

CARACTERIZAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS PELOS PROCESSOS MIG/MAG (GMAW) E ARAME TUBULAR (FCAW) UTILIZANDO O MODO DE CORRENTE PULSADA COM PULSAÇÃO TÉRMICA ¹

*Paulo Tancredo de Campos²
Ricardo Diego Torres²
Karin Soldatelli Borsato²*

Resumo

Os processos de soldagem MIG/MAG e Arame Tubular são amplamente aplicados na indústria de petróleo. Ambos os processos podem ser aplicados em uma variedade de aços, tais como baixo carbono, inoxidável entre outras ligas ferrosas. Outra característica importante destes dois processos é a excelente produtividade devida à possibilidade de automação dos equipamentos. Estes dois processos já são empregados a nível industrial, entretanto, as diferenças em termos microestruturais e propriedades mecânicas foram pouco exploradas a nível científico. O objetivo principal deste projeto de pesquisa é determinar a microestrutura e o comportamento mecânico do MIG/MAG e do Arame Tubular quando as juntas são soldadas submetidas à pulsação térmica. As juntas soldadas pelo processo Arame Tubular apresentaram uma microestrutura mais fina bem como uma maior tenacidade. O Arame Tubular resultou em um metal de solda com dureza mais elevada. Por outro lado, o gradiente de dureza é maior para as juntas com Arame Tubular.

Palavras-chave: Soldagem; FCAW; MIG/MAG; Pulsação térmica.

CHARACTERIZATION OF WELDMENTS PRODUCED BY FCAW AND GMAW WELDING PROCESSES WITH THERMAL PULSATION MODE

Abstract

The GMAW and FCAW welding processes are been applied mostly in the oil industry. Both processes can be applied in a variety of steels, such as low carbon, stainless among other ferrous alloys. Another important feature of these two processes is the high productivity due the automatization of the equipments. Even thought these two processes are already an industrial reality the difference in terms of microstructure and mechanical response are not been well establish. The main goal of this research project is to determine the microstructure and mechanical behavior of the GMAW and FCAW when the joints are produced under Thermal Pulsation. The FCAW joint showed a finer microstructure as well as higher toughness. The FCAW showed a higher hardness in the weld metal. On other hand, the hardness gradient is higher for the FCAW joints.

Key words: Welding; FCAW; MIG/MAG; Thermal pulsation.

¹ *Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ*

² *Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM/PUCPR*

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é aplicada em grande escala nas diversas atividades industriais. Em todas as aplicações há uma contínua busca da melhoria na qualidade das juntas soldadas, principalmente as de grande responsabilidade como em tubulações, vasos, tanques, estruturas metálicas, entre outras. Por este motivo é necessário um investimento em pesquisas e desenvolvimento dos processos de soldagem, bem como a caracterização destes processos para facilitar a seleção do método mais adequado para cada aplicação específica.

Neste trabalho foram estudados os processos MIG/MAG e Arame Tubular, utilizando o modo de corrente pulsada com pulsação térmica. Este modo de corrente surgiu recentemente na década de 90, sendo ainda um método não muito conhecido nas aplicações industriais.

O objetivo principal deste trabalho é ampliar o campo de conhecimento sobre ambos os processos, utilizando o modo pulsado térmico de corrente, através da caracterização do processo, das microestruturas e das propriedades mecânicas das juntas soldadas.

1.1 Modo Pulsado Térmico

No Brasil o início das pesquisas sobre o MIG/MAG pulsado com pulsação térmica ocorreu na década de 90. O pulsado térmico une as características do MIG/MAG pulsado com as vantagens do TIG pulsado.⁽¹⁾

A pulsação térmica é uma técnica dinâmica de refinamento de grãos, através de nucleação heterogênea devido à agitação da poça de fusão.⁽²⁾

O pulsado térmico é a combinação de duas fases, base térmica e pulso térmico, as quais permanecem em um determinado tempo, tempo de base térmica (T_{bt}) e tempo de pulso térmico (T_{pt}). A base térmica e o pulso térmico são combinações dos parâmetros de tempo, corrente e velocidade de arame do modo pulsado que irá gerar uma corrente média de base térmica ($I_{m_{bt}}$) e uma corrente média de pulso térmico ($I_{m_{pt}}$), respectivamente. Esta variação da corrente média no decorrer do tempo provoca uma variação do aporte térmico e conseqüentemente submete o material a um ciclo térmico durante a soldagem.

Além da variação do aporte térmico, a pulsação da velocidade do arame provoca uma mudança cíclica na geometria do cordão, tanto na superfície quanto na forma da penetração do cordão, formando o efeito serrilhado observado quando é feito um corte longitudinal ao cordão de solda.⁽¹⁾ A Figura 1 ilustra o comportamento da corrente de soldagem em função do tempo para o modo pulsado térmico.

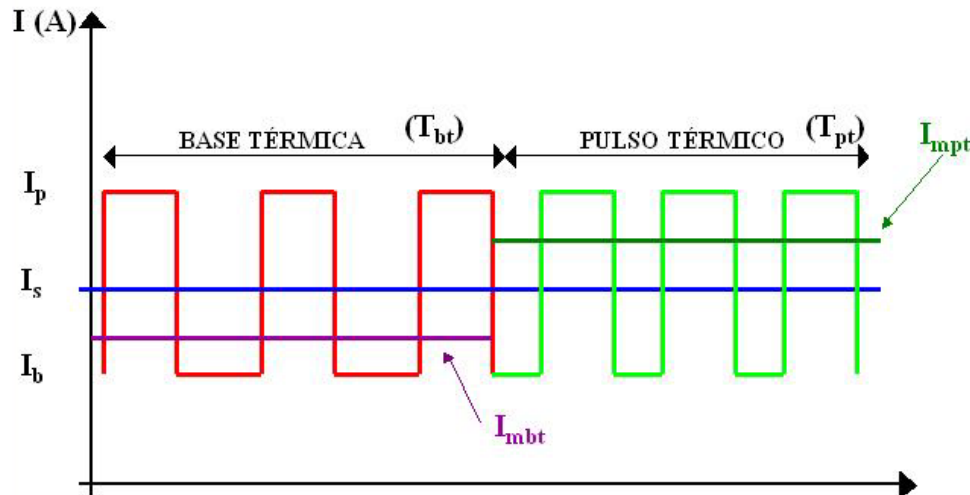


Figura 1. Ilustração da forma de onda da corrente x tempo para o modo pulsado com pulsação térmica. A linha rosa corresponde à corrente média durante o período de base térmica (I_{mbt}). A linha verde-escuro corresponde à corrente média durante o período de pulso térmico (I_{mpt}). E a linha azul indica a corrente média de soldagem resultante (I_s).

Segundo Barra,⁽¹⁾ as principais vantagens e desvantagens do modo pulsado térmico são:

- Vantagens
 - Controle sobre o tamanho da poça de fusão;
 - Boa penetração e redução da espessura mínima a ser soldada;
 - Nível de frequência adequado para ter efeito na poça de fusão (frequência térmica na faixa de 0,5 a 10Hz);
 - Curto espaço de tempo em temperaturas elevadas;
 - Redução de porosidades e mordeduras
- Desvantagens
 - Formação de pontos de concentração de tensão para valores baixos de frequência térmica, devido à formação de escamas na superfície do cordão;
 - Diferentes níveis de diluição entre as fases de pulso e base térmica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram feitos em três situações distintas.

A primeira é a aplicação do processo MIG/MAG no modo pulsado térmico, utilizando uma mistura tripla de Ar + CO₂ + O₂, (composição aproximada: Ar – 90%, CO₂ – 8% e O₂ - 2%) como gás de proteção. Para facilitar a identificação nos resultados esta situação foi codificada como 3-GMAW.

A segunda, codificada como 3-FCAW, é a aplicação do processo Arame Tubular no modo pulsado térmico e como gás de proteção, a mesma mistura tripla da situação 3-GMAW.

A terceira situação, codificada como 2-FCAW, é a aplicação do processo Arame Tubular no modo pulsado térmico, utilizando uma mistura de Ar + CO₂ (composição aproximada: Ar – 75% e CO₂ – 25%), como gás de proteção.

Para cada situação foram soldadas cinco chapas de teste de dimensões 150x330mm, resultando em um cordão de solda. A solda foi executada em um único passe, com 300mm de comprimento. Na retirada dos corpos de prova para os ensaios de tração, dureza, impacto e micrografias foram descartadas 50mm da extremidade do cordão soldado.

A soldagem foi executada em juntas de topo com chanfro reto na posição plana “1G”⁽³⁾ e com cobre-junta. Tanto o metal de base quanto o cobre-junta são de aço carbono conforme especificação ASTM A283 grau C, com espessura de 4,75mm.

Como metal de adição, para o processo MIG/MAG, foi utilizado o arame de classificação ER70-S6, conforme especificação AWS A5.18;⁽⁴⁾ e para o processo Arame Tubular, foi utilizado o arame de classificação E71T-1, conforme especificação AWS A5.20.⁽⁵⁾

Foi utilizada uma fonte de soldagem eletrônica multi-processo modelo DIGITEC 300, desenvolvida pela Universidade Federal de Santa Catarina. Esta fonte permite a seleção dos parâmetros de pulsação térmica como tempos de base e pulso, correntes de base e de pulso, períodos de pulsação velocidades de arame no pulso térmico e na base térmica.

Os parâmetros adotados para a soldagem das chapas de teste estão representados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de soldagem.

ENSAIO	METAL DE ADIÇÃO	CORRENTE		TEMPO		VEL. ARAME (m/min)	PERÍODO (s)	ENERGIA DE SOLDAGEM (kJ/cm)	GÁS DE PROTEÇÃO	PULSADO TÉRMICO
		PULSO (A)	BASE (A)	PULSO (ms)	BASE (ms)					
3-GMAW	ER70S-6	320	100	4,5	12	4,3	0,5	14,51	(Ar + CO ₂ + O ₂)	
		320	100	4,5	2,6	7,1	0,5			
3-FCAW	E71T-1	320	100	4,5	12	6,4	0,5	14,88	(Ar + CO ₂ + O ₂)	
		320	100	4,5	2,6	10,6	0,5			
2-FCAW	E71T-1	320	100	4,5	12	6,4	0,5	14,88	(Ar + CO ₂)	
		320	100	4,5	2,6	10,6	0,5			

Após a soldagem, foram retirados corpos de provas para análise metalográfica e ensaios mecânicos. Para avaliação das propriedades mecânicas das juntas foram adotados os ensaios de tração, de impacto (Charpy) e de dureza. As dimensões dos corpos de prova obedeceram à norma ASTM A370,⁽⁶⁾ considerando os tamanhos reduzidos (*sub size*) devido à espessura da chapa soldada ser de 4,75mm.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Soldagem das Chapas de Teste

Durante a soldagem das chapas de teste, foi observada a evolução da execução do procedimento desde soldas com falta de penetração, falta de fusão e perfuração; até a obtenção de soldas livres de descontinuidades (Ensaio Visual), conforme mostrado nas Figuras 2 e 3.

O processo MIG/MAG apresentou um melhor controle do pulsado térmico, e uma maior facilidade em se obter soldas livres de descontinuidades (Ensaio Visual).

Na Figura 2, no processo MIG/MAG, foi observado a formação de escamas no acabamento do cordão, provocada pela pulsação térmica, identificada como uma desvantagem deste modo por Barra⁽¹⁾ devido ao fato das escamas gerarem um fator de concentração de tensões. Entretanto, no processo arame tubular, observa-se que a formação de escamas é menos pronunciada, reduzindo os pontos de concentração de tensão.

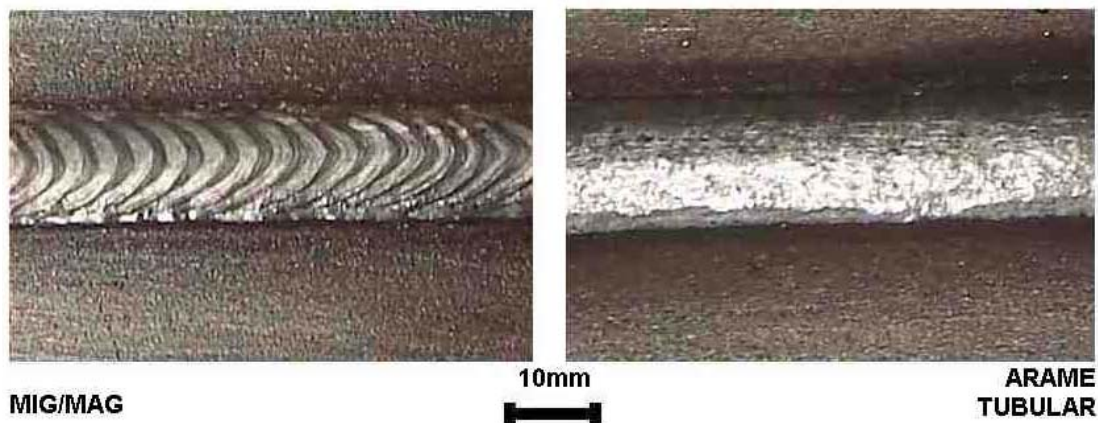


Figura 2. Chapas de teste pulsado térmico (MIG/MAG e ARAME TUBULAR).

3.2 Caracterização Microestrutural

A Figura 4 mostra o aspecto microestrutural das três condições estudadas neste projeto: MIG/MAG com mistura tripla de gases (3- GMAW), Arame Tubular com mistura tripla de gases (2- FCAW) e Arame Tubular com mistura dupla de gases (2- FCAW). Em todos os processos foi utilizado o modo de transferência pulsado térmico. O processo MIG/MAG com mistura tripla resulta em uma microestrutura mais refinada tanto na ZTA como na região do metal de solda. O processo que resultou em uma microestrutura mais grosseira foi o Arame Tubular com a mistura dupla de gases.

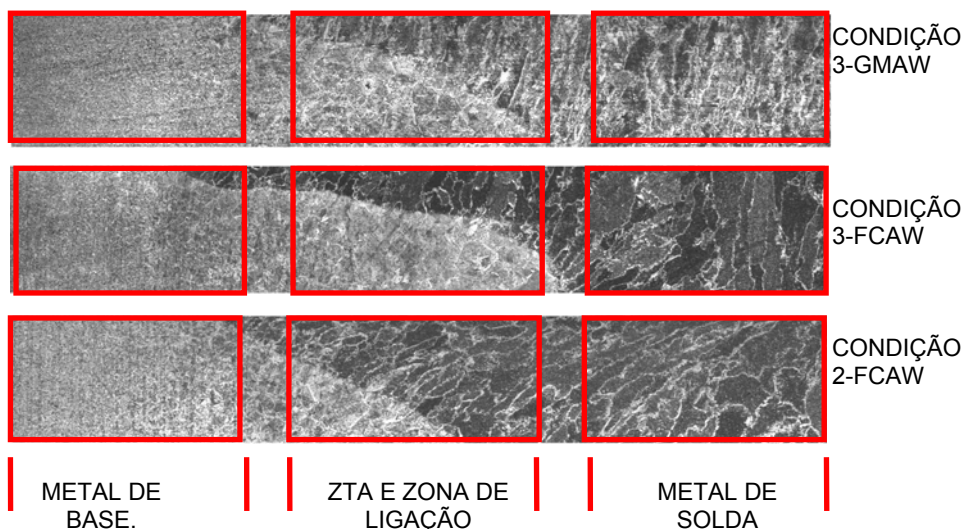


Figura 3. Visão geral da microestrutura das regiões da junta soldada.

3.2.1 Zona fundida

A região do metal de solda (zona fundida), para os três casos estudados, é formada pelos seguintes constituintes microestruturais, conforme mostra a Figura 5.

- 3-GMAW : Grãos colunares de ferrita acicular – AF, com ferrita de contorno de grão – PF(G), regiões com ferrita com segunda fase alinhada – FS(A) e ferrita intragranular poligonal.
- 3-FCAW : Grãos colunares de ferrita acicular – AF, com ferrita de contorno de grão.
- 2-FCAW: Grãos colunares de ferrita acicular – AF, com ferrita de contorno de grão – PF(G), regiões com ferrita com segunda fase alinhada – FS(A) e ferrita intragranular poligonal.

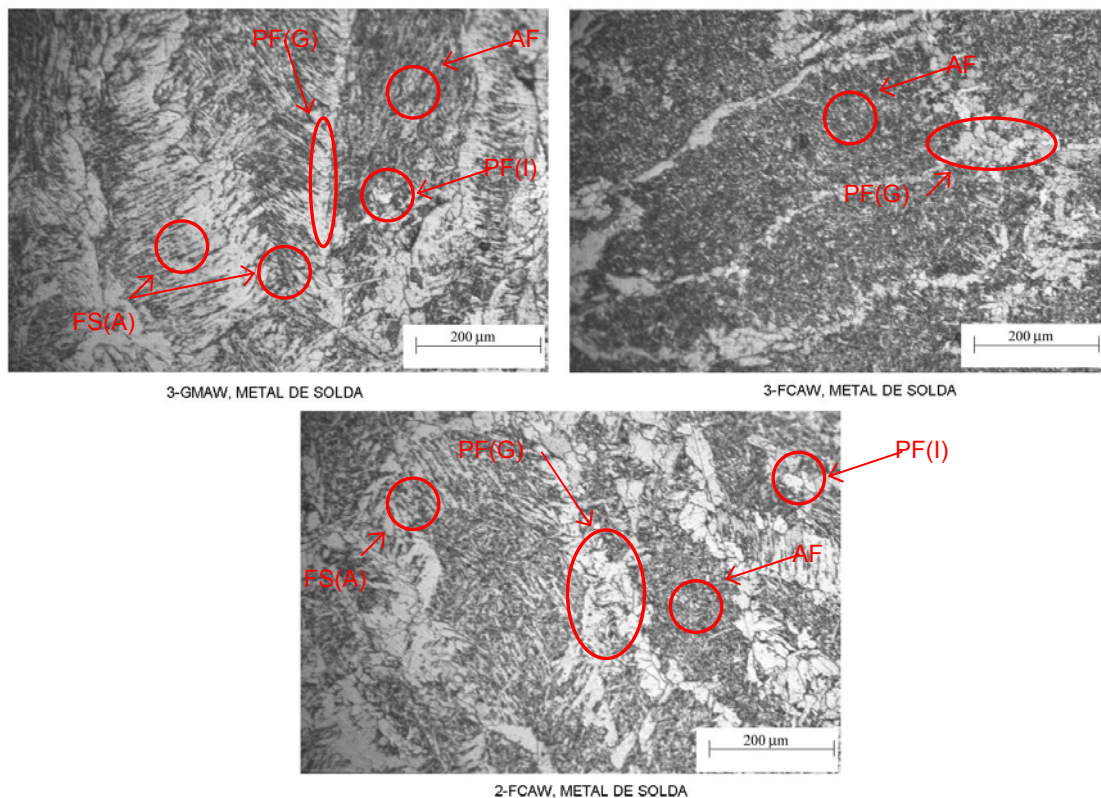


Figura 4. Micrografias mostrando as microestruturas do metal de solda para os casos 3-GMAW, 3-FCAW e 2-FCAW.

3.2.2 Zona termicamente afetada

A região da zona termicamente afetada (ZTA), para os três casos estudados, é formada pelos seguintes constituintes microestruturais, conforme mostra a Figura 6:

- 3-GMAW : Grãos de ferrita quando se aproxima do metal de base e na região próxima ao metal de solda apresenta ferrita com segunda fase alinhada – FS(A).
- 3-FCAW : Grãos de ferrita quando se aproxima do metal de base e na região próxima ao metal de solda apresenta ferrita com segunda fase não alinhada – FS(NA) e ferrita de contorno de grão – PF(G).
- 2-FCAW: Grãos de ferrita quando se aproxima do metal de base e na região próxima ao metal de solda apresenta ferrita com segunda fase alinhada – FS(A).

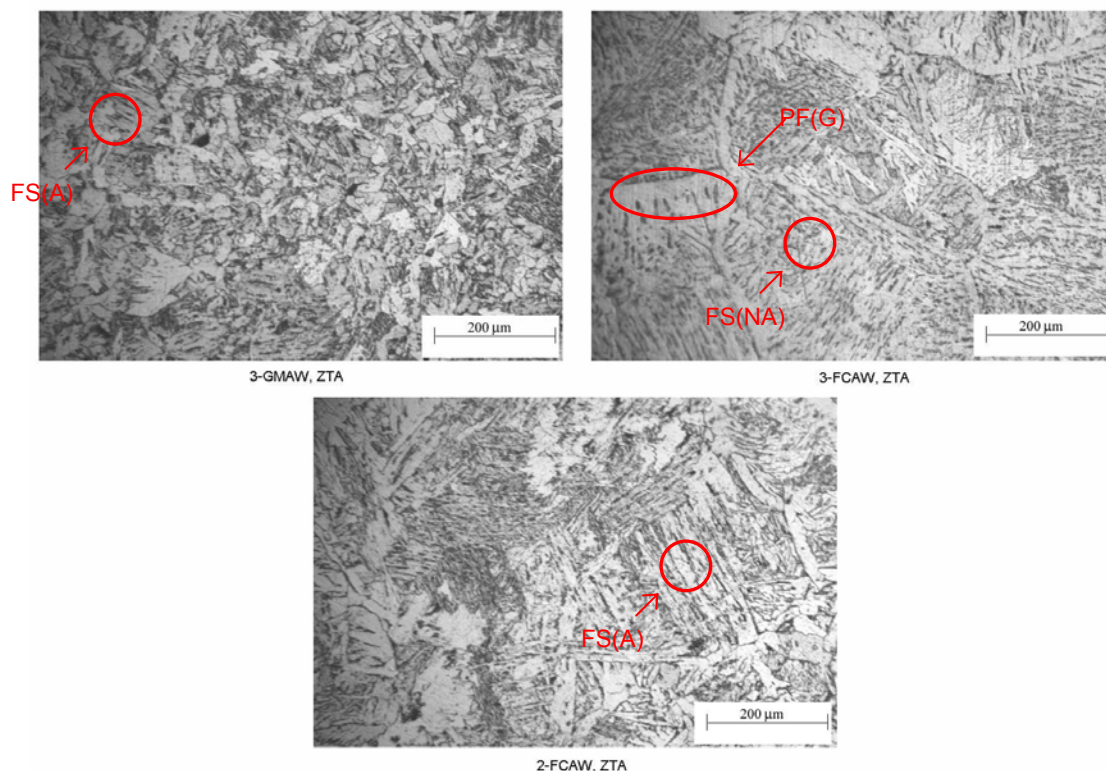


Figura 5. Micrografias mostrando as microestruturas da Zona Termicamente Afetada (ZTA) para os casos 3-GMAW, 3-FCAW e 2-FCAW.

3.3 Propriedades Mecânicas

3.3.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração comprovou a integridade das juntas soldadas, pois todos os corpos de prova romperam no metal de base com tensão máxima de tração acima do valor mínimo de 380MPa conforme requerido na especificação ASTM A283 grau C, para o metal de base.⁽⁷⁾ A Figura 7 mostra os resultados dos ensaios de tração para as três situações estudadas neste projeto.

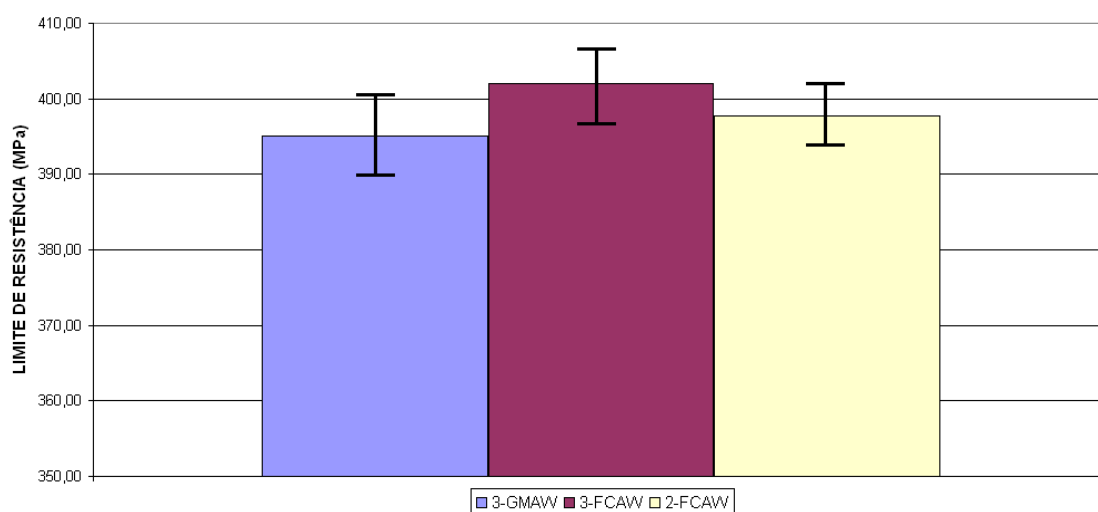


Figura 6. Limite de resistência médio para os casos 3-GMAW, 3-FCAW e 2-FCAW. Todos os corpos de prova romperam no metal de base (corpo de prova transversal).

3.3.2 Ensaio de impacto

As soldas com Arame Tubular, 3-FCAW e 2-FCAW, apresentaram uma maior tenacidade, com absorção de mais de 25 Joules na fratura a -20°C no ensaio de Charpy, quando comparado com o processo MIG/MAG. Esta tenacidade superior ao processo MIG/MAG deve-se à menor quantidade de ferrita de contorno de grão – PF(G) e ferrita com segunda fase alinhada – FS(A), quando comparada com a microestrutura do metal de solda resultante do processo MIG/MAG, situação 3-GMAW. Entre as duas situações soldadas com o processo Arame Tubular, a 2-FCAW apresentou microestrutura do metal de solda com menor quantidade de ferrita de contorno de grão – PF(G) e nenhuma ferrita com segunda fase alinhada – FS(A), resultando na absorção de 29,8 Joules para o entalhe no metal de solda.

A solda resultante do processo MIG/MAG, ensaio 3-GMAW, apresentou uma baixa tenacidade absorção de 17 Joules, relacionada com a grande quantidade de ferrita de contorno de grão – PF(G) e ferrita com segunda fase alinhada – FS(A).

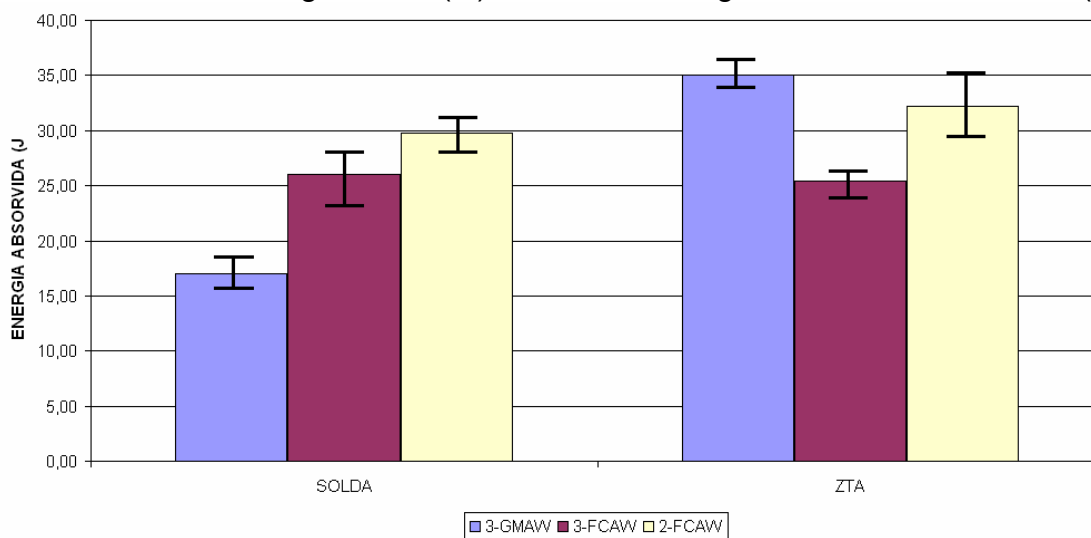


Figura 7. Energia média absorvida (J) no ensaio de Charpy a -20°C , para entalhe no metal de solda e na ZTA.

3.3.3 Ensaio de dureza

Os perfis de dureza mostraram que a soldagem com o processo MIG/MAG, 3-GMAW, produz uma solda com menores níveis de dureza ao longo da seção transversal em relação às situações do Arame Tubular, 2-FCAW e 3-FCAW. O processo MIG/MAG apresentou também uma menor variação de dureza entre o metal de solda e a ZTA. Por estes motivos o processo MIG/MAG mostrou uma melhor condição de ser aplicado em situações onde é determinada uma dureza máxima, por exemplo, 248HV em soldas de tubulação (material A106 ou API 5L) que trabalham com H_2S , conforme norma Petrobras N-76.⁽⁸⁾

A utilização da mistura $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$ para o processo Arame Tubular, situação 3-FCAW, resultou em uma solda com um maior gradiente de dureza entre o metal de solda e a ZTA, quando comparado com a situação 2-FCAW. A mistura tripla como gás de proteção, para este processo, não é indicada na soldagem de juntas que serão submetidas às condições exemplificadas no parágrafo anterior.

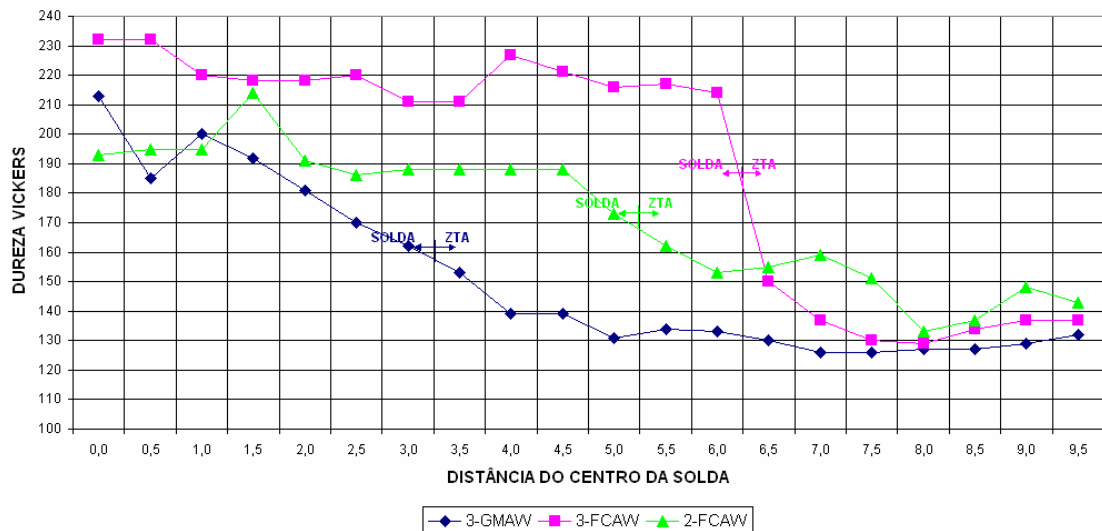


Figura 8. Perfil de dureza (HV5), distância de 1mm entre as impressões e a superfície da solda, medidas em milímetros.

4 CONCLUSÃO

O modo pulsado térmico apresentou um comportamento mais estável durante a soldagem com o processo MIG/MAG tendo maior facilidade de se obter soldas com ótimo acabamento superficial.

O uso do cobre-junta para o processo Arame Tubular causou a retenção de escória na raiz da solda ocasionando falta de penetração.

Conforme mostrado nos ensaios executados neste trabalho, é evidente a influência do gás de proteção na microestrutura e conseqüentemente nas propriedades mecânicas do metal de solda no processo arame Tubular, situações 2-FCAW e 3-FCAW.

O processo Arame Tubular produz soldas com maior tenacidade, sendo mais indicado nas situações onde requer uma boa resistência ao impacto.

O processo MIG/MAG produz soldas com menor dureza em sua seção transversal, sendo indicada nas situações onde são fixados limites máximos de dureza.

REFERÊNCIAS

- 1 Barra, R. Sérgio; **Influência do processo MIG/MAG Térmico sobre a microestrutura e a geometria da zona fundida**, Tese de Doutorado, UFSC, 2003.
- 2 Kou, Sindo; **Welding Metallurgy**, New York: John Wiley & Sons, 1987.
- 3 AWS, **Structural Welding Code - Steel**, AWS D1.1 (2002).
- 4 AWS, **Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding**, AWS A5.18 (2001).
- 5 AWS, **Specification for Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding**, AWS A5.20 (1995).
- 6 ASTM, **Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products**, ASTM A370, 2003.
- 7 ASTM, **Standard Specification for Low and Intermediate Tensile Strength Carbon Steel Plates**, ASTM A283, 2000.
- 8 N-76; **Materiais de Tubulação**, Norma Petrobras, 2001 rev. E.

BIBLIOGRAFIA

- 1 Quites, A M.; **Introdução à soldagem a Arco Voltaico**, Soldasoft, Florianópolis, 2002.
- 2 Irvin, B.; **Shielding Gases are the Key to Innovations in Welding**, *Welding Journal*: pag. 37 – 41, Jan. 1999.
- 3 Jönsson, P. G.; Murphy, A. B. and Szekely, J., **The Influence of Oxygen Additions on Argon-Shielded Gas Metal Arc Welding Processes**, *Welding Journal*: pag. 48-s – 58-s, Feb. 1995.
- 4 Araújo, W. R.; **Comparação entre soldagem Robotizada com Arame Sólido e “Metal Cored” - A ocorrência do “Finger”**, Belo Horizonte, UFMG, 2004. Dissertação (Mestrado).