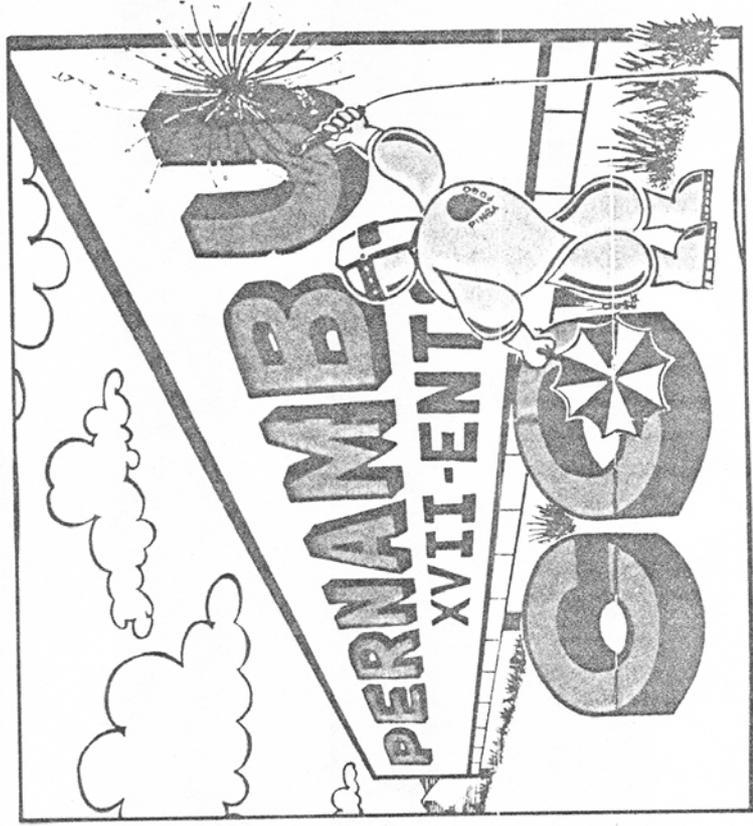




Associação Brasileira de Soldagem

**ANAIS
XVII ENCONTRO NACIONAL
DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM**



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE SOLDAGEM

Rua Correia Vasques, nº 67 — Vila Clementino

CEP 04038 — São Paulo / SP

Fones: (011) 571-4662 e 571-3705

FAX: (011) 5713881

01 a 04 de Setembro de 1991

Recife / PE

AVALIAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO INDUTIVO PARA SIMULAÇÃO DE CICLOS TÉRMICOS DE SOLDAGEM ⁽¹⁾

WAGNER REIS DA COSTA CAMPOS ⁽²⁾
PAULO VILLANI MARQUES ⁽³⁾
GERALDO DE PAULA MARTINS ⁽²⁾

RESUMO

Neste trabalho foi avaliada a simulação de ciclos térmicos de soldagem em amostras de grandes dimensões, utilizando-se um equipamento indutivo para aquecimento das peças. Uma comparação entre regiões da zona termicamente afetada de soldas a arco submerso e corpos-de-prova simulados com base na temperatura de pico e no tempo de resfriamento entre 800 e 500 °C foi feita, através de ensaios mecânicos e metalográficos.

ABSTRACT

The simulation of welding thermal cycles in relatively large specimens, using a inductive heating equipment, was evaluated. The microstructure and mechanical properties of the specimens were compared to those of corresponding regions of the heated affected zone of SAW welds in terms of peak temperature and cooling time between 800 and 500 °C.

1. INTRODUÇÃO

Um estudo para se avaliar a possibilidade de simulação de ciclos térmicos de soldagem em um equipamento indutivo foi feito em 1988 pelo Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG⁽¹⁾. Foi mostrado que o equipamento utilizado permitia a simulação de ciclos térmicos de soldagem, respeitados os limites da norma alemã KTA 1406⁽²⁾, que trata da qualificação de aços estruturais utilizados na fabricação de vasos de pressão e contenção de reatores nucleares.

⁽¹⁾ Contribuição Técnica ao XVII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem - Recife-PE, 01 a 04 de setembro de 1991.

⁽²⁾ Eng^o Mecânico, M. Sc., CDTN/CNEN.

⁽³⁾ Físico, M. Sc. Professor Assistente do DMT-UFMG.

Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG
Rua Espírito Santo, 35 - 2^o andar - Centro
30.160 - Belo Horizonte - MG

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN
Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN
Caixa Postal 1041 - Cid. Universitária - Pampulha
30.161 - Belo Horizonte - MG

No presente trabalho é avaliada a validade da simulação de ciclos térmicos sofridos por diferentes regiões da zona termicamente afetada de juntas soldadas, utilizando-se o mesmo equipamento.

Foram tomados como parâmetros base para a simulação a temperatura de pico (T_p) e o tempo de resfriamento entre as temperaturas de 800 e 500 °C (Δt_{500}^{800}) experimentados por diferentes regiões da zona termicamente afetada de juntas soldadas pelo processo a arco submerso, com diferentes energias de soldagem.

A homogeneidade das amostras simuladas ao longo de seu comprimento e de sua espessura foi avaliada através de ensaios mecânicos e metalográficos. Uma comparação entre as características das amostras simuladas e as características da zona termicamente afetada de soldas feitas pelo processo a arco submerso foi feita, através dos mesmos ensaios.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.

2.1 - Materiais:

Utilizou-se como metal base, tanto para soldagem como para simulação, um aço microligado do tipo WStE 370-N, de procedência nacional, na espessura de 39,5 mm, cuja composição química é dada na Tabela I.

Para todos os cordões de solda utilizaram-se uma arame de 4,0 mm de diâmetro e um fluxo aglomerado básico, ligado ao manganês, classificados como AWS F6A2 E1-12K, de fabricação nacional.

Tabela I - Composição química do metal base utilizado (% peso)

C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	Ni	Cr	N	V, Cu, Co
0,19	1,60	0,37	0,012	0,007	0,019	0,043	0,04	0,17	0,0056	Traços

2.2 - Equipamentos:

O aquecimento das amostras para simulação de ciclos térmicos foi feito utilizando-se a fonte de energia de um forno de indução

eletromagnética de alta potência (50 kW) e média frequência (4,8 kHz), à qual foi acoplada uma bobina com diâmetro interno de 100 mm e comprimento de 370 mm, fabricada a partir de um tubo de cobre com 16 mm de diâmetro. O resfriamento das amostras foi feito por imersão em banho de óleo.

Foi utilizado um equipamento convencional de soldagem a arco submerso, com capacidade para até 1000 A, corrente contínua, para confecção das soldas.

O registro dos ciclos térmicos foi feito utilizando-se termopares de Cromel-Alumel para temperaturas até 1275 °C e de Platina-Platina/13 % Rhódio, para temperaturas superiores, com diâmetro de 0,10 e 0,35 mm respectivamente, acoplados a um registrador "x-t" potenciométrico convencional.

2.3 - Metodologia:

a) Cordão sobre chapa:

Foram depositados quatro cordões de solda sobre chapa pelo processo a arco submerso, referidos como CS-1, CS-2, CS-3 e CS-4, com diferentes valores de energia de soldagem. Os valores de energia líquida de soldagem foram calculados pela equação abaixo:

$$H_L = \eta V I / v_p, \text{ onde} \quad (1)$$

H_L é a energia líquida de soldagem (em J/mm), V é a tensão do arco (em V), I é a corrente de soldagem (em A), v_p é a velocidade de soldagem (em mm/s) e η é o rendimento do processo, assumido como 0,85^[3].

Com os valores das energias líquidas de soldagem foram calculados os valores do tempo de resfriamento At_{500}^{800} , utilizando-se a equação^[3]:

$$At_{500}^{800} = \frac{H_L}{2 \pi k} \left[\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right], \text{ onde} \quad (2)$$

k é a condutividade térmica do material, tendo sido adotado o valor de 0,028 J/(mm s °C)^[4], e T_0 é a temperatura inicial da peça.

Para cada cordão sobre chapa foi levantado o perfil de dureza (HV5) da zona termicamente afetada e um perfil metalográfico, segundo as técnicas usuais, como mostrado na figura 1.

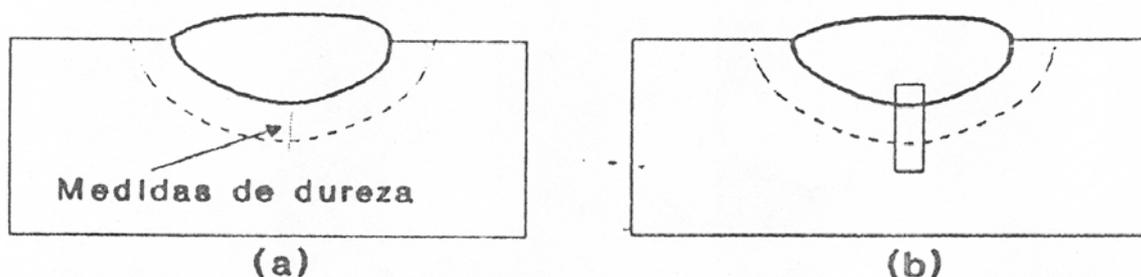


Fig. 1 - Posições onde foram realizadas (a) as medidas de dureza e (b) os ensaios metalográficos nos cordões sobre chapa.

b) Junta soldada com chanfro meio-V:

Uma junta com chanfro meio-V em passe único, mostrada na figura 2, foi confeccionada para a retirada de corpos-de-prova para ensaios Charpy-V. Esta junta também foi feita por arco submerso e identificada como JC.

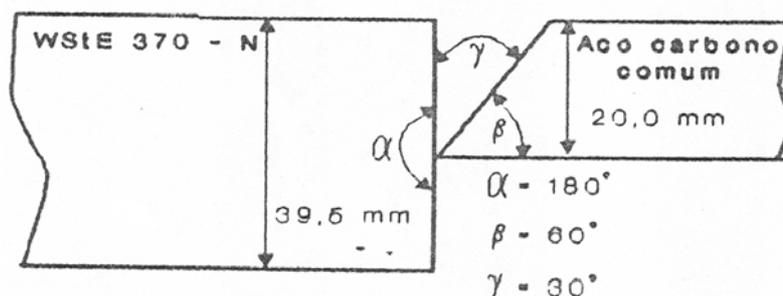


Fig. 2 - Junta utilizada na solda para retirada de corpos de prova para ensaio de impacto Charpy-V.

A energia líquida de soldagem e o tempo de resfriamento para esta junta foram obtidos a partir do ábaco do IRSID^[5], mostrado na figura 3, considerando-se uma junta em X, com valor de ϕ ($= \alpha + \beta$) obtido com os valores mostrados na figura 2. A equação (2) não era aplicável neste caso pois foi obtida para fonte de calor puntual e chapa grossa.

$$H_{\text{MEDIDO}} = \frac{V \cdot I}{v}$$

$$V = 30 \text{ V}$$

$$I = 580 \text{ A}$$

$$v = 5,0 \text{ mm/s}$$

$$H_{\text{MEDIDO}} = 34,8 \text{ kJ/cm}$$

$$H_{\text{EQUIVALENTE}} = H_L = 23,0 \text{ kJ/cm}$$

$$H_L = 2.300 \text{ J/mm}$$

$$\Delta t \frac{800}{500} = 11,0 \text{ s}$$

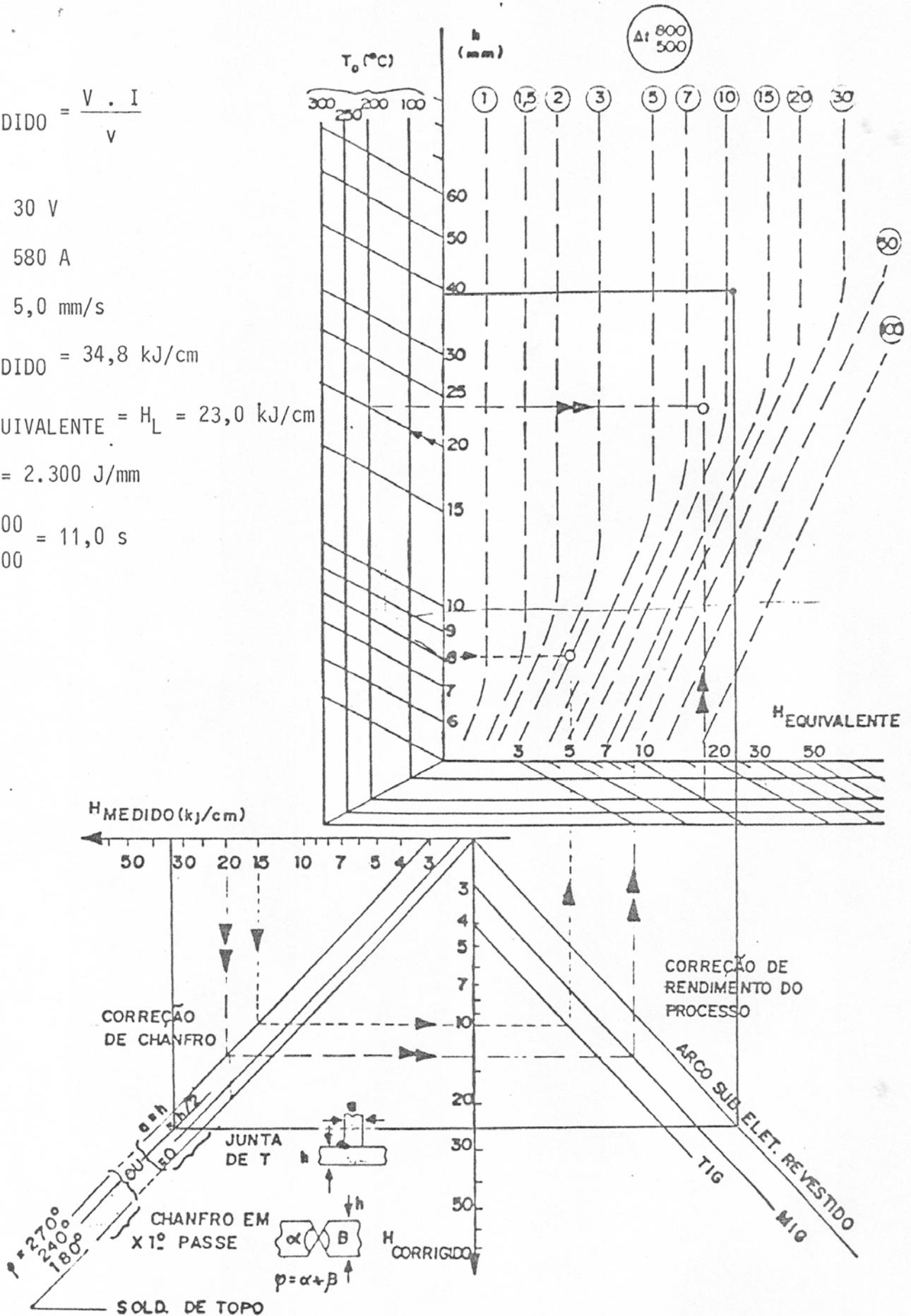


Fig. 3 - Ábaco do IRSID⁽⁵⁾ utilizado para determinação da energia líquida de soldagem e do tempo de resfriamento da junta com chanfro em meio-V.

Desta junta foram retirados 13 corpos-de-prova (J-1 a J-13) para ensaio de impacto Charpy-V a 0 °C do material da zona termicamente afetada (ZTA), com dimensões de 10 x 3,6 x 56 mm e entalhe localizado entre 0,30 e 0,35 mm da linha de fusão. Foram feitas também medidas de dureza (HV5), como mostrado na figura 4.

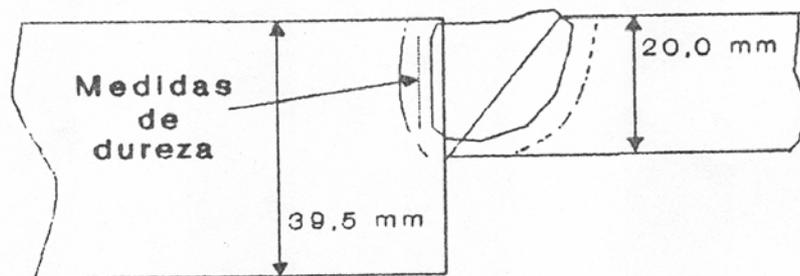


Fig. 4 - Posições de medida de dureza na ZTA da junta soldada com chanfro meio-V.

Foram ainda calculados os valores das temperaturas de pico em °C (T_P) atingidas a distâncias de 0,30 e 0,35 mm da linha de fusão, utilizando-se a equação^[6,7]:

$$\frac{1}{T_P - T_o} = \frac{4,13 \rho C h d}{E_L} + \frac{1}{T_F - T_o}, \text{ onde} \quad (3)$$

ρC é o calor específico volumétrico do material, tendo sido adotado o valor de 0,0044 (J/mm³ °C)^[4]; h é a espessura da chapa (em mm), d é a distância à linha de fusão da região onde a temperatura do material atingiu o valor de T_P (em mm) e T_F é a temperatura de fusão do material, tomada como 1510 °C^[4].

c) Amostras simuladas:

Foram retiradas 14 amostras do material base para serem submetidas a ciclos térmicos simulados de soldagem (identificadas como S-1 a S-14), sendo que S-1 a S-3 tinham seção circular, com diâmetro de 20 mm, e as restantes seção quadrada de 17 x 17 mm. Todas amostras tinham comprimento de 180 mm.

A simulação consistiu de um aquecimento rápido até a temperatura de pico (T_P) no equipamento indutivo, seguido de resfriamento em banho de óleo.

Duas destas amostras foram utilizadas para avaliação da homogeneidade, em termos de dureza e microestrutura, segundo o esquema mostrado na figura 5.

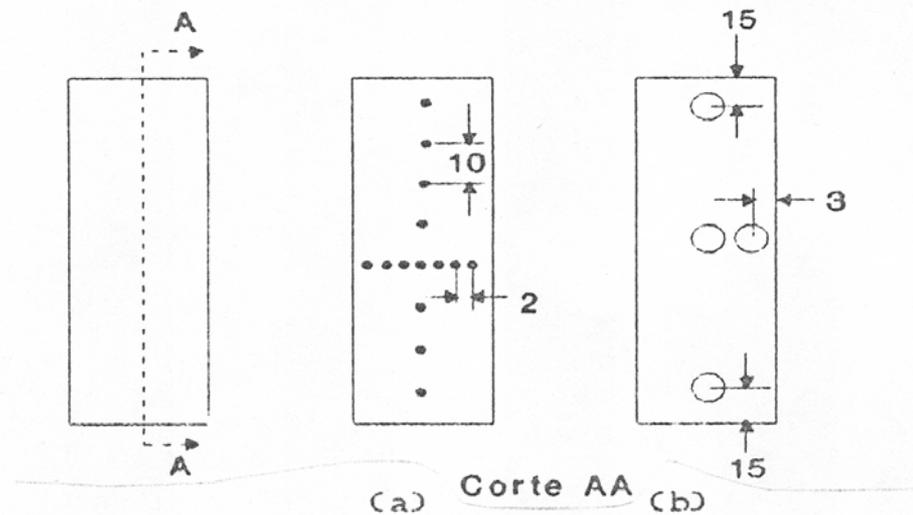


Fig. 5 - Posições onde foram realizados ensaios para avaliação da homogeneidade das amostras simuladas S-9 e S-13 para (a) medidas de dureza e (b) ensaio metalográfico.

Outras duas amostras foram utilizadas para avaliação da resistência ao impacto, através do ensaio Charpy-V, a 0 °C, com corpos-de-prova com as mesmas dimensões dos usados para a junta soldada com chanfro. A escolha destas amostras foi feita a partir da comparação de At_{500}^{800} e da temperatura de pico (T_p) das amostras simuladas e At_{500}^{800} e da temperatura de pico a 0,30 e 0,36 mm da linha de fusão na junta soldada. De cada amostra foram retirados quatro corpos-de-prova, como mostrado esquematicamente na figura 6.

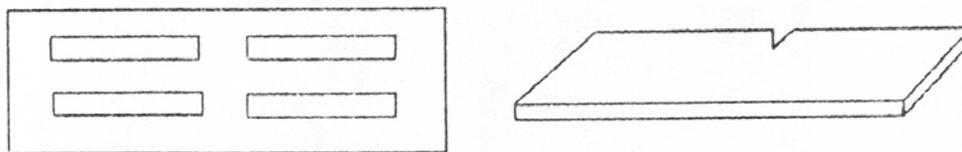


Fig. 6 - Posições para retirada de corpos-de-prova para ensaio de impacto Charpy-V das amostras S-2 e S-3.

Foram feitas medidas de dureza e ensaios metalográficos nas amostras simuladas, na região central do corpo-de-prova, como mostrado na figura 7.

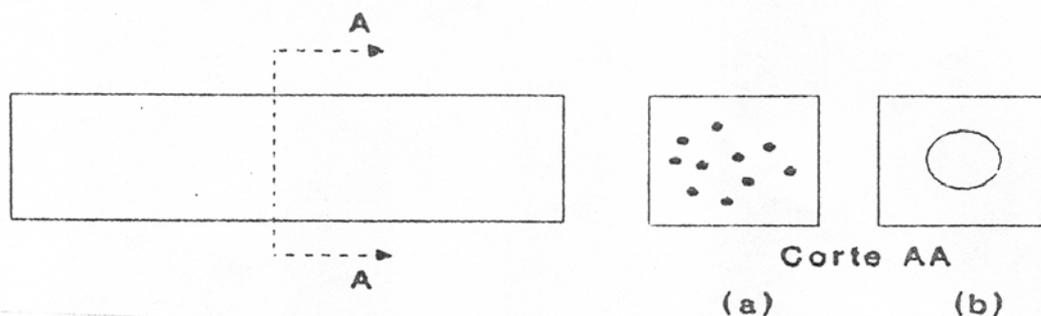


Fig. 7 - Posições para ensaio de (a) dureza e (b) metalográfico das amostras submetidas a simulação.

3. RESULTADOS

A Tabela II mostra os valores das energias líquidas de soldagem e de At_{500}^{800} obtidos pelas equações (1) e (2) para os cordões sobre chapa e pelo ábaco da figura 2 para a solda em chanfro.

Tabela II - H_L e At_{500}^{800} obtidos para as juntas soldadas.

Cordão N ^o	H_L (J/mm)	At_{500}^{800} (s)
CS-1	1933	9,0
CS-2	2134	9,9
CS-3	2635	12,2
CS-4	3051	14,1
JC	2300	11,0

A figura 8 mostra os valores de dureza dos cordões sobre chapa para diferentes valores da distância à linha de fusão, de acordo com a figura 1(a).

A Tabela III mostra os valores do tempo de resfriamento, da temperatura de pico a 0,30 e a 0,35 mm da linha de fusão (respectivamente $T_p 0,30$ e $T_p 0,35$) e dureza da junta com chanfro.

Dureza na ZTA

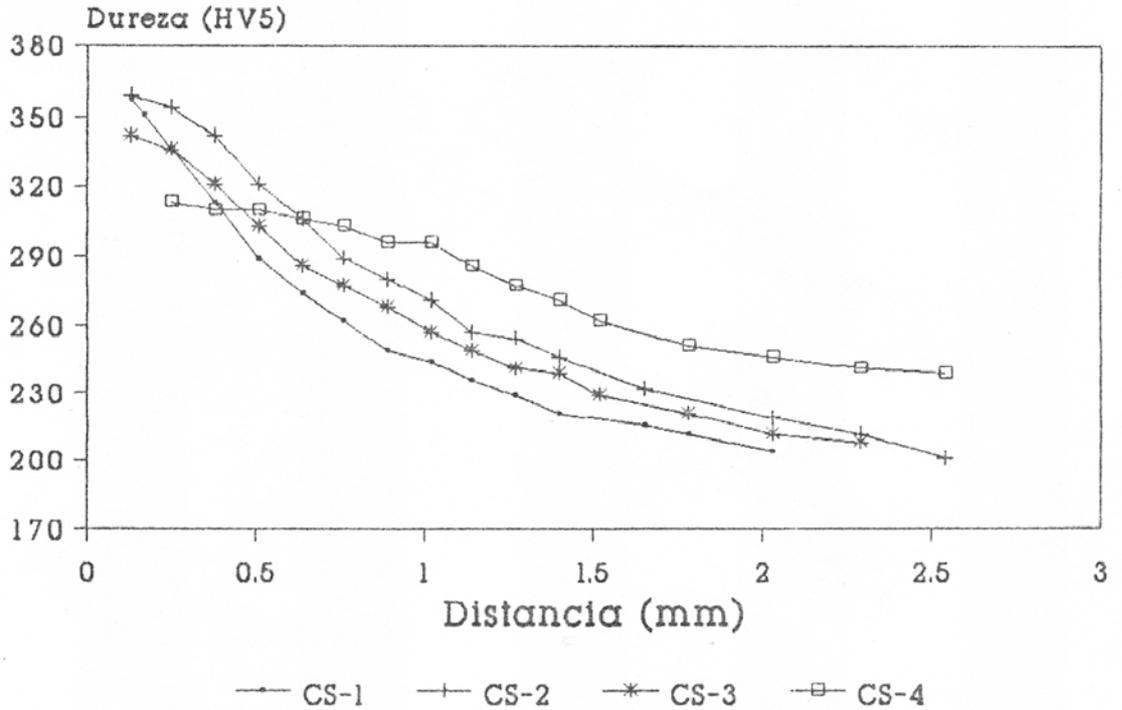


Fig. 8 - Perfil de dureza dos cordões sobre chapa.

Tabela III - Valores At_{500}^{800} , T_P para $d = 0,30$ e $d = 0,35$ mm da linha de fusão e dureza medida entre 0,30 e 0,35 mm da linha de fusão para a junta com chanfro.

Cordão	At_{500}^{800} (s)	T_P 0,30 (°C)	T_P 0,35 (°C)	Dureza HV5	
				Média	Desv. Padrão
JC	11,0	1329	1303	334	9,9

A Tabela IV mostra os valores da resistência ao impacto obtidos para os corpos-de-prova J-1 a J-13.

A resistência média ao impacto da junta soldada com chanfro, para os corpos-de-prova em que a fratura ocorreu na ZTA foi de $9,97 \pm 0,81$ kgf.m/cm².

Tabela IV - Resultados do ensaio de impacto da junta soldada em chanfro, a 0 °C.

Corpo de prova N ^o	Resist. ao Impacto (kgf.mm/cm ²)	Localização da fratura
J-1	9,46	ZTA (1)
J-2	9,13	ZTA
J-3	6,25	LF (2)
J-4	10,18	ZTA
J-5	3,46	LF
J-6	5,53	LF
J-7	3,10	LF
J-8	9,83	ZTA
J-9	4,82	LF
J-10	5,97	LF
J-11	4,86	LF
J-12	11,24	ZTA
J-13	4,52	LF

(1) ZTA - Fratura na ZTA, paralela à linha de fusão.

(2) ZF - Fratura desviada para a linha de fusão.

A Tabela V mostra os valores da temperatura de pico e tempo de resfriamento obtidos dos ciclos térmicos e os valores de dureza medidos (figura 7(a)) para as amostras simuladas.

Tabela V - T_P, At₅₀₀⁸⁰⁰ e valores de dureza HV5 das amostras submetidas à simulação.

Amostra N ^o	T _P (°C)	At ₅₀₀ ⁸⁰⁰ (s)	Dureza HV-5	
			Média	Desv. Padrão
S-1	1330	11,0	320	10,1
S-2	1320	11,5	326	10,6
S-3	1315	10,3	349	10,9
S-4	1295	10,0	349	8,1
S-5	1275	11,0	319	11,1
S-6	1270	9,0	342	5,9
S-7	1265	9,5	321	3,0
S-8	1245	9,3	317	8,3
S-9	1245	9,5	341	4,5
S-10	990	14,0	270	5,9
S-11	940	10,8	254	3,6
S-12	940	14,8	249	4,1
S-13	935	10,0	256	8,4
S-14	870	13,0	246	1,7

A Tabela VI mostra os resultados do ensaio de dureza utilizadas para avaliação da homogeneidade das amostras simuladas (figura 8(a)) que simulavam regiões de crescimento (S-9) e refino de grão (S-13).

Tabela VI - Resultados do ensaio de dureza das amostras S-9 e S-13, ao longo da espessura e do comprimento.

Amostra N ^o	Dureza HV (5)			
	Comprimento		Largura	
	Média	Desv. Padrão	Média	Desv. Padrão
S-9	344	6,5	343	6,6
S-13	257	3,9	255	5,4

As figura 9 e 10 mostram metalografias (figura 5 (b)) das amostras S-9 e S-13.

A Tabela VII mostra os valores da resistência ao impacto das amostras S-2 e S-3, que representam a região entre 0,30 e 0,35 mm da linha de fusão da junta em chanfro, em termos de T e Δt_{500}^{800} .

Tabela VII - Resultados do ensaio de impacto das amostras S-2 e S-3 a 0°C.

Amostra N ^o	Resist. ao Impacto (kgf.m/cm ²)	
	Média	Desv. Padrão
S-2	10,71	0,46
S-3	10,18	0,45

4. DISCUSSÕES

As equações usadas para cálculo do tempo de resfriamento entre 800 e 500 °C, equação (2), e para a temperatura de pico, equação (3), apesar de muito usadas, não fornecem resultados precisos. A equação para o cálculo do tempo de resfriamento é derivada do modelo de Rosenthal⁽⁸⁾, no qual são introduzidas várias simplificações para permitir uma solução analítica do fluxo de calor em soldagem. A equação para cálculo da temperatura de pico é empírica e foi originalmente desenvolvida para soldagem em passe único com penetração total. Posteriormente foi verificado que ela podia ser aplicada na soldagem sem penetração total⁽⁷⁾.

A Tabela IV mostra a dificuldade de realização de ensaios de impacto Charpy-V na ZTA de juntas soldadas, mesmo quando esta junta tem uma geometria apropriada para a retirada de corpos-de-prova para este tipo de ensaio. Somente cerca de 38% dos corpos-de-prova forneceram resultados relevantes para a avaliação da tenacidade da junta, na região de interesse.

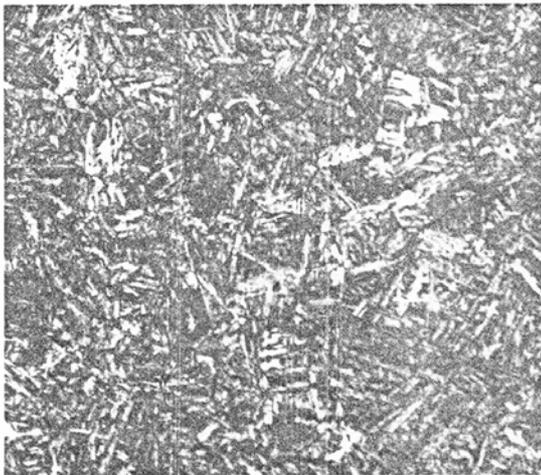
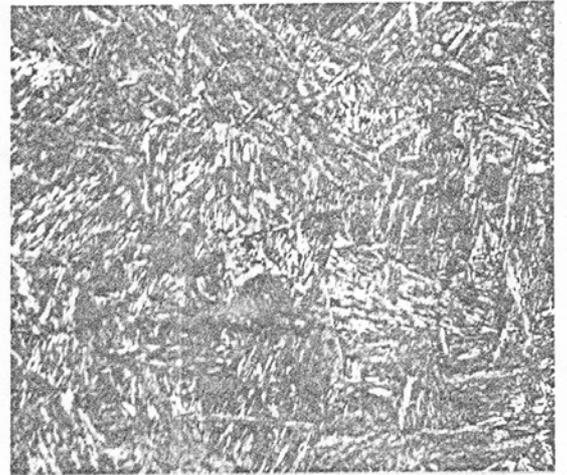
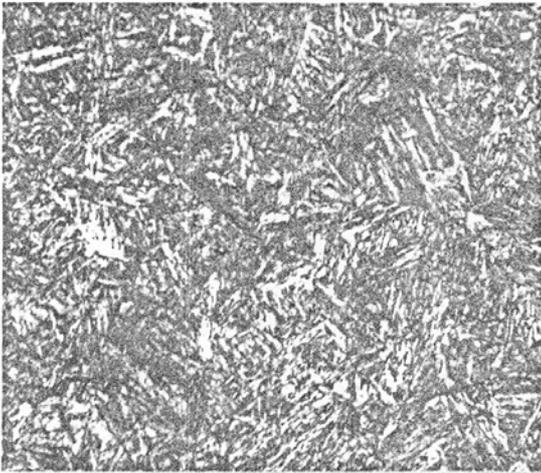
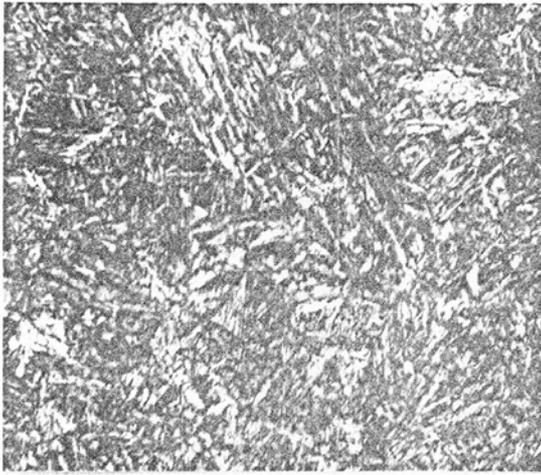


Fig. 9 - Microestrutura da amostra S-Q, nas regiões mostradas na figura 5 (b). Nital 2%, 200 X.

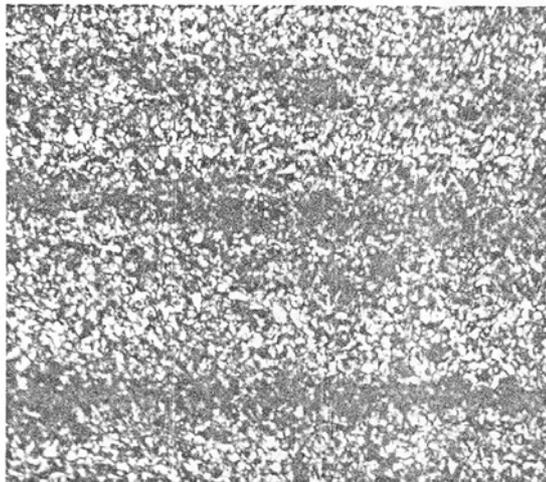
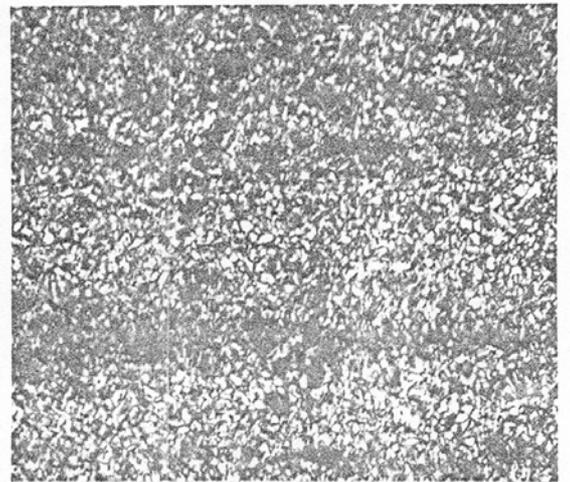
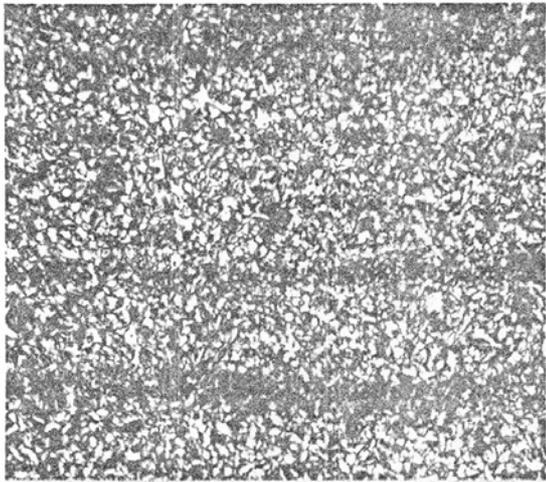
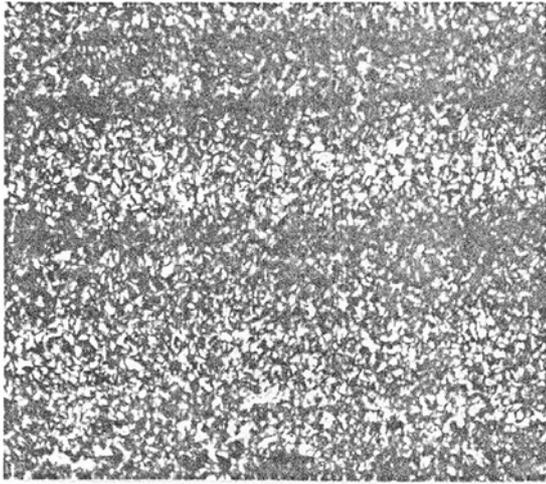


Fig. 10 - Microestrutura da amostra S-13, nas regiões mostradas na figura 5 (b). Nital 2%, 200 X.

As Tabelas VI e VII e as figuras 9 e 10 mostram que as amostras simuladas apresentaram uma boa homogeneidade mecânica e metalográfica ao longo de seu comprimento e espessura, com variações pouco significativas em termos de dureza e microestrutura, no nível considerado. Isto indica que apesar do volume relativamente grande das amostras, o ciclo térmico sofrido pela amostra como um todo é bastante uniforme.

A comparação dos resultados foi feita do seguinte modo:

- (a) Foi feita uma relação entre as amostras simuladas (Tabela V) e os cordões de solda, CS-1 a CS-4 (Tabela II), em termos de At_{500}^{800} , admitindo-se uma variação de até 20% no tempo de resfriamento em relação aos valores obtidos para os cordões de solda, mostrada nas Tabelas VIII a XI.
- (b) A partir dos valores de T_p das amostras simuladas (Tabela V) e de H_L dos cordões de solda correspondentes em termos de At_{500}^{800} (Tabela II), foi calculada pela equação (3) qual a distância da linha de fusão que cada amostra estaria simulando, em termos de T_p e At_{500}^{800} . Esta distância foi chamada de d_E e também é mostrada nas Tabelas VIII a XI.
- (c) Com os valores de dureza das amostras simuladas (Tabela V) e os perfis de dureza dos cordões de solda CS-1 a CS-4 correspondentes em termos de At_{500}^{800} (figura 8), foi levantada a distância à linha de fusão que cada amostra estaria simulando, em termos de dureza. Esta distância foi chamada de d_H e também é mostrada nas Tabelas VIII a XI.
- (d) O mesmo foi feito para a microestrutura, a partir dos perfis metalográficos dos cordões de solda e dos resultados do ensaio metalográfico das amostras simuladas, por comparação visual. Esta distância foi chamada de d_M e também é mostrada nas Tabelas VIII a XI.

Tabela VIII - Amostras que representaram o cordão CS-1 em termos de At_{500}^{800} com até 20% de variação e suas distâncias à linha de fusão d_F , d_H e d_M .

Amostra N ^o	d_F (mm)	d_H (mm)	d_M (mm)
S-3	0,27	0,18	0,26
S-4	0,31	0,18	0,26
S-6	0,35	0,23	0,35
S-7	0,36	0,36	0,35
S-8	0,39	0,38	0,40
S-9	0,39	0,23	0,35
S-11	1,13	0,98	1,15
S-13	1,16	0,96	1,10

Tabela IX - Amostras que representaram o cordão CS-2 em termos de At_{500}^{800} com até 20% de variação e suas distâncias à linha de fusão d_F , d_H e d_M .

Amostra N ^o	d_F (mm)	d_H (mm)	d_M (mm)
S-1	0,28	0,53	0,35
S-2	0,29	0,50	0,35
S-3	0,30	0,33	0,30
S-4	0,34	0,33	0,35
S-5	0,38	0,55	0,35
S-6	0,39	0,39	0,40
S-7	0,40	0,53	0,40
S-8	0,43	0,55	0,45
S-9	0,43	0,39	0,45
S-11	1,25	1,28	1,20
S-13	1,27	1,23	1,15

Tabela X - Amostras que representaram o cordão CS-3 em termos de At_{500}^{800} com até 20% de variação e suas distâncias à linha de fusão d_F , d_H e d_M .

Amostra N ^o	d_F (mm)	d_H (mm)	d_M (mm)
S-1	0,34	0,37	0,35
S-2	0,36	0,34	0,35
S-3	0,37	(1)	0,40
S-4	0,42	(1)	0,40
S-5	0,45	0,38	0,45
S-10	1,33	0,86	1,00
S-11	1,54	1,08	1,10
S-13	1,56	1,04	1,10
S-14	1,87	1,18	1,20

(1) O valor de dureza da amostra simulada foi maior que o maior valor de dureza medido na ZTA do cordão de solda.

Tabela XI - Amostras que representaram o cordão CS-4 em termos de Δt_{500}^{800} com até 20% de variação e suas distâncias à linha de fusão d_E , d_H e d_M .

Amostra N ^o	d_E (mm)	d_H (mm)	d_M (mm)
S-2	0,42	(1)	0,45
S-10	1,54	1,41	1,55
S-12	1,78	1,87	1,90
S-14	2,17	2,02	1,80

(1) O valor de dureza da amostra simulada foi maior que o maior valor de dureza medido na ZTA do cordão de solda.

Observando-se as Tabelas VIII a XI, nota-se que algumas amostras simuladas não representaram regiões dos cordões de solda correspondentes em termos de dureza. Entretanto, em termos de microestrutura, esta correspondência foi melhor.

Comparando-se os valores das Tabelas IV e VII, nos casos em que a fratura ocorreu paralela à linha de fusão, nota-se que os resultados de resistência ao impacto das amostras simuladas foram ligeiramente superiores aos encontrados para a junta soldada.

5. CONCLUSÃO

O equipamento utilizado permitiu a simulação de ciclos térmicos de soldagem sofridos por juntas feitas pelo processo a arco submerso.

Apesar dos bons resultados obtidos na simulação em termos de microestrutura e resistência ao impacto, a dispersão dos valores obtidos para dureza indica que a simulação de ciclos térmicos de soldagem baseada apenas em parâmetros do ciclo térmico não garante que a amostra simulada apresentará um comportamento exatamente similar ao da região simulada da ZTA da solda real, o que sugere cuidados na utilização desta técnica.

Estudos mais aprofundados devem ser feitos, no sentido de se comprovar a tendência evidenciada neste trabalho, de que o ideal é se tentar simular a microestrutura da região de interesse da ZTA e não o ciclo térmico por ela sofrido.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Supervisão de Ensaios e Metrologia do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CDTN/CNEN, pelo apoio dado a este estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CAMPOS, W.R.C. et alli. Simulação de Ciclos Térmicos de Soldagem. In: XIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem - Anais. ~~São Paulo~~, ABS, 1988. pp. 539-448.
Gramado, RS, 439
- [2] KERntechnischer AUSSCHUSS. Schweißsimulationsversuche. In: ----- Grundsätze für die Begutachtung von Werkstoffen für den Einsatz in Kernkraftwerken. Teil 1. Leichtwasserreaktoren. Köln, 1984. Abschnitt 3.2.4. pp.33-36. (KTA 1406).
- [3] IVENS, P.F.; VAN DER BERGH, A.A. Impact Test on the HAZ. *Metal Construction and British Weld. J.* 6(7). 1974. pp.234-236.
- [4] AMERICAN WELDING SOCIETY. *Welding Handbook*. 7 ed. Miami, AWS, 1976. V.2. pp.80-89.
- [5] IRSID. *Soudabilité des Aciers au C-Mn et Microalliés*; rapport final. S-1. 1976, pp. 9-10.
- [6] ADAMS Jr., C.M. Cooling Rates and Peak Temperatures in Fusion Welding. *Weld. J.* 37(5), 1958. pp.210s-215s.
- [7] BARRY, J.M.; ZVI P.; ADAMS, Jr., C.M. Heating Conduction from Moving Arcs in Welding. *Weld. J.* 42(3), 1963. pp.97s-104s.
- [8] ROSENTHAL, D. Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting. *Weld. J* 20(5), 1941. pp.220s-226s.