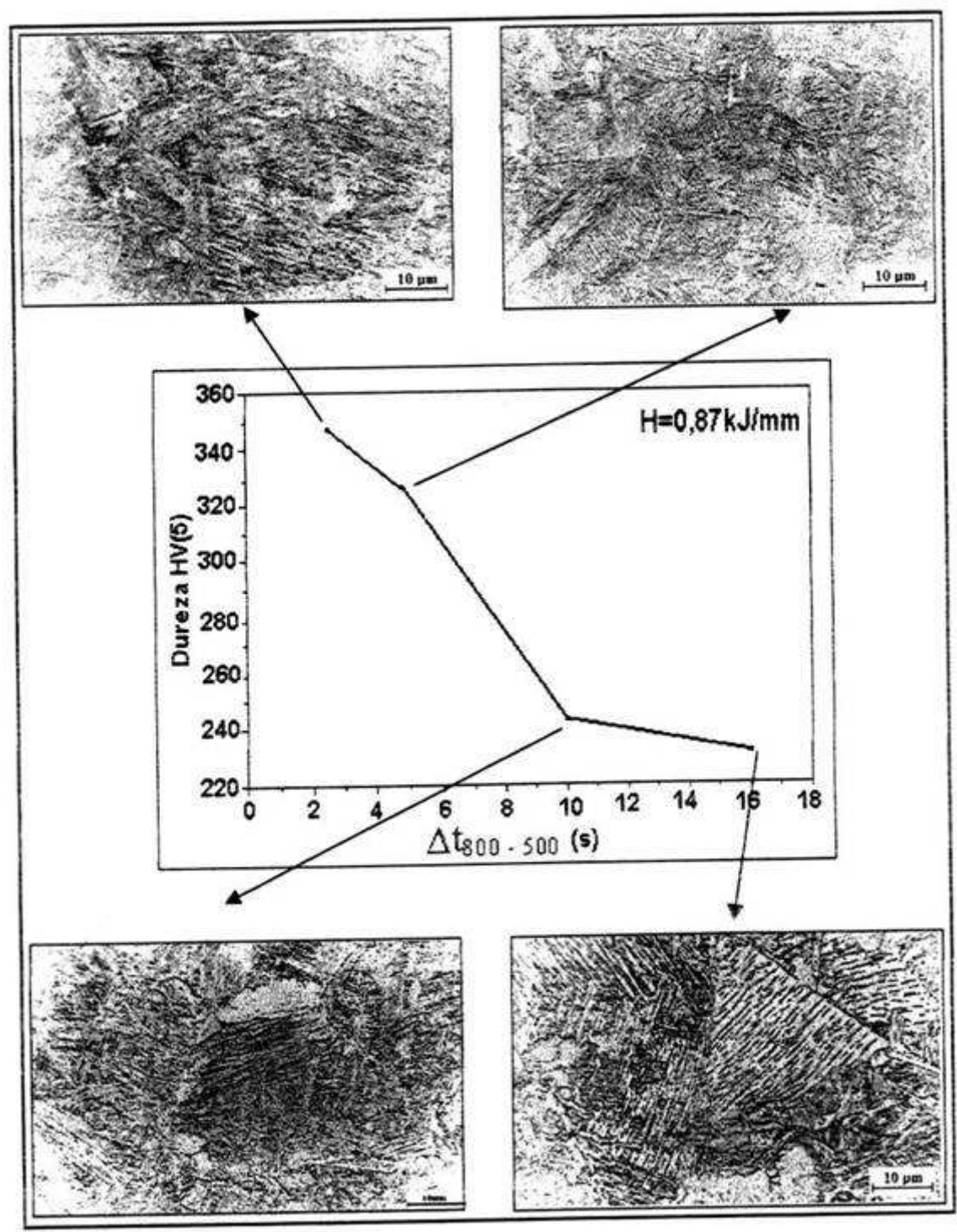


Figura 2 – Curva de dureza versus tempo de resfriamento para juntas soldadas com energia de soldagem (H) igual a 0,87kJ/mm.

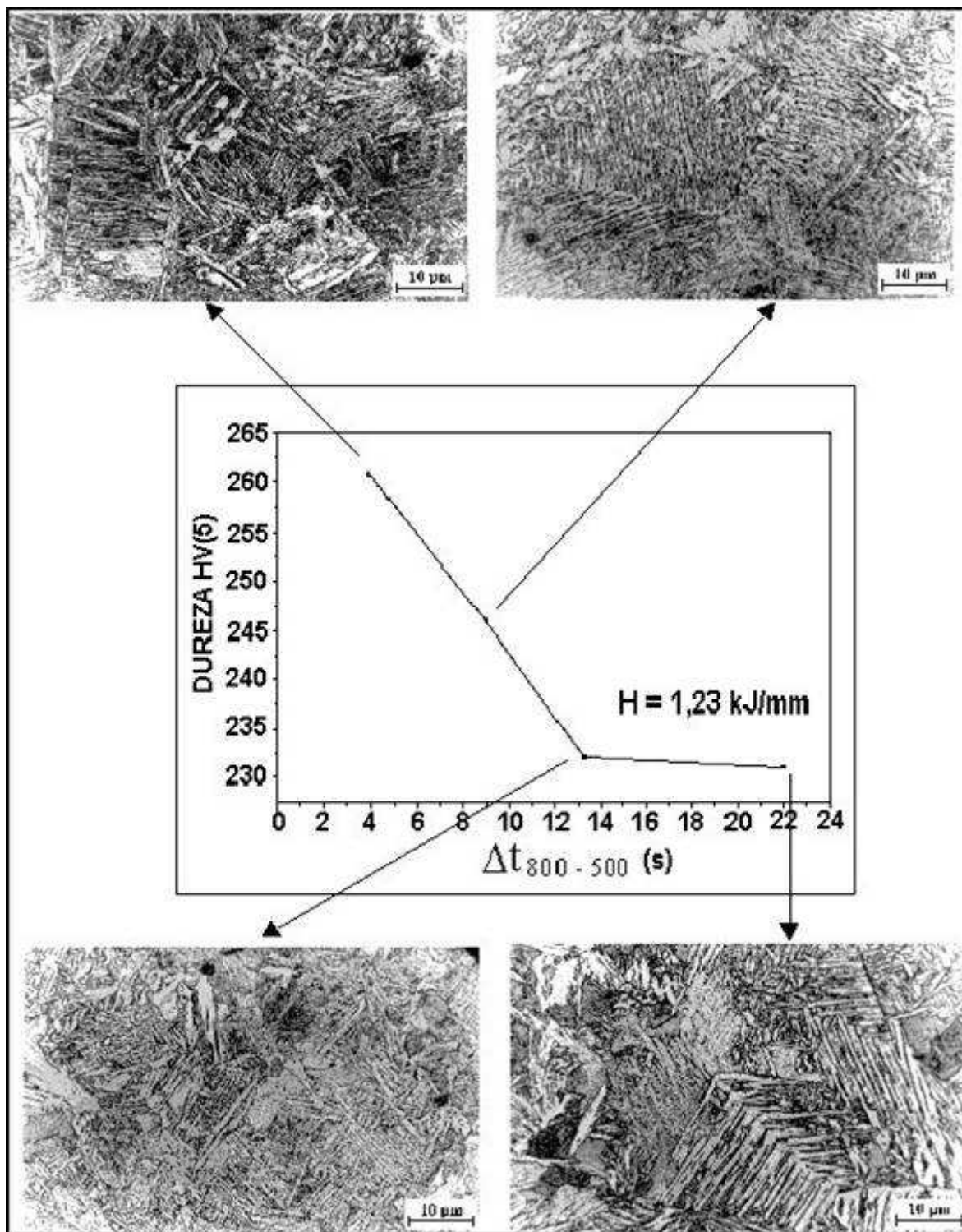


Figura 3 – Curva de dureza versus tempo de resfriamento para juntas soldadas com energia de soldagem (H) igual a 1,23 kJ/mm.

3.2. Dureza

Para a obtenção das medidas de dureza, optou-se pelo método Vickers, com carga de 5 kg.

Para a mesma energia de soldagem 0,87 kJ/mm ou 1,23 kJ/mm, mesma espessura de 8,3 mm ou 16 mm, a dureza varia com o pré-aquecimento, ou seja, chapas de mesma espessura e energia de soldagem apresentam dureza menor quando soldadas com pré-aquecimento de 100 °C, e dureza maior quando soldada sem pré-aquecimento. Observa-se, também, queda na dureza com o aumento da energia de soldagem, conforme pode ser visto na tabela 2 e, nas figuras 2 e 3 seguindo o mesmo esquema descrito para análise da microestrutura onde a espessura e o pré-aquecimento são mantidos constantes e ocorre uma ligeira queda na dureza.

Isso se deve ao fato de que o tempo de resfriamento é influenciado tanto pelo pré-aquecimento quanto pela energia de soldagem e, conseqüentemente pela taxa de resfriamento, o que possibilita a origem de estrutura de menor ou maior dureza.

Tabela 2 - Resultados de dureza, $\Delta t_{800-500}$ da junta soldada em relação aos parâmetros de soldagem.

Variáveis			Ensaio/am ostra	Dureza HV			Tempo de Resfriamento
H KJ/mm	e mm	T °C	n°	ZAT <u>Min.-Max.</u> Méd.	MB Med.	MS <u>Min.-Máx.</u> Med.	$\Delta t_{800/500}$ s
0,87	8,3	30	S-1	<u>224-243</u> 233	155	<u>274-309</u> 294	9,8
		100	S-5	<u>214-230</u> 221	154	<u>251-278</u> 267	16,1
	16	30	S-8	<u>303-347</u> 328	172	<u>330-355</u> 344	2,57
		100	S-2	<u>294-326</u> 310	174	<u>296-322</u> 311	4,8
	8,3	30	S-3	<u>202-232</u> 216	151	<u>241-264</u> 256	13,3
		100	S-6	<u>194-222</u> 209	154	<u>222-253</u> 237	22,1
1,23	16	30	S-7	<u>236-261</u> 251	174	<u>245-274</u> 256	3,91
		100	S-4	<u>223-246</u> 234	173	<u>242-265</u> 254	9

3.3. Trinca a Frio

Na procura de determinar as condições ótimas de utilização do aço em estudo, com relação à soldagem, uma questão de grande interesse foi o risco da ocorrência de trinca a frio na junta soldada. Entre os fatores essenciais que as causam, estão a presença de hidrogênio que se difunde do MS para a ZAT; a existência de tensões de origem interna e ou externa aplicada, à junta soldada; a temperatura e presença de microconstituíntes susceptíveis ao trincamento, este provavelmente sob a ação dos três primeiros fatores.

A trinca a frio pode ocorrer tanto no MS quanto na ZAT região de grãos grosseiros; portanto, a análise visou observar a ocorrência de trinca nestas regiões. Após análise cuidadosa, observou-se que, na soldagem através do processo SAMG, com os parâmetros utilizados neste trabalho, não foram apresentados sinais de tais trincas em nenhuma das condições apresentadas na tabela 1, confirmando o que já era esperado em função das características do processo acima citado e do resultado do carbono equivalente do aço e do eletrodo.

Analisando-se as propriedades mecânicas da ZAT, e mais especificamente, a dureza máxima relacionada com o tempo de resfriamento ($\Delta t_{800-500}$) obtido durante a operação de soldagem, pode-se associar a microestrutura resultante a cada ponto da curva, isso pode permitir ao usuário projetar procedimentos de soldagem para obter as estruturas desejadas na ZAT e isentas de defeitos como a trinca a frio. Após a obtenção dos ciclos térmicos e dos valores de dureza, construiu-se as curvas de dureza versus tempos de resfriamento para cada valor de energia de soldagem, apresentadas nas figuras 2 e 3, que é uma quantificação das informações contidas no diagrama de resfriamento contínuo.

Alguns particulares podem ser observados nas figuras supra citadas:

- Na figura 2 quando $\Delta t_{800-500} = 2,57$ s, a dureza máxima é de 347 HV5. A microestrutura característica dessa região é martensita;
- Na parte superior, onde a inclinação é acentuada com $\Delta t_{800-500} = 5$ s, a microestrutura correspondente é predominantemente de martensita com presença significativa de segunda fase alinhada e ferrita poligonal intragranular;
- Uma região de inclinação suave, na parte inferior da curva onde a dureza é 243 HV5, a microestrutura corresponde é composta de ferrita de segunda fase alinhada; ferrita de contorno de grão e algumas colônias de martensita,
- Na parte inferior da curva, com $\Delta t_{800-500} \leq 16$ s, com dureza máxima em torno de 230 HV5 a microestrutura característica apresentada é predominante de ferrita de segunda fase alinhada e não alinhada;
- Na figura 3, onde o $\Delta t_{800-500} = 4$ s, a microestrutura varia entre martensita e algumas colônias de ferrita;
- Na parte superior da curva, segue um patamar onde o $\Delta t_{800-500} = 9$ s, a microestrutura característica é ferrita de segunda fase alinhada e de segunda fase não alinhada,
- A parte inferior da curva, a dureza é praticamente constante, e a microestrutura predominante é ferrita.

4. CONCLUSÕES

O comportamento observado na microestrutura e dureza da ZAT está diretamente relacionado com as variações ocorridas na energia de soldagem, temperatura de pré-aquecimento e consequentemente nos tempos de resfriamento ($\Delta t_{800-500}$).

A dureza se manifesta inversamente proporcional à energia de soldagem e ao pré-aquecimento devido ao fato de que o tempo de resfriamento é influenciado tanto pela energia de soldagem quanto pelo pré-aquecimento e consequentemente pela taxa de resfriamento, o que possibilita estruturas de menor e maior dureza tipo ferrita e martensita respectivamente.

O processo SAMG (MAG) e os parâmetros utilizados são viáveis e adequados para a soldagem do aço estudado, tendo-se em vista a não-ocorrência de trinca a frio em todas as condições de ensaios do presente trabalho.

5. REFERÊNCIAS

- 1 - LINERT, G. E. - WELDING METALLURGY. 3rd. New York, American Welding Society, 1967, p.631.
- 2 - EASTERLING, K. E. - Introduction to the Physical Metallurgy of Welding. London, Butterworths & Co. Ltd. 1983, 232p.
- 3 - FERRANTE, M. - Influência da Composição Química sobre a Microestrutura e Tenacidade de Metal de Solda Ferrítico. Parte I: Manganês, Silício, Oxigênio e Nióbio. Soldagem & Materiais, 1(3): 36-43, jul/set.1989.
- 4 - ALCÂNTARA, N. G. - Weld Metal Hydrogen Cold Cracking. Cranfield Institute of Technology - School of Industrial Science, 322p, Cranfield, April, 1982 (PhD Thesis).
- 5 - ALCÂNTARA, N. G. - Trincas a Frio Causadas pelo Hidrogênio- Problemas e Soluções.In.: Simpósio de Tecnologia de Soldagem da Região Sul, 1, Porto Alegre, RS, 22-26 set. 1986, p.31-50, Anais.
- 6 - MARTINS, S. H. e ALCÂNTARA, N. G. - Influência do Nível de Tensão Sobre as Trincas Induzidas pelo Hidrogênio em Metais de Solda. Soldagem & Materiais. 1(2): 38-44, abr/jun. 1989
- 7 - MARTINS, S. H. - Estudo das Trincas Induzidas pelo Hidrogênio Através do Ensaio de Restrição Controlada, São Carlos-SP, 1990, 88p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos.

- 8 - MULLER, L. R. e ALCÂNTARA, N. G. - Obtenção e Caracterização das Curvas de Resfriamento Direto em Metais de Solda. In.: Encontro Nacional de Tecnologia de Soldagem, XII, Campos do Jordão, 5-8 out. 1986, Anais.
- 9 - PERDIGÃO, S. C. - Instruções para Classificação dos Constituintes Microestruturais do Metal de Solda dos Aços Ferríticos, Utilizando Microscopia Ótica. In.: Encontro Nacional de Tecnologia de Soldagem, XII, Campos do Jordão, 1986, p.212-228, Anais.
- 10 - GUIDE TO THE LIGHT MICROSTRUCTURE EXAMINATION OF FERRITIC STEEL WELD METALS. IIW DOC. No. IX-1533-88, IXJ-123-87 Revision 2, June 1988.
- 11 - MONDENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. dos - Curso de Metalurgia de Soldagem. Universidade Federal de Minas Gerais, DEM, Belo Horizonte - MG, 1985, 388p.
- 12 - ASKESEN, O. M.; SIMOSEN, T. - Techniques to Examining Transformation Behaviour in Weld Metal and HAZ, a State of Art Review, Welding in the World 25(1/2): 26-34, 1987.
- 13 - LANCASTER, J. F. - Metallurgy of Welding. 3.ed. London, George Allen & Unwin Ltd. .1980, 254p.
- 14 - THAULOW, C.; PAUW, A.; GUTTORMSEN, K. - The Heat Affected Zone Toughness of Low Carbon Microalloyed Steel. Welding Journal 66(9): 266s-279s, September, 1987.
- 15 - LARS, E. S. - Control of Microstructure and Properties in Steel Arc Welds. Florida -USA:, inc. 1994
- 16 - CERJAK, H & POSCH, G. & LETOFSKY. - Gleeble-Simulation for Round Robin Test on "HAZ Microstructure". IIW Doc. No IX B 246-97.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq, COSIPA, CEFET-PI, PPG-CEM-DEMa-UFSCar.