

NOVAS TÉCNICAS PARA SOLDAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL
FERRÍTICO ABNT 430 [1]

Wilson dos Santos Brandão [2]
Vicente T. Lopes Buono [3]
Paulo Villani Marques [3]

RESUMO:

Neste trabalho são apresentadas novas técnicas para soldagem de aços inoxidáveis ferríticos ABNT 430. Estas técnicas permitem minimizar os problemas advindos do acentuado crescimento de grão e formação de martensita que este material sofre durante a soldagem, com consequentes perda de tenacidade e ductilidade, além de reduzir sua sensibilidade à fissuração a quente.

ABSTRACT:

Some new methods to minimize the problems of grain growth, martensite formation, loss of ductility and toughness and sensitivity to hot cracking of ferritic stainless steel type AISI 430 are presented in this paper.

1. INTRODUÇÃO:

Os aços inoxidáveis, desde sua descoberta no início deste século, vêm passando por um rápido desenvolvimento e uma crescente abertura no seu leque de aplicações. A sua propriedade característica de boa resistência à corrosão em meios agressivos garante este crescimento. Além dessa propriedade, alguns aços inoxidáveis possuem características adequadas para a conformação mecânica e a soldagem, o que justifica o seu amplo consumo e os tornam imprescindíveis a determinadas aplicações.

[1] Contribuição Técnica ao I Seminário Brasileiro sobre Aços Inoxidáveis - São Paulo - outubro de 1989.

[2] Eng^o Mecânico, M. Sc. ESAB S.A. Indústria e Comércio.

[3] Físico, M. Sc. Prof. Assistente do DMT-UFMG.

Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG
Rua Espírito Santo, 35 - 2^o andar - Centro
30.180 - Belo Horizonte - M.G.

Dentro da classe dos aços inoxidáveis, os ferríticos têm assumido uma importância crescente, devida principalmente à sua maior resistência à corrosão sob tensão e ao seu menor custo em relação aos aços austeníticos convencionais.

As maiores limitações na utilização dos aços inoxidáveis ferríticos têm sido a sua sensibilidade à fissuração a quente, a perda de tenacidade, de ductilidade e resistência à corrosão, quando expostos a temperaturas elevadas, como ocorre durante a soldagem.

As principais maneiras de se minimizar estes problemas têm envolvido, quase sempre, pequenas modificações na composição química, através da adição de elementos estabilizantes e a diminuição dos teores de intersticiais e impurezas. Contudo, vários problemas associados com a soldagem permanecem em aberto, em especial, a perda de tenacidade na zona fundida e a sensibilidade à fissuração a quente. Neste trabalho são apresentadas técnicas de soldagem que permitem minimizar a ocorrência destes problemas e melhorar a soldabilidade destes materiais.

2. AS MODIFICAÇÕES DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA:

A presença de elementos intersticiais (C e N) expandem o campo de existência da austenita [1]. Estes elementos têm uma baixa solubilidade na ferrita e, com isto, eles tendem a se precipitar na forma de carbonetos, nitretos e carbonitretos de Cr e Fe. Estes precipitados podem afetar drasticamente as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis ferríticos, aumentando a fragilização e a susceptibilidade à corrosão intergranular [2].

Assim, têm sido desenvolvidas variações de aços ABNT 430 com teores de C e N baixos ($\%C + \%N < 0,040$) e extra baixos ($\%C + \%N < 0,025$) [3].

Os elementos estabilizantes são elementos alfa-gêneos que, quando em solução sólida, também formam compostos com o C e o N, porém mais estáveis que os carbonetos e nitretos de Fe e Cr [4-9].

Os principais estabilizantes utilizados têm sido o Nb e o Ti, que são adicionados em quantidade suficiente para combinar com todo o C e N presentes e uma pequena parte permanecer em solução sólida. Outros elementos como o V e o Zr também podem ser utilizados [2, 10-13].

Tem sido demonstrado que os estabilizantes, através da formação de carbonitretos, podem melhorar a tenacidade, a ductilidade, a sensibilidade à corrosão intergranular e à fissuração a quente [4-14].

Embora as propriedades do metal de base possam ser melhoradas pela estabilização, a adição de estabilizantes pode também comprometer a soldabilidade do aço ABNT 430, de forma que a escolha do melhor estabilizante e a quantidade ideal é ainda motivo de controvérsia [15].

Metal de adição de aço inoxidável austenítico ou liga de níquel podem ser utilizados na soldagem de aços inoxidáveis ferríticos entre si ou entre metais dissimilares, permitindo a obtenção de uma zona fundida dútil e tenaz. Problemas devidos a diferenças de propriedades químicas e físicas (em particular o coeficiente de expansão térmica) devem ser, contudo, considerados. Entretanto, esta técnica não é capaz de evitar a fragilização da zona termicamente afetada [16].

3. TRATAMENTOS TÉRMICOS PÓS-SOLDAGEM:

Os tratamentos térmicos pós-soldagem produzem poucas alterações microestruturais perceptíveis por microscopia ótica e alterações mais sensíveis nas propriedades mecânicas, particularmente na tenacidade, mas com ganhos relativamente pequenos, tanto para os

aços estabilizados como para os não estabilizados [2].

Tanto para microdureza como para tenacidade, avaliada pela temperatura de transição dútil-frágil, os melhores resultados foram obtidos para tratamentos a 900°C por 30 minutos [2].

Com isto, a relação custo/benefício para tratamentos térmicos pós-soldagem dos aços inoxidáveis ferríticos com 17% de cromo é muito pouco favorável.

4. USO DE NUCLEANTES:

Este é, a princípio, o meio mais fácil de se controlar a solidificação da poça de fusão pois estes elementos, quando adicionados, induzem a nucleação de novos grãos na zona fundida da solda, resultando em uma granulacão mais fina.

Ferro-titânio, ferro nióbio e carbonetos de titânio têm sido citados como efetivos refinadores de grãos [17]. Aços estabilizados com Nb e Ti podem ter seu tamanho de grão refinado por adições de Al e/ou N durante a soldagem [18].

Adições de nitrogênio ao gás de proteção entre 2 e 12% em volume durante a soldagem TIG dos aços inoxidáveis ferríticos estabilizados ao Nb e Ti produziram um acentuado refino de grão na zona fundida, conforme mostram a Tabela I e as figuras 1 e 2. Pode-se observar que, além de produzir grãos de tamanho equivalente ao metal de base, a adição de nitrogênio conferiu um caráter predominantemente equiaxial aos grãos da zona fundida [19].

Entretanto, o refino de grão não necessariamente levou a uma melhoria de tenacidade, como mostra a figura 3. Adições em maiores teores, embora tenham causado refino de grão da zona fundida com a mesma intensidade, provocaram a formação de maior quantidade de martensita nos contornos de grão, como mostra a figura 4 [19].

Deve-se salientar que o refino de grão produzido pela ação de nucleantes só é possível quando a taxa de nucleação no líquido for suficiente para obstruir o crescimento colunar, o que depende fortemente da posição de nucleação na poça de fusão, da taxa de fornecimento de nucleantes, do tamanho das partículas e das condições de soldagem [17].

3. USO DE OSCILAÇÃO MAGNÉTICA DO ARCO:

A oscilação magnética do arco de soldagem provoca movimentos na poça de fusão que tendem a fragmentar e reorientar dendritas em crescimento, fornecendo novos núcleos para a solidificação. Diversos autores têm utilizado esta técnica, com sucesso, em diversos materiais [17,20-25], para produzir refino de grão.

Brandão e co-autores [26] obtiveram bons resultados com a oscilação magnética transversal à direção de soldagem em aços não estabilizados, como mostram as figuras 5 e 6, utilizando baixa energia de soldagem, com poça de fusão em forma elíptica (figura 7).

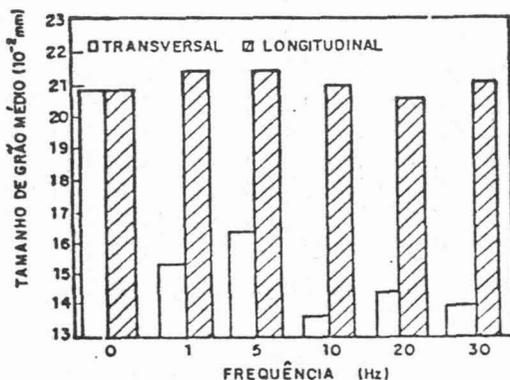


Fig. 5 - Tamanho de grão da zona fundida em função da frequência de oscilação do arco. [26]

A oscilação magnética do arco de soldagem também pode promover uma mudança na subestrutura de solidificação. A alteração na forma da poça de fusão de gota para elíptica, por exemplo, faz com que mais grãos tenham condições de sobreviverem durante a solidificação, havendo um conseqüente refino.

Estes resultados também foram obtidos por Brandão e co-autores [26] quando utilizaram uma energia de soldagem mais alta, onde a poça de fusão tinha a forma de gota, sem oscilação (figuras 8 e 9). A mudança da forma da poça de fusão de gota para elíptica, obtida com a oscilação longitudinal, ocorreu devido ao aumento da transferência de calor por convecção, em função da agitação da poça de fusão.

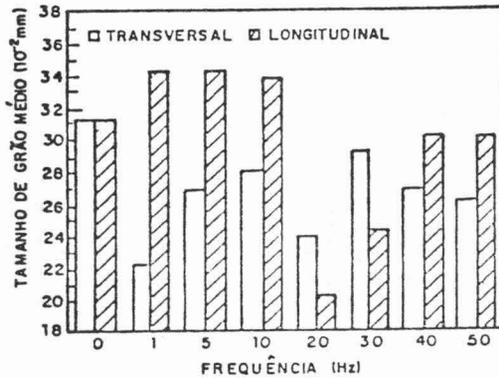
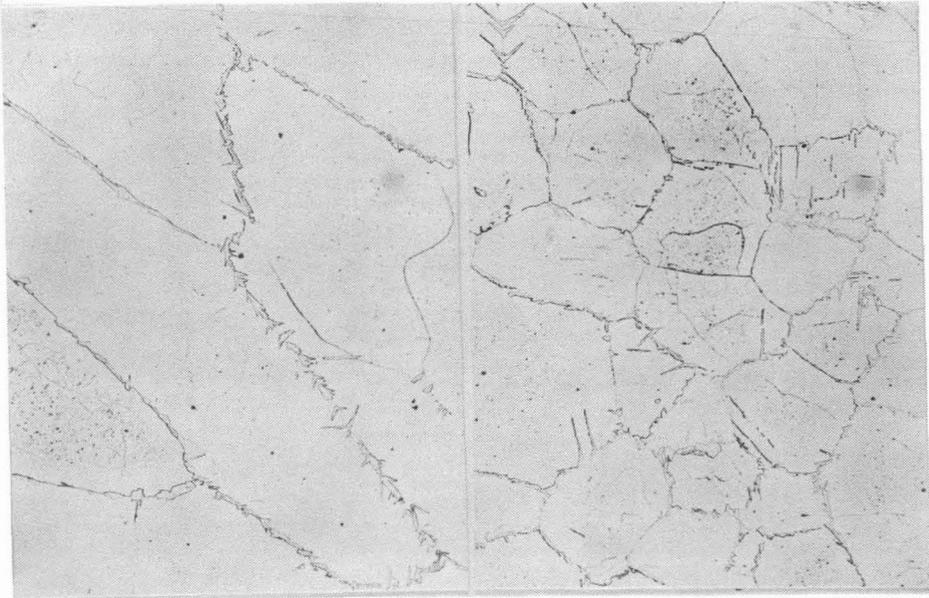


Fig. 8 - Tamanho de grão da zona fundida em função da frequência de oscilação do arco. Soldagem com alta energia. [26]



(a)

(b)

Fig. 9 - Microestrutura da zona fundida (a) sem oscilação
 (b) oscilação logitudinal na frequência de 20 Hz.
 Alta energia de soldagem. Villela, 100 X. [26]

Brandão e co-autores [28], utilizando a oscilação magnética do arco de soldagem com baixa frequência de oscilação (figura 10), observaram que a efetividade desta técnica em reduzir a sensibilidade à fissuração a quente pode ser atribuída à microestrutura produzida, que é caracterizada por periódicas mudanças na orientação dos grãos colunares na zona fundida. Esta morfologia pode ser observada na figura 11 e comparada com a da figura 12, que apresenta um cordão de solda feito sem oscilação do arco.

A oscilação magnética do arco de soldagem também é bastante efetiva na prevenção da fissuração a quente [17,20,23,27-30].

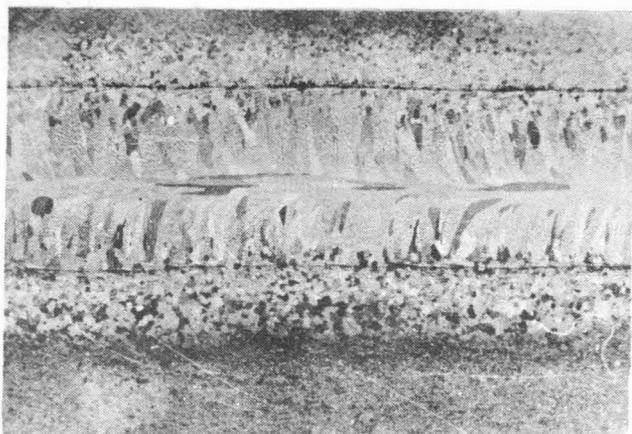


Fig. 12 - Microestrutura da solda sem oscilação.
Villela, 9 X. [28]

Contudo, deve-se observar que os resultados da oscilação magnética são fortemente dependentes do conjunto dos parâmetros de soldagem utilizados, de tal forma que os parâmetros de oscilação tais como frequência e amplitude devem ser otimizados em função dos parâmetros de soldagem, como corrente, velocidade de soldagem, etc., para maximizar um ou outro efeito (refino de grão e prevenção da fissuração a quente).

A deflexão magnética do arco pode ser feita de diversas maneiras, em círculos, na mesma direção de soldagem, no mesmo sentido e/ou sentido contrário, na direção perpendicular à direita e/ou à esquerda, dependendo da direção e sentido do campo magnético aplicado [31-33].

6. OUTRAS TÉCNICAS:

A extração rápida de calor na superfície da poça também pode ser usada como meio de se refinar grão durante a soldagem [34] e foi conseguida por vários autores [34,35] através de um fluxo de argônio direcionado para a superfície da poça durante a soldagem TIG, oriundo de pequenos bocais. Esta técnica entretanto só é efetiva para espessuras pequenas (até 5 mm) e depende também do conjunto de parâmetros de soldagem, como mostra a figura 13.

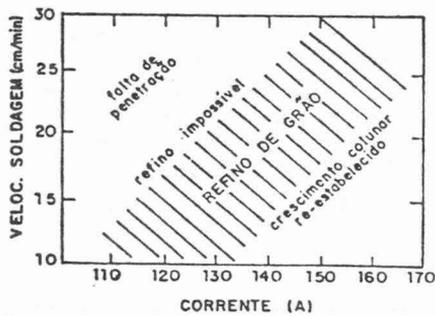


Fig. 13 - Efeitos das condições de soldagem na efetividade de refino de grão por extração rápida de calor na liga Al-2,5Mg, 3,2 mm de espessura [35].

Movimentos na poça de fusão também podem ser obtidos com o uso de ultra-som, através do uso de corrente pulsada e de oscilação mecânica da tocha de soldagem [17,27,36-37].

7. CONCLUSÃO:

Um controle efetivo da solidificação durante a soldagem de aços inoxidáveis ferríticos que resulta em melhorias consideráveis na soldabilidade destes materiais pode ser obtido de maneira relativamente simples com o uso da oscilação magnética do arco de soldagem e com a adição de nitrogênio ao gás de proteção na soldagem com proteção gasosa inerte.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. PECKENER D. & BERNSTEIN, I. M. Handbook of Stainless Steels. New York, McGraw-Hill, 1977.
2. CASTRO, A. L. R. Efeitos de Tratamentos Térmicos Pós-Soldagem em Aços Inoxidáveis Ferríticos com 17% de Cromo. Tese de Mestrado, DMT-UFMG, 1984.
3. MODENESI, P. J. et alli. Características Metalúrgicas da Solda em Aços Inoxidáveis Ferríticos com 17% Cr. Tecnologia da Soldagem 81. São Paulo, ABM, 1981. pp.133-50.
4. BARBAZANGES, Y. et alli. Structure et Comportement Mécanique des Soudures dans les Aciers Inoxidables Ferritiques Stabilisés a 17% Cr. Bulletin du Cercle D'Etudes de Métaux, 14(10), 1982. pp. 9-3 - 9-9.
5. SAWHILL, J. M. & BOND, P. A. Ductility and Toughness of Stainless Steel Welds. Weld. J., 55(2), 1976. Res. Supp., pp. 33s-41s.
6. HAMMOND, J. & GUNSTONE, C. R. The Welding of 18% Cr-2% Mo Ferritic Stainless Steel with Low Interstitial Element Contents. Weld. in the World, 10(0/10). 1981, pp. 49-64.
7. WRIGHT, R. N. Mechanical Behavior and Weldability of High Chromium Ferritic Stainless Steel as a Function of Purity. Weld. J., 56(10), 1977, Res. Supp., pp. 434s-40s.
8. KALTENHAUSER, R. H. Improving the Engineering Properties of Ferritic Stainless Steels. Metals Engin. Quarterly, may. 1971. pp. 41-7.
9. SHONO, S. et alli. Weldability of 18% Chromium Ferritic Stainless Steel with Titanium Addition. Trans. Iron Steel Inst. JPN1, 24(7), 1984. pp. 557-65.

10. YUSHCHENKO, R. I. et alli. Effects of Welding Thermal Cycles on the Embrittlement of Nickel-Free Chromium Steels Alloyed with Zirconium. Autom. Weld., 35(11). 1983. pp 18-20.
11. ASLUND, C. & NYBY, G. Properties and Applications of Low Interstitial 18 and 25% Cr-Mo Ferritic Stainless Steels. Stainless Steel 77, sep. 1977. pp. 173-6.
12. LIPODAEV, V. et alli. The Weldability of Ferritic Chromium Steels. Autom. Weld., 38(2). 1984. pp. 38-41.
13. POLLARD, B. Ductility of Ferritic Stainless Weld Metal. Weld. J., 51(4). 1972. Res. Supp., pp.222s-30s.
14. NISHIO, Y. et alli. Weld Cracking and Mechanical Properties of 17% Chromium Steel Weldment. Weld. J., 50(1). 1971. Res. Supp., pp.9s-18s.
15. HUNTER, G. B. & EAGAR, T. W. Ductility of Stabilized Ferritic Stainless Steel Welds. Met. Trans. A, 11A(2). 1980. pp. 213-18.
16. MODENESI, P. J. et alli. Curso de Metalurgia da Soldagem. Belo Horizonte, FCO/DMT, 1985. pp. 280-340.
17. DAVIES, G. J. & GARLAND, J. G. Solidification Structure and Properties of Fusion Welds. Internat. Metall. Reviews, 20, 1975. pp. 83-106.
18. LOURENÇO, G. C. Efeitos da Adição de Alumínio e Nitrogênio na Solda do Aço Inoxidável Ferrítico Estabilizado com Nióbio e Titânio. Tese de Mestrado, DMT-UFMG, 1986.
19. BRANDÃO, W. S. et alli. Adição de Nitrogênio ao Gás de Proteção na Soldagem de Aços Inoxidáveis. XV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Anais. Gramado-RS, ABS, 1988. V.2. pp. 627-37.
20. TSENG C. F. & SAVAGE, W. F. The Effect of Arc Oscillation. Weld. J., 56(11). 1977. pp.777-86.
21. BOLDYREV, A. M. et alli. Reduction in Grain Size in the Structure of Weld Metals Deposited with the Arc Oscillating in a Transverse Magnetic Field. Autom. Weld., 28(7). 1975. pp. 56-7.
22. PEARCE, B. P. & KERR, H. W. Grain Refinement in Magnetically Stirred GTA Welds of Aluminum Alloys. Met. Trans. B, 12B(9). 1981. pp. 470-86.
23. KOU, S & LE, Y. Grain Structure and Solidification Cracking in Oscillated Arc Welds of 5052 Aluminum Alloys. Met. Trans. A, 16A(7). 1985. pp.1345-52.
24. CHERNYSH, V. P. & PAKHARENKO, V. A. The Kinetics of

- Solidification of Pool Metal in Welding with Electromagnetic Stirring. Autom. Weld., 32(3). 1979. pp 3-8.
- 25 SCARBROUGH, J. D. & BURGAN, C. E. Reducing Hot-Short Cracking in Iridium GTA Welds Using Four-Pole Oscillation. Weld. J., 63(6). 1984. pp. 54-6.
- 26 BRANDÃO, W. S. et alli. Controle da Solidificação Durante a Soldagem dos Aços Inoxidáveis Ferríticos com 17% de Cromo. I Congresso ALAMET, Anais. Rio de Janeiro, 1988.
27. BROWN, D. C. et alli. The Effect of Electromagnetic Stirring and Mechanical Vibration on Arc Welds. Weld. J., 41(8). 1962. Res. Supp. pp. 241s-50s.
28. BRANDÃO, W. S. et alli. The Effect of Magnetic Arc Oscillation on Hot Cracking Sensitivity of 17% Chromium Ferritic Stainless Steel GTA Welds. IIW Doc. II-C 810/87. 1987.
29. KOU, S. & LE, Y. Improving Weld Quality by Low Frequency Arc Oscillation. Weld. J., 64(3). 1985. pp. 51-5.
30. BRANDÃO, W. S. et alli. Efeito da Oscilação Magnética do Arco na Sensibilidade à Fissuração a Quente dos Aços Inoxidáveis Ferríticos com 17% de Cromo. XIII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Anais. ABS, Guarujá-SP, 1987. pp. 300-321.
31. JAYARAJAN, T. N. & JACKSON, C. E. Magnetic Control of Gas Tungsten Arc Welding Process. Weld. J., 51(8). 1972. Res. Supp. pp. 377s-85s.
32. HICKEN, G. K. & JACKSON, C. E. The Effects of Applied Magnetic Fields on Welding Arcs. Weld. J., 45(11). 1966. Res. Supp. pp. 515s-24s.
33. HICKEN, G. K. et alli. Application of Magnetically Controlled Welding Arcs. Weld. J., 55(4). 1976. pp. 264-67.
34. WELLS, M. E. & LUKENS, W. E. Effect of Forced Gas Cooling on GTA Weld Pools. Weld. J., 65(12). 1986. Res. Supp. pp. 314s-20s.
35. GARLAND, J. G. Weld Pool Solidification Control. Metal Const. and Brit. Weld. J., apr. 1974. pp. 121-7.
36. MAKABA, A. M. & KUSHNIRENKO, B. N. Weaving the Arc as a Factor in Improving the Structure and Properties of Welded Joints. Autom. Weld., 1. 1967. pp. 35-40.
37. VAGI, J. J. et alli. Pulsed-Current Arc Welding Process. DMIC Memorandum 250. Columbus, Battelle Memorial Intitute, 1970.

TABELA I - Tamanho de grão da zona fundida em função do teor de nitrogênio no gás de proteção. [19]

Teor de Nitrogênio no gás de proteção (% em volume)	Tamanho de Grão médio (mm)
0	0,185
2	0,097
4	0,092
6	0,091
8	0,084
10	0,077
12	0,089

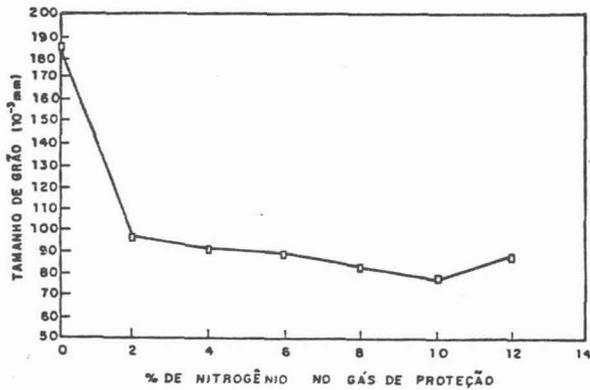
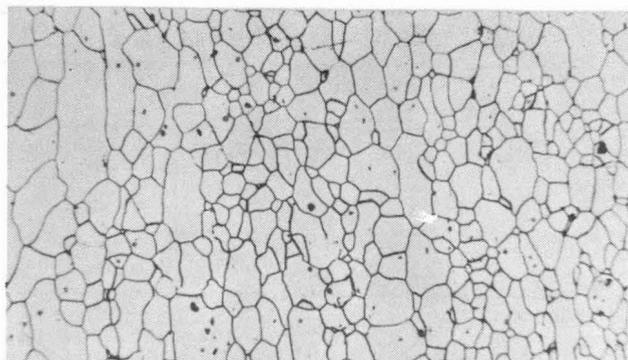
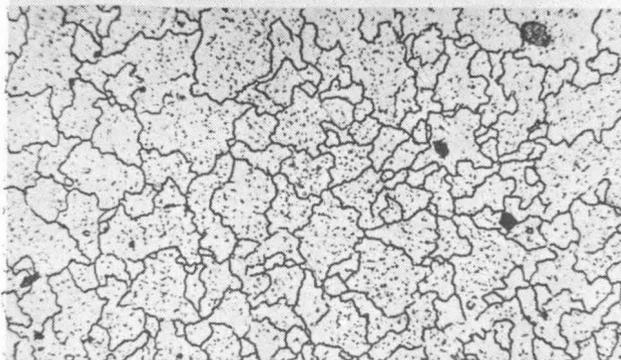


Fig. 1 - Variação do tamanho de grão da zona fundida com o teor de nitrogênio adicionado ao gás de proteção. [19]



(a)



(b)



(c)

Fig. 2- Micrografias do aço inoxidável ferrítico ABNT 430. (a) metal de base, (b) zona fundida da solda com 2% N, (c) zona fundida da solda com Ar puro. Villela, 100 X. [19]

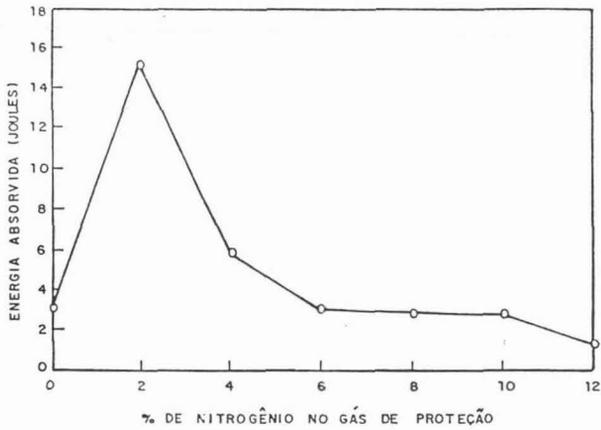


Fig. 3 - Variação da energia absorvida no ensaio de impacto com o teor de nitrogênio no gás de proteção. [19]

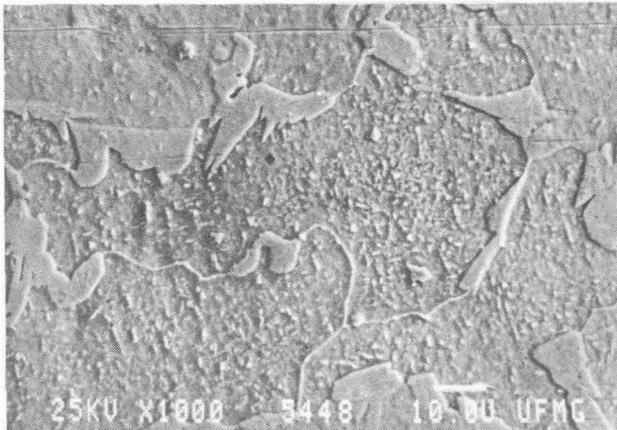


Fig. 4 - Zona fundida da solda do aço inoxidável ferrítico com 12% N_2 no gás de proteção. MEV, 1000 X. [19]

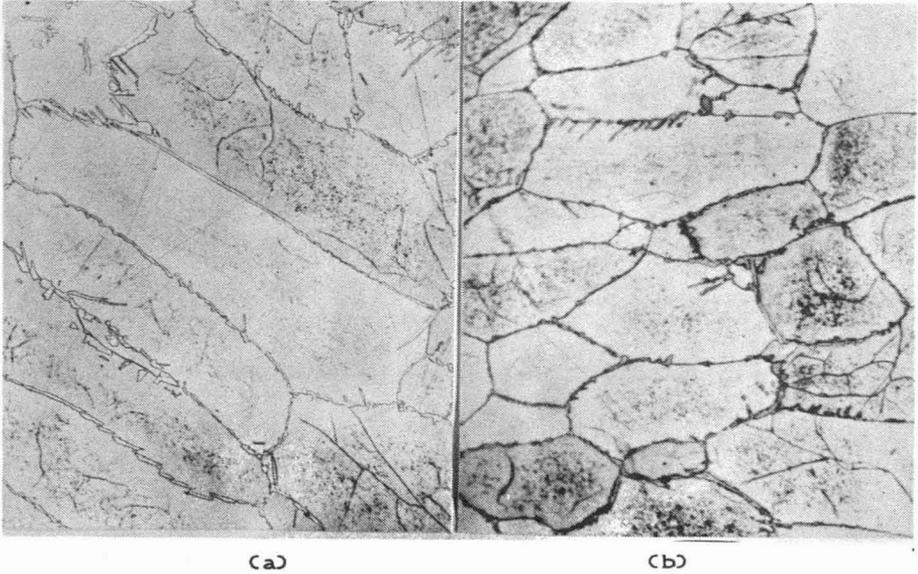


Fig. 6 - Microestrutura da zona fundida. (a) sem oscilação
(b) com oscilação transversal, frequência 10 Hz.
Vilella, 100 X. [26]

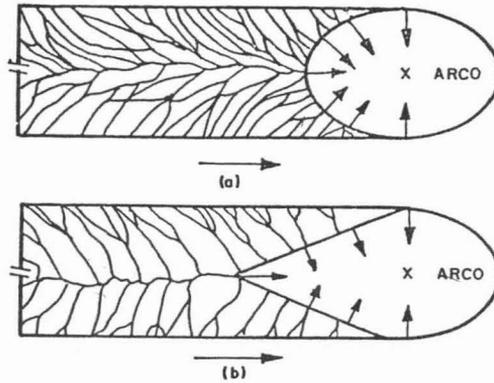


Fig. 7 - Influência da forma da poça de fusão na macroestrutura da zona fundida (Esquemática). (a) poça elíptica
(b) poça em gota. [26]

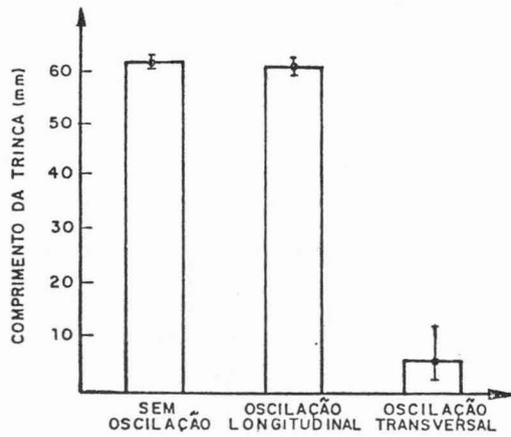


Fig. 10 - Comprimento de trincas de fissuração a quente no ensaio Fishbone. Oscilação longitudinal com 2,5 Hz e oscilação transversal com 0,75 Hz. [28]

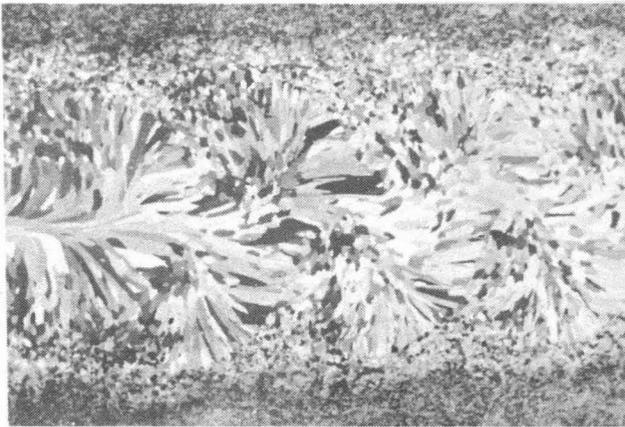


Fig. 11 - Microestrutura da solda com oscilação transversal. 0,75 Hz, Villela, 9 X. [28]

