

SIMULAÇÃO DE CICLOS TÉRMICOS DE SOLDAGEM (1)

WAGNER REIS DA COSTA CAMPOS (2)
GERALDO DE PAULA MARTINS (3)
PAULO VILLANI MARQUES (4)
VICENTE TADEU LOPES BUONO (4)

RESUMO

A localização do entalhe em corpos-de-prova para ensaios de impacto de juntas soldadas apresenta problemas devidos à pequena extensão das subregiões de interesse e ao formato do cordão de solda. Além disso, não se pode garantir que a fratura se propague apenas numa subregião. Tais dificuldades podem ser superadas pela utilização de corpos-de-prova que apresentem uma única microestrutura, representativa da região de interesse, obtidos por simulação de ciclos térmicos de soldagem. Neste trabalho avalia-se a utilização de um forno de indução eletromagnética para simulação de ciclos térmicos de soldagem em corpos-de-prova com tamanho adequado para ensaios mecânicos e metalográficos, atendendo aos critérios da norma KTA 1406.

ABSTRACT

Notch localization in impact test specimens of welded joints exhibit various problems due to small extension of the sub-regions of interest and to the form of the weld bead. Besides that, fracture may always propagate through sub-regions other than that of interest. Such difficulties can be overcome by using test specimens exhibiting solely the microstructure of interest, obtained by simulation of the weld thermal cycle. In this work the use of an electromagnetic induction furnace to simulate weld thermal cycles in specimens of adequate size for mechanical and metallographic tests according to KTA 1406 norm was evaluated.

-
- (1) Contribuição Técnica ao XIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Rio Grande do Sul, Outubro de 1988
 - (2) Engº Mecânico, Aluno do CPGEMM/UFMG - CDTN/Nuclebrás
 - (3) Engº Mecânico, M.Sc. - CDTN/Nuclebrás
 - (4) Físico, M.Sc. - Professor Assistente do CPGEMM/UFMG

1. INTRODUÇÃO

A zona termicamente afetada (ZTA) de soldas de aço-carbono e micro ligados geralmente apresenta problemas de perda de tenacidade, devidos principalmente ao crescimento excessivo de grãos e à microestrutura formada em função do ciclo térmico de soldagem. A tenacidade de juntas soldadas tem sido avaliada principalmente através de ensaios de impacto Charpy-V, mas esta técnica apresenta problemas de ordem prática, particularmente quanto à localização do entalhe na região de interesse e à impossibilidade de se garantir a propagação da fratura apenas nesta região.

Estas dificuldades podem ser minimizadas pelo uso de simulação de ciclos térmicos de soldagem, de tal modo que peças com dimensões suficientes para a retirada de corpos-de-prova para ensaios metalográficos e principalmente mecânicos apresentem uma única microestrutura representativa daquela da região que se deseja estudar.

Os equipamentos mais comuns para simulação de ciclos térmicos de soldagem promovem o aquecimento das amostras por efeito Joule, usando a peça como condutor elétrico. O resfriamento é feito através de condução para as garras que sustentam a peça e é controlado por jatos de gás. Tais equipamentos são de custo elevado e existem poucos no país.

A microestrutura da zona termicamente afetada depende principalmente da composição química do material, da quantidade, tamanho e distribuição das inclusões, do tamanho de grão austenítico e do ciclo térmico de soldagem, particularmente da velocidade de resfriamento ou do tempo de resfriamento entre duas temperaturas críticas, normalmente tomadas como 800 e 500°C para aços-carbono e baixa liga.

Neste trabalho avaliam-se os resultados da adaptação de um forno de indução eletromagnética para simulação de ciclos térmicos de soldagem em um aço microligado do tipo WStE 370-N, segundo os critérios da norma KTA 1406 [1], que qualifica aços para fabricação de vasos de contenção de reatores nucleares.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.a. Material

Utilizou-se como metal de base para soldagem e simulação um aço microligado do tipo WStE 370-N, de procedência nacional, a ser qualificado para a fabricação do vaso de contenção do reator nuclear da usina de Angra III. A composição química do aço é dada na Tabela I.

Para a soldagem usaram-se um arame de 4 mm de diâmetro e um fluxo aglomerado, básico, ligado ao manganês, ambos de fabricação nacional, classificados como AWS F6A2 EL-12.

2.b. Equipamentos

Foi usado um equipamento convencional de soldagem a arco submerso com capacidade para fornecer corrente contínua de até 1000 A.

Os ciclos térmicos de soldagem foram simulados utilizando-se a fonte de energia de um forno de indução eletromagnética, com potência de 50 kW, ao qual foi adaptada uma bobina de indução com 100 mm de diâmetro e 370 mm de comprimento, fabricada a partir de um tubo de cobre com 16 mm de diâmetro, mostrada na Figura 1. Um dispositivo de posicionamento garantia que a amostra a ser submetida à simulação permanecesse na região central da bobina. O resfriamento foi feito em banho de óleo.

As medidas de temperatura foram feitas usando-se termopares de Pt/Pt-13%Rh, com fios de 0,35 mm de diâmetro, e um registrador potenciométrico convencional, do tipo x-t.

2.c. Metodologia

Inicialmente foi depositado um cordão de solda sobre uma chapa, com dimensões de 300 x 250 x 39 mm, da qual foram retirados corpos-de-prova para ensaios metalográficos e de dureza. Os parâmetros de soldagem são mostrados na Tabela II.

O ciclo térmico obtido nesta soldagem foi avaliado por cálculo utilizando-se nomogramas e equações disponíveis na literatura [2-4] e mostradas no Apêndice.

Corpos-de-prova com 20 mm de diâmetro e 180 mm de comprimento foram tirados do mesmo material e submetidos ao ciclo térmico simulado. Este foi acompanhado utilizando-se termopares fixados na borda da região central do corpo-de-prova, em furos de 1,2 mm de diâmetro, perpendiculares ao seu eixo.

Amostras da peça soldada e das submetidas à simulação foram preparadas para ensaios metalográficos e de dureza, segundo os procedimentos convencionais. Os resultados destes ensaios foram então comparados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os cálculos indicaram uma temperatura de pico na região de crescimento de grão da ZTA, avaliada pela equação (1), da ordem de 1300°C, e um tempo de resfriamento entre 800 e 500°C de 24 s pela equação (2), de 7,6 s pela equação (3.a) e de 15 s pelo nomograma da referência [4].

Em vista desta divergência de resultados optou-se por simular o ciclo térmico nas condições estabelecidas em [1] e se proceder uma análise comparativa dos resultados dos ensaios metalográficos e de dureza das amostras soldada e submetidas a simulação.

A Figura 2 mostra os ciclos térmicos obtidos em três corpos-de-prova submetidos a simulação. Pode-se observar a reprodutibilidade dos ciclos térmicos simulados e que o tempo de aquecimento e os tempos de resfriamento entre 800 e 500 e 800 e 300°C estão de acordo com as exigências da norma KTA 1406 que, em resumo, são: tempo de aquecimento de 35 ± 10 s, tempo de permanência na temperatura de pico de 5 ± 1 s, tempo de resfriamento entre 800 e 500°C de 10 ± 2 s, tempo de resfriamento entre 800 e 300°C de 35 ± 10 s e temperatura de pico de 1330 ± 20 °C.

A Tabela III mostra os resultados dos ensaios de dureza para as peças soldada e submetidas a simulação. As durezas obtidas nos corpos-de-prova submetidos à simulação são equivalentes aos valores medidos na ZTA da solda. As diferenças entre os diversos valores obtidos com simulação podem ser justificadas considerando-se as pequenas diferenças nos ciclos térmicos a que foram submetidos os corpos-de-prova (Figura 2), particularmente no que se refere ao tempo de resfriamento entre 800 e 300°C. Por exemplo, o valor mais elevado de dureza observado na amostra S-3 pode ser devido ao menor tempo de resfriamento neste intervalo de temperaturas. Contudo, deve ser lembrado que estas variações no ciclo térmico estão dentro dos limites estabelecidos pela norma KTA 1406.

A Figura 3 mostra uma micrografia da região da solda, onde se vê as regiões do metal base (MB), ZTA e zona de fusão (ZF).

A Figura 4 mostra detalhes das microestruturas da ZTA da solda e dos corpos-de-prova submetidos à simulação. A nível de microscopia ótica não se observa nenhuma diferença significativa entre estas microestruturas. Ao longo do comprimento dos corpos-de-prova também não se notam variações importantes de microestrutura ou dureza.

Estes resultados mostram que a montagem utilizada atende aos requisitos de simulação de ciclos térmicos de soldagem exigidos pela norma KTA 1406, com boa reprodutibilidade de resultados.

4. CONCLUSÕES

A simulação de ciclos térmicos de soldagem usando aquecimento indutivo, nas condições utilizadas neste trabalho, proporcionou boa reprodutibilidade, tendo os parâmetros dos ciclos térmicos obtidos atendido aos requisitos da norma KTA 1406.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Tecnologia de Materiais do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear da NUCLEBRÁS (CDTN), em Belo Horizonte, pelo apoio dado a este estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KERntechnischer Ausschuss. Schweißsimulationsversuche. In: —. Grundsätze für die Begutachtung von Werkstoffen für den Einsatz in Kernkraftwerken Teil 1. Leichtwasserreaktoren. KÖln, 1984. Abschnitt 3.2.4. p. 33-6 (KTA-1406).
- [2] OKUMURA, T. & TANIGUCHI, C. Engenharia de soldagem e aplicações. Rio de Janeiro, LTC, 1982. p. 69.
- [3] AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding Handbook. 7 ed. Miami, 1976. V. 1, p. 80, 84-5.
- [4] IRSID. Soudabilité des aciers au C-Mn et microalliés; rapport final. s. l., p. 9-10.

TABELA I - Composição Química do Aço Utilizado (% peso)									
C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	Ni	Cr	N
0,19	1,6	0,37	0,012	0,007	0,019	0,043	0,04	0,17	0,0056
Traços de V, Cu e Mo.									

TABELA II - Parâmetros de Soldagem	
Corrente de Soldagem (A)	- 560
Tensão de Soldagem (V)	- 26
Velocidade de Soldagem (mm/s)	- 4,8
Eficiência	- 0,9
Diâmetro do Arame (mm)	- 4

TABELA III - Resultados das Medidas de Dureza (HV - 5)	
Amostra	Dureza
M B	169 ± 1,2
Z F	212 ± 10,8
Z T A	309 ± 12,6
S - 1	305 ± 13,5
S - 2	301 ± 8,9
S - 3	333 ± 10,0

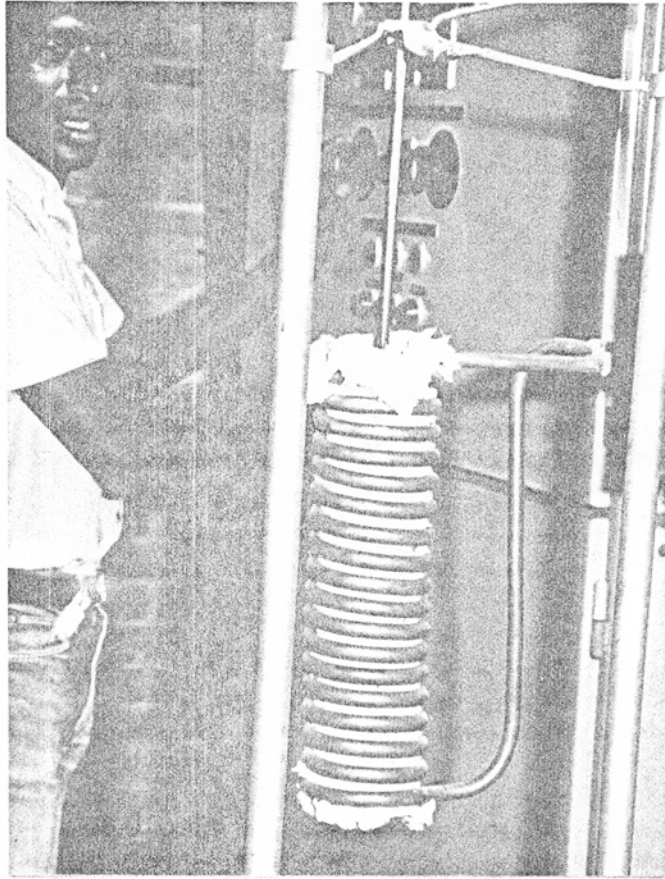


FIGURA 1 - Bobina de indução para simulação dos ciclos térmicos.

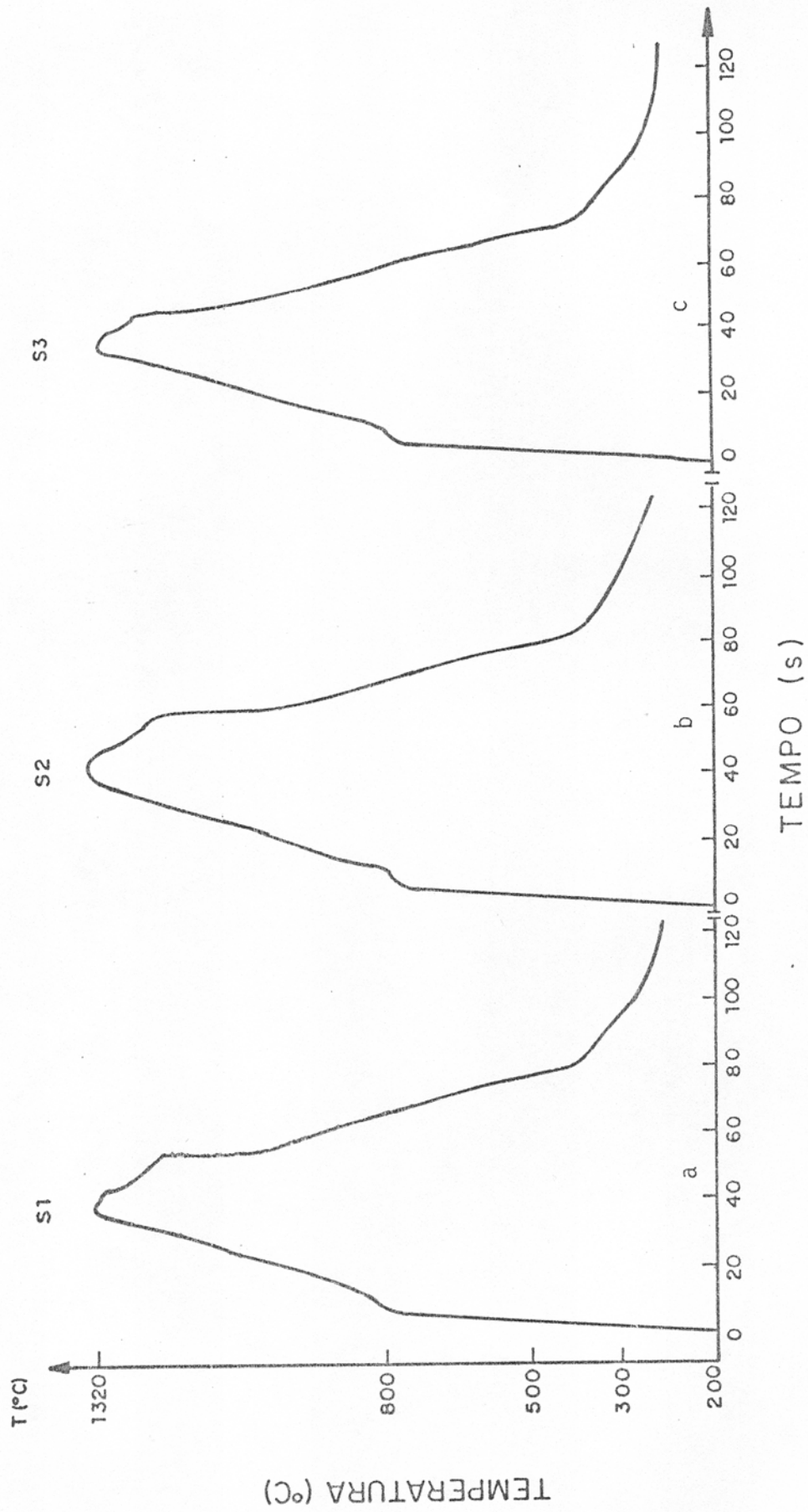


FIGURA 2 - Ciclos térmicos simulados nos corpos-de-prova:
 a) amostra S-1, b) amostra S-2 e c) amostra S-3.

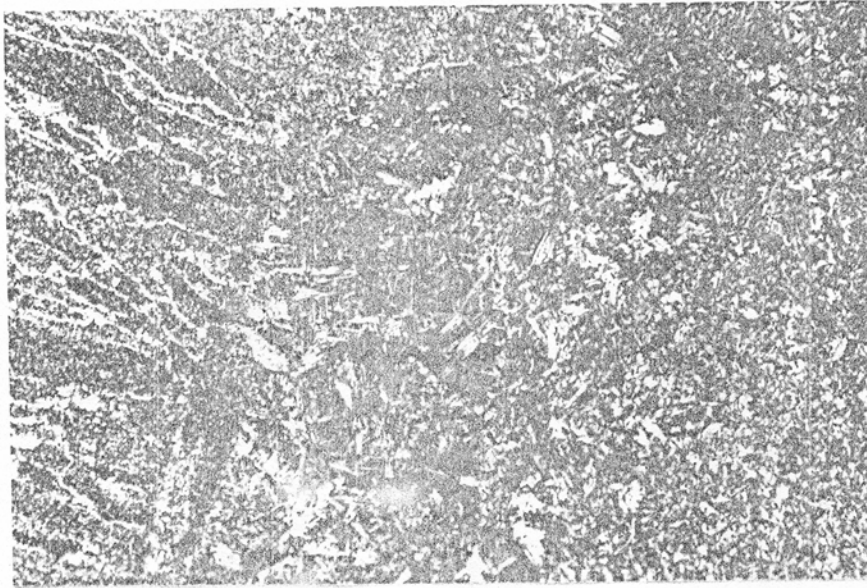
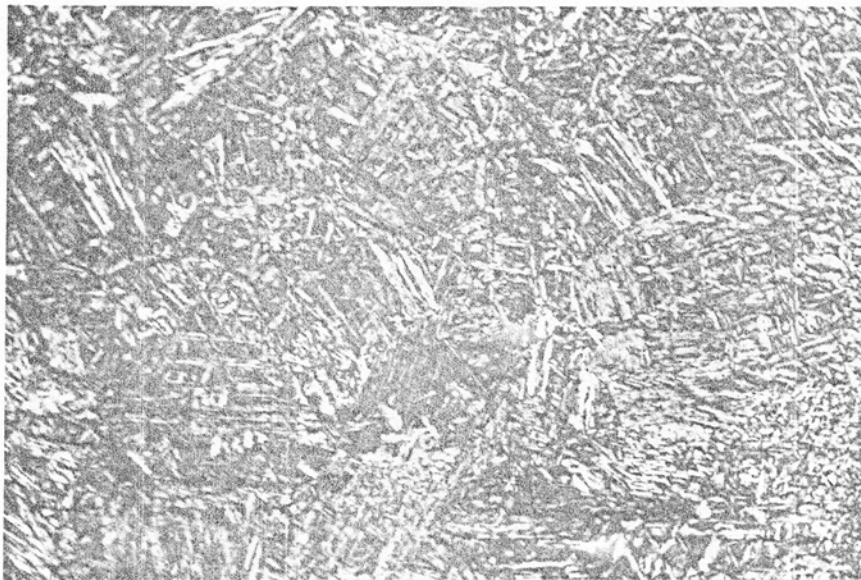
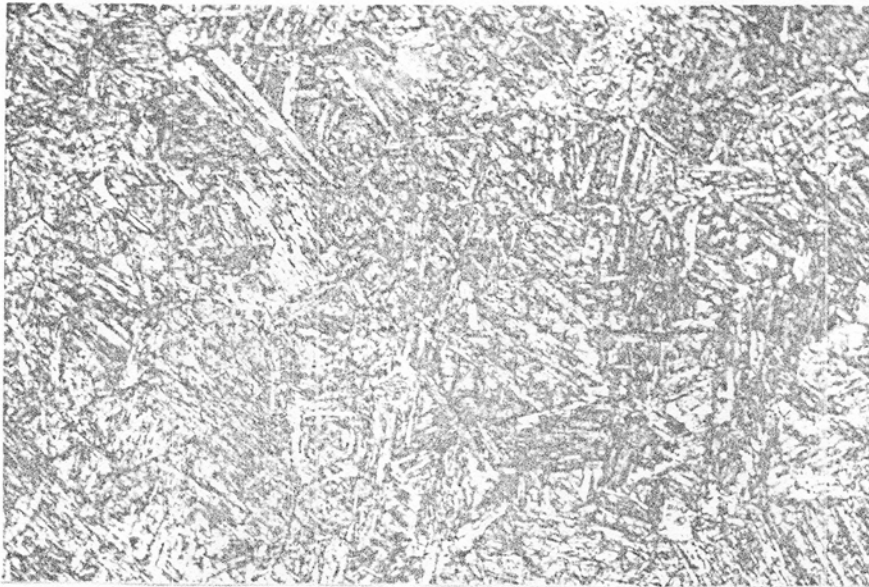


FIGURA 3 - Micrografia da solda. Aumento: 50 X, Ataque: Nital.

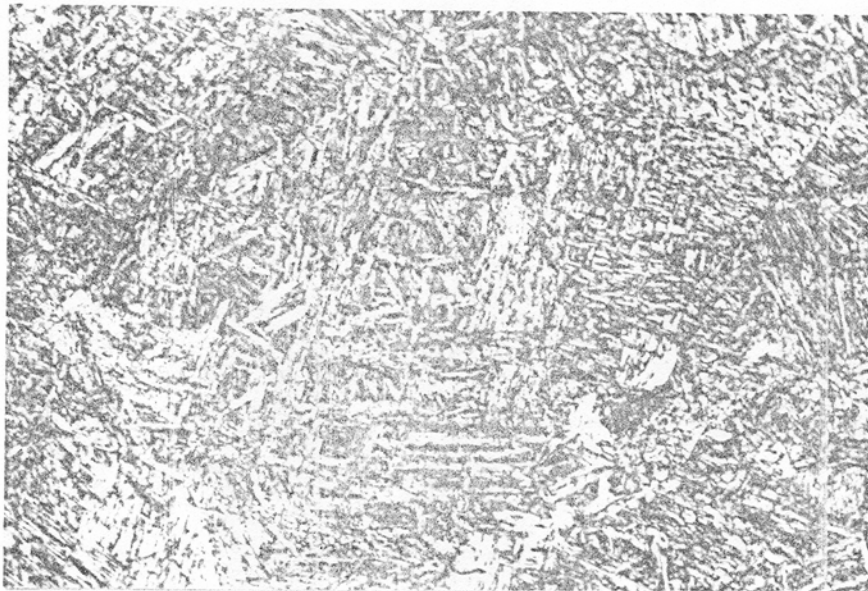


(a)

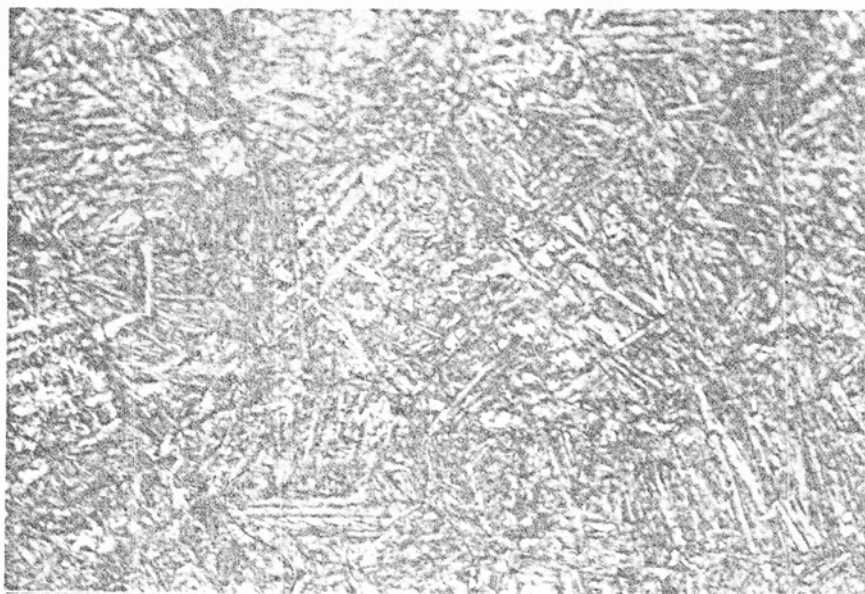
FIGURA 4 - Microestruturas obtidas nas amostras a) soldada, b) S-1, c) S-2 e d) S-3. Aumento: 200 X, Ataque: Nital.



(b)



(c)



(d)

APÊNDICE

Equação para cálculo da temperatura de pico

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4 \rho C e y}{H} + \frac{1}{T_f - T_0} \quad (1)$$

Equação para cálculo do tempo de resfriamento entre 800 e 500°C

$$\Delta t = \frac{K H^n}{(\bar{T} - T_0)^2 \left[1 + \frac{2}{\pi} \arctg \left(\frac{e - e_0}{a} \right) \right]} \quad (2)$$

Equação para cálculo da velocidade de resfriamento teórica

$$\frac{dT}{dt} = \frac{2 \pi k (T - T_0)^2}{H} \quad (3)$$

Equação para cálculo do tempo de resfriamento teórico

$$\Delta t = \frac{H}{2 \pi k} \left(\frac{1}{T_2 - T_0} - \frac{1}{T_1 - T_0} \right) \quad (3.a)$$

onde:

- T_p é a temperatura de pico, em °C;
- T_0 é a temperatura inicial da peça, em °C;
- T_f é a temperatura de fusão do material, em °C;
- \bar{T} é a temperatura média na ZTA, tabelada em 600°C;
- ρ é a densidade do material, em g/mm³;
- C é o calor específico do material, em J/g . °C;
- e é a espessura da peça, em mm;
- y é a distância do ponto considerado à linha de fusão, em mm;
- H é a energia de soldagem, em J/mm;
- Δt é o tempo de resfriamento entre 800 e 500°C, em s;
- T_1 e T_2 são as temperaturas críticas 800 e 500°C respectivamente;
- k é a condutividade térmica do material, em J/°C . s . mm;
- K , n , a e e_0 são constantes, valendo respectivamente, 950, 0,95, 3 e 12 para as condições da Tabela II.