

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE PRÉ-AQUECIMENTO NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE JUNTAS SOLDADAS DE UM AÇO DE ULTRA-ALTA RESISTÊNCIA¹

José Roque Filho²
Carlos de Moura Neto³
José Augusto Orłowski de Garcia⁴
Valdir Alves Guimarães⁵

Resumo

Neste trabalho é verificada a influência da temperatura de pré-aquecimento na resistência mecânica de juntas soldadas em chapa de pequena espessura de um aço de ultra-alta resistência de médio-carbono e baixa liga. A soldagem foi realizada em passe único pelo processo *Plasma Arc Welding (PAW)*, com a técnica *keyhole*, nas condições sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento de 100°C. A caracterização do material foi feita em duas condições: “como soldado” e “tratado termicamente”. Os corpos-de-prova (cdps) de tração foram submetidos a ciclos térmicos de normalização, têmpera e duplo revenimento e suas fraturas foram caracterizadas por MEV. Observa-se que as juntas soldadas com pré-aquecimento apresentam resistência máxima à tração 1,8% menor que as juntas soldadas à temperatura ambiente, apesar de não ter sido constatada diferença de tamanho de grão entre as amostras representativas das duas condições de soldagem.

Palavras-chave: Aços de ultra-alta resistência; Soldagem; Tratamentos térmicos.

INFLUENCE OF THE PREHEATING TEMPERATURE ON THE MECHANICAL STRENGTH OF WELDED JOINTS MADE OF AN ULTRAHIGH-STRENGTH STEEL

Abstract

The objective of this study is to verify the influence of the preheating temperature on the mechanical strength of welded joints on a thin sheet made of a medium-carbon low-alloy ultrahigh-strength steel. The welding was done by Plasma Arc Welding Process (PAW) using the keyhole technique, single pass. The weldings were performed at room temperature and at a preheating temperature of 100°C. The material characterization was obtained from the welded sheets in two conditions: as welded and in the heat-treated condition. The specimens for tension tests were heat-treated by normalizing, quenching and double tempering cycles and, after the tests, their fractures were inspected by SEM. It is observed that the preheating welded joints present maximum strength at a tension 1.8% lower than the strength presented by the joints welded at room temperature. However, no difference in grain size between the representative samples of the two welding conditions is observed.

Key-words: Ultrahigh strength steels; Welding; Heat treatment.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² Eng. Mecânico, Mestre em Engenharia, Tecnologista do CTA-IAE - São José dos Campos - SP.

³ Eng. Metalurgista, Prof. Associado da Divisão de Eng. Mec-Aer do ITA (Sócio da ABM).

⁴ Eng. Metalúrgico, Doutor, Tecnologista do CTA-IAE - São José dos Campos - SP.

⁵ Eng. Mecânico, Prof. Dr. do Depto de Materiais e Tecnologia da FEG/UNESP - Guaratinguetá - SP.

1 INTRODUÇÃO

Componentes estruturais para aplicações espaciais exigem otimização da relação resistência / peso. Isto requer um refinado projeto estrutural, com adoção de baixos coeficientes de segurança, utilização de materiais de alta resistência específica, rigoroso controle dos processos de fabricação e um programa de ensaios bem elaborado para que se possa ter um bom conhecimento da estrutura e atuar no projeto para fazer as correções e refinamentos necessários.

1.1 A Estrutura Envelope-motor

Uma das principais estruturas que compõe os veículos espaciais por propulsão sólida é denominada de envelope-motor (*rocket motor case*). Este componente funciona como vaso de pressão e como elemento de viga da estrutura principal do veículo. É constituído da membrana cilíndrica e dos domos dianteiro e traseiro, e pode ser fabricado em material metálico ou compósito. Quando metálico, é fabricado em aço de ultra-alta resistência, e a membrana cilíndrica é obtida a partir de chapas finas, calandradas e soldadas.

1.2 Histórico, Generalidades, Motivação e Objetivos

O Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) tem como missão atividades de pesquisa e desenvolvimento aeroespacial e possui uma larga competência, adquirida ao longo de décadas, no desenvolvimento de foguetes de sondagem. O projeto do Veículo Lançador de Satélites (VLS-1), cuja complexidade e desempenho exigidos são muito superiores àqueles próprios dos foguetes de sondagem, exigiu o desenvolvimento de propulsores metálicos de maior desempenho que os anteriormente desenvolvidos.

Os aços da classe de ultra-alta resistência foram desenvolvidos por exigência dos setores aeroespacial e de defesa, objetivando otimizar a relação resistência / peso. Neste trabalho, consideram-se como aços de ultra-alta resistência os aços estruturais comerciais que, submetidos a tratamentos térmicos e/ou mecânicos, apresentam resistência mínima ao escoamento de 1380 MPa (140,7 kgf/mm²).^[1]

No processo de soldagem a arco plasma (*PAW*), se a intensidade de calor do plasma é suficientemente alta, pode-se operar em uma técnica não-convencional em que o arco plasma atravessa toda a espessura do material, formando uma pequena poça de fusão com um furo passante, e que é conhecida por *keyhole* ou “buraco de fechadura”, referência ao pequeno orifício que se forma no ponto de incidência do arco. Dentre outras aplicações, esta técnica é utilizada na fabricação de componentes nucleares e aeroespaciais como, por exemplo, os envelopes-motores sólidos do *Space Shuttle*, fabricados com o aço HP 9-4-30, e do VLS.^[2-4]

Os envelopes-motores metálicos desenvolvidos no IAE são fabricados em aços de médio-carbono e baixa liga, que são uma família de aços da classe de ultra-alta resistência, tidos como difíceis de serem soldados, devido sua alta capacidade de desenvolver estrutura martensítica na região da solda, além de serem susceptíveis à fissuração pelo hidrogênio, deficiências que podem ser minimizadas pela adoção de pré-aquecimento. No entanto, o pré-aquecimento tende a promover o crescimento do tamanho de grão da zona termicamente afetada (ZTA) que, por sua vez, tende a reduzir a resistência mecânica e a tenacidade da junta soldada.

Assim, a adoção de pré-aquecimento requer um estudo preliminar para a verificação da influência da respectiva temperatura na resistência mecânica da junta soldada.

A finalidade deste trabalho é verificar a influência do fator temperatura de pré-aquecimento, nível de 100°C, na resistência mecânica de juntas soldadas de chapas finas de um aço de ultra-alta resistência de médio-carbono e baixa liga, e compará-la com o desempenho das juntas soldadas na condição de temperatura ambiente.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado foi um aço de ultra-alta resistência, na forma de chapa, medindo 3,250 m x 1,350 m x 0,003 m. O lingote e a placa para fabricação da chapa foram produzidos pela Villares, sendo o lingote obtido através do processo de refusão sob escória eletrocondutora (*Electroslag Remelting - ESR*).

2.1 Caracterização do Material Recebido

A caracterização do material consistiu de análise química, exames metalográficos e ensaios de dureza e de tração. Previamente aos ensaios de dureza e de tração, os corpos-de-prova foram submetidos a ciclos de tratamentos térmicos de normalização, têmpera e duplo revenimento, que são discutidos no item 2.3.

A Tabela 1 apresenta a composição química do aço utilizado.

Tabela 1 - Composição química do aço utilizado (% em peso).

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu
Composição	0,33	0,80	1,76	0,009	<0,001	0,77	1,73	0,37	0,07	0,05

Foram preparadas duas amostras metalográficas, conforme previsto pela norma ASTM E3-01:^[5] amostra longitudinal (direção de laminação da chapa) e amostra transversal (direção transversal à de laminação da chapa). O ataque químico foi realizado por imersão em solução de Nital 3%, durante 25 segundos. Em seguida, foram verificadas e registradas as suas microestruturas em um microscópio óptico, equipado com câmera digital para captura de imagens. Os resultados obtidos revelaram uma microestrutura formada predominantemente por ferrita (áreas claras) e perlita globular e lamelar (áreas escuras), conforme mostram as Figuras 1 e 2.



Figura 1 - Fotomicrografia da seção longitudinal do material “como recebido”. Ataque: Nital 3%. Aumento: 1000x.

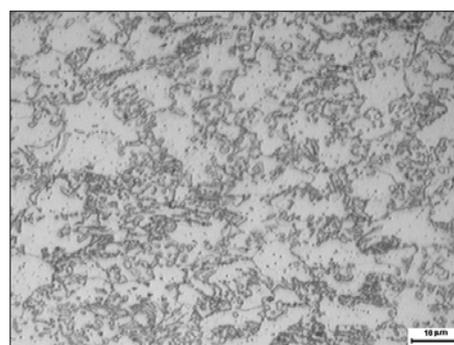


Figura 2 - Fotomicrografia da seção transversal do material “como recebido”. Ataque: Nital 3%. Aumento: 1000x.

O

Os ensaios de dureza foram realizados através de cinco impressões na seção transversal à direção de laminação da chapa, na região média em relação à

espessura da citada seção. A dureza média obtida foi de 49,7 HRC com desvio-padrão de 0,6%.

Os cdps para ensaio de tração, destinados à caracterização do material recebido, estavam configurados como consta na seção 6.3 da norma ASTM E 8M-04.^[6] A velocidade de aplicação da carga foi de 1,0 mm/min. Foram ensaiados quatro cdps sendo obtidos os seguintes resultados (valores médios):

- Tensão de escoamento (*offset* 0,2%): média 1334 MPa, com desvio-padrão 2,5%;
- Tensão máxima: média 1697 MPa, com desvio-padrão 1,9%; e
- Alongamento (seção útil = 50 mm): 6,3%, com desvio-padrão 5,0%.

2.2 Soldagem

O processo utilizado foi o *PAW* - Técnica *keyhole*. Foram realizadas duas operações de soldagem em pares de chapa, variando-se, de uma operação para outra, o fator “temperatura inicial do par de chapas a ser soldado”. A este fator foram atribuídos dois níveis: temperatura ambiente e 100°C (pré-aquecimento). Previamente, cada um dos pares de chapa teve uma de suas bordas faceadas em fresadora para possibilitar o adequado alinhamento e junção de topo com a borda correspondente, também faceada, de outra chapa. Para todas as bordas faceadas foram confeccionados chanfros retos.

As operações de soldagem foram automáticas, na posição plana, em passe único e com os respectivos pares de chapa fixados ao dispositivo de soldagem longitudinal. O metal de adição (arame) utilizado foi a liga Turbaloy[®] 17-22, especificação AMS 6458H,^[7] de diâmetro 0,9 mm (0,035”), cuja composição química encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química do metal de adição (% em peso) [7].

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo
Composição	0,32	0,50	0,66	0,004	0,001	1,25	0,50
Elemento	V	Ni	Cu	O	N	H	---
Composição	0,26	0,07	0,03	0,0020	0,004	0,0001	---

Os parâmetros de soldagem utilizados constam da Tabela 3 e foram os mesmos para as operações nos dois níveis de temperatura.

A primeira operação de soldagem foi realizada com as chapas identificadas como AC e AD, mantidas na condição inicial “temperatura ambiente”.

Em seguida, com as chapas identificadas como AA e AB, foi realizada a operação de soldagem na condição inicial “com pré-aquecimento”. Inicialmente, as chapas foram fixadas ao dispositivo de soldagem. Em seguida, foi ligado o sistema de aquecimento do citado dispositivo e ajustada a temperatura para o aquecimento das chapas a 100°C. Após estabilizada a temperatura, foi feita a soldagem da junta.

Tabela 3 - Parâmetros de soldagem.

Corrente [A]	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tempo de pulso [s]: 0,17 ▪ Corrente de pulso [A]: -165,0 ▪ Tempo de subida [s]: 3,0 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tempo base [s]: 0,17 ▪ Corrente de base [A]: -165,0 ▪ Tempo de descida [s]: 7,0
Arame	Gás
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Velocidade [m/min]: 0,8 ▪ Tempo de subida [s]: 2,0 ▪ Tempo de descida [s]: 1,0 ▪ Avanço: contínuo 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vazão [L/min]: 2,8 ▪ Tempo de subida [s]: 2,0 ▪ Tempo de descida [s]: 5,0
Velocidade de soldagem	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Velocidade [cm/min]: 32,0 ▪ Tempo de subida [s]: 0,0 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sentido do deslocamento: à direita ▪ Tempo de descida [s]: 20,0
Configuração	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tempo de soldagem [s]: 900,0 ▪ Corrente inicial [A]: -100,0 ▪ Corrente final [A]: -50,0 ▪ Vel. inicial do arame [m/min]: 0,5 ▪ Vel. final do arame [m/min]: 0,0 ▪ Vazão inicial gás [L/min]: 0,6 ▪ Vazão final gás [L/min]: 0,5 ▪ Tempo liberação gás [s]: 1,0 ▪ Tempo fechamento gás [s]: 2,0 ▪ Tempo de finalização [s]: 6,0 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tempo de pré-gás [s]: 2,0 ▪ Tempo de pós-gás [s]: 5,0 ▪ Tempo de início da corrente [s]: 2,0 ▪ Tempo finalização da corrente [s]: 3,0 ▪ Tempo de início do arame [s]: 1,0 ▪ Tempo finalização do arame [s]: 0,0 ▪ Tempo início vel. soldagem [s]: 0,0 ▪ Tempo final vel. soldagem [s]: 0,0 ▪ Gás de manutenção [L/min]: 0,5

Dentre os materiais e equipamentos utilizados estão o Dispositivo de Soldagem Longitudinal, com sistema de aquecimento por resistência elétrica; a tocha de soldagem, marca Thermal Arc, modelo PWM-300, capacidade 300 A, equipada com bocal-orifício de 3,2 mm de diâmetro; e três cilindros de gás argônio da White Martins, sendo do tipo ultra-puro (99,999 %) os utilizados para plasma e para proteção e de pureza comercial o utilizado para purga.

Após as operações de soldagem foi realizada a inspeção das juntas através de ensaios não-destrutivos, conforme estabelecido pela norma AWS D13.1-61,^[8] através de exame visual, líquidos penetrantes e raios X. Os critérios de aceitação das soldas, no âmbito da citada norma, foram os aplicados para componentes soldados da Classe I. Não foram constatados defeitos superficiais e internos nas soldas realizadas em ambas as condições de temperatura.

Na seqüência foi realizado o tratamento térmico para alívio de tensões em ambos os pares de chapas soldadas. O ciclo térmico consistiu na introdução das chapas no forno previamente aquecido à temperatura de 620°C, na manutenção a esta temperatura por três horas e, ao final, no resfriamento ao ar calmo. No patamar de temperatura houve uma variação $\pm 5^\circ\text{C}$.

2.3 Tratamentos Térmicos

Após usinagem dos cdps das juntas soldadas, eles foram submetidos a um ciclo de tratamento térmico que constou de três fases: normalização, têmpera e duplo revenimento. Para evitar a decarbonetação superficial durante os tratamentos de normalização e têmpera, os cdps receberam jateamento superficial por micro-esferas de vidro e, em seguida, três demãos de tinta protetiva anti-cementante No-Carb, aplicadas com pistola. Após cada demão foi feita a secagem da tinta em

estufa à temperatura de 80°C por, aproximadamente, 30 minutos. Após a secagem da última demão, os cdps foram retirados da estufa e, ainda aquecidos, introduzidos no forno, onde permaneceram, na posição vertical, pendurados em dispositivo apropriado. O forno encontrava-se pré-aquecido à temperatura correspondente a cada um dos citados tratamentos.

Os ciclos térmicos adotados para cada uma das fases foram:

- Normalização: aquecimento a 930°C com manutenção desta temperatura por 40 minutos, seguida de resfriamento ao ar calmo;
- Têmpera: aquecimento a 980°C com manutenção desta temperatura por uma hora, seguida de resfriamento em óleo; e
- Revenimento: aquecimento a 280°C com manutenção desta temperatura por duas horas, seguida de resfriamento ao ar calmo. Este ciclo foi repetido uma vez, totalizando dois ciclos para este tratamento.

Para cada uma das três fases do tratamento térmico, a variação de temperatura no interior do forno foi de $\pm 10^\circ\text{C}$.

2.4 Caracterização do Material “Como Soldado” e “Tratado Termicamente”

A caracterização “como soldado” foi feita por meio de ensaios metalográficos; ensaios de microdureza Vickers (HV) e da verificação comparativa do tamanho de grão nas ZTAs entre amostras de cada uma das condições de soldagem.

Para a condição “tratado termicamente” após a soldagem, os recursos utilizados foram ensaios metalográficos, ensaios de microdureza Vickers (HV), ensaios de tração e, finalmente, caracterização da fratura por MEV.

2.5 Ensaios Metalográficos

Foram preparadas quatro amostras metalográficas, conforme a norma e os procedimentos citados no item 2, subitem 2.1. O tempo de ataque químico foi de 30 segundos.

A Tabela 4 apresenta a identificação e a configuração de cada uma das amostras.

Tabela 4 - Identificação e configuração das amostras metalográficas.

Condição da amostra	Temperatura de soldagem	
	Ambiente	100°C
“Como soldado”	A6	B6
“Tratado termicamente”	A5	B5

2.6 Ensaios de microdureza Vickers (HV)

Os ensaios de microdureza Vickers (HV) foram realizados segundo a norma ASTM E 92-82,^[9] nas amostras A5, A6, B5 e B6, as quais já haviam sido previamente preparadas para os ensaios metalográficos (item 2.5).

As indentações foram feitas alinhadamente entre si a partir do centro da zona fundida (ZF) em direção ao metal base (MB), passando pela ZTA, na região média da amostra em relação à espessura. O espaçamento entre indentações foi de 0,2 mm, a carga de prova foi de 1000 gf durante 8 segundos com ampliação de 400x.

2.7 Verificação Comparativa do Tamanho de Grão das ZTAs

Teve por objetivo verificar se houve variação do tamanho de grão das ZTAs entre ambas as condições de soldagem. Foram analisadas duas amostras:

- amostra A7: material soldado à temperatura ambiente; e
- amostra B7: material soldado com pré-aquecimento.

Para facilitar a visualização dos contornos de grão, fez-se um tratamento térmico para promover a precipitação de carboneto de ferro nos contornos de grão das amostras. Estas foram introduzidas em um forno pré-aquecido a 450°C, permaneceram a esta temperatura por quatro horas e, em seguida, foram resfriadas ao ar. Na seqüência, foi realizada a preparação metalográfica, conforme prevê a norma ASTM E3-01,^[5] e ataque por imersão com Nital 3%, por aproximadamente 15 segundos. Em seguida, as amostras foram examinadas, segundo a norma ASTM E 112-96,^[10] para verificação comparativa do tamanho de grão entre as suas ZTAs.

2.8 Ensaio de Tração

Foram realizados de acordo com a norma ASTM E 8M-04 [6], em oito cdps soldados, previamente submetidos aos ciclos térmicos de normalização, têmpera e duplo revenimento. O contorno externo dos corpos-de-prova foi executado em fresadora convencional e a região de seção reduzida em um centro de usinagem por controle numérico (CNC). Os cdps soldados à temperatura ambiente foram identificados como A1, A2, A3 e A4; os soldados com pré-aquecimento, como B1, B2, B3 e B4. A velocidade de aplicação da carga foi de 1,0 mm/min.

A Figura 3 apresenta a configuração e as dimensões dos cdps.

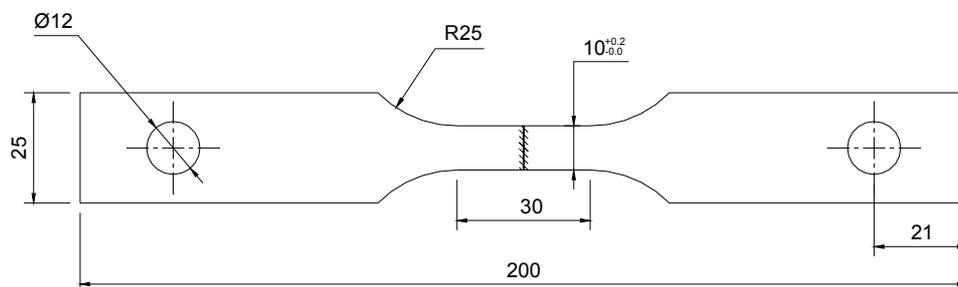


Figura 3 - Corpo-de-prova soldado, segundo a seção A/A2 da norma AWS B4.0M:2000 [11] (dimensões em milímetros).

2.9 Caracterização da Fratura

As fraturas foram analisadas por MEV. Para tal, foi selecionado um cdp representativo de cada uma das condições de soldagem. Utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura, marca Leo, modelo 435VPi.

3 RESULTADOS

As Figuras 4 e 5 apresentam, respectivamente, as macrografias das amostras do material nas condições “como soldado” e “tratado termicamente”.

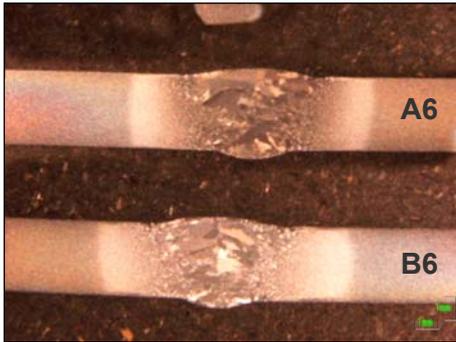


Figura 4 - Material “como soldado” à temperatura ambiente (A6) e com pré-aquecimento (B6). Ataque: Nital 3%. Aumento: 6x.

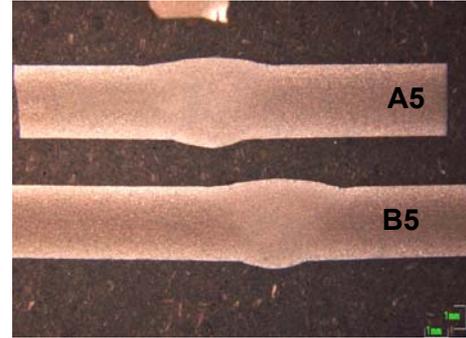


Figura 5 - Material “tratado termicamente”. Amostras soldada à temperatura ambiente (A5) e com pré-aquecimento (B5). Ataque: Nital 3%. Aumento: 6x.

A Figura 6 apresenta os perfis de microdureza Vickers (HV) das amostras na condição “como soldado”.

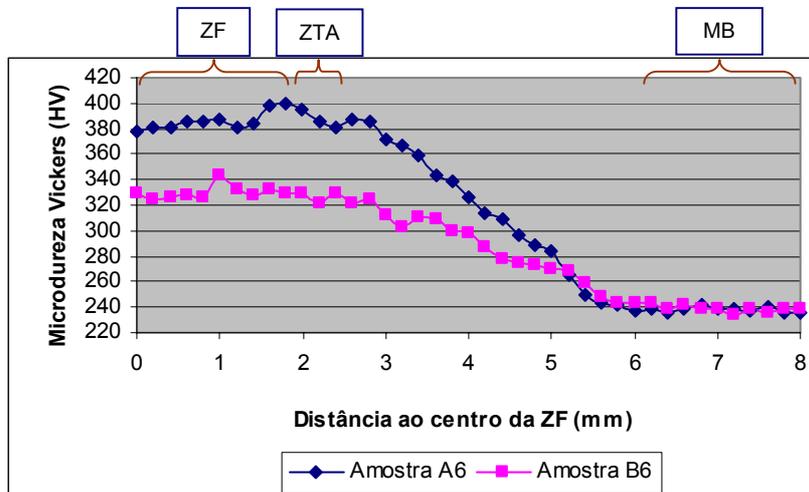


Figura 6 - Perfil comparativo de microdureza Vickers (HV) entre as amostras soldadas à temperatura ambiente (A6) e com pré-aquecimento (B6) do material na condição “como soldado”.

A Figura 7 apresenta os perfis de microdureza Vickers (HV) das amostras na condição “tratado termicamente”.

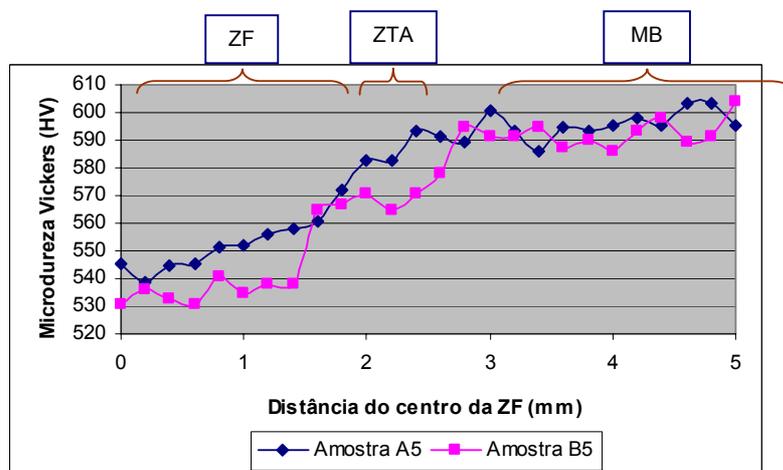


Figura 7 - Perfil comparativo de microdureza Vickers (HV) entre as amostras soldadas à temperatura ambiente (A5) e com pré-aquecimento (B5) do material na condição “tratado termicamente”.

Na verificação comparativa do tamanho de grão das ZTAs (item 2.8), não foi constatado aumento no tamanho de grão da amostra soldada com pré-aquecimento, apesar de esta amostra apresentar maior largura da ZTA, comparativamente à amostra soldada à temperatura ambiente. O grão predominante em ambas as amostras foi o ASTM 3.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados dos ensaios de tração nos cdps soldados.

Tabela 5 - Valores de tensão de escoamento, máxima e de alongamento obtidos no ensaio de tração dos corpos-de-prova soldados.

Amostra	Tensão de escoamento (offset 0,2 %)			Tensão máxima		
	Valor (MPa)	Média (MPa)	Desvio-padrão (%)	Valor (MPa)	Média (MPa)	Desvio-padrão (%)
A1	1368	1350	1,3	1683	1683	0,6
A2	1329			1675		
A3	1346			1677		
A4	1359			1696		
B1	1370	1354	0,9	1659	1652	0,8
B2	1345			1639		
B3	1356			1665		
B4	1345			1643		

As fraturas de todos os corpos-de-prova localizaram-se na região do metal base com ocorrência de estricção do corpo-de-prova e, na seção da fratura, a presença das zonas fibrosa e de cisalhamento (taça-cone).

No aspecto microscópico, as fractografias das amostras representativas de cada uma das condições de soldagem, obtidas por MEV, revelaram a presença de *dimples*.

A Figura 8 mostra o detalhe da localização da fratura, em relação à junta soldada, da amostra A1. Na Figura 9 é apresentada a fractografia da superfície de fratura da mesma amostra.



Figura 8 - Detalhe da localização da fratura no corpo-de-prova A1.

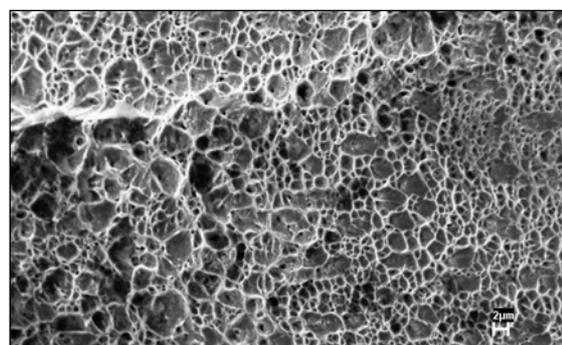


Figura 9 - Fractografia da superfície de fratura do corpo-de-prova A1.

4 DISCUSSÕES

Através da análise metalográfica (Figura 4), constata-se que o material soldado com pré-aquecimento (B6) possui maior extensão da ZTA em comparação

com o material soldado à temperatura ambiente (A6). Isto significa que a menor taxa de resfriamento obtida na região da ZTA, devido ao uso de pré-aquecimento, apesar de inibir a formação da martensita nesta região, pode causar aumento no tamanho de grão devido ao maior tempo de exposição desta região às altas temperaturas.

A análise comparativa de microdureza entre as amostras na condição “como soldado” (Figura 6) evidencia que a amostra soldada à temperatura ambiente apresenta, comparativamente à amostra soldada com pré-aquecimento, maiores valores de dureza nas regiões da ZF e ZTA e, também, na região compreendida entre a ZTA e o MB. A máxima dureza foi encontrada na região da ZTA da amostra soldada à temperatura ambiente. Para esta condição de soldagem, o mesmo resultado foi obtido por Leitão Jr. et al.^[12] para soldagem de chapas finas de um outro aço da mesma família (aço 300M) também realizado pelo processo PAW. Ainda na figura 6, a constatação da queda contínua dos valores de dureza ao longo do metal base. À medida que se afasta da região da ZTA era esperada - e ocorre - devido à alta temperabilidade dos aços da família médio-carbono baixa liga. A fração de martensita formada diminui progressivamente à medida que se afasta da região da ZTA em direção ao metal base, devido às menores temperaturas locais atingidas durante a soldagem.

Para as amostras na condição “tratado termicamente” (Figura 7) constata-se que a amostra soldada à temperatura ambiente apresenta maiores valores médios de dureza nas regiões da ZF, da ZTA, do MB e, também, na região de transição da ZTA para o MB, comparativamente à amostra soldada com pré-aquecimento. Para cada uma das amostras, constata-se que, na região compreendida entre a ZTA e o MB, há um acréscimo gradual nos valores de dureza. A localização do ponto no qual ocorre o início da estabilidade dos valores de dureza em cada uma das amostras indica que, na amostra soldada à temperatura ambiente, a estabilidade inicia-se em uma região mais próxima do centro da ZF. Isto significa que esta amostra apresenta menor largura da ZTA que a amostra soldada com pré-aquecimento.

Dos dados obtidos nos ensaios de tração (Tabela 5) constata-se que as dispersões dos valores de tensão de escoamento e máxima são pequenas, o que indica a boa qualidade da junta soldada e a homogeneidade do material da chapa. O valor médio da tensão máxima das amostras soldadas com pré-aquecimento apresenta-se 1,8% menor que o correspondente valor obtido para as amostras soldadas à temperatura ambiente. Quanto à localização da fratura, ocorreram na região do metal base em todos os corpos-de-prova. Da análise fractográfica, constata-se o comportamento dúctil das fraturas.

5 CONCLUSÕES

Em face aos objetivos propostos e aos resultados obtidos nos experimentos, conclui-se que, apesar de o material soldado com pré-aquecimento apresentar maior largura da ZTA, não é constatado aumento no tamanho de grão para esta condição de soldagem, comparativamente à soldagem realizada à temperatura ambiente, conforme resultados da análise metalográfica das amostras correspondentes. Ainda, a resistência máxima à tração das juntas soldadas com pré-aquecimento apresenta-se 1,8% menor que às soldadas à temperatura ambiente, conforme evidenciam os resultados obtidos no ensaio de tração dos grupos de amostras correspondentes. Finalmente, a adoção de pré-aquecimento não resulta em benefício que justifique seu uso na fabricação de componentes aeroespaciais utilizando este tipo aço, para esta espessura.

Agradecimentos

Às Divisões de Mecânica (AME) e de Materiais (AMR), do Instituto de Aeronáutica e Espaço - IAE, pelo apoio recebido na realização da parte experimental deste trabalho, e ao incentivo acadêmico proporcionado pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, ambos do Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial - CTA.

REFERÊNCIAS

- 1 PHILIP, T. V.; McCaffrey, T. J. (Rev.). Ultrahigh-strength steels. In: AMERICAN SOCIETY FOR MATERIALS. **Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys**, 2002. (ASM Handbook Online, v. 1). Disponível em: <<http://products.asminternational.org.libproxy.mit.edu/hbk/index.jsp>>. Acesso em: 13 fev. 2006.
- 2 MENDEZ, P. F. New trends in welding in the aeronautic industry. In: NEW TRENDS FOR THE MANUFACTURING IN THE AERONAUTIC INDUSTRY, 2000, San Sebastián. **Proceedings...** San Sebastián: Hegan/Inasmet, 2000. p. 21-38.
- 3 RICHETTI, A. **Análise e modelagem empírica do processo de soldagem a plasma com “keyhole” em aço inoxidável**. 2003. 278f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- 4 WU, P.S. et al. Novel method for cooling plasma welding torch head. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 7, n. 4, p. 247-252, 2002.
- 5 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E3-01**: standard guide for preparation of metallographic specimens. West Conshohocken: ASTM, 2004.
- 6 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 8M-04**: standard test methods for tension testing of metallic materials [Metric]. West Conshohocken: ASTM, 2004.
- 7 SAE AEROSPACE. **AMS 6458H**: steel welding wire 0.65Si – 1.25Cr - 0.50Mo - 0.30V (0.28 - 0.33C) vacuum melted, environment controlled packaging. Warrendale: AMS, 2006.
- 8 AMERICAN WELDING SOCIETY. **D13.1-61**: fabrication of welded rocket motor cases. New York, 1961.
- 9 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 92-82**: standard test method for Vickers hardness of metallic materials. West Conshohocken, 2003.
- 10 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 112-96**: standard test method for determining average grain size. West Conshohocken, 2004.
- 11 AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS B4.0M: 2000**: standard methods for mechanical testing of welds. Miami: AWS, 2000.
- 12 Leitão Jr, A. et al. Estudo comparativo da soldagem de dois aços da indústria aeroespacial. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, 15, 1989, São Paulo. **Anais...** Belo Horizonte: ABS, 1989.