

# SOLDAGEM DE TUBOS DE AÇO PATINÁVEL DE ALTO SI PELO PROCESSO HFIW

Ricardo Miranda Alé<sup>1</sup>  
Adão Vieira de Faria<sup>2</sup>  
Ramsés Ferreira da Silva<sup>3</sup>  
Antônio Carlos Depizzol<sup>4</sup>  
Wagner de Almeida Reinig<sup>5</sup>

## Resumo

O aço alto silício é uma alternativa de baixo custo para a fabricação de estruturas tubulares resistentes à corrosão atmosférica. Contudo a literatura, de um modo geral, indica que os aços que apresentam um alto teor de silício e/ou uma baixa relação Mn/Si são mais susceptíveis à formação de defeitos na linha de solda de juntas obtidas pelo processo HFIW (*High Frequency Induction Welding* – Soldagem por Indução com Alta Frequência), bastante utilizado na fabricação de tubos de pequeno diâmetro. Neste estudo é avaliada a influência das condições de soldagem pelo processo HFIW na qualidade de tubos de aço de alto silício, com baixa relação Mn/Si. A qualidade dos tubos soldados foi determinada através de teste de alargamento e os defeitos observados na linha de solda foram caracterizados via MEV. Verifica-se que, para a soldagem desse aço, devem ser utilizados valores mais elevados de velocidade, ângulo de convergência do V e potência, comparativamente a de um aço C-Mn comum de resistência mecânica similar.

**Palavras-chave:** Soldagem por indução com alta frequência; Aço patinável; Tubo com costura.

## HIGH FREQUENCY INDUCTION WELDING OF HIGH SILICON STEEL TUBES

## Abstract

High-Si steel is a low cost alternative for the fabrication of tubular structures resistant to atmospheric corrosion. However, the literature has often pointed out that steels presenting a higher Si content and/or a lower Mn/Si ratio have higher susceptibility to defects at the weld bond line during HFIW (High Frequency Induction Welding) process, which has been widely used for manufacturing small diameter tubes. In this study the effect of the HFIW conditions on the quality of steel tubes with high-Si content and low Mn/Si ratio is investigated. The quality of welded tubes was determined by flare test and the defects in the bond line were identified by SEM. It has been found that higher welding speeds, V-convergence angles and power input should be applied in welding of high-Si steel, when compared to similar strength C-Mn steel.

**Key words:** High frequency induction welding; Weathering steel; Seam welded pipe.

## I INTRODUÇÃO

Uma alternativa de menor custo para a fabricação de aços resistentes à corrosão atmosférica é a utilização de teores elevados de silício. A adição do silício permite a redução do teor de cobre e, em consequência, uma menor

ocorrência de defeitos superficiais durante a fabricação do aço. Como o silício tem uma forte influência na resistência mecânica, permite também a redução dos teores de carbono e de manganês e, em consequência, do carbono equivalente. Contudo, sabe-se que os aços que apresentam um teor de silício elevado e/ou uma relação Mn/Si

<sup>1</sup>Engenheiro Metalurgista, M.Sc., D.Sc., Especialista da Gerência de Assistência Técnica, Usiminas, Ipatinga, MG, Av. Pedro Linhares Gomes, 5431, Bairro Usiminas, Cep 35160-900, Ipatinga, MG, Brasil. E-mail: ricardo.ale@usiminas.com

<sup>2</sup>Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Especialista da Gerência de Assistência Técnica, Usiminas, Ipatinga, MG, Av. Pedro Linhares Gomes, 5431, Bairro Usiminas, Cep 35160-900, Ipatinga, MG, Brasil. E-mail: adao.faria@usiminas.com

<sup>3</sup>Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Engenheiro Pesquisador, Centro de Tecnologia da Usiminas, Usiminas, Ipatinga, MG, Av. Pedro Linhares Gomes, 5431, Bairro Usiminas, Cep 35160-900, Ipatinga, MG, Brasil. E-mail: ramsesferreira@hotmail.com

<sup>4</sup>Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Gerente de Qualidade, Soluções Usiminas, São Paulo, SP,

Av. Monteiro Lobato, 2805, São Roque, Cep 07190-902, Guarulhos, SP, Brasil. E-mail: antonio.depizzol@solucoesusiminas.com

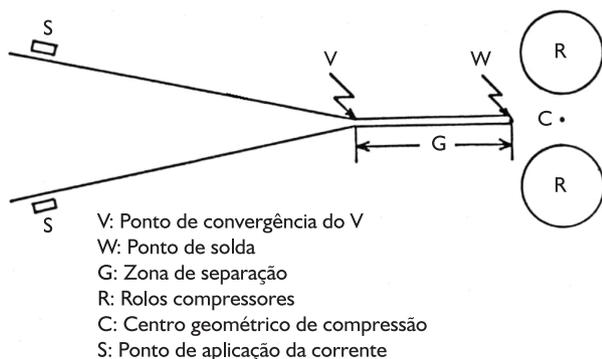
<sup>5</sup>Engenheiro Mecânico, Gerente Industrial, Soluções Usiminas, Campo Limpo Paulista, SP, Rua Aníbal Lopes da Fonseca, 251, Cep 13230-500, Campo Limpo Paulista, SP, Brasil. E-mail: wagner.reinig@solucoesusiminas.com

baixa são mais susceptíveis a defeitos na linha de solda de juntas obtidas pelo processo de soldagem por indução com corrente elétrica de alta frequência (HFIW - *High Frequency Induction Welding*), bastante utilizado na fabricação de tubos de pequeno diâmetro.

Este estudo tem como objetivo avaliar a influência dos principais parâmetros do processo HFIW (velocidade, ângulo de convergência do V e potência) na qualidade de tubos fabricados com aço de alto teor de silício.

## 1.1 Fundamentos do Processo de Soldagem

No processo de soldagem por resistência elétrica com alta frequência a corrente pode ser aplicada no material por indução (HFIW) ou por contatos deslizantes (HFERW - *High Frequency Electric Resistance Weld*). Neste trabalho é utilizada a sigla HF para representar esse processo de forma genérica. A Figura 1 mostra que, na soldagem HF, nem sempre o ponto de solda coincide com o ponto de convergência do V, sendo então observada a presença de uma zona de separação entre as bordas a soldar, a partir do ponto de convergência do V. A formação da zona de separação corresponde à remoção do metal fundido pela pressão eletromagnética exercida nas superfícies a soldar, devido à passagem da corrente em direções opostas.<sup>(1)</sup>



**Figura 1.** Ilustração esquemática da ocorrência da zona de separação a frente do ponto de convergência do V.<sup>(1)</sup>

De acordo com Haga, Aoki e Sato<sup>(1)</sup> ocorrem três tipos de fenômeno na soldagem HF, de acordo com o comprimento e forma da zona de separação (Figura 2).

Sendo  $V_a$  a taxa de aproximação das bordas e  $V_r$  a taxa de recuo devido à remoção do metal fundido, tem-se que:



**Figura 2.** Representação esquemática da zona de separação, para os três tipos de fenômenos <sup>(1)</sup>: (a) 1º tipo; (b) 2º tipo; e (c) 3º tipo.

- Fenômeno do 1º tipo:  $V_a > V_r$  (Figura 2a) - a zona de separação não é desenvolvida à frente do ponto de convergência;
- Fenômeno do 2º tipo:  $V_a \cong V_r$  (Figura 2b) - é formada uma zona de separação, de até 15 mm de comprimento, com as bordas paralelas após o ponto de convergência;
- Fenômeno do 3º tipo:  $V_a < V_r$  (Figura 2c) - como a taxa de recuo é maior que a de aproximação, a separação entre as bordas aumenta com o movimento da linha, resultando numa zona de separação na forma de cometa.

A taxa de aproximação das bordas ( $V_a$ ) é diretamente proporcional à velocidade da linha ( $v$ ) e ao ângulo de convergência do V ( $\theta$ ), pois  $V_a = v \cdot \tan \theta/2$ . Portanto, quanto maiores estes parâmetros, maior a tendência de formação do fenômeno do 1º tipo. A taxa de recuo das bordas ( $V_r$ ) é proporcional à potência de soldagem ( $P$ ).<sup>(2)</sup> Assim, para  $v$  e  $\theta$  constantes, quanto maior a potência maior a tendência do fenômeno do 3º tipo.

## 1.2 Principais Defeitos de Soldagem

Dependendo do tipo de fenômeno presente durante a soldagem HF, podem ocorrer dois defeitos distintos na linha de solda: solda fria e penetrador.

Durante a soldagem observa-se a formação de numerosas pequenas extrusões (basicamente de óxidos) na superfície das bordas, quando se aproximam da convergência do V. O defeito solda fria ocorre quando esses óxidos ficam aprisionados a partir do ponto de solda, e não são eliminados durante o recalque. Este defeito é típico do fenômeno do 1º tipo.<sup>(2)</sup>

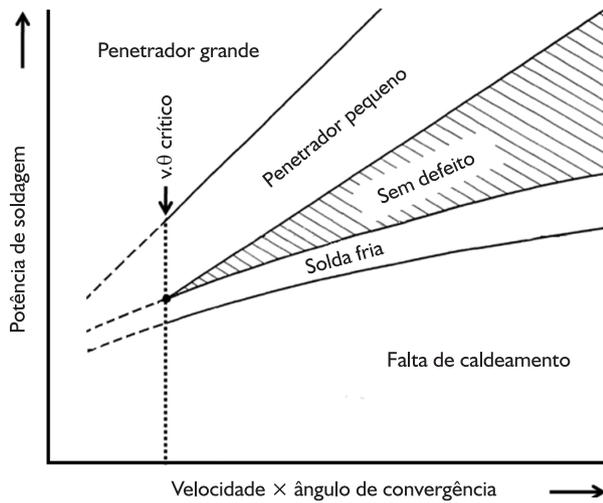
Nos fenômenos dos 2º e 3º tipos, as bordas entram em contato periodicamente próximo ao ponto de convergência. Neste instante, ocorre abertura de arco, seguida da formação de uma ponte de metal fundido entre as bordas da zona de separação. A ponte de metal fundido é impulsionada pela força eletromagnética em direção ao ponto de solda imediatamente após a sua formação. Ao mesmo tempo que se forma a ponte, é iniciado o preenchimento da zona de separação pela gota de metal fundido, que havia sido removido pela força eletromagnética. Isto ocorre porque a força eletromagnética, que atua nas paredes da zona de separação, subitamente desaparece, agindo apenas a tensão superficial. A gota fundida, que contém uma grande quantidade de óxidos por ficar exposta a atmosfera, forma o defeito penetrador,<sup>(3)</sup> quando não é expulsa novamente da zona de separação, pelo movimento de varredura da ponte de metal fundido em direção ao ponto de solda ou pelo recalque. Este defeito é observado apenas no fenômeno do 3º tipo, em função da maior extensão da zona de separação.

Yokoyama et al.<sup>(4)</sup> indicam que menores valores da relação Mn/Si favorecem a formação de penetradores com teores mais elevados de  $\text{SiO}_2$ , que apresentam maior

dificuldade de arraste pelo metal líquido, pois aumentam a temperatura de fusão e viscosidade do óxido formado na gota fundida retornada.

Com base nos trabalhos de Haga et al.<sup>(2)</sup> e de Ichihara et al.,<sup>(5)</sup> é possível inferir, em um gráfico P versus  $v \cdot \theta$ , que existe uma faixa de potência de soldagem na qual os defeitos solda fria e penetrador não ocorrem, quando  $v \cdot \theta > v \cdot \theta$  crítico (Figura 3).

A área do gráfico sem defeito, denominada no presente trabalho de campo de soldabilidade, é extremamente estreita quando o produto  $v \cdot \theta$  é pequeno e se torna mais ampla conforme este produto aumenta. A explicação



**Figura 3.** Representação esquemática da relação entre condição de soldagem e a ocorrência de defeitos.<sup>(5)</sup>

para este comportamento está associada ao fato de que para maiores velocidades<sup>(1)</sup> e ângulos de convergência<sup>(3)</sup> existe uma faixa mais ampla de potência de soldagem que permite a geração de uma zona de separação de aproximadamente mesma extensão. Além disso, desde que  $v \cdot \theta$  corresponde à taxa de aproximação das bordas, este produto pode ser analisado como sendo uma taxa de recalque.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

No estudo foi utilizado um aço estrutural de elevado teor de silício (1,07%) e baixa relação Mn/Si (0,26). A título

**Tabela 1.** Composição química dos aços utilizados (%p)

Aço	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Ni	Nb	Ti
Alto Si	0,07	1,07	0,28	0,032	0,012	0,024	0,089	0,014	-	-
ASTM A572	0,11	0,29	1,15	0,021	0,011	0,026	0,012	0,009	0,016	0,019

**Tabela 2.** Parâmetros de soldagem utilizados

Frequência (kHz)	Potência (kVA)	Velocidade (m/min)	Ângulo de Convergência (°)
450	290 a 420	10 a 21	4 e 5

de comparação, foi avaliado o aço ASTM 572-Gr 50 de resistência mecânica similar, com relação Mn/Si em torno de 4. As composições químicas destes aços são apresentadas na Tabela 1.

A experiência foi realizada industrialmente na fábrica de tubos da Usiminas, unidade de Campo Limpo, SP. Foram fabricados tubos de 125,8 mm de diâmetro e 6,3 mm de espessura. As condições de soldagem utilizadas são apresentadas na Tabela 2.

A avaliação da qualidade das juntas foi realizada por ensaio de alargamento, em ambos os lados da amostra de tubo, com base na norma NBR NMI 68.<sup>(6)</sup> Os critérios utilizados para a classificação da qualidade das juntas foram: fratura total, fratura parcial (em apenas um dos lados ensaiados), pequenas trincas e ausência de trinca (Figura 4).

Para análise dos defeitos presentes na linha de solda dos tubos, que não apresentaram fratura total no ensaio de alargamento, foram preparados e submetidos à tração, até a ruptura, três corpos de prova transversais à solda para cada tubo, nas dimensões de 250 × 30 × 6,30 mm. Os corpos-de-prova foram entalhados (entalhe em "V", com 2 mm de profundidade) para favorecer a fratura na linha de solda. De modo a facilitar a identificação na superfície de fratura de defeitos pré-existentes na linha de solda, os corpos de prova foram tracionados após imersão em nitrogênio líquido. Com isso, foi possível garantir que todas as regiões da superfície de fratura sem defeito apresentaram clivagem.

A superfície de fratura foi analisada pelas técnicas de microscopia estereoscópica e de microscopia eletrônica de varredura (MEV), de modo a identificar o tipo de defeito presente em cada condição avaliada. Na análise por MEV foi utilizada a técnica de elétrons retroespalhados, que gera uma diferença de tonalidade entre regiões com diferentes composições químicas. Os defeitos presentes na superfície de fratura foram submetidos à análise química semiquantitativa, através de espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDS - *Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy*).

## 3 RESULTADOS

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de alargamento, para cada aço e condição de soldagem utilizada.



**Figura 4.** Amostras representativas do critério de avaliação utilizado após ensaio de alargamento: (a) fratura total; (b) fratura parcial; (c) pequenas trincas; e (d) sem trinca.

**Tabela 3.** Resultado dos testes de alargamento

Aço	Velocidade v (m/min)	Ângulo - $\theta$ (°)	v. $\theta$ (°.m/min)	Potência (kVA)	Resultado
Alto Si	10	4	40	290	Fratura total
	16	5	80	380	Fratura total
	21	5	105	390	Fratura total
	16	4	64	360	Fratura parcial
	16	4	64	390	Fratura parcial <sup>(*)</sup>
	15	5	75	380	Pequenas trincas
	15	5	75	390	Pequenas trincas
	18	5	90	390	Pequenas trincas
	21	5	105	430	Pequenas trincas <sup>(**)</sup>
ASTM A572	12	4	48	290	Sem trincas
	21	5	105	420	Sem trincas

<sup>(\*)</sup>Houve propagação da fratura para o metal base. <sup>(\*\*)</sup>Foi observada uma única microtrinca, em apenas um dos lados ensaiados.

A Figura 5 mostra as superfícies de fratura características dos diferentes tipos de resultado obtidos no ensaio de alargamento (Tabela 3) do aço alto silício, observadas por microscopia estereoscópica. Nesta figura são indicados os principais defeitos observados, após caracterização com maior aumento no MEV (Figura 6) e através de análise pela técnica EDS (Figura 7). São identificados quatro tipos de defeitos: solda fria, filme de óxido, falta de caldeamento e penetrador. Os defeitos filme de óxido e falta de caldeamento são observados apenas nas amostras de tubos com fratura total (Figuras 5a, b). O defeito solda fria é observado nas amostras de tubos com fraturas total (Figuras 5a, b) e parcial (Figuras 5c, e), porém ocupando uma área significativamente maior nas amostras que apresentam fratura total. O defeito penetrador é observado na amostra de tubo com fratura parcial com propagação no metal base (Figuras 5d, e) e nas amostras de tubo com pequenas trincas (Figura 5f).

No defeito solda fria, as inclusões, observadas no interior dos *dimples*, são constituídas basicamente de óxidos de ferro e silício (Figura 6a). O defeito caracterizado como um filme de óxido apresenta principalmente ferro e oxigênio (Figura 7b). O defeito penetrador é caracterizado

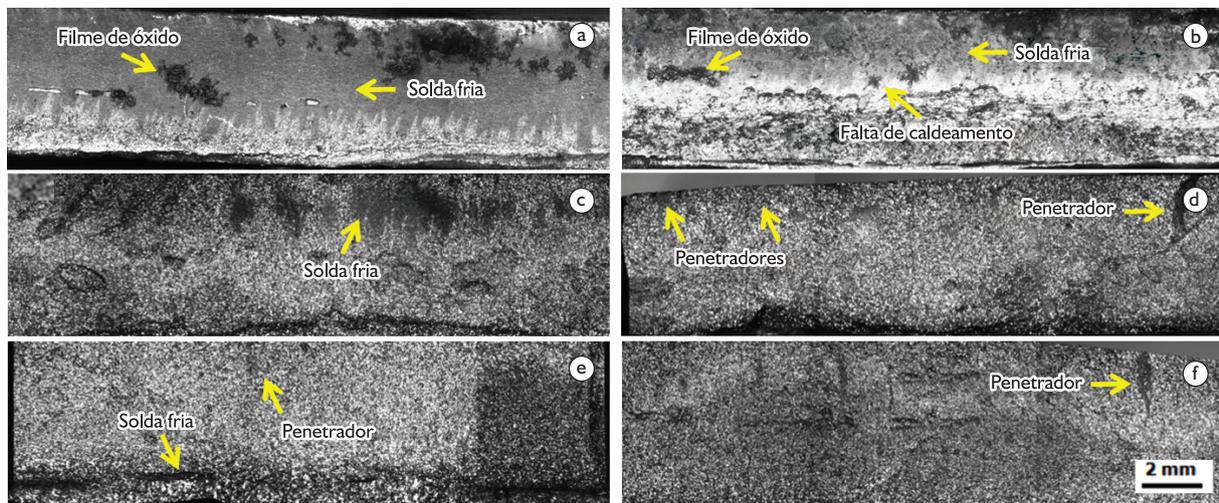
como óxidos (região escura na Figura 6d) de diferentes elementos com grande afinidade pelo oxigênio, especialmente silício (Figura 7c), envolvido por metal solidificado (região clara na Figura 6d), basicamente ferro (Figura 7d)

Assim como no ensaio de alargamento, as amostras de tubo de aço ASTM A572 submetidas à tração, não apresentam defeito na linha de solda. A fratura, nestes casos, é sempre por clivagem.

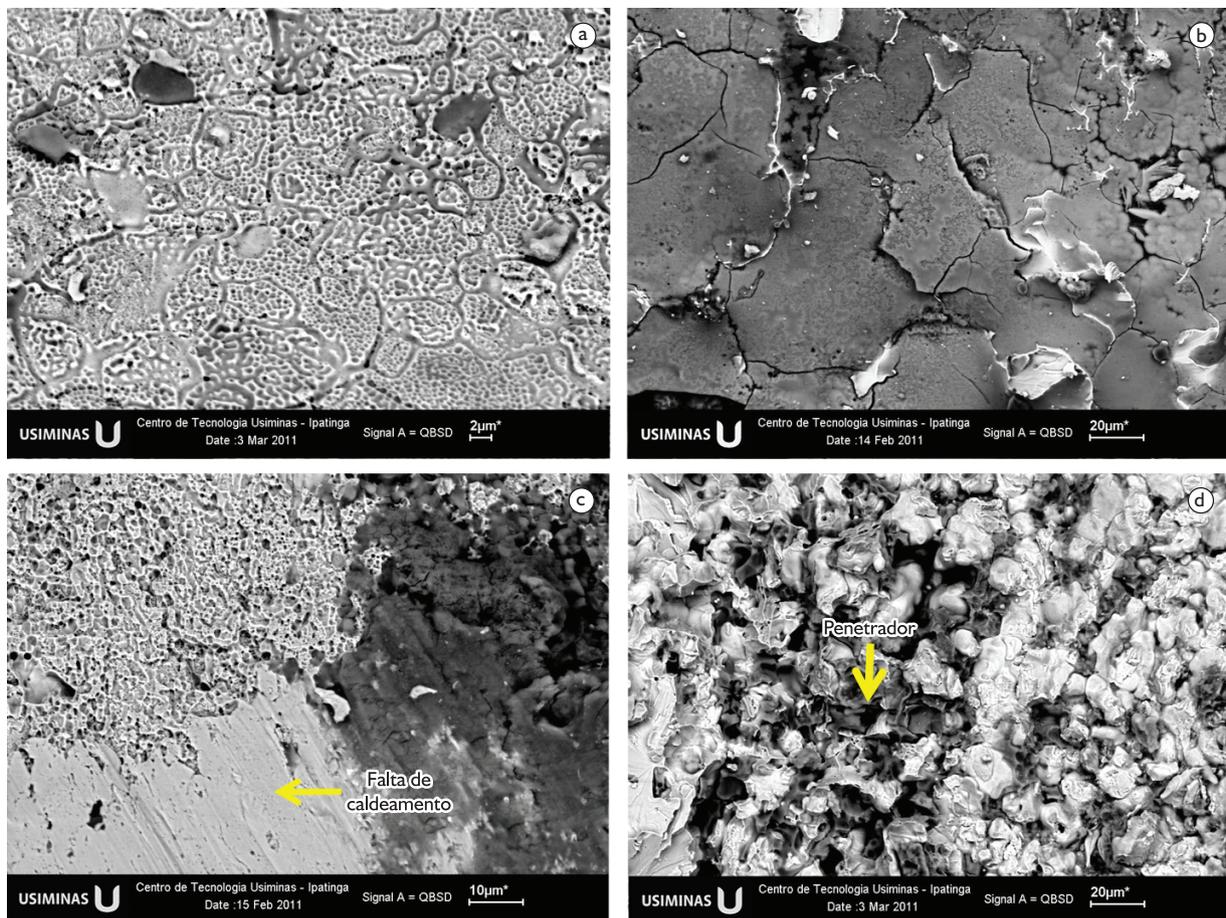
#### 4 DISCUSSÃO

A análise da superfície de fratura dos tubos de aço alto silício, que apresentam fratura total no ensaio de alargamento, permite associar o mau desempenho destes tubos à presença de três tipos de defeito: solda fria (Figura 6a), aprisionamento de um filme de óxido (Figura 6b) e falta de caldeamento (Figura 6c).

A presença de solda fria é um indicativo da ocorrência do fenômeno do 1º tipo. Este resultado é coerente com o fato de terem sido utilizadas, para uma mesma velocidade e ângulo de convergência, as menores potências de soldagem para esses tubos (Tabela 3). No fenômeno do 1º tipo não



**Figura 5.** Superfície de fratura observada por microscopia estereoscópica, após ensaio de alargamento ou de tração: (a) fratura total; (b) fratura total; (c) fratura parcial; (d) e (e) fratura parcial de tubo que apresentou propagação para o metal base; e (f) pequenas trincas.

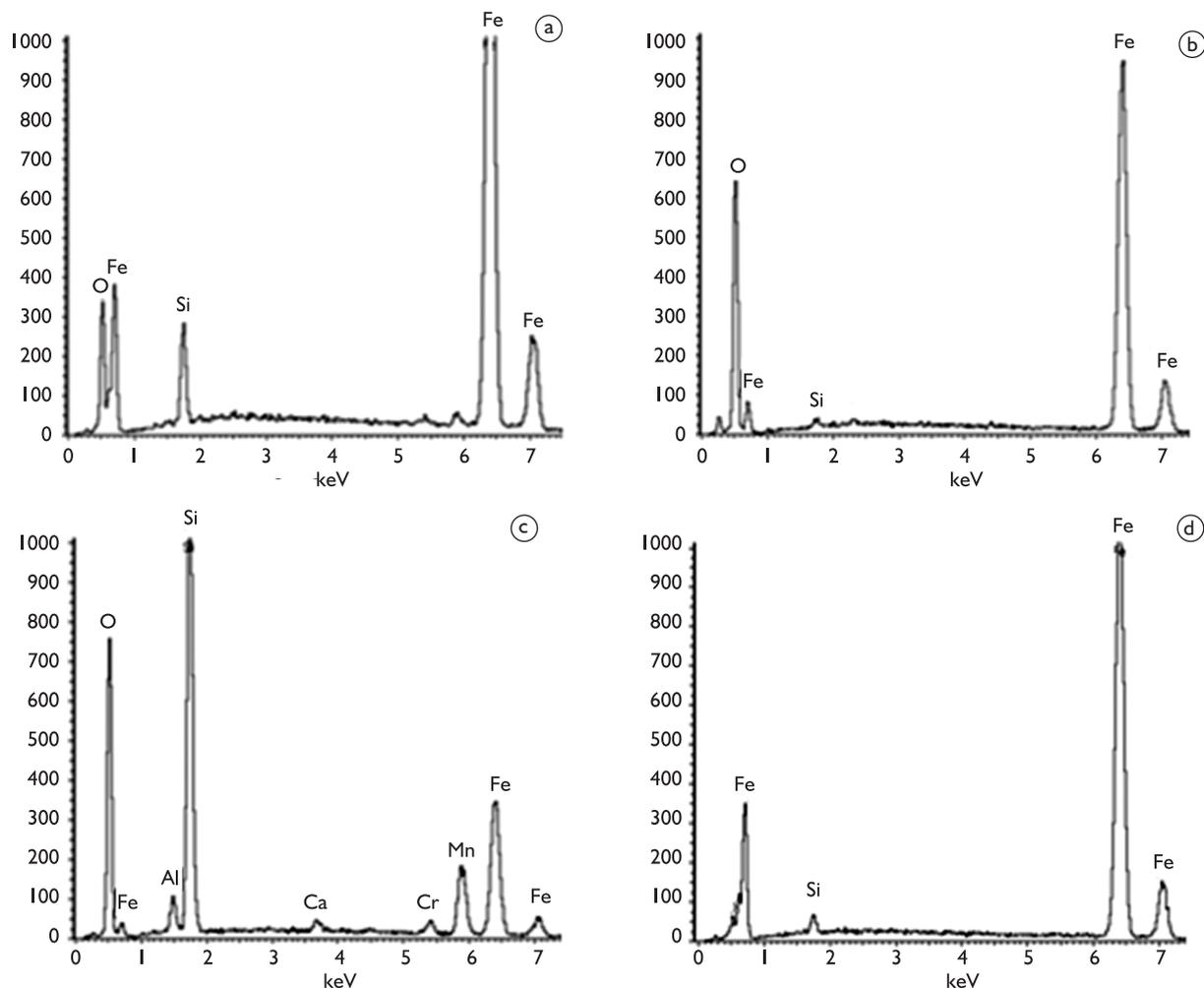


**Figura 6.** Defeitos observados na superfície de fratura da região de solda de tubos de aço alto silício: (a) solda fria; (b) filme de óxido; (c) falta de caldeamento, em região com os defeitos solda fria e filme de óxido; e (d) penetrador.

há geração de uma quantidade suficiente de metal fundido para arrastar esses óxidos das faces das bordas, sob o efeito da força eletromagnética. Nesta condição, a força eletromagnética exercida sobre as faces das bordas também é menor, em função da menor corrente de soldagem.<sup>(3)</sup> No caso específico do aço alto silício, a dificuldade de expulsão

é aumentada pela formação do óxido de silício (Figura 7a) que apresenta uma elevada temperatura de fusão.

O filme de óxido aprisionado na linha de solda, embora possa ser confundido com o penetrador, não resultou do retorno de óxido com a gota fundida, uma vez que ficou evidente que as condições de soldagem determi-



**Figura 7.** Resultados da análise pela técnica EDS dos defeitos mostrados na figura 6: (a) inclusão presente no defeito solda fria (Figura 6a); (b) filme de óxido de ferro (Figura 6b); (c) região escura do penetrador (Figura 6d), caracterizada como basicamente óxido de silício; e (d) região clara do penetrador (Figura 6d), caracterizada como metal solidificado.

naram a ocorrência do fenômeno do 1º tipo. Esse defeito é formado devido à fusão incipiente das faces das bordas, de modo que a pequena quantidade de metal fundido foi oxidada, dificultando a sua remoção tanto pela força eletromagnética quanto pelo recalque. Como o tempo de exposição do metal fundido à atmosfera é muito curto, praticamente só foi observado óxido de ferro (Figura 7b).

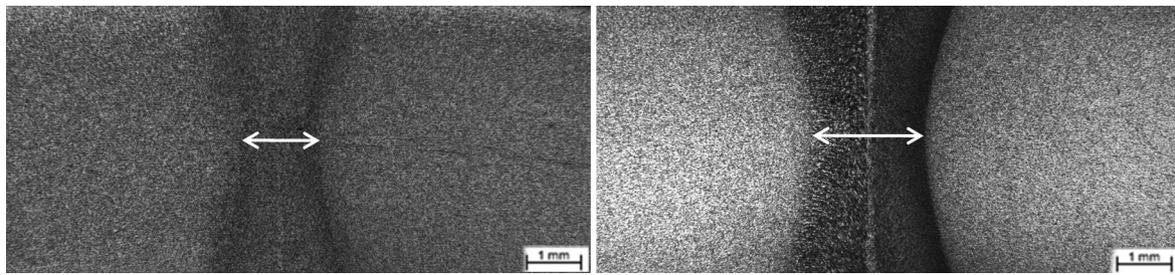
Em uma das amostras é possível observar o problema de falta de caldeamento (Figura 6c), em consequência de, localmente, o aporte de calor não ter sido nem mesmo suficiente para provocar a fusão das faces das bordas.

Para a condição de menor potência avaliada no estudo, esperava-se que os defeitos filme de óxido aprisionado e falta de caldeamento também ocorressem para o aço ASTM A572, pois a potência e o recalque foram os mesmos utilizados para o aço alto silício. Contudo, os ensaios de alargamento e de tração não revelaram qualquer defeito na linha de solda dos tubos fabricados com o aço ASTM A572. Uma possível explicação para esta diferença de resultado

está associada ao fato do silício aumentar significativamente a resistividade elétrica do aço.<sup>(7)</sup> Assim, para o aço alto silício, a magnitude da corrente induzida é menor para uma mesma potência de soldagem e, conseqüentemente, também são menores a força eletromagnética e a quantidade de metal fundido, contribuindo para a ocorrência desses defeitos na linha de solda. A Figura 8 evidencia, por meio da análise da extensão da zona afetada pelo calor, o menor aquecimento da junta soldada de aço alto silício, comparativamente à junta de aço ASTM, para uma mesma condição de soldagem.

Os tubos que apresentaram fratura parcial foram soldados com diferentes potências, porém com a mesma velocidade e ângulo de convergência (Tabela 3).

Para o tubo que foi soldado com a menor potência, observa-se o defeito solda fria (Figura 5c). A ocorrência desse defeito, para esta condição de soldagem, apresenta a mesma justificativa dada anteriormente para os tubos



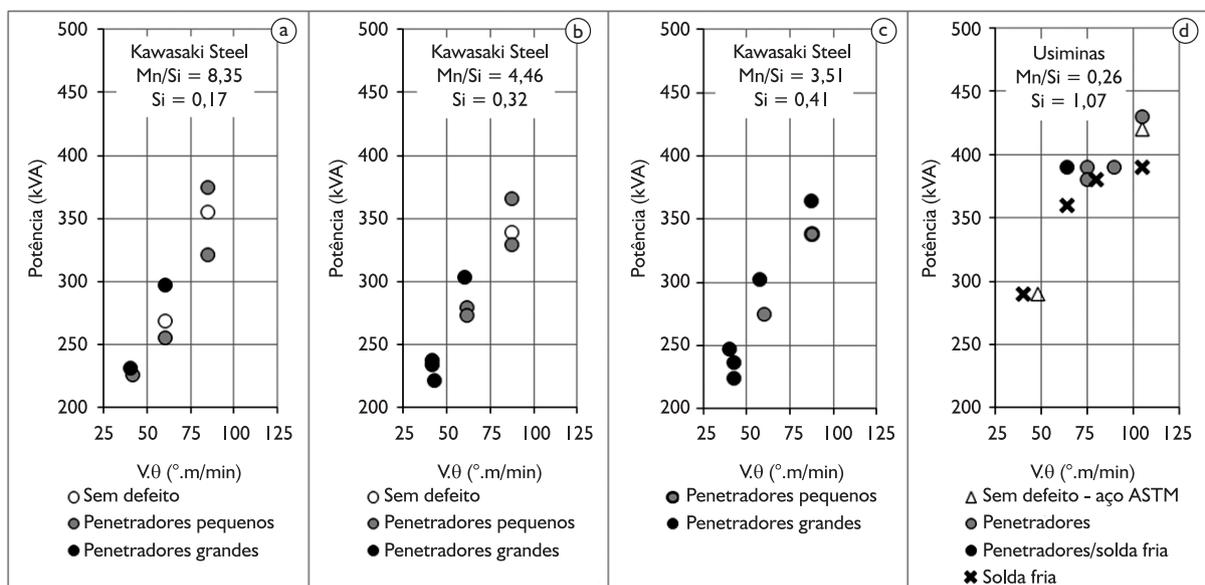
**Figura 8.** Extensão da zona afetada pelo calor, para a condição de maior potência, ângulo, e velocidade de soldagem: (a) aço alto silício; e (b) aço baixo silício.

com fratura total. O melhor desempenho em ensaio de alargamento, comparativamente aos tubos com fratura total, é associado à menor área com solda fria e ausência do filme de óxido aprisionado.

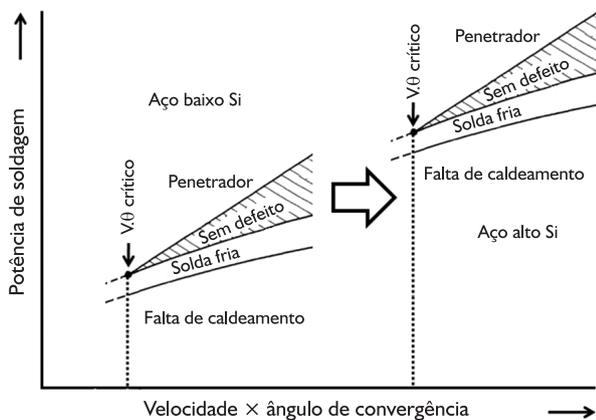
Já o tubo com fratura parcial, soldado com maior potência, apresenta o defeito penetrador em várias regiões da superfície de fratura (Figura 5d). Este resultado é coerente com a literatura,<sup>(1,3)</sup> que reporta que, para uma mesma velocidade e ângulo de convergência, o aumento da potência pode determinar a ocorrência do fenômeno do 3º tipo e, em consequência, o defeito penetrador. Em uma das amostras observa-se também a presença de solda fria (Figura 5e). Como pode ser observado na figura 3, a coexistência dos defeitos solda fria e penetrador é possível para condições de soldagem abaixo de  $v.\theta$  crítico, caso ocorram variações, mesmo que pequenas, na potência durante o processo, alternando a ocorrência dos fenômenos do 2º e do 3º tipo. Para este caso, a fratura também ocorreu de forma parcial no ensaio de alargamento devido à menor área com o defeito solda fria e ausência do filme de óxido. A propagação em direção ao metal base pode ser atribuída ao fato da região com solda fria ter sido muito pequena (Figura 5e). Na soldagem do aço com alto silício

não é possível a eliminação completa de defeitos, sendo que as melhores condições determinaram a ocorrência de pequenas trincas no ensaio de alargamento, associadas a penetradores. Esses tubos foram soldados com potências elevadas e valores do produto  $v.\theta \geq 75^\circ$  m/min. Estas condições certamente conduziram à ocorrência do fenômeno do 3º tipo. Provavelmente, a zona de separação foi pequena, uma vez que foram pequenas a quantidade e a dimensão das trincas (Figura 4), geradas em ensaio de alargamento, e dos penetradores (Figura 5f), observados na superfície de fratura de corpos de prova de tração. Na condição experimental em que foram utilizadas maior potência, maior velocidade e maior ângulo de convergência, obteve-se o melhor resultado, sendo observada apenas uma microtrinca, em toda área analisada no ensaio de alargamento. O aço ASTM A572 também foi soldado nesta condição, não tendo sido constatados defeitos.

Na Figura 9 foram traçados gráficos P versus  $v.\theta$  com os resultados do presente trabalho e os do estudo realizado por pesquisadores da antiga Kawasaki Steel<sup>(4)</sup> que avalia a influência das condições de soldagem e da relação Mn/Si (variando apenas o teor de silício) na ocorrência do defeito penetrador. Deve-se ressaltar que os critérios



**Figura 9.** Gráficos mostrando a influência dos parâmetros de processo e da relação Mn/Si na ocorrência de defeitos na linha de solda: (a) Mn/Si = 8,35; (b) Mn/Si = 4,46; (c) Mn/Si = 3,51; e (d) Mn/Si = 0,26.



**Figura 10.** Representação esquemática do deslocamento esperado para o campo de soldabilidade pela mudança na relação Mn/Si e teor de silício.

adotados em cada estudo são diferentes. No presente trabalho elabora-se uma avaliação apenas qualitativa, indicando o principal tipo de defeito observado. No estudo da Kawasaki Steel,<sup>(4)</sup> para cada condição mede-se o comprimento total dos penetradores, na superfície externa da junta soldada do tubo, utilizando líquido penetrante. Na Figura 9, são considerados penetradores pequenos aqueles cujo comprimento total é inferior a 0,6 mm/m de tubo e penetradores grandes, aqueles cujo comprimento total é superior a 2 mm/m de tubo.

Apesar dos critérios serem diferentes, a análise dos gráficos da Figura 9 permite concluir que a redução da relação Mn/Si, promove o deslocamento do campo de soldabilidade para valores mais elevados de  $v\theta$ , tornando

necessária a utilização de maiores potências para aumento da eficiência de expulsão do penetrador da zona de separação. No presente trabalho, fica evidente o efeito do elevado teor de silício no menor aquecimento das faces das bordas a soldar, devido à redução da corrente induzida. Com isso, além da necessidade de aumento da potência para compensar o aumento de  $v\theta$  crítico, há necessidade de se aumentar este parâmetro para gerar correntes induzidas de maior valor nas bordas a soldar, de modo a evitar os defeitos solda fria, filme de óxido e falta de caldeamento. A Figura 10 mostra o efeito esperado da relação Mn/Si e do teor de silício do aço no campo de soldabilidade.

## 5 CONCLUSÃO

Verifica-se que, para a soldagem de aço com elevado teor de silício, pelo processo HFIW, devem ser utilizados valores mais elevados de velocidade, ângulo de convergência e potência, comparativamente a de um aço C-Mn comum de mesma resistência mecânica. A diferença de comportamento pode ser explicada pelo fato da baixa relação Mn/Si, associada ao elevado teor de silício do aço, favorecer a formação de óxidos de elevado ponto de fusão durante a soldagem, o que dificulta a eliminação dos defeitos solda fria e penetrador por arraste pelo metal fundido. Além disso, o silício aumenta significativamente a resistividade do aço, reduzindo a magnitude da corrente induzida para uma mesma potência de soldagem. Conseqüentemente, também são menores a força eletromagnética e a quantidade de metal fundido, que auxiliam na expulsão dos óxidos da linha de solda.

## REFERÊNCIAS

- HAGA, H.; AOKI, K.; SATO, T. Welding phenomena and welding mechanisms in high frequency electric resistance welding: 1st report. *Welding Journal*, v. 59, n. 7, p. 208s-16, July 1980.
- HAGA, H. et al. Automatic heat input control in production welding of medium-diameter ERW pipe. *Nippon Steel Technical Report*, n. 26, p. 27-33, July 1985.
- KIM, C.-M.; KIM, J.-K. The effect of heat input on the defect phases in high frequency electric resistance welding. *Metals and Materials International*, v. 15, n. 1, p. 141-8, 2009. <http://dx.doi.org/10.1007/s12540-009-0141-5>
- YOKOYAMA, E. et al. Effects on penetrator defect occurrence of welding conditions and Mn/Si ratio of ERW high manganese line pipe. *Kawasaki Steel Giho*, v. 10, n. 1, p. 23-33, 1978.
- ICHIHARA, H. et al. Manufacture of alloy steel tube by high frequency electric resistance welding. *Transactions ISIJ*, v. 26, p. 468-75, 1986. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational1966.26.468>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 168*. Tubos de aço: Ensaio de alargamento. Rio de Janeiro, 2000.
- LANDGRAF, F. J. G. Lâminas de aço para motores elétricos. *Metalurgia e Materiais*, v. 55, n. 483, p. 626-7, 1999.

Recebido em: 12/10/2011

Aceito em: 14/02/2012