

SIMULAÇÃO DA SOLDAGEM POR INDUÇÃO DE ALTA FREQUÊNCIA EM AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO

Ivan J. de Santana

M.Sc. Eng. Mecânico, PUC MINAS, Av. Dom José Gaspar 500, Coração Eucarístico, BH, ivansan@pucminas.br.

Balsamo Paulo

ACESITA S.A., Praça 1º de maio 09, Centro, Timóteo, MG, pbalsamo@acesita.ind.br.

Paulo J. Modenesi

UFMG, Rua Espírito Santo 35, 30160-030, Belo Horizonte, MG, modenesi@demet.ufmg.br.

Resumo. *Este trabalho descreve o desenvolvimento e avaliação de um equipamento construído a partir de uma máquina de soldagem por pontos para a simulação da Soldagem por Indução de Alta Frequência de aços inoxidáveis ferríticos. O equipamento está sendo desenvolvido para avaliar a soldabilidade destes aços em um sistema de baixo custo, de uma forma rápida e com um consumo mínimo de material. Foram realizadas modificações em uma máquina de soldagem por pontos para permitir a soldagem de topo possibilitando a regulagem e controle dos parâmetros de soldagem. Para avaliar o sistema, foram realizados testes em corpos de prova de largura variável com o intuito de se obter juntas soldadas com aspecto visual similar ao obtido com o processo de Soldagem por Indução de Alta Frequência. Os resultados obtidos por meio de análise visual, ensaios tração, avaliação metalográfica indicam a possibilidade de obtenção de soldas similares àquelas feitas com soldagem por indução e com propriedades mecânicas similares às do metal base.*

Palavras-chave: *Soldagem por Indução de Alta Frequência, Simulação, Aço Inoxidável Ferrítico, Soldagem por Resistência.*

1. INTRODUÇÃO

A soldagem por Indução de Alta Frequência é um processo de soldagem por deformação pertencente ao segmento de soldagem por resistência elétrica, que utiliza o calor gerado na interface dos materiais devido a resistência à passagem de um fluxo de corrente elétrica (efeito Joule) simultaneamente com a aplicação de pressão^(1,2 e 3). Este processo é muito difundido na indústria para a soldagem longitudinal de tubos. Aços inoxidáveis ferríticos vêm sendo utilizados na fabricação de tubos soldados por esse processo, em particular, para o sistema de exaustão de automóveis⁽⁴⁾. Embora sejam considerados materiais de difícil soldabilidade, nas últimas décadas, o desenvolvimento de aços estabilizados ao Nb e Ti e de baixíssimo teor de intersticiais em muito melhorou este aspecto e contribuiu para a sua maior aplicação industrial^(5,6). Os equipamentos de soldagem por Indução de Alta Frequência possuem, em geral, um alto índice de automação e são caracterizados por serem equipamentos compactos e de valor agregado alto⁽⁷⁾. Assim, estudos de soldabilidade bem como, a otimização de parâmetros operacionais para o processo tendem a apresentar custos e consumo de material elevado.

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver uma alternativa para avaliar a soldabilidade de aços inoxidáveis ferríticos neste tipo de aplicação. Para isto, procurou-se desenvolver e aplicar

um procedimento experimental em um equipamento simples e de baixo custo, que permitisse o estudo da soldabilidade de aços inoxidáveis ferríticos e de outros materiais em laboratório, objetivando a redução de custo com matéria prima e parada de equipamento. Será relatado o desenvolvimento, a preparação do equipamento, a metodologia aplicada e os resultados dos testes de soldagem, obtidos por meio de ensaios de tração, análise visual e inspeção metalográfica na qual avaliou-se as microestruturas obtidas em relação àquelas obtidas no processo industrial.

2. DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO PARA SIMULAÇÃO

Utilizou-se, como fonte de energia para o sistema desenvolvido, um equipamento de Soldagem por Pontos convencional. Neste equipamento foram realizadas as modificações e adaptações necessárias para o desenvolvimento do sistema de simulação (Figura 1):

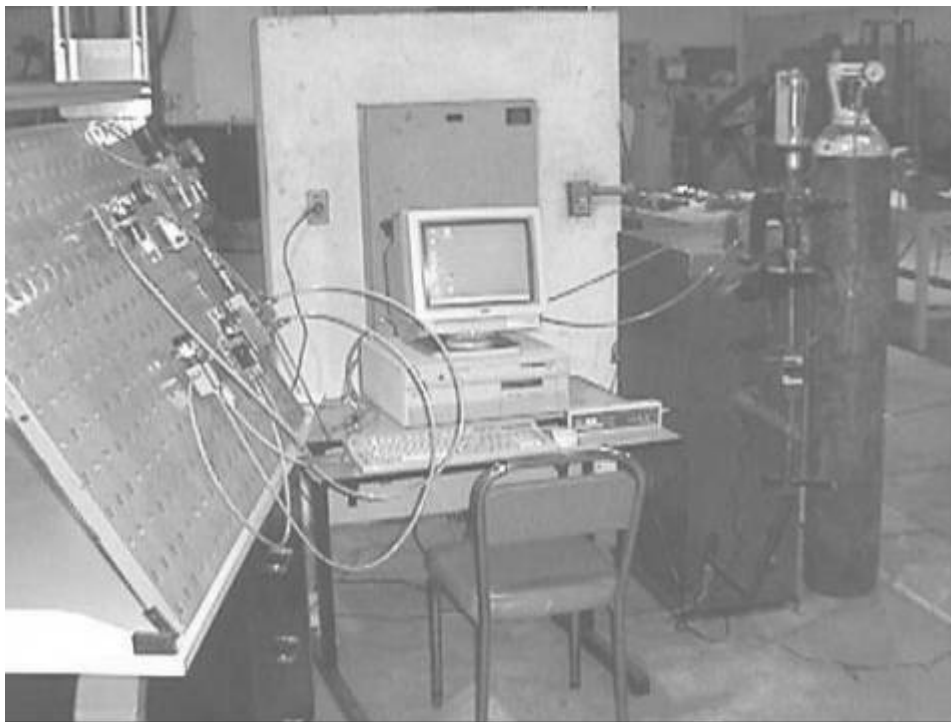


Figura 1 – Equipamento de soldagem por ponto adaptado para soldagem de topo com controle dos parâmetros de soldagem.

- Desenvolvimento e adaptação do mecanismo de fixação e deslocamento dos corpos de prova. Foram incorporados elementos mecânicos, que permitiram a fixação de corpos de prova retangulares e de largura variável de forma simples e rápida. Estes elementos permitiram que o corpo de prova descrevesse uma trajetória linear durante a soldagem de topo. O sistema permite também o ajuste do comprimento dos corpos de prova fora da garra de fixação.
- Desenvolvimento e adaptação de um temporizador. Um programa em C++ foi desenvolvido para comandar um circuito eletrônico que controlava o relé de potência do equipamento, sendo possível controlar, com resolução de 0,001s, o tempo de atuação da corrente de soldagem.
- Desenvolvimento de um sistema de proteção da solda com nitrogênio utilizando um regulador de vazão, junto ao cilindro de gás, e um sistema composto de mangueira e tubos soldados, no sistema de fixação dos corpos de prova.
- Desenvolvimento e adaptação de um temporizador para controle do tempo de pré-carga e carga aplicada aos corpos de prova. Utilizando um circuito pneumático temporizado, controlou-se o tempo de início de ação de um atuador pneumático de dupla ação, cuja função era acionar o sistema de fixação dos corpos de prova, pressionando, assim, as partes durante a soldagem.

- Desenvolvimento e adaptação do mecanismo para regular a pré-carga e carga aplicada aos corpos de prova. A pré-carga foi definida como sendo o peso inicial do conjunto superior móvel. A carga é controlada por um regulador de pressão inserido no circuito pneumático, o qual possibilita variar a força exercida pelo atuador de dupla ação. A força aplicada é medida com uma célula de carga de 500N de capacidade conectada a um indicador digital. A célula de carga é colocada entre as garras de fixação dos corpos de prova antes dos testes.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizado para este estudo o aço inoxidável ferrítico AISI 441. O material foi fornecido pela ACESITA S.A. na forma de chapas de 1,5mm de espessura, juntamente com sua análise química Tabela I.

Tabela I. Composição química do aço AISI 441 (% em peso).

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Ti	Nb
0,011	0,14	0,023	0,001	0,48	17,96	0,195	0,143	0,594
O	Sn	Cu	V	Co	Mo	N	Al	
18 ppm	0,003	0,013	0,046	0,021	0,035	122ppm	0,011	

Foram usados corpos de prova com três valores de largura (16, 18 e 20mm) e dois comprimentos (50 e 110mm). Os corpos de prova menores foram usados para a avaliação dos parâmetros do processo no aspecto visual da solda e análise metalográfica e os mais longos para a realização de ensaios de tração da solda. Estes ensaios foram feitos com base na norma ASTM E8M-95a.

Para avaliar os parâmetros do processo e a sua influência no aspecto visual da solda e na formação da zona termicamente afetada (ZTA) e da rebarba, foram realizados 24 testes. O tamanho da ZTA foi caracterizado indiretamente pela largura da região oxidada do corpo de prova. A formação da rebarba foi caracterizada por um índice (IR) definido pela diferença do comprimento inicial dos corpos de prova e o seu comprimento final após a soldagem. Para avaliar a repetibilidade do processo, foram realizados 11 testes adicionais e, para a análise metalográfica, foram realizados 30 testes variando diferentes parâmetros do processo, sendo selecionados aqueles com melhor aspecto visual. Para a avaliação mecânica, foram realizados 9 testes com os mesmos parâmetros usados nos corpos de prova selecionados para avaliação metalográfica. Além destes, dois corpos de prova do metal base foram ensaiados para comparação. Os ensaios foram feitos em uma máquina INSTRON Modelo 5582, com capacidade de dez toneladas, aplicando uma velocidade de deformação de $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela II mostra os resultados dos testes realizados para avaliação dos parâmetros de soldagem do equipamento desenvolvido. A Figura 2 mostra um corpo de prova que foi considerado como ótimo em sua avaliação visual.

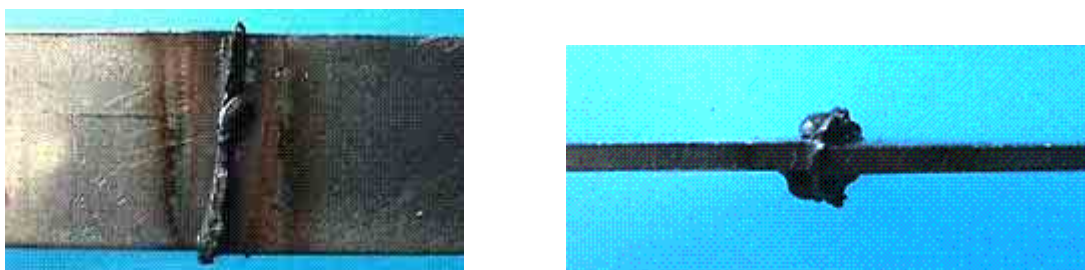


Figura 2 - Exemplo de corpo de prova soldado considerado como ótimo na inspeção visual.

Tabela II - Testes para avaliação visual, do índice de rebarba e ZTA.

Condições iniciais fixas:		• Vazão de gás: 20 l/min (N ₂) • Corrente no primário: 60A								
Teste	Área de contato (mm ²)	Tempo Corrente (s)	Tempo Pré-carga (s)	Carga (N)	D (mm)	L _{INIC} (mm)	L _{FIM} (mm)	IR (mm)	“ZTA” (mm)	Junta (avaliação visual)
A01	24,0	2,000	1,0	15,0	10	99,8	92,5	7,3	8,5	O
A02	27,0	2,000	1,0	15,0	10	100,0	95,3	4,7	9,9	O
A03	30,0	2,000	1,0	15,0	10	99,4	96,1	3,3	11,2	O
A04	30,0	1,000	1,0	15,0	10	99,8	99,5	0,3	9,1	R
A05	30,0	1,250	1,0	15,0	10	99,8	99,7	0,1	12,8	R
A06	30,0	1,500	1,0	15,0	10	100,6	100,0	0,6	13,1	R
A07	30,0	1,750	1,0	15,0	10	100,0	96,1	3,9	10,5	O
A08	30,0	1,875	1,0	15,0	10	100,2	95,2	5,0	9,2	O
A09	30,0	2,000	1,0	15,0	10	100,1	95,5	4,6	11,2	O
A10	30,0	2,250	1,0	15,0	10	100,4	94,1	6,3	9,1	R
A11	30,0	2,000	1,0	15,0	7	99,8	94,3	5,5	5,7	R
A12	30,0	2,000	1,0	15,0	10	99,4	96,1	3,3	11,2	O
A13	30,0	2,000	1,0	15,0	12	99,8	94,9	4,9	10,5	O
A14	30,0	2,000	1,0	15,0	14	100,0	98,7	1,3	15,7	R
A15	30,0	2,000	1,0	15,0	10	99,4	96,1	3,3	11,2	O
A16	30,0	2,000	1,0	20,0	10	99,9	93,6	6,0	9,2	O
A17	30,0	2,000	1,0	25,0	10	100,4	94,0	6,4	7,6	O
A19	30,0	2,000	1,0	35,0	10	100,0	94,2	5,8	7,5	B
A20	30,0	2,000	0,0	15,0	10	100,0	94,7	5,3	10,2	O
A21	30,0	2,000	0,5	15,0	10	99,8	93,8	6,0	7,8	O
A22	30,0	2,000	1,0	15,0	10	100,4	93,8	6,6	9,2	B
A23	30,0	2,000	1,5	15,0	10	100,4	93,8	6,6	9,7	R
A24	30,0	2,000	2,0	15,0	10	100,2	93,4	6,8	7,4	B

Obs: **D** - Distância entre as garras de fixação, **Avaliação visual: O - Ótimo** (Juntas bem unidas, sem indícios de falta de união, alinhadas e com rebarba uniforme), **B - Bom**-. (Juntas bem unidas, porém com algum indício de falta de união, desalinhamento e ou rebarba não uniforme) e **R - Regular**-. (juntas com falta de união, desalinhamento e ou outros defeitos observáveis).

A Figura 3 mostra a variação do índice de rebarba (IR) e do tamanho da ZTA com a variação da área de contato entre os corpos de prova. Estes resultados devem estar relacionados com a variação de densidade de corrente ou com a variação da pressão de contato durante a atuação da pré-carga e carga nos corpos de prova durante os testes. Os resultados indicam que IR diminui e o tamanho da ZTA aumenta nos corpos de prova com área de contato maior, isto é, a geração de calor seria mais concentrada na região de contato quando sua área transversal for menor, o que possibilitaria uma maior expulsão de metal como rebarba e uma ZTA menor.

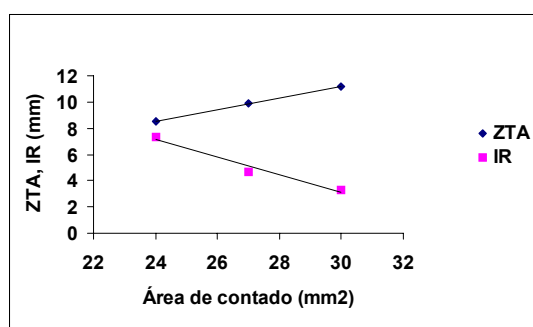


Figura 3 - Índice de rebarba e ZTA em função da área de contato. Corpos de prova A01, A02, A03.

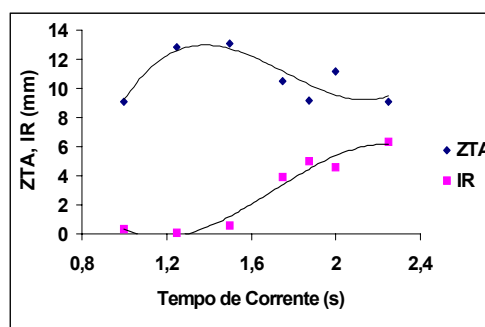


Figura 4 - Tempo de corrente elétrica (testes A04, A05, A06, A07, A08, A09, A10).

As Figuras 4 e 5 mostram, respectivamente, a influência do tempo de passagem da corrente elétrica e da distância entre as garras de fixação dos corpos de prova no tamanho da ZTA e no IR. No primeiro caso, a ZTA torna-se maior com o tempo de corrente, o que é esperado devido à maior geração de calor. Para tempos entre 1,5 e 2,0s, obteve-se soldas de boa qualidade (Tabela II). Neste intervalo, o índice de rebarba aumenta rapidamente até cerca de 6mm. No segundo caso (Figura 5), verificou-se uma faixa restrita para a obtenção de soldas de boa qualidade.

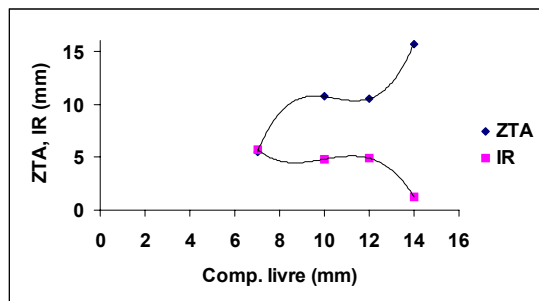


Figura 5 - Distância entre as garras (testes A09, A11, A12, A13, A14 e A22).

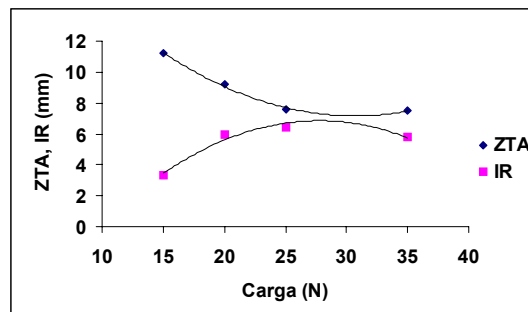


Figura 6 - Índice de rebarba e ZTA em função da carga aplicada aos corpos de prova (testes A15, A16, A17 e A19).

A Figura 6 mostra a relação entre carga e o valor de IR e do tamanho da ZTA. Observa-se uma tendência para IR aumentar e a ZTA diminuir até uma carga de 25N e tender para uma estabilização para cargas maiores. Durante estes testes, obteve-se soldas que foram consideradas como de boa qualidade na avaliação visual para os menores valores de ZTA (cerca de 7,6mm). A Figura 7 mostra a influência do tempo de pré-carga no processo. Há um aumento de IR em função deste tempo. Uma possível explicação seria que, durante a aplicação da pré-carga, a resistência de contato entre os corpos de prova seja maior do que durante a aplicação da carga, o que causaria um aquecimento maior e mais localizado.

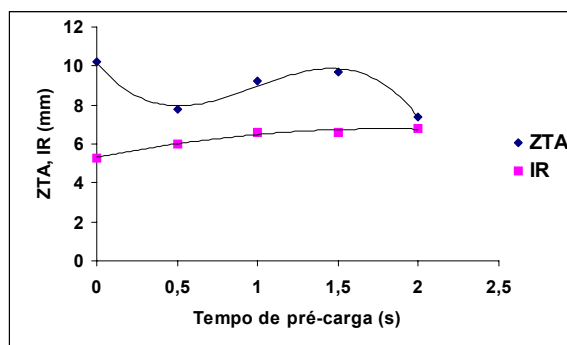


Figura 7- Índice de rebarba e ZTA em função do tempo de pré-carga. Corpos de prova A20, A21, A22, A23 e A24.

Nesta etapa foram realizados, também, testes para se verificar a importância do gás de proteção durante a soldagem. Constatou-se uma forte influência do gás de proteção (nitrogênio) para que se obtenha soldas de boa qualidade, sendo que a ausência do mesmo durante o processo inviabiliza a união das partes, Figura 8. A Figura 9 mostra a microestrutura original do metal de base. Pode-se observar que o material é constituído de grãos finos de ferrita com a presença de precipitados dispersos na estrutura^(8 e 9).

As Figuras 10 e 11 mostram a microestrutura da solda de dois corpos de prova (B08 e B21) desde o centro da junta (lado esquerdo) até a região próxima ao metal base. Em ambos os casos, a microestrutura da solda é caracterizada de grãos equiaxiais e grosseiros.



Figura 8 - Solda de topo, em corpo de prova sem a utilização do gás de proteção.

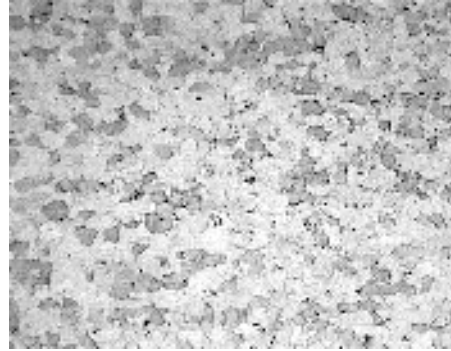


Figura 9 - Metalografia aço AISI 441, metal base. Ataque Vilella 100x.

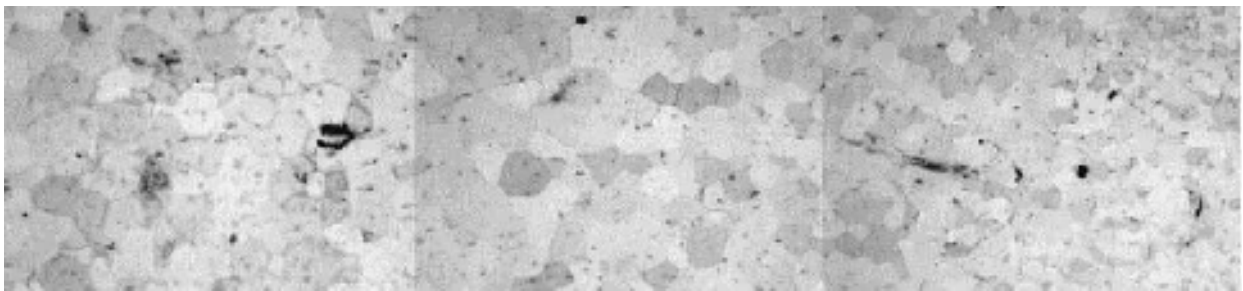


Figura 10 - Metalografia, teste 08 (equivalente aos testes 09 e 10 submetidos ao ensaio de tração), Ataque Vilella. 100x.

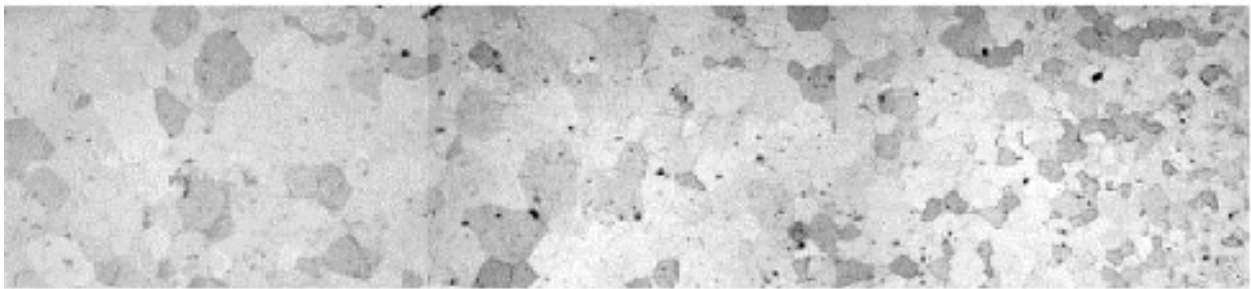


Figura 11 - Metalografia, teste 21 (equivalente ao teste 22 submetido ao ensaio de tração), Ataque Vilella. 100x.

No corpo de prova B21, apesar do seu menor tempo de soldagem, a sua menor área de contato (Tabela III) levou a um aquecimento maior e mais difuso. Como resultado, a solda deste corpo de prova apresenta uma ZTA mais extensa e com uma granulação mais grosseira. Três dos corpos de prova de tração soldados romperam fora da região da solda (B09, B10 e B31, tabela III) e seis romperam nas proximidades da linha de união (B14, B18, B19, B22, B34 e B37). Neste caso, a ruptura foi associada com o crescimento de grãos junto a região soldada e com regiões de falta de união que não foram detectadas na análise visual.

A Figura 12 mostra a curva de tração do metal de base. As Figuras 13 a 15 são relativas, respectivamente, aos corpos de prova B31, B09 e B10. Pode-se observar que estes corpos de prova apresentam propriedades mecânicas similares aos do metal de base. Por outro lado, os testes B19 e B22 apresentaram um resultado muito inferior, com a sua ruptura ocorrendo no início do escoamento. Finalmente, os ensaios de tração dos corpos de prova B09 e B10 (obtidos com os mesmos parâmetros de soldagem) apresentaram, praticamente, o mesmo resultado (Figuras 14 e 15), o que indica ser possível, obter uma repetibilidade nas propriedades mecânicas entre testes com o sistema desenvolvido. A análise das superfícies de fratura dos corpos de prova de tração que apresentaram propriedades mecânicas inferiores ao resultado do metal base, com microscópio eletrônico de varredura, mostram uma quantidade apreciável de regiões com fratura por clivagem (frágil), Figura 16. Este comportamento deve estar associado ao crescimento de grão na região da solda. Os resultados desta etapa mostraram que as soldas que tiveram melhor comportamento mecânico (B09, B10 e B31) foram àquelas feitas com o maior tempo de aplicação de corrente (2s) e que apresentaram os maiores índices de rebarba (maior ou igual a 5mm). As outras tenderam a apresentar problemas de falta de união e microestrutura de granulação grosseira.

Tabela III - Parâmetros de soldagem de alguns corpos de prova que foram submetidos a análise mecânica e metalográfica.

Condições iniciais fixas:										
• Material: Aço inoxidável AISI 441			• Corrente no primário: 60A							
• Vazão de gás: 20 l/min (N₂)			• Pré-carga: 25,0 N							
Teste	Área de contato (mm ²)	Tempo Corrente (s)	Tempo Pré-carga (s)	Carga (N)	D (mm)	L _{INIC} (mm)	L _{FIM} (mm)	IR (mm)	“ZTA” (mm)	Junta (avaliação visual)
B08	30,0	2,00	1,0	15,0	10	99,6	94,5	5,1	8,5	O
B09	30,0	2,00	1,0	15,0	10	---	---	---	10,5	O
B10	30,0	2,00	1,0	15,0	10	---	---	---	9,5	O
B12	30,0	1,50	1,0	15,0	10	99,8	97,3	2,5	10,0	O
B14	30,0	1,50	1,0	15,0	10	---	---	---	10,0	O
B17	24,0	1,25	1,0	15,0	10	99,6	95,8	3,8	8,0	O
B18	24,0	1,25	1,0	15,0	10	---	---	---	8,5	O
B19	27,0	1,25	1,0	15,0	10	---	---	---	9,5	O
B21	27,0	1,50	1,0	15,0	10	100,0	96,2	3,8	10,0	O
B22	27,0	1,50	1,0	15,0	10	---	---	---	8,8	B
B30	30,0	2,00	1,0	15,0	14	99,6	94,6	5,0	12,0	O
B31	30,0	2,00	1,0	15,0	14	---	---	---	9,5	O
B33	27,0	1,50	1,0	15,0	14	100,0	97,5	2,5	14,0	O
B34	27,0	1,50	1,0	15,0	14	---	---	---	13,0	O
B36	24,0	1,25	1,0	15,0	10	99,5	96,9	2,6	12,0	O
B37	24,0	1,25	1,0	15,0	14	---	---	---	15,0	R

As Figuras 17 e 18 mostram a microestrutura da região soldada de tubos do mesmo aço processados industrialmente. A microestrutura da Figura 17 apresenta, na região central da solda, uma estrutura de grãos alongados no sentido da espessura da parede do tubo. Esta estrutura pode ser resultante da intensa deformação dos grãos durante o processo de conformação e soldagem e que não se recristalizaram durante o ciclo térmico. A outra amostra (Figura 18) mostra na região de união uma microestrutura com grãos mais arredondados, o que se assemelha mais à condição observada nas amostras obtidas durante testes no equipamento desenvolvido neste trabalho. Em ambos os casos, contudo, a ZTA, caracterizada como a região de crescimento de grão, foi menor

nas amostras obtidas por processamento industrial. Esta diferença deve estar associada aos maiores tempos de soldagem e a uma geração de calor mais distribuído no sistema desenvolvido. Mudanças no sistema, particularmente no formato do corpo de prova e nos valores da carga que podem ser aplicados durante os testes, deverão melhorar estes resultados.

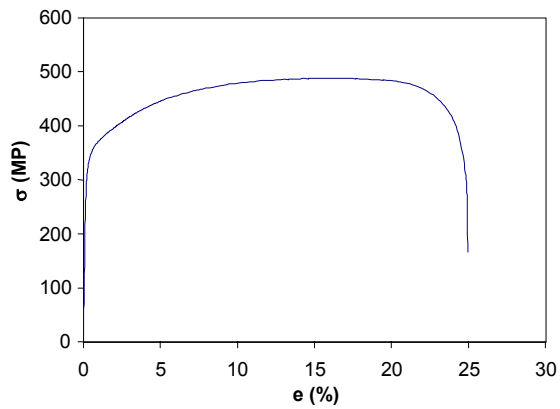


Figura 12 - Curva de tração: material como

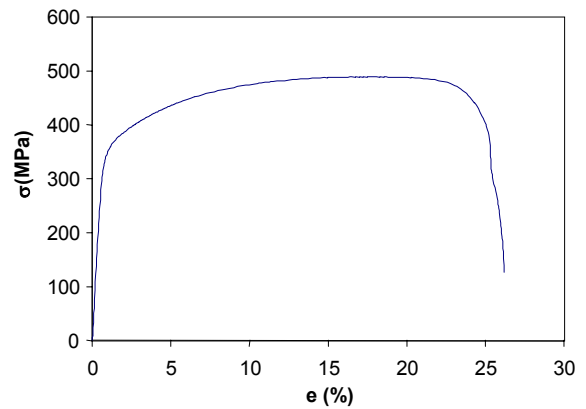


Figura 13 - Curva de tração: Teste B31.

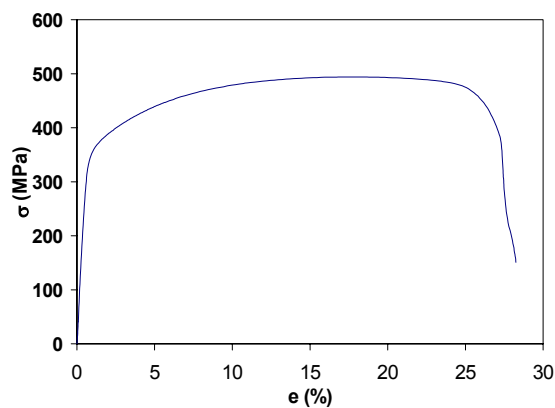


Figura 14 - Curva de tração: Teste B09.

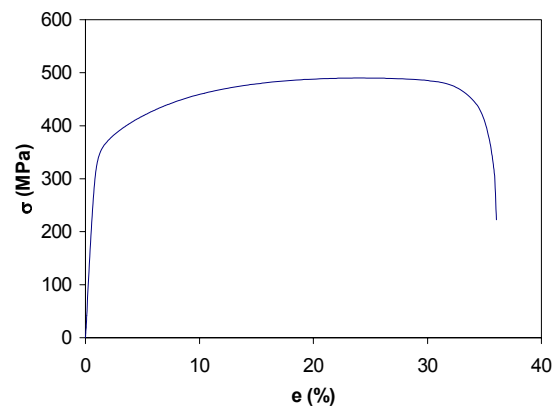


Figura 15 - Curva de tração: Teste B10.

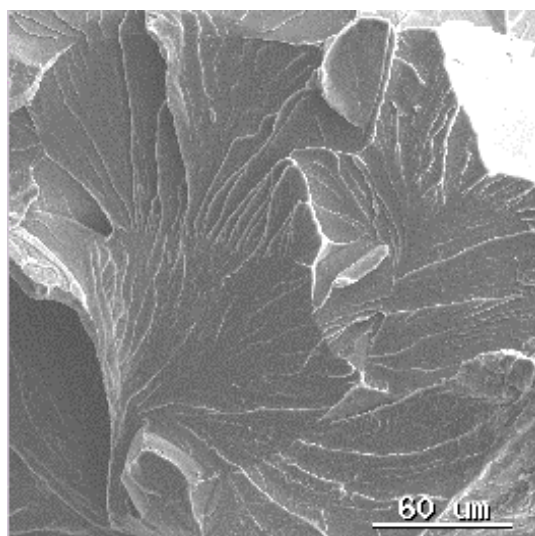


Figura 16. - Microscopia de varredura na superfície do corpo de prova submetido a ensaio de tração, 390x: Teste B34.

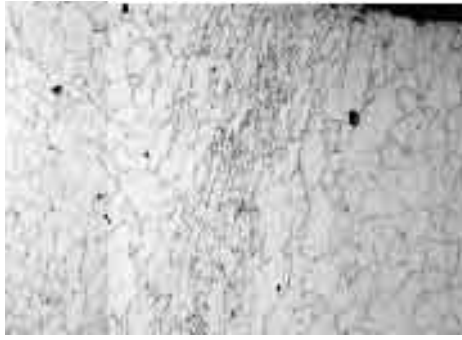


Figura 17 – Tubo soldado, processo industrial padronizado. Ataque Vilella, 100x.

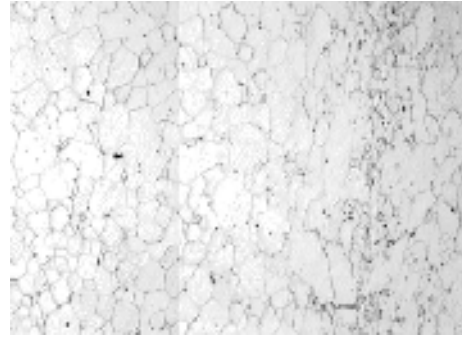


Figura 18 – Tubo soldado, processo industrial otimizado. Ataque Vilella, 100x.

5. CONCLUSÕES:

O equipamento desenvolvido permite a realização de soldas por resistência de topo em corpos de prova de seção variável com uma repetibilidade satisfatória. As principais variáveis do sistema foram a área da seção transversal do corpo de prova, a distância entre as garras de contato, o tempo de aplicação da corrente e os valores da carga e pré-carga. A dispersão dos resultados que ainda é observada neste sistema inicial foi associada com variações na resistência de contato dos corpos de prova e na carga aplicada. A microestrutura obtida apresenta certa semelhança com a obtida no processo industrial, mas tende a ser mais larga e com um maior crescimento de grão. A presença de uma região deformada no centro da solda, observada em um corpo de prova de origem industrial, não foi observada nas amostras obtidas com o sistema desenvolvido. Os resultados do presente trabalho servirão para indicar alterações futuras no sistema para melhorar o seu desempenho e, possivelmente, permitir reproduzir melhor mais aspectos da microestrutura da região da solda obtida industrialmente.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ACESITA S.A pelo fornecimento do material e pelo apoio técnico e à PUC Minas por ter cedido o equipamento e permitido o desenvolvimento do trabalho em seus laboratórios.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cary, H.C., **Modern Welding Technology**, 4ed, New Jersey Prentice-Hall, 1998, 780p.
- Martin, D. C., “**High Frequency Resistance Welding**”, Welding Research Council Bulletin Series, New York, 1971, 21 p.
- Rudd W. C., “**High-Frequency Resistance Welding**”, Welding Jornal, 1957, pp. 703-707.
- Barteri, M., Fazio, F., Fortunati S., 1999, “**Gli Acciai inossidabili Nei Sistemi Di Scarico Degli Autoveicoli**”, La Metalurgia Italiana
- Modenesi, P. J., **Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis**, São Paulo, SENAI-SP, 2001, 100p.
- Modenesi, P. J., **Estudo da Soldabilidade e das Propriedades Estruturais e Mecânicas da Zona Fundida do Aço Inoxidável Ferrítico a 17% Cromo com Nióbio**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica), Departamento de Engenharia metalúrgica da UFMG, Belo Horizonte, 1983, 227p.
- American Welding Society. Welding Handbook, 1991, **Welding Processes**. 8ªed. V2. AWS Miami, pp. 651 a 670.
- Product Data Bulletin, 2002, “**Stainless Steel**”, www.alleghenyludlum.com
- Chiaverini, V., **Aços e Ferros Fundidos**, 5ed ABM: São Paulo, 1987, 518p.

SIMULATING HIGH FREQUENCY INDUCTION WELDING OF FERRITIC STAINLESS STEELS

Ivan J. de Santana

M.Sc. Eng. Mecânico, PUC MINAS, Av. Dom José Gaspar 500, Coração Eucarístico, BH, ivansan@pucminas.br.

Balsamo Paulo

ACESITA S.A., Praça 1º de maio 09, Centro, Timóteo, MG, pbalsamo@acesita.ind.br.

Paulo J. Modenesi

UFMG, Rua Espírito Santo 35, 30160-030, Belo Horizonte, MG, modenesi@demet.ufmg.br.

ABSTRACT

This work aims to develop and evaluate a piece of equipment to simulate high frequency induction welding of ferritic stainless steels using a conventional power supply for resistance spot welding. Modifications were performed in the power supply to allow butt welding of thin sheet and the variation of process parameters like sheet width, welding time and current. Tests were performed to evaluate the use of this equipment. The results were evaluated by visual inspection, tensile testing and metallographic analysis. This analysis indicated that good quality welds that are similar to those obtained by high frequency welding may be obtained.

Keywords: *High Frequency Induction Welding, Simulation, Ferritic Stainless Steels, Resistance Welding.*