

ESTUDO DE JUNTA SOLDADA COM LIGA DE TI GRAU 1, APÓS SOLDAGEM GTAW ORBITAL AUTÓGENA, UTILIZADA NA SOLDAGEM TUBO-ESPELHO DE EQUIPAMENTOS NUCLEARES.*

Luiz Carlos Chaves de Oliveira¹
Gerson Ronelli Ferreira Carneiro²

Resumo

O presente trabalho apresenta o estudo de uma junta soldada através do processo GTAW orbital autógeno, utilizado na soldagem dos tubos em espelhos de liga de titânio, do condensador de Angra III. Esses materiais são comumente utilizados na fabricação de equipamentos para usinas nucleares. A grande quantidade de soldas realizadas com as ligas de titânio grau 1 e a falta de conhecimento de suas análises metalográficas e propriedades mecânicas, motivaram o estudo desta liga. Foram preparadas oito amostras para observar as microestruturas obtidas por este processo de soldagem. Após a soldagem, as amostras foram submetidas a ensaio visual, para verificação de trincas, poros ou outros defeitos visuais, bem como às análises metalográfica e de microdureza em regiões distintas da solda. A estrutura encontrada no metal de base apresentou uma fase alfa com morfologia de grãos equiaxiais. Na zona de fusão foi verificada a presença de grãos de fase alfa com morfologia martensítica e com orientações diferentes limitadas pela fase beta. A zona de fusão apresentou uma maior dureza, com valor médio de 164HV. Esse comportamento pode estar relacionado ao rápido resfriamento, responsável pela presença de morfologia martensítica nesta região. A ZTA apresentou um valor médio de dureza de 134HV e o metal de base apresentou um valor médio de 147HV.

Palavras-chave: Titânio; GTAW; Autógena; Nuclear.

STUDY OF WELDED JOINT WITH GRADE 1 TITANIUM ALLOY AFTER AUTOGENOUS ORBITAL GTAW USED ON TUBE TO TUBESHEET WELDING OF NUCLEAR EQUIPMENT

Abstract

This work presents the study of an orbital autogenous GTAW weld joint, used in tubesheets welds of titanium alloys on Angra III condenser. These materials are commonly used in equipment manufacturing to nuclear power plants. The great number of welds made with grade 1 titanium alloys and the lack of knowledge about the mechanical properties and metallographic analysis, has motivated the study of this alloy. Eight samples were prepared to analyze the microstructures obtained by this welding process. After welding, visual tests were made to evaluate pores, cracks and other visual defects as well as metallographic analysis and microhardness on different welds regions. The structure found on base metal presents an alpha phase with equiaxed grains morphology. On the melting zone, the presence of phase alpha grains with martensitic morphology with different orientations limited by the beta phase was observed. The melting zone presented a higher hardness, with average value of 164HV. This behavior could be related to the fast cooling which has motivated the martensitic morphology formation in this region. HAZ presented average value of 134HV in hardness and the base metal presented average value of 147HV.

Keywords: Titanium, GTAW, Autogenous, Nuclear.

¹ Engenheiro Mecânico, Bacharel, Métodos e Processos, Engenharia Industrial, Nuclebras Equipamentos Pesados, Itaguaí, Rio de Janeiro, Brasil.

² Engenheiro de Materiais, Mestre, Engenheiro, Engenharia Industrial, Nuclebras Equipamentos Pesados, Itaguaí, Rio de Janeiro, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A matriz energética brasileira tem sido tema amplamente discutido no cenário nacional, principalmente ao considerar o aumento da demanda de energia devido a novas tecnologias, o aumento populacional e as constantes mudanças climáticas. Com isso, encontrar soluções econômicas e ambientalmente viáveis para o sistema brasileiro é prioridade. Uma das soluções discutidas é a construção de usinas nucleares no Brasil, o que possibilitaria o aumento da produção de energia elétrica, sem a interferência direta das condições climáticas[1].

A usina nuclear Angra III está em construção no município de Angra dos Reis, no Rio de Janeiro, e, dentre os equipamentos necessários para o funcionamento de uma usina nuclear, pode-se citar os condensadores, que são equipamentos primordiais do sistema secundário. Esses equipamentos são trocadores de calor responsáveis por condensar, através da troca térmica com a água do mar, o vapor principal após a realização de trabalho na turbina para enviá-lo ao gerador de vapor[2]. Os condensadores de Angra III estão sendo fabricados pela NUCLEP, no município de Itaguaí.

O presente trabalho apresenta o estudo da junta soldada através do processo GTAW orbital autógeno, utilizado na soldagem tubo-espelho do condensador de Angra III. Esses materiais são comumente utilizados na produção de equipamentos em usinas nucleares. Ao todo, são realizadas por volta de 72.000 soldas em cada uma das três caixas condensadoras de Angra III. As quantidades expressivas de soldas realizadas e a falta de conhecimento de suas análises metalográficas e suas propriedades mecânicas motivaram o estudo desta liga[3]. Este estudo consiste em analisar a macro e a microestrutura da solda, da zona de fusão, da ZTA e do metal de base, além de estudar as propriedades mecânicas, nessas regiões através de ensaios de micro dureza.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais

2.1.1 Metais de base utilizados

Foram utilizados tubos de titânio comercialmente puro (ERTi-1) grau 1, conforme Figura 1 e espelhos de aço carbono ASTM A-515 com revestimento de titânio comercialmente puro (ERTi-1) grau 1, conforme Figura 2.

Os tubos utilizados apresentam espessuras entre 0,63mm e 0,77mm e diâmetro de 20,7mm.



Figura 1. Tubos de titânio comercialmente puro (ERTi-1) grau 1.

Os espelhos possuem espessura de 46,0mm de ASTM A-515 com revestimento de ERTi-1 de, no mínimo, 6,0 mm, como mostrado na Figura 2.

A soldagem do revestimento de titânio no aço carbono do espelho foi realizada pelo método de soldagem por explosão.



Figura 2. Espelhos de aço carbono ASTM A-515 revestidos com ERTi-1.

Os tubos e os revestimentos dos espelhos seguem a composição química relatada no certificado de qualidade recebido pela NUCLEP, na qual a composição química está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Análise química do ERTi-1

%	C	O	H	N	I	V	Fe	Pd	Ti
ERTi-1	0,02 Máx	0,09 Máx	0,005	0,006 Máx	-	-	0,1	-	99,779

2.1.2 Equipamentos de soldagem

O equipamento de soldagem utilizado no experimento foi adquirido junto à empresa Polysoude e pode ser visto na Figura 3. Esta corresponde a uma máquina de soldagem GTAW orbital e é constituída basicamente de:

- Fonte de soldagem PC 300 TR;
- Unidade de programação dos parâmetros de soldagem (PO-WIN software);
- Cabeçote de soldagem com câmara fechada TS 34;
- Controle remoto com todas as funções e tela de LCD mostrando os valores reais durante a soldagem;
- Módulo com sistema de aquisição de dados em tempo real.



Figura 3. Máquinas de solda - Polysoude.

Foram utilizados eletrodos de tungstênio (Figura 4) com 2% de Tório (EWTh-2), diâmetro de 2,4 mm, vértice em ângulo de $30^\circ \pm 5^\circ$ e diâmetro da ponta do eletrodo entre 0 e 0,2mm. A distância utilizada entre a ponta do eletrodo e a superfície do espelho, neste processo, variou de 1,0 à 1,3 mm.

O diâmetro de rotação do eletrodo utilizado foi de $23,0 \pm 0,1$ mm.



Figura 4. Eletrodo de tungstênio montado no cabeçote de soldagem.

2.2 Métodos

A soldagem dos tubos de titânio junto ao espelho é muito sensível à substâncias estranhas ao processo, tais como graxas, óxidos entre outros, necessitando um ambiente limpo e controlado.

Os procedimentos anteriores à soldagem propriamente dita são variáveis essenciais para obter uma soldagem de sucesso, livre de defeitos ou imperfeições. Esses processos, embora não detalhados neste trabalho, são a expansão dos tubos e a fresagem dos tubos.

2.2.1 Soldagem

Neste trabalho foi realizada a união de tubos de titânio com diâmetros pequenos e espessura reduzida de ligas de titânio utilizando junta de topo e passe único. Os tubos são mantidos estacionários, ao passo que o eletrodo se desloca ao longo da junta formando um cordão de solda homogêneo e com propriedades próximas às do metal base.

Esta soldagem é executada pelo processo a arco elétrico com eletrodo de tungstênio e gás inerte (TIG/GTAW), de modo automatizado, sem material de adição, e com cabeçote de soldagem posicionado através de mandril centralizador, de tal forma que seu eixo de rotação coincida com o eixo do tubo no processo de soldagem. Antes de iniciar a soldagem das amostras, é necessário limpeza da região com álcool isopropílico 99%.

Após limpeza, prepara-se a máquina de solda inserindo no software, o sinete do soldador, o dia, o número da amostra e os parâmetros de soldagem que serão adotados. Estes parâmetros são descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de soldagem utilizados

Corrente	70 A
Voltagem	10 V

Velocidade	110 mm/min (40s para 360°)
Teor mínimo de pureza	99,997%
Vazão de Ar	10 l/min
Comprimento de soldagem	Correspondente a 375°
Tempo de préfluxo do gás de proteção	10 s
Tempo de subida da corrente para 27°	2 s
Formação da poça de fusão	0,5 s
Descida da corrente	De 70A a 10A em 5s
Tempo de permanência do gás de proteção	10 s

Além da atenção aos parâmetros de soldagem, também se faz necessário a conferência da posição do eletrodo de tungstênio, pois este posicionamento influi diretamente na qualidade final da solda. Após todas as conferências necessárias, o equipamento de soldagem é posicionado no respectivo furo e iniciam-se as soldagens das amostras seguindo a sequência mostrada na Figura 5, sendo utilizados os parâmetros esquemáticos citados:

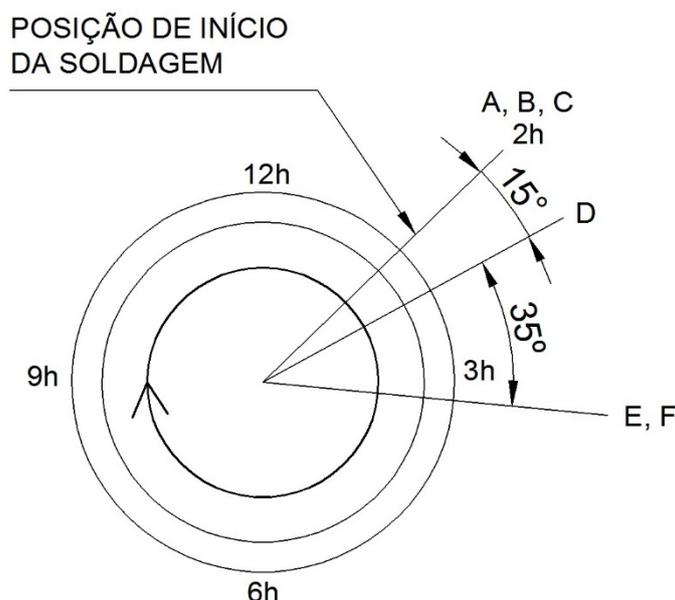


Figura 5. Sequência de soldagem.

Onde:

A - Fluxo de gás antes da abertura do arco = 10s.

B - Subida da corrente para 27A em 2s.

C - Formação da poça de fusão em 0,5s. Após a corrente sobe para 70 A com velocidade de 11 cm/min e percorre um volta +15°.

D-E - Descida da corrente para 10A em 5s.

E - Fim do movimento da máquina e interrupção do arco.

F - Fluxo de gás após a soldagem = 10s

Finalizando assim a soldagem das amostras para o experimento, com um perfil admissível de soldagem do tubo espelho conforme demonstrado no esquema de solda na Figura 6.

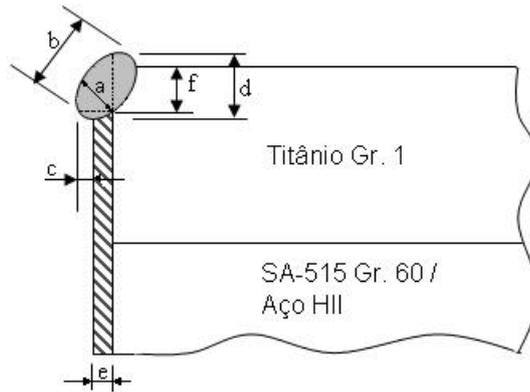


Figura 6. Esquema de solda tubo espelho.

Onde:

a = espessura do caminho de vazamento mínimo

b = largura da solda elipsoidal

c = projeção da solda

d = altura da solda

e = espessura da parede do tubo

f = penetração total do depósito de solda na raiz da junta

2.2.2 Retirada e preparação das amostras

Foram retiradas 08 amostras de produção após o término da soldagem e cortadas a frio com serra de fita na seção transversal a fim de serem analisadas. A seção de corte transversal foi escolhida em função da geometria das amostras, conforme orientado no ASME IX (2007) e demonstrados esquematicamente na Figura 7. As regiões de retirada das respectivas amostras são mostradas na Tabela 3.

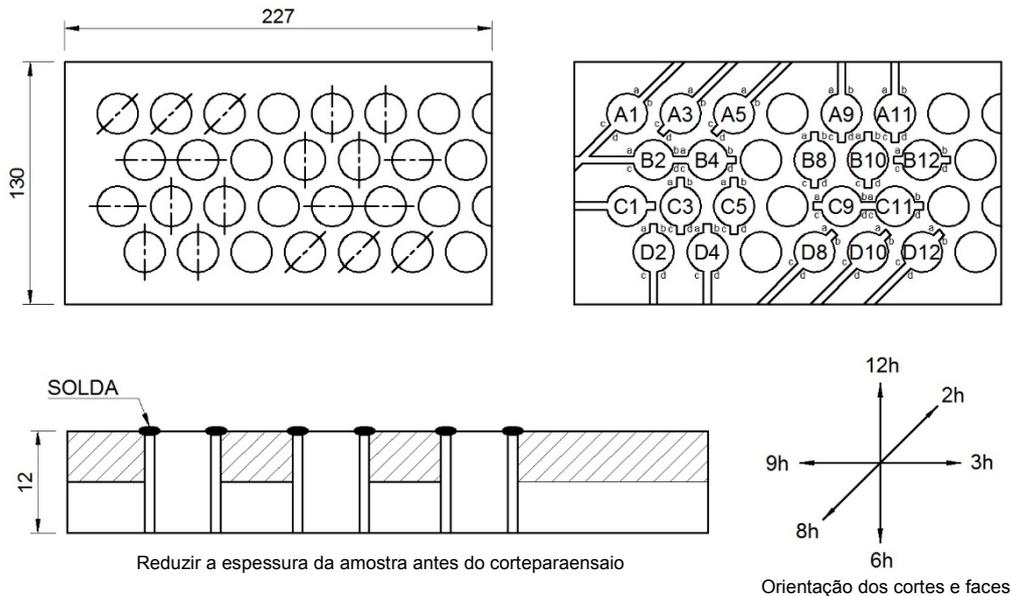


Figura 7. Esquema de corte das amostras.

Essas amostras foram soldadas em dias distintos para garantir a acurácia e numeradas conforme Tabela 3. Serão seguidos os números de trabalho das amostras para análises dos resultados.

Tabela 3. Controle das amostras

Número NUCLEP	Número de trabalho	Região de corte da amostra
4059-B15	1	A3
3059-B11	2	B2
2059-B5	3	B4
3059-D11	4	C3
2059-C06	5	B10
4199-C14	6	C9
4199-D15	7	D4
1059-B01	8	D10

As amostras foram embutidas em baquelite, conforme Figura 8, no laboratório metalográfico da NUCLEP.

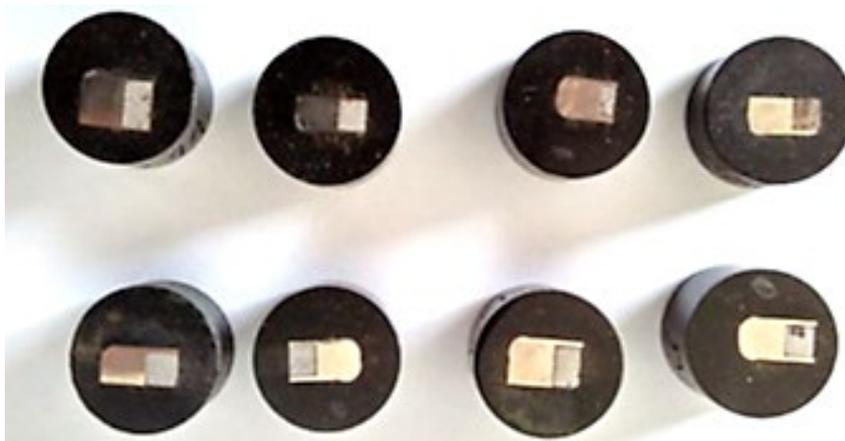


Figura 8. Amostras embutidas.

2.3 Resultados e discussões

Os resultados obtidos das amostras de titânio grau 1 através da soldagem no processo GTAW autógena, no tubo-espelho foram analisadas, caracterizando-se assim suas macro e microestruturas após soldagem.

2.3.1 Observação da macroestrutura

Para a análise da macroestrutura, após o polimento e ataque químico das amostras, foram obtidas macrografias com aumento de 20x. Nota-se, na Figura 9, que todas as amostras apresentaram estruturas macrográficas muito semelhantes, apresentando zonas de bem definidas.

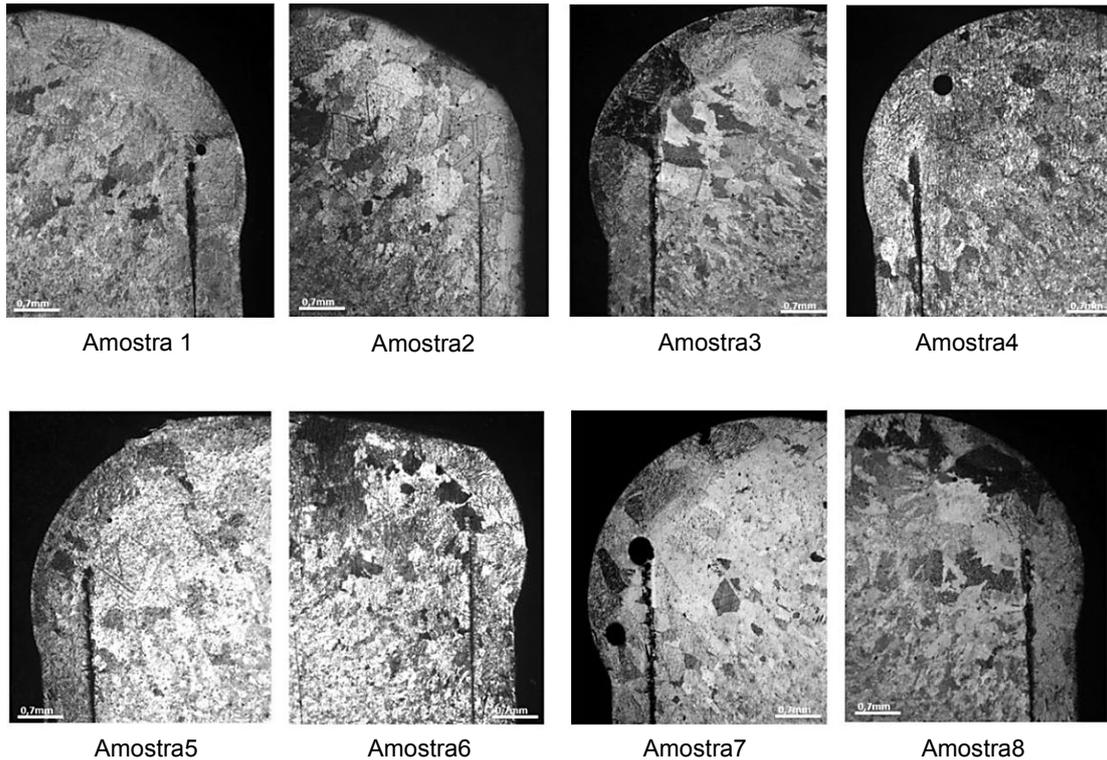


Figura 9. Análise macrográfica das amostras com aumento de 20 X.

Observando as macrografias obtidas, é possível verificar a perfeita separação e definição das diferentes áreas geradas pelo processo de soldagem, como observado na Figura 10. Todas as amostras apresentaram estruturas muito bem definidas entre solda, linha de fusão (LF), zona termicamente afetada (ZTA) e metal de base (MB).

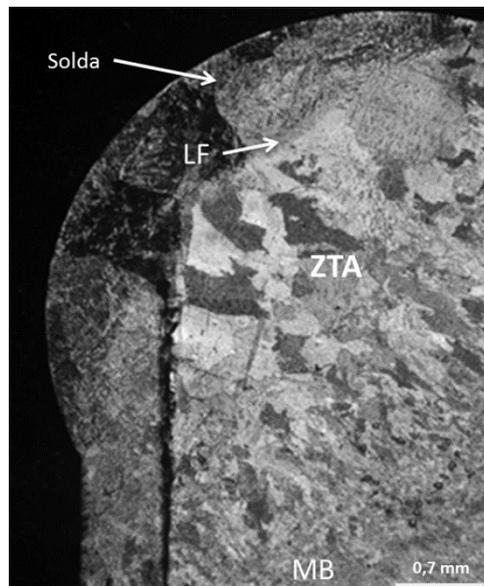


Figura 10. Definição das regiões analisadas das amostras (Amostra 3).

2.3.2 Observação da microestrutura

Analisando as oito amostras, observou-se que as microestruturas encontradas foram as mesmas em cada região estudada para as amostras coletadas nas diferentes

regiões. Foi possível verificar, na região do metal de base, a presença de uma fase alfa com morfologia de grãos equiaxiais com colônias na forma serrilhada, conforme observado na Figura 11. Verificam-se também mudanças de direção das estruturas indicando contornos de grãos bem definidos. Também é possível verificar que os tamanhos de grãos são irregulares e encruados devido à força exercida na superfície do material.

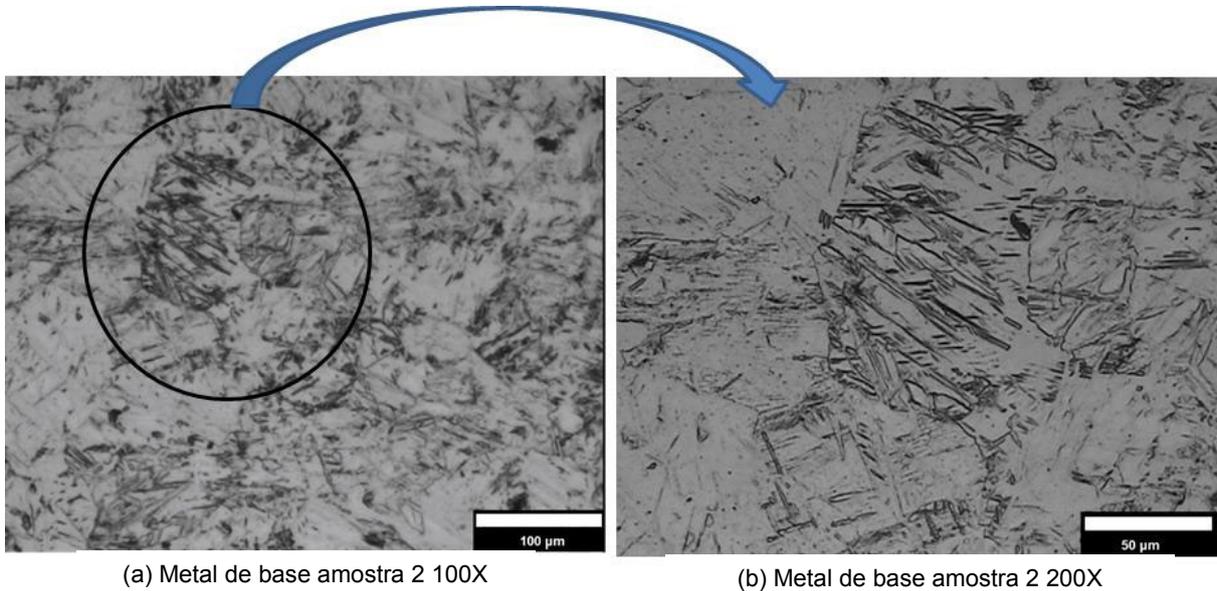


Figura 11.Fase alfa com morfologia de grãos equiaxiais com colônias serrilhada

O metal de base apresentou estrutura de fase alfa e morfologia de grãos equiaxiais com colônias serrilhadas, o que nos indica que esta estrutura é o resultado do processo de soldagem por explosão de um ERTi-1 com outro metal.

A ZTA pode ser observada na Figura 12. Em função do resfriamento mais lento, observa-se na ZTA a presença de grãos de alfa com morfologia alfa recristalizados, esse comportamento é esperado de acordo com [4]. Verifica-se a presença de contornos bem definidos, estrutura tipicamente de titânio puro, sem tratamento.

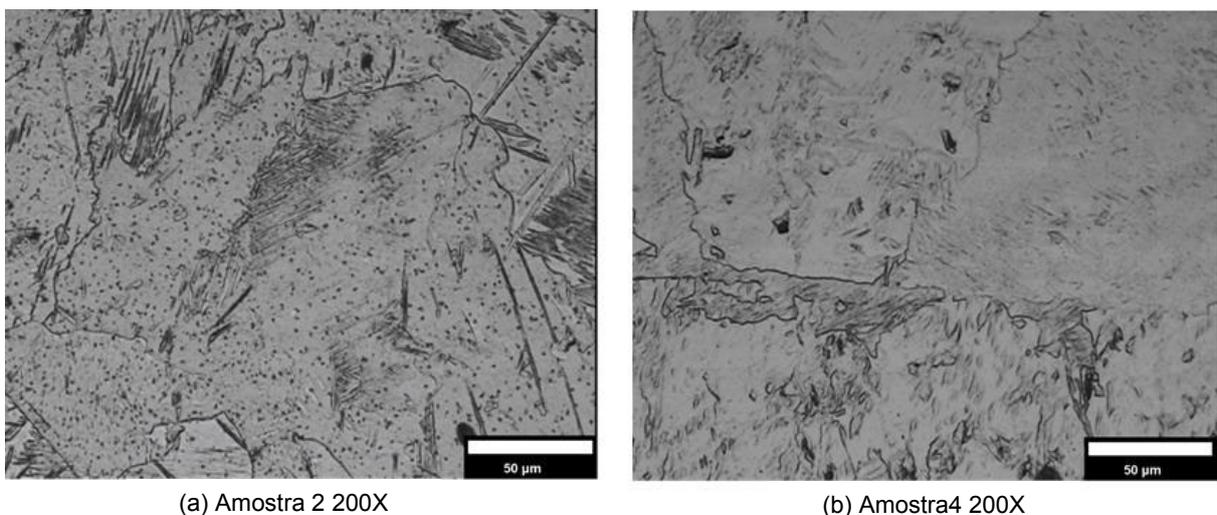


Figura 12.Região da ZTA, exibindo grãos recristalizados de alfa recristalizados

A observação região da solda é apresentada na Figura 13. Nota-se que esta região não apresenta uma estrutura uniforme e é possível verificar, predominantemente, a presença de grãos de alfa e morfologia martensítica (paralelas) com orientações diferentes limitadas pela fase beta. Este resultado era esperado, de acordo com [5].

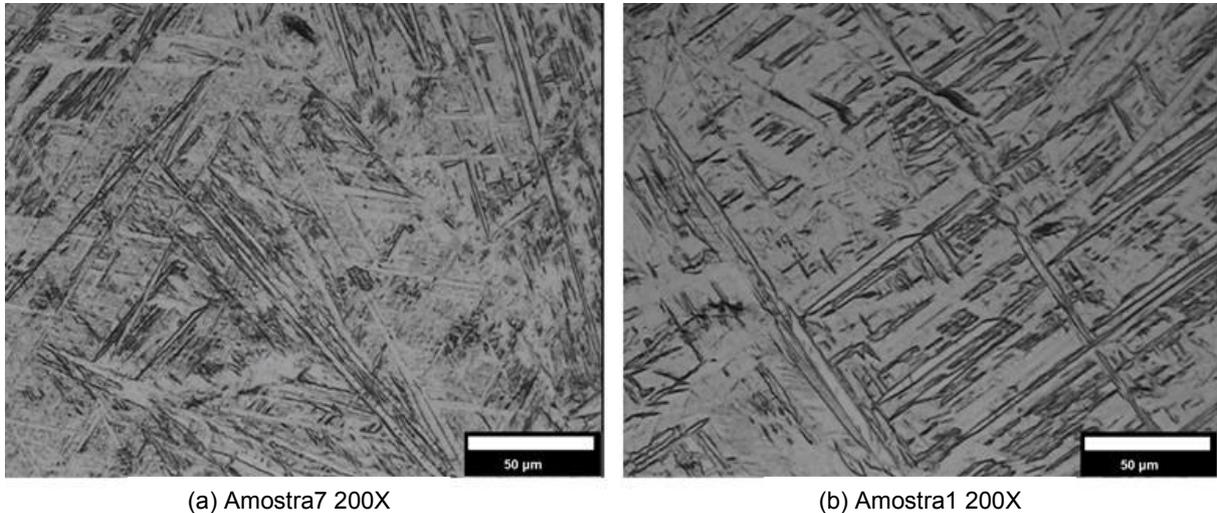


Figura 13. Região da solda, exibindo estrutura alfa com morfologia martensítica.

2.3.2 Microdureza

Foi realizado o ensaio de microdureza HV 0,2, nas amostras seguindo o croqui da Figura 14, em duas linhas distintas mostradas pelas setas L1 e L2, adotando como ponto zero a região superior da figura (região da solda) e a medida de 0,2mm entre cada ensaio, até o ponto em que as microdurezas não apresentavam mais variação.

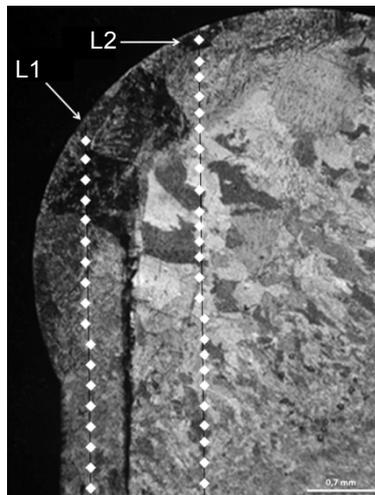


Figura 14. Croqui das regiões ensaiadas das amostras.

Após análise dos resultados obtidos, os dados foram plotados no gráfico da Figura 15. De acordo com [4], a região de solda que apresenta microestrutura martensítica apresenta uma dureza mais elevada em comparação com o metal de base e a zona termicamente afetada. A zona termicamente afetada apresenta a menor dureza de toda a estrutura final da solda, isso devido a microestrutura equiaxial, como

esperado de acordo com [6]. Desta forma, pode-se observar que os resultados encontrados correspondem à literatura.

Microdureza Amostra 1 x Amostra 2

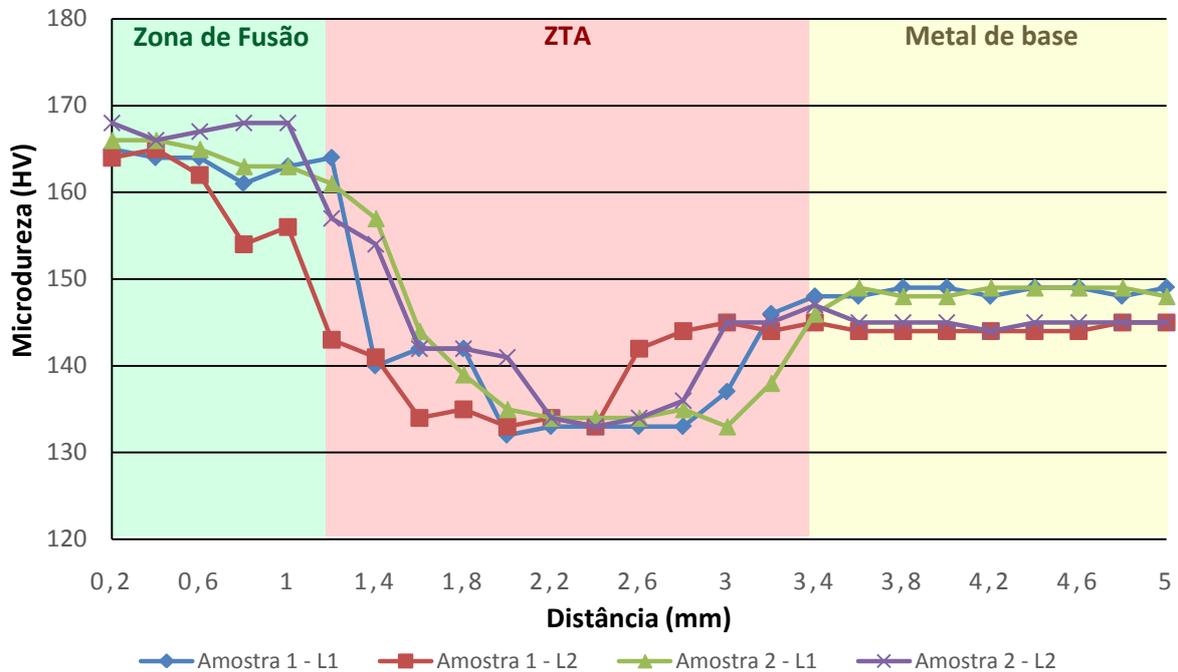


Figura 15. Resultado de ensaio de microdureza das Amostras 1 e 2.

Através dos dados obtidos podemos perceber que não houve alteração significativa no comprimento das regiões entre as amostras e as L1 e L2.

As durezas encontradas na região da solda apresentaram uma média de 160,3 HV, um pouco abaixo da do Ti puro, que é de 192 HV. Na região da ZTA, a dureza apresentou uma média de 137,4 HV, e na região do metal de base 148,9 HV, todas abaixo da dureza do titânio teórico. De uma forma geral, os resultados apresentados mostram que o processo de soldagem provoca uma diminuição da dureza em comparação ao titânio puro, e esta diminuição ocorre em todas as regiões da junta soldada.

3 CONCLUSÃO

As soldas apresentaram as mesmas estruturas e penetração, comprovando que o método adotado, é indicado para processo onde se necessita garantir a qualidade final da solda.

A estrutura encontrada no metal de base apresentou uma fase alfa com morfologia de grãos equiaxiais com colônias de alfa serrilhada, na região da solda foi verificada a presença de grãos de fase alfa com morfologia martensítica (paralelas) e com orientações diferentes limitadas pela fase beta, confirmando que o processo de soldagem provoca alterações na microestrutura.

Observou-se um significativo aumento de grão na zona termicamente afetada em relação ao metal de base, confirmando que existe uma modificação à medida que movimentamos da zona de fusão em direção ao metal de base.

A dureza nas diferentes regiões da junta soldada foi menor que a dureza teórica do metal puro sem tratamento, podendo assim, afirmar que o processo de soldagem provoca uma diminuição da dureza do material. A zona de fusão apresentou uma maior dureza que as demais regiões, esse comportamento está relacionado ao rápido resfriamento, responsável pela presença de martensita nesta região.

Agradecimentos

Agradecemos à Nuclebras Equipamentos Pesados S.A. e seus funcionários, em especial ao eng. Luís Gustavo Macedo Ribeiro, pelo apoio no desenvolvimento e execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Siqueira, Diana Silva. Análise Energética e Exergética de uma Usina Nuclear com Reator PWR. Itajubá : Universidade Federal de Itajubá, 2016.
- 2 Souza, Yago Lopes. Análise Termodinâmica e Modelagem Computacional com Otimização de Parâmetros do Sistema Secundário da Usina Nuclear de Angra 1. Rio de Janeiro, CEFET/RJ, 2017.
- 3 Garcia, J. A. O.; Lima, G. L.; Pereira, W. D. B.; Guimarães, V. A.; Neto, C. M.; Paranhos, R. P. R.; Desenvolvimento da Tecnologia de Soldagem do Titânio pelo Processo TIG Orbital no Segmento Aeroespacial Brasileiro - Parte 2: Caracterização das Juntas Soldadas; Soldagem Insp. São Paulo, Vol. 12, No. 2, p.107-114, Abr/Jun 2007.
- 4 Karpagaraj A.; Shanmugam N. S., Sankaranarayanan K. Some studies on mechanical properties and microstructural characterization of automated TIG welding of thin commercially pure titanium sheets, Welding Design and Fabrication, Materials Science & Engineering, 2015; 180–189.
- 5 Davis, R.; Flower, H. M.; West D. R. F. Martensitic transformations in Ti-Mo alloys. Journal of Materials Science, v.14, n.3, p.712-722, 1979
- 6 Xiao-Long Gao, Lin-Jie Zhang, Jing Liu, Jian-Xun Zhang, A comparative study of pulsed Nd: YAG laser welding and TIG welding of thin Ti6Al4V titanium alloy plate, Materials Science & Engineering, 2013; 14–21.