

## TÉCNICAS DE SOLDAGEM EM TUBOS DE TITÂNIO DURANTE O PROCESSO DE MONTAGEM

Cosme Costa Devens <sup>1</sup>  
Manoel Carreira Neto <sup>2</sup>

### RESUMO

A complexidade de produzir titânio é uma das justificativas para o alto custo relativo deste metal. Apesar disso, existem situações onde o titânio é um dos únicos materiais capazes de satisfazer os requisitos de alguns processos da indústria petroquímica, cervejaria, fertilizantes, alimentícias, farmacêutica, papel e celulose e outras. Em todos os projetos de construção metálica necessariamente ocorre união por soldagem. A soldagem de titânio pode comprometer as propriedades da junta soldada. Cuidados especiais durante o processo de soldagem são necessários. O objetivo deste trabalho é desenvolver e aprovar um procedimento de soldagem de campo de tubos de titânio para a montagem de uma planta industrial. Utilizou-se tubos de 2 polegadas com 3,19 mm de espessura de titânio puro grau 2, soldados com adição ER TI-2 com o processo TIG com argônio de alta pureza (99,999%) na proteção da junta soldada. Realizou-se ensaios de tração, dobramento e dureza de acordo com a ASME seção IX-2015. Estes ensaios mostraram que as propriedades mecânicas do titânio, por ser altamente reativo, podem ser afetadas por contaminações ao reagir com o oxigênio a alta temperatura.

Palavras-Chave: Titânio; soldagem; montagem.

<sup>1</sup> Pós graduação em engenharia de soldagem pela faculdade de tecnologia SENAI CIMATEC. [engdevens@gmail.com](mailto:engdevens@gmail.com).

<sup>2</sup> Drº em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela escola politécnica da USP – Professor Senai Cimatec. [mcarreiraneto@gmail.com](mailto:mcarreiraneto@gmail.com).

## 1. INTRODUÇÃO

A alta resistência, baixo peso e excelente resistência à corrosão do titânio e suas ligas levaram a uma ampla e diversificada gama de aplicações bem-sucedidas nas indústrias aeroespacial, química, de geração de energia, extração de petróleo e gás, médica, esportiva e outras. Existe uma questão comum que é a dificuldade em soldar peças de titânio ou, soldar este material a outros materiais para produzir componentes do projeto de montagem. Esta dificuldade está relacionada com a grande reatividade do titânio com o oxigênio quando exposto a atmosfera em temperaturas intermediárias. Para isto é necessário desenvolver uma especificação de procedimento de soldagem (EPS) que atenda ao conteúdo de qualidade do projeto.

A variedade de ligas de titânio e o número muito maior de metais e materiais de engenharia exigem que haja uma seleção versátil de processos de junção de titânio para que o metal seja capaz de ser usado na mais ampla gama de aplicações. Embora a fixação mecânica, os adesivos e outras técnicas tenham grande importância, a soldagem continua sendo o processo mais importante para unir o titânio. A soldagem de titânio por vários processos é amplamente praticada, e o desempenho de serviço de soldas é comprovado com um extenso e contínuo registro de conquistas. Novos métodos adaptáveis para titânio estão avançando ainda mais com o desenvolvimento da ciência e tecnologia. A aplicação desta tecnologia ao projeto, fabricação e aplicação de titânio é muito importante para usuários e para clientes comprometidos. Para muitas aplicações, a escolha do processo de soldagem é um passo tão importante no projeto quanto à especificação da liga. (GITTOS, M. e colaboradores, 1999).

O projeto passa pela fase de fabricação que normalmente é desenvolvida em espaços apropriados, com soldagem orbital, com menor influência da atmosfera e, que requer um procedimento de soldagem pertinente ao caso, no entanto a montagem é desenvolvida em uma atmosfera agressiva de céu aberto e requer parâmetros dos quais aqueles da fabricação não atendem.

É necessário que antes de iniciar o processo efetivo da montagem sejam feitas adequações de parâmetros específicos, atendendo as condições locais onde será desenvolvido o projeto como, por exemplo, ventos de alta velocidade, umidade relativa do ar e movimentação de poeira. É importante qualificar um procedimento de soldagem aplicado especificamente para a montagem, ou seja, uma EPS experimental. O cuidado com a proteção da poça de fusão é o mais importante fator para se iniciar o procedimento de soldagem, uma vez detectada uma contaminação no cordão de solda esta deverá ser tratada com rigor antes de liberar o passe seguinte ou, se for o caso, remover todo o cordão e reiniciar o procedimento (AWS 2007).

O oxigênio é o maior contaminador no processo de soldagem do titânio, por ter um raio atômico metade do titânio, durante o processo de resfriamento, pode se instalar nos contornos de grãos impedindo a movimentação das discordâncias alterando as propriedades da junta soldada, quando comparada com as propriedades do metal de base. (GARCIA e colaboradores 2007).

A crescente aplicação do titânio exige cada vez mais a qualificação de procedimentos de soldagem e de soldadores, aperfeiçoa a qualidade da junta soldada, diminui a necessidade de retrabalhos durante o processo, com isto minimiza muito os custos de produção uma vez que diminui a perda de material, seja ele de consumível ou do metal de base.

Durante o processo de soldagem para minimizar o efeito do oxigênio sobre a poça de fusão é usado o argônio, como protetor da poça, com grau de pureza da ordem de 99,999%, feita com três cilindros desse gás, agindo na proteção da poça propriamente dita com uma mangueira acoplada na “tocha”, um difusor acoplado a “tocha”, conforme mostra a figura 02 e, outra mangueira passando por dentro do tubo, chamada de purga.

Dentre tantas aplicações do titânio este, na siderurgia é utilizado como um elemento de liga para redução no tamanho de grão durante a fabricação de aços inoxidáveis para melhorar a resistência à corrosão, diminui a relação resistência por peso, agir como desoxidante, agir como estabilizador, além de auxiliar na redução da concentração de carbono nos aços inoxidáveis.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

Para execução do trabalho foram utilizados os seguintes materiais: 1,2 m de tubo de titânio grau 2 com diâmetro de 2 polegadas, espessura de 3,19 milímetros. Metal de adição: varetas de titânio ER-Ti2 de diâmetro 1,6 mm. Eletrodo de tungstênio toriado com 1,6 mm de diâmetro. Gás de proteção argônio com grau de pureza 99,999%, mostrado na figura 1 e um difusor fabricado pelo soldador mostrado na figura 2 abaixo.



Figura 01 - Cilindro de argônio.  
Fonte: Autoria própria



Figura 02 - Difusor fabricado  
Fonte: Autoria própria

O difusor fabricado é mostrado na figura 2. Difere muito do equipamento ideal conforme figura 3, apresentada abaixo. No entanto devido ao alto custo desse difusor, a solução encontrada foi à adaptação do dispositivo como na figura 2



Figura 03 - Difusor padrão

Fonte: <https://www.huntingdonfusion.com/index.php/es/products/weld-purge-accessories>

O tubo foi cortado no torno com ferramenta apropriada em aço inoxidável austenítico para não haver contaminação. Seccionou-se em partes de 190 mm para soldagem retiradas dos corpos de provas assim como uma amostra do material de base para análise química, ensaios de tração e dobramento. Após a realização dos ensaios no metal de base comparou-se os percentuais dos elementos químicos com o fornecido pela ASTM B338 – 2017.

Além das propriedades químicas do metal de base é importante também conhecer a composição química do consumível. Esses dados foram retirados do certificado do material e os seus dados estão mostrados na tabela 2 abaixo.

Análise Química ( % ) / Chemical Analysis ( % )							
	C	O	N	H	Fe	Ti	-
Encontrado	0,013	0,12	0,007	0,001	0,034	Bal	-

Propriedades Mecânicas / Mechanical Properties		
Resistência à Tração MPa	Alongamento (%)	Limite de Escoamento MPa
345	20	275

Tabela 02 – Propriedades químicas e mecânicas do consumível  
Fonte: Techno Alloy LTDA, 2018

## 2.2 MÉTODOS

### 2.2.1 Preparação para o processo de soldagem

A preparação para o processo de soldagem deve atender criteriosamente os seguintes passos: estocagem adequada do metal de base, do metal de solda, do eletrodo de tungstênio e inspeção rigorosa do certificado do gás de proteção. O metal de base deve ser limpo com éter e tecido que não deixe fiapos, trabalhado com luvas cirúrgicas e ensacado em plástico de bolha até o momento de ser ponteadado para a soldagem. Da mesma maneira o metal de enchimento. O eletrodo de tungstênio deve ser afiado, se necessário, em pedra rotativa de carboneto de silício mantendo um ângulo de  $60^\circ$ , Com ângulos inferiores a  $40^\circ$  há um risco maior de perda de tungstênio, enquanto que acima de  $80^\circ$  o início do arco é difícil e o arco tem uma tendência a vagar. Caso o eletrodo toque no cordão, metal de base ou poça de fusão, devem ser cuidadosamente examinados antes de serem reiniciados. Qualquer inclusão tungstênio na solda, não importa quão pequeno, deve ser retirado.

O uso de um medidor de oxigênio é recomendado na maioria dos casos para garantir que o conteúdo de oxigênio do gás de purga seja inferior a aproximadamente 20 ppm antes do início da soldagem. O custo de medidores de oxigênio capazes de ler esses níveis baixos caiu nos últimos anos e o investimento de capital pode ser rapidamente recuperado com o uso reduzido de argônio, retrabalho e componentes descartados. Se possível, a soldagem deve ser realizada sem abertura de raiz, uma vez que a abertura da raiz torna a purga do lado de baixo significativamente mais difícil. Se uma fenda da raiz for inevitável, então, onde houver acesso ao lado de baixo, uma proteção de gás do lado da raiz, semelhante à usada para proteger a capa de solda (discutida abaixo), é a melhor solução.

Se o acesso for limitado, alumínio ou folha de cobre pode ser colado na face superior e removido à frente da tocha durante a conclusão do passe de solda da raiz.

O chanfro deve estar necessariamente isento de qualquer impureza, deve ser limpo com éter e, se necessário, para remover camada de óxido, escovar com escova rotativa de baixa rotação para não haver aquecimento acima de 120°C com arames de aço inoxidável austenítico virgem.

Antes de iniciar a soldagem definitiva foi feito um cordão de solda sobre um pedaço do tubo, que recebeu um corte, para adequação dos parâmetros de soldagem, a partir de uma EPS qualificada para soldagem de fabricação. Para este processo foram usados dois cilindros de argônio, conforme mostrado abaixo. Como há a necessidade de serem usados três ramais, um para proteção, um para arraste através do difusor e outro na parte interna do tubo para purga, um desses cilindros recebeu uma bifurcação para ser desenvolvido o processo de soldagem conforme figura abaixo.



Figura 05 – Cilindros de argônio  
Fonte: Autoria própria

No entanto com essa metodologia adotada o cordão de solda de teste foi completamente contaminado, conforme mostrado na figura 6.



Figura 06 – Cordão de solda contaminado  
Fonte: Autoria própria

A partir deste resultado percebeu-se que era necessário abandonar a EPS usada na fabricação e adequar os parâmetros para a condição de montagem/soldagem em campo.

Passou-se a usar então três cilindros ao invés de dois, fazendo um ramal para cada função. A vazão que anteriormente que era de 12 litros por minuto passou a ser de 25 litros/minuto na proteção e no arraste e 15 litros/minuto na purga. A máquina que estava calibrada segundo a EPS de fabricação passou a ter seus parâmetros conforme mostrado abaixo:

Corrente contínua de polaridade direta 80A.

Tensão 12 V.

Vazão do gás de proteção 25 l/min, gás de arraste 25 l/min e gás de purga 15 l/min.

Número de passes 2 passes, raiz, enchimento e acabamento.

Velocidade de avanço 100 mm/min.

Método de limpeza de interpasse, esmerilhamento.

Temperatura de interpasse 100°C.

### 2.3 SOLDAGEM.

Antes de iniciar o procedimento de adequação dos parâmetros de soldagem, as três tomadas de gás foram abertas por 15 segundos para expulsar todo oxigênio da região e assim então foram feitos os três pontos de alinhamento para o início desse processo, defasados por  $120^\circ$  ao longo do diâmetro interno. Após a conclusão de cada ponto as tomadas de gás permaneceram abertas pelo mesmo tempo. Concluído o ponteamto todos os pontos foram inspecionados com relação a sua coloração e assim aprovado para o fechamento do passe de raiz. Concluído o passe de raiz, o gás continuou fluindo por 15 segundos, após este tempo foram fechados todos os ramais para a inspeção visual, concluída a inspeção foi liberado para enchimento e acabamento.

Repetiu-se todo o procedimento, ou seja, abriram-se os três ramais por 15 segundos e após a conclusão permaneceram abertos pelo mesmo tempo. Após fechado os três ramais, realizou-se a inspeção final e a junta foi aprovada.

Uma vez confirmado que a soldagem ocorreu sem nenhuma contaminação, os tubos soldados, agora em pedaços de 380 mm, foram ensacados em plástico de bolha e enviados ao laboratório para retirada dos corpos de prova e prepara-los para os ensaios.

### 2.4 Corpos de provas (CP)

Os corpos de prova foram cortados e usinados segundo padrão ASME seção IX – 2015; figuras QW-462 e QW-463, como mostrados abaixo.



Figura 07 - Corpos de prova  
Fonte: Autoria própria

Dos seis CP'S retirados, foi realizado ensaio de dobramento em 4 CP'S, sendo dois dobramentos de face e dois de raiz, e dois corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração. Além dos ensaios destrutivos foi realizada medição de dureza na zona fundida, na zona termicamente afetada e no metal de base conforme metodologia ASTM E92/98.

## 2.5. Coloração do cordão de solda

A coloração apresentada por um cordão de solda é de fundamental importância na inspeção visual, dele se toma a decisão de reprovar ou aprovar o trabalho. Após um passe de solda que será seguido por outros passes é necessário que não haja contaminação de espécie alguma para só então se iniciar o próximo passe. As duas figuras abaixo mostram o critério de aceitação de acordo com a coloração do cordão de solda.

**Table 2 — Color Acceptance Criteria**

Weld Color	Quality Indication
Bright Silver	Acceptable <sup>(a)</sup>
Silver	Acceptable <sup>(a)</sup>
Light Straw	Acceptable <sup>(a)</sup>
Dark Straw	Acceptable <sup>(a)</sup>
Bronze	Acceptable <sup>(a)</sup>
Brown	Acceptable <sup>(a)</sup>
Violet	Unacceptable <sup>(b, c)</sup>
Dark Blue	Unacceptable <sup>(b, c)</sup>
Light Blue	Unacceptable <sup>(b, c)</sup>
Green	Unacceptable <sup>(b, c)</sup>
Gray	Unacceptable
White	Unacceptable

Figura 8 – Critério de aceitação através da coloração  
Fonte: Welding jornal AWS, 2007



Figura 9 – Coloração do cordão de solda  
Fonte: Welding jornal AWS, 2007

A coloração inadequada deve ser removida antes da soldagem adicional.

- a) Na linha de solda e na ZTA 1 mm além da solda
- b) A coloração violeta, azul e verde é rejeitável se for necessária soldagem adicional. A coloração azul e verde é aceitável em soldas acabadas, mas deve ser removida antes do processamento subsequente.
- c) Descolorações violetas, azuis e verdes são rejeitáveis se for necessária a soldagem adicional. Descolorações azuis e verdes são aceitáveis nas soldas acabadas, mas deve ser removido antes do processamento subsequente.

Quando não protegido corretamente, o titânio durante o processo de soldagem pode apresentar coloração azul ou púrpura que deve ser removida por lima rotativa com no mínimo 0,04mm abaixo da superfície para uma completa descontaminação. Após a remoção medir a dureza do metal de base com a ZTA e a diferença não pode exceder 50 pontos na escala vicker's, só assim dar sequência ao processo de soldagem. Após a segunda remoção se persistir o problema toda a solda deve ser retirada e, após a limpeza total da região iniciar uma nova solda.

A coloração cinza ou branca deve ser rejeitada (formação de  $TiO_2$ ). Nesse caso toda solda e ZTA devem ser removidas por esmerilhamento com lima rotativa, seguida da eliminação de no mínimo 0,3mm da espessura. Fazer teste de dureza para certificar-se de que foi removida a contaminação. Após o processo serão permitidas apenas duas soldagens.

Pequenas faixas estreitas azuladas usualmente presentes e localizadas fora da ZTA devem ser desconsiderada.

A coloração prateada deve ser alcançada mesmo em corpos de prova antes da soldagem.

Várias tonalidades de azul podem ser encontradas em peças soldadas após tratamento térmico de alívio de tensão, porém, são inofensivas, pois ocorrem somente em função do tratamento térmico e não de contaminação pela soldagem.

Durante a soldagem em campo, após a extinção do arco o gás de proteção, arraste e purga deve permanecer fluindo por cerca de vinte segundos para ga-

rantir que não haja contaminação pelo ar atmosférico em alta temperatura até que a temperatura atinja 120°C para menos.

A coloração preferida deve ser a prata clara. Embora a coloração amarela palha brilhante seja aceita ela não deve ser alterada pela temperatura de interpasse. No caso de continuação da soldagem torna-se necessário escovar o cordão de solda enquanto a solda estiver quente e com uma escova de aço inoxidável limpa, de preferência “virgem”. A coloração amarela palha brilhante tendendo para violeta é somente aceita na soldagem interpasse, porém torna-se necessário à retirada desta contaminação enquanto a solda estiver quente, via lima rotativa limpa.

Coloração que não seja prata clara deve ser inspecionada para que se tomem as medidas necessárias a continuidade do processo de soldagem.

Componentes de titânio soldados ou preparados para soldagem devem ser totalmente protegidos contra poeira, envolvidos em plástico bolha ou outra proteção eficiente.

Um cordão de solda que foi severamente contaminado e que foi fortemente escovado mostrará uma superfície enrugada quando comparada a uma superfície mais suave de uma área dúctil por isto o soldador não deve escovar o final do cordão e a ZTA até o limite de 10 mm da margem do cordão de solda.

### 3.RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme definido na metodologia do trabalho, foram realizados os ensaios de micrografia, medição de dureza e ensaios mecânicos. Abaixo são apresentados os resultados dos testes.

#### 3.1 Micrografia

A micrografia foi analisada qualitativamente com relação ao aumento do grão nas proximidades do centro do cordão de solda, da ZTA e interface com o metal de base. Nas figuras abaixo tem-se as micrografias realizadas

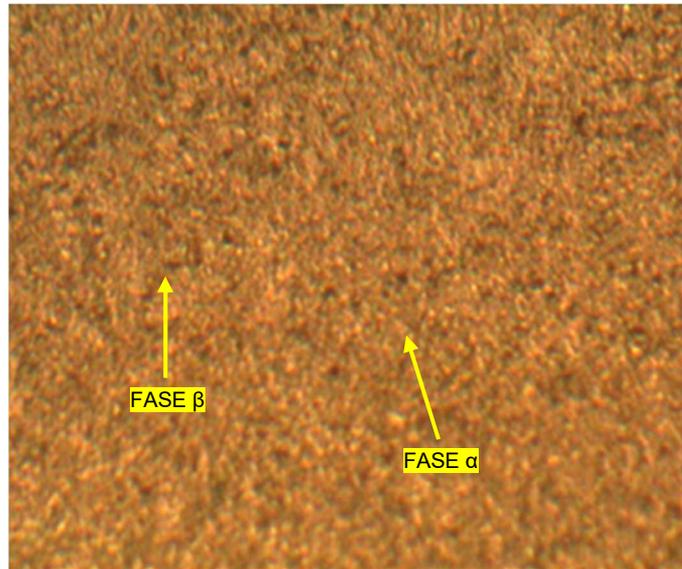


Figura 10 – Micrografia do metal de base com ampliação de 200x  
Fonte: Relatório 193/18 JC Laboratórios LTDA, 2018

A figura acima mostra uma foto da microestrutura onde estão presentes as fases alfa e o ferro estabilizado na fase beta, tanto em contorno de grão quanto na matriz. Norma utilizada ASTM E112 e E7.

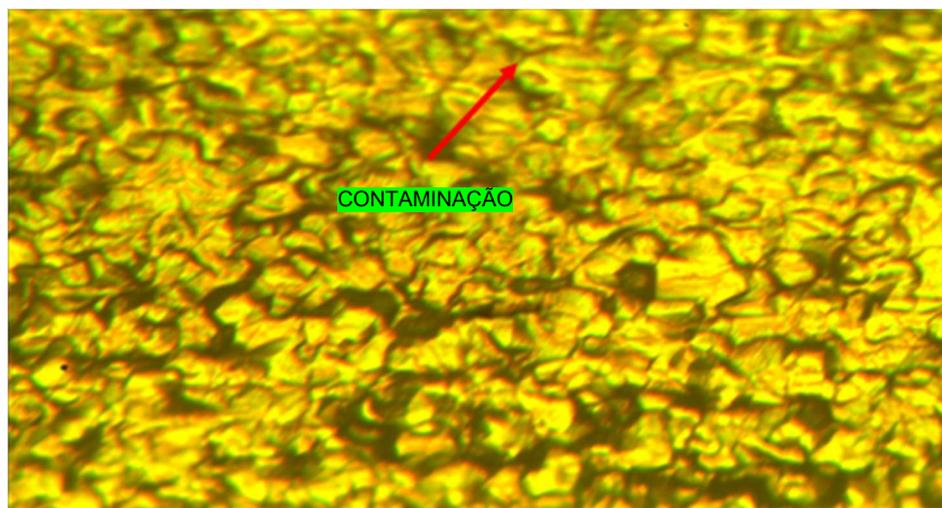


Figura 11 - Micrografia da região de interface entre a zona fundida e ZTA (CP contaminado)  
Fonte: Relatório 193/18 JC Laboratórios LTDA, 2018

Na figura acima temos uma micrografia da zona fundida do corpo de prova contaminado. Destacando 11 mm para o centro da solda mostrando crescimento dos grãos nas fases alfa e beta.

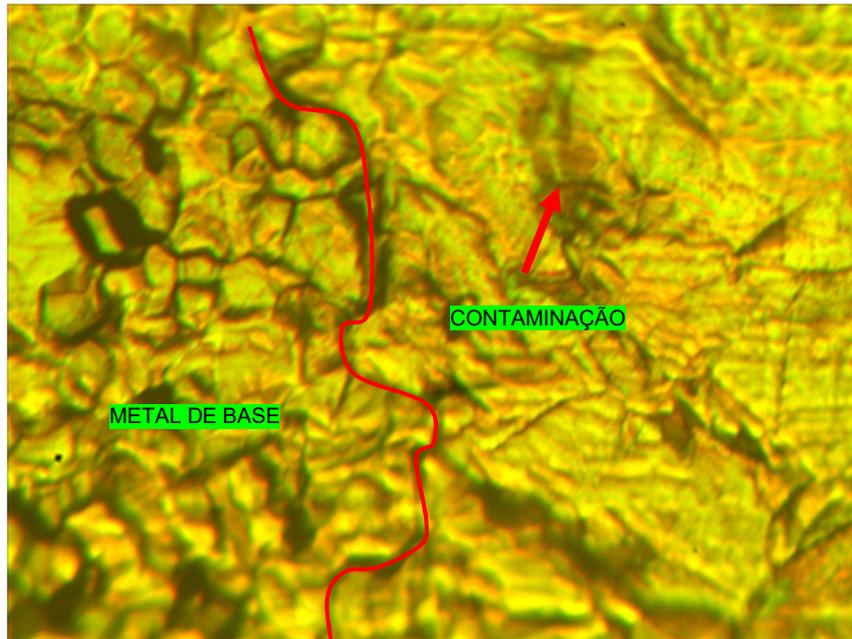


Figura 12 - Micrografia da região de interface entre a zona fundida e ZTA (CP contaminado)  
Fonte: Relatório 193/18 JC Laboratórios LTDA, 2018

Na figura 12, mostrada acima, tem-se a micrografia da região de interface entre a ZTA e o metal de solda no corpo de prova contaminado. Na imagem fica nítida as dimensões dos grãos da ZTA e do metal de solda, já aparecendo sinais de contaminação.

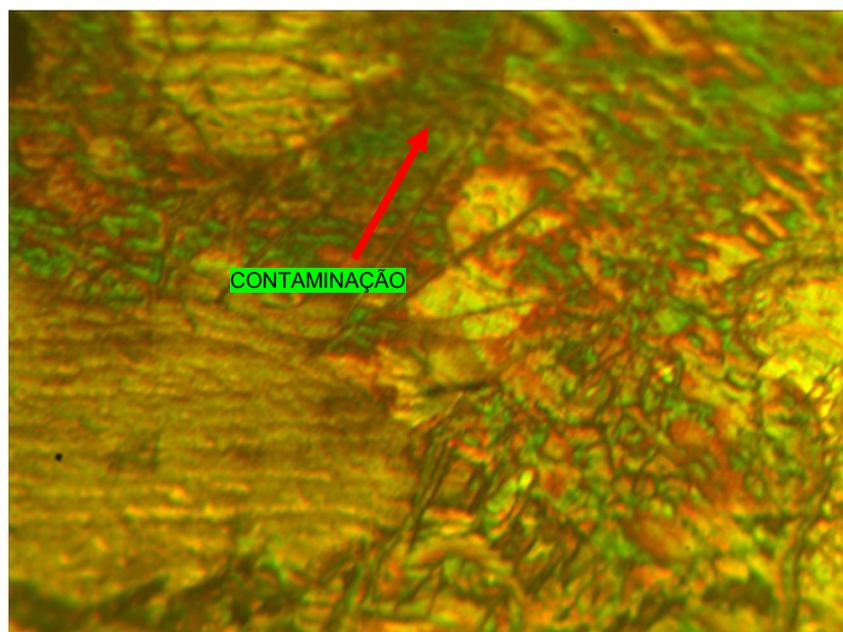


Figura 13 - Micrografia do centro do cordão de solda – Ampliação de 250x  
Fonte: Relatório 193/18 JC Laboratórios LTDA, 2018

Na figura 13 é possível visualizar de forma bem nítida a contaminação do centro do cordão de solda bem como os contornos de grão.

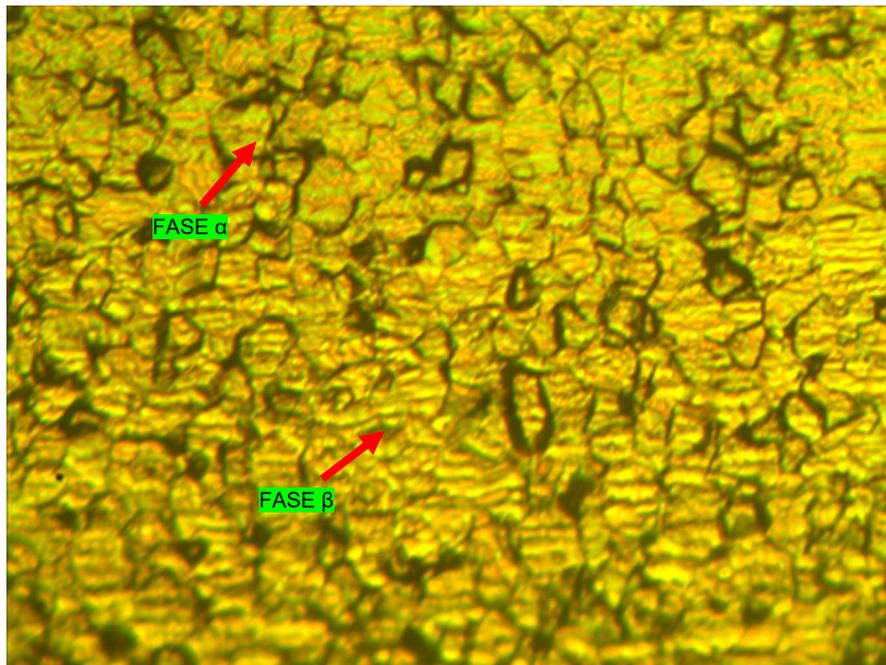


Figura 14 - Micrografia da região 10 mm deslocada do centro do cordão de solda  
Fonte: Relatório 192/18 JC Laboratórios LTDA, 2018 – CP sem contaminação.

Na figura 14 nota-se o crescimento de grãos alfa e beta, porém não aparecem indícios de contaminação. Como citado anteriormente essa solda foi desenvolvida dentro dos padrões adequados para o local da soldagem.

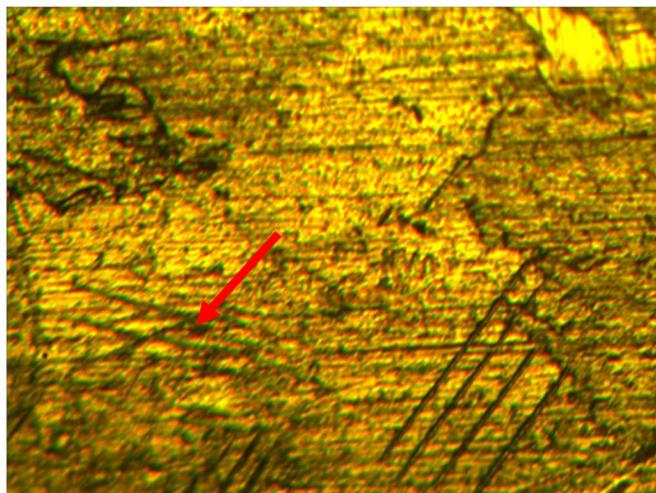


Figura 15 - Micrografia apresentando crescimento dos grãos e formação de martensita  
Fonte: Relatório 192/18 JC Laboratórios LTDA, 2018

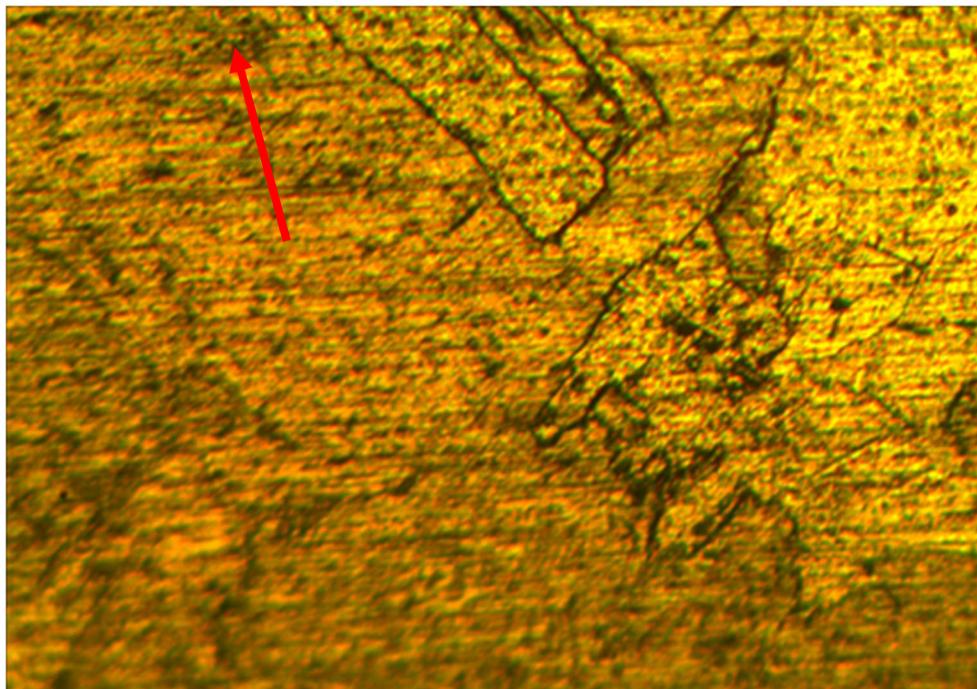


Figura 16 - Micrografia apresentando crescimento dos grãos e formação de martensita  
Fonte: Relatório 192/18 JC Laboratórios LTDA, 2018

Nas figuras 15 e 16 observa-se o crescimento do grão e o aparecimento das estruturas martensíticas lamelar provocada pela alta taxa de resfriamento causada pelo gás de proteção purga e arraste.

Este é um problema potencial para o processo de soldagem durante a montagem que a engenharia de projeto deve corrigir através de tratamento térmico de alívio de tensão. Se por um lado é necessário proteger o cordão de solda através de uma maior vazão dos gases por outro se corre o risco de ter uma junta que precise fazer um tratamento de alívio de tensão, dependendo da espessura do metal de base, para atender as necessidades de projeto.

### 3.2 Ensaio mecânicos

Foram feitos ensaios de tração, dobramento e dureza em corpos de prova do material de base e nos corpos de prova soldados. Os ensaios mecânicos bem como a análise de composição química do metal de base serviram para caracterização do material em comparação ao padrão da norma ASTM

B338/2017. Os ensaios nos corpos de prova soldados foram utilizados para estudo da influência do processo de união no material.

As tabelas 1, 2 apresentam a análise química realizada nos corpos de prova do metal de base e a composição química nominal esperada para o material.

ANÁLISE QUÍMICA METAL DE BASE- METODOLOGIA ASTM E30, E350 A E3534			
TITÂNIO (%)	FERRO (%)	SILÍCIO (%)	OUTROS (%)
98,77	0,65	0,53	0,05

Tabela 01 – Análise química – Metodologia ASTM E30, E350 a E354  
Fonte: Relatório 730/17 – JC Laboratórios Ltda

Composition, Weight Percent <sup>A,B,C,D,E</sup>																				
Grade	UNS Number	Carbon max.	Oxygen range or max.	Nitrogen max.	Hydrogen max.	Iron range or max.	Aluminum	Vanadium	Palladium	Ruthenium	Nickel	Molybdenum	Chromium	Cobalt	Zirconium	Niobium	Tin	Silicon	Other Elements, max. each	Other Elements, max. total
1	R50250	0.08	0.18	0.03	0.015	0.20	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.1	0.4
2/2H	R50400	0.08	0.25	0.03	0.015	0.30	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.1	0.4

Tabela 02 – Tabela de composição química Nominal  
Fonte: ASTM B338/2017

As tabelas 3 e 4 apresentam os resultados dos ensaios de tração e dobramento para o material de base.

LR – resistência mecânica (KSi; MPa); AL – alongamento; CM – carga máxima (kgf); CE – carga de escoamento (kgf); ESP – espessura (mm); LARG – largura (mm); Área – mm<sup>2</sup>; ALG – Alongamento percentual.

CP (nº)	Esp. (mm)	Largura (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	CE Kgf	CM Kgf	LE Kgf/mm <sup>2</sup>	LE MPA	LR Kgf/mm <sup>2</sup>	LR MPA	Alongamento (%)
1	2,0	13,7	27,40	690	1370	25,18	246,89	50,00	490,20	22,8

Tabela 03 - Ensaio de tração – Metal de base – Metodologia ASTM A 370  
Fonte: relatório 730/17 – JC Laboratórios Ltda

CP Nº	Espessura (mm)	Largura (mm)	Posição	Resultados
DF-1	2,0	22,0	Face	Isento de descontinuidade

Tabela 04 – ensaio de dobramento – metal de base – metodologia ASTM A 370.  
Fonte: relatório 730/17 – JC Laboratórios Ltda

### 3.2.1 Dobramento do Material Soldado

A tabela 5 abaixo mostra o ensaio de dobramento de face e raiz do corpo de prova contaminado.

ENSAIO DE DOBRAMENTO – METODOLOGIA ASME IX 2017 – ÂNGULO 180°					
CP - N°	ESP. (mm)	LARG. (mm)	POSIÇÃO	RESULTADOS	LAUDO
DF – 1	1,5	20,2	FACE	SEM DESC.	APROVADO
DR – 2	1,5	20,0	RAIZ	SEM DESC.	APROVADO
DF – 3	1,4	20,0	FACE	SEM DESC.	APROVADO
DR - 4	1,4	20,2	RAIZ	SEM DESC.	APROVADO

Tabela 05 – Resultado do ensaio de dobramento no CP contaminado  
Fonte: Relatório 193/18 JC Laboratórios LTDA, 2018

Apesar de contaminado o corpo de prova não apresentou falha no ensaio, porém, os números dessas amostras não são suficientes para uma análise mais precisa. Este ensaio foi feito somente para verificar o desempenho do soldador. Assim como realizado no corpo de prova com a solda contaminada, foi realizado ensaio de dobramento nos CP'S sem contaminação, apenas para verificar a aptidão do soldador.

ENSAIO DE DOBRAMENTO – METODOLOGIA ASME IX 2017 – ÂNGULO 180°					
CP - N°	ESP. (mm)	LARG. (mm)	POSIÇÃO	RESULTADOS	LAUDO
DF – 1	1,5	20,2	FACE	SEM DESC.	APROVADO
DR – 2	1,5	20,0	RAIZ	SEM DESC.	APROVADO
DF – 3	1,4	20,0	FACE	SEM DESC.	APROVADO
DR - 4	1,4	20,2	RAIZ	SEM DESC.	APROVADO

Tabela 06 – Resultado do ensaio de dobramento no CP sem contaminação  
Fonte: Relatório 192/18 JC Laboratórios LTDA, 2018

### 3.2.2 Tração

Na tabela abaixo apresentamos os valores dos ensaios de tração realizados no corpo de prova contaminado

ENSAIO DE TRAÇÃO – METODOLOGIA ASME IX 2017 – TEMPERATURA AMBIENTE							
CP	ESP. (mm)	LARG. (mm)	ÁREA (mm <sup>2</sup> )	CR (Kgf)	LR Kgfmm <sup>-2</sup>	LR (MPA)	LOCAL RUPTURA
T1	1,70	12,50	21,25	830	37,04	363,22	1,0 FS
T2	1,80	12,40	22,32	780	35,84	351,51	1,0 FS

**LEGENDA:** FS – fora da solda (mm), LR – limite de resistência, CR – carga de ruptura.

Tabela 07 – Resultado do ensaio de tração  
Fonte: Relatório 193/18 JC Laboratórios, 2018

Os resultados acima mostram que os corpos de provas mesmo contaminados tiveram rompimento fora do cordão de solda, mais uma vez prevaleceu o desempenho do soldador. Após a realização do ensaio de tração no corpo de prova contaminado, realizou-se o mesmo ensaio em um corpo de prova sem contaminação e os resultados desse ensaio estão apresentados na tabela abaixo.

ENSAIO DE TRAÇÃO – METODOLOGIA ASME IX 2017 – TEMPERATURA AMBIENTE							
CP	ESP. (mm)	LARG. (mm)	ÁREA (mm <sup>2</sup> )	CR (Kgf)	LR Kgfmm <sup>-2</sup>	LR (MPA)	LOCAL RUPTURA
T1	1,80	12,60	22,68	800	39,06	383,50	1,2 FS
T2	1,60	12,30	19,68	840	39,63	388,69	1,1 FS

Tabela 08 – Resultado do ensaio de tração no corpo de prova sem contaminação  
Fonte: Relatório 192/18 JC Laboratórios, 2018

Embora seja prematura uma avaliação severa, baseada no número de corpos de prova, mas as tabelas 6 e 7 mostram que a resistência à tração é maior nos corpos de provas isentos de contaminações, isto pode estar associado ao nível de porosidade dos corpos de prova contaminados, já que uma das características da contaminação é a porosidade.

Observando-se os valores de resistência mecânica obtidos nos ensaios de tração do metal de base e os valores de resistência mecânica do metal de solda tirado do certificado, a junta soldada apresentou valores dentro desse intervalo, tanto para o corpo de prova contaminado como aquele sem contaminação.

A maior taxa de transferência de calor provocada pela vazão dos gases ao CP sem contaminação pode ter colaborado para a maior resistência mecânica, quando comparada ao CP contaminado.

### 3.2.3 ENSAIO DE DUREZA

O ensaio de dureza foi realizado nos corpos de prova contaminados e não contaminados conforme mostrados na figura 17 abaixo. É importante notar que o centro da solda é representado no ponto 8 da figura.

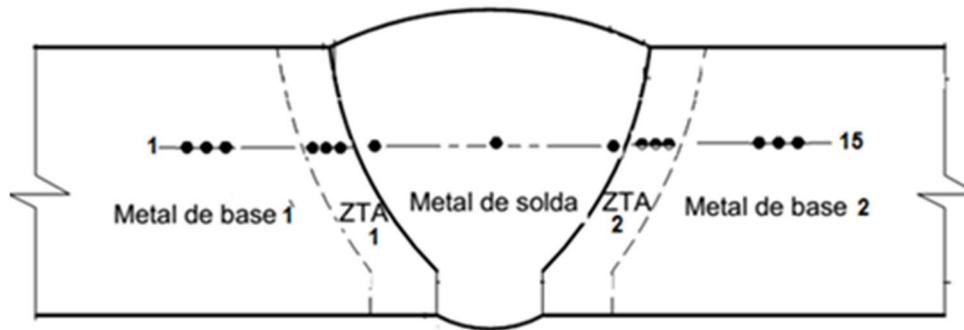


Figura 17 – Regiões de medição da dureza nos corpos de prova  
Fonte: Relatório 192/18 JC Laboratórios LTDA, 2018

Na figura abaixo, temos uma tabela com os resultados dos ensaios de dureza nos corpos de prova. Sendo que o Rel. 192 refere-se ao corpo de prova não contaminado e o Rel. 193 apresenta o resultado da medição da dureza no CP contaminado.

**TABELA 3: RESULTADOS (HV-10)**

Ponto	MB-1			Média	ZTA-1			Média	MS			Média	ZTA-2			Média	MB-2			Média
	1	2	3		4	5	6		7	8	9		10	11	12		13	14	15	
<b>RL192</b>	180	185	188	184	185	181	171	186	170	182	173	188	180	189	188	186	153	159	158	156
<b>Ponto</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Média</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>Média</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>Média</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>Média</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>Média</b>
<b>RL193</b>	128	132	135	132	137	158	159	151	153	155	155	154	163	180	140	154	135	134	133	134

Figura 18 – Resultado do teste de dureza no corpo de prova contaminado e não contaminado  
Fonte: Relatório 192/18 e 193/18 JC Laboratórios LTDA, 2018

No corpo de prova contaminado a partir do ponto 1 a dureza aumenta no sentido do centro do cordão de solda quando chega a 135 Vickers no ponto 3. Na transição com a ZTA ela aumenta dois pontos e quando está na interface com o metal de solda ela ganha 24 pontos e passa a 159 Vickers. Isto pode estar associado a maior formação de óxidos na região da junta, já que neste caso a vazão dos gases foi da ordem de 12 litros por minuto, não fez a proteção necessária e não provocou choque térmico que justificasse grande formação da martensita. Deste ponto até o centro da solda houve uma ligeira queda de quatro pontos que pudesse ser justificada em função de ser uma região mais frontal aos bocais da proteção e arraste e, portanto maior área de proteção. A situação se repete com pequenas diferenças até a chegada do ponto 15.

No corpo de prova sem contaminação, toda a situação anterior se repete, porém, com o diferencial de que o aumento da dureza pode estar diretamente ligado à alta taxa de transferência de calor e não pela contaminação, conforme a coloração apresentada.

Outro fator a ressaltar é o centro da solda, onde a taxa de transferência de calor é menor, a dureza também tem uma queda quando comparada com a transição da ZTA.

#### 4.CONCLUSÕES

Neste estudo apresentou-se condições que podem servir as necessidades de projeto diante da soldagem de tubos de titânio realizada durante o processo de montagem em atmosfera livre e chegou-se as seguintes conclusões:

- Se não houver uma vazão suficiente de gases para proteção da poça de fusão esta será contaminada pela formação de óxidos provocada pela reação do titânio, a alta temperatura, com o oxigênio atmosférico.
- Os trabalhos executados na montagem devem ter seus parâmetros de soldagem adequados no campo de forma que fica inviável a utilização da EPS de fabricação já que ela é desenvolvida para a soldagem em espaços mais protegidos do ataque atmosférico.
- Embora o aumento na vazão dos gases seja necessária para a soldagem de montagem é preciso notar que ela pode causar a formação da martensita e isto pode ser um fator prejudicial ao projeto.
- Os resultados do trabalho confirmam o esperado que era a necessidade de qualificar uma EPS específica para a soldagem de tubos de titânio durante a montagem em atmosfera livre.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASME - THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME Boiler and Pressure Vessel Code An International Code. Section IX Welding, Brazing, and Fusing Qualifications, 2015.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM B338 Titanium Alloy Pipes and Tubes, 2017.

AWS – American Welding Society. WELDING JOURNAL. Miami. Dez 2007

BAESLACK III, W.; CROSS, C.; GERKEN, J.; HANSON, J.; LIU, P.; MONSEES, J.; SCHLEY, J.; SHOWALTER, L. **Titanium and Titanium Alloys**. STD. AWS. WHB 4, part 2, ch 9, 1998.

GARCIA, J.; GUIMARÃES, V.; LIMA, G.; PARANHOS, R.; PEREIRA, W. **Desenvolvimento da tecnologia de soldagem do titânio pelo processo TIG orbital no segmento aeroespacial brasileiro** - Parte 2: Caracterização das juntas soldadas. Revista Soldagem Insp, São Paulo, v. 12, n. 2, p 107-114, 2007.

GITTO, M.; SMITH, L.; THREADGILL, P. **Welding titanium. A designers and users handbook**. TWI – The Welding Institute, 1999.

KHAN, I. **Welding Science and Technology**. New age international publishers, 2017

OTANI, T. Titanium welding technology. **Nippon Steel Technical Report No. 95**, 2007