

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NA TENACIDADE DE UMA JUNTA SOLDADA DE UM AÇO API 5L GRAU B¹

Patrick Ranzan²
Vagner Machado Costa³
Jefferson Haag³
Bill Paiva dos Santos³
Gabriel Cogo³
Pedro Cunha⁴
Guilherme Viera Braga Lemos⁴
Telmo Roberto Strohaecker⁵

Resumo

Este trabalho visa uma análise mecânica e metalúrgica de juntas soldadas de tubos de aços API 5L Grau B na condição de como soldado (CS) e como tratado (CT) unidos através de dois processos de soldagem: GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) raiz e SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) enchimento/acabamento. O estudo baseou-se na realização de perfis de microdureza, ensaios de CTOD e *charpy* no metal de solda das juntas soldadas, enquanto que a caracterização metalúrgica foi através de análise química do metal de base e do metal de solda e por fim a caracterização metalográfica (macrografias e micrografias). Os resultados obtidos mostram que a junta soldada na condição de como tratado (CT) possui maior tenacidade à fratura devido ao alívio de tensões obtido pelo tratamento térmico.

Palavras-chave: Caracterização; Junta soldada; Aço API; CTOD.

STUDY OF THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON THE TOUGHNESS OF WELDED JOINT OF API 5L GRADE B1 STEEL

Abstract

This work aims mechanical and metallurgical analysis of welded joints of steel pipes API 5L Grade B as welded (CS) and as treated (CT) joined with two welding processes: GTAW-root and SMAW-filling. The study was based on the realization of microhardness profiles, CTOD and Charpy tests in the weld metal of welded joints, while the metallurgical characterization was by chemical analysis of the base metal and weld metal followed by the metallographic characterization (macrographs and micrographs). The results show that the welded joint as treated (CT) has a higher fracture toughness due to the stress relief obtained by the heat treatment.

Key words: Characterization; Welded joint; API steel; CTOD

¹ Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalúrgico. UTC Engenharia, Canoas, RS, Brasil.

³ Engenheiro metalúrgico. Mestrando. Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), UFRGS, RS, Brasil.

⁴ Engenheiro metalúrgico. Doutorando, Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), UFRGS, RS, Brasil.

⁵ Engenheiro metalúrgico. Prof. Dr., Eng. do PPGE3M, pesquisador do Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), UFRGS, RS, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O rápido aumento recente da demanda de petróleo e gás natural associado à grande demanda energética e de matérias primas vem provocando um aumento significativo no consumo nacional de óleo, gás e derivados (gasolina, diesel, nafta) na última década.

Prevendo este cenário com elevado consumo, grandes empresas do setor petrolífero vêm investindo gradativamente em técnicas de inspeção e qualificação na seleção de materiais para o transporte destes combustíveis fósseis. Em virtude desta significativa expansão e busca pelo desenvolvimento de novas técnicas torna-se necessário aumentar os níveis de segurança e confiabilidade operacional em sistemas de tubulações industriais. Com isto, este trabalho tem por objetivo avaliar a influência do tratamento térmico de alívio de tensões nas características mecânicas e metalúrgicas de uma junta soldada em aço API.

Para validação do consumível com propriedade assegurada, utilizaram-se como referência os parâmetros da Norma N-1859⁽¹⁾ da Petrobras.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho utilizou o aço API 5L Grau B pertencente ao grupo de materiais API (American Petroleum Institute) com as seguintes dimensões: comprimento de 100 mm (direção de laminação), diâmetro de 6" (152,4 mm) e espessura de 11 mm. A composição química determinada pela API segue na Tabela 1.

Tabela 1. Valores máximos dos elementos químicos determinados pela API

Elemento Químico	Máx. % C	Máx. %Mn	Máx. %P	Máx. %S
API 5L Grau B	0,26	1,15	0,004	0,05

Foi realizada análise química para determinação da composição das chapas de aço e do eletrodo revestido utilizados neste trabalho.

Os tubos foram chanfrados (em V) para facilitar a união e soldados através da utilização do processo GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) no passe de raiz com uma vareta (AWS A 5.18 ER 70S-3) de 2,38 mm de diâmetro. Nos passes de enchimento e acabamento utilizou-se o processo SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) com eletrodo revestido de 3,25 mm de diâmetro de acordo com a especificação AWS A 5.1 ER 7018-1. A composição química do eletrodo revestido conforme fabricante segue na Tabela 2.

Tabela 2. Composição química do eletrodo revestido fornecido pelo fabricante

Elemento Químico	% C	% Mn	%Si
ER 7018-1	0,06	1,45	0,5

Para o passe de raiz foi utilizado, como proteção gasosa do arco, uma mistura de 99,997% Argônio com vazão de 12 a 15 L/min e progressão ascendente. A corrente era contínua de 150 A, polaridade direta e a voltagem foi de 14,5 V. Para os passes de enchimento e acabamento, utilizou-se corrente elétrica contínua de 190 A e polaridade indireta e a voltagem de 25 V.

Após o recebimento do tubo as amostras para os ensaios de CTOD e Charpy foram cortadas em uma serra fita e em seguida usinadas através de uma fresadora mecânica até as dimensões finais conforme as normas BS EN ISO 15653⁽²⁾ e

ASTM E-23,⁽³⁾ respectivamente (Figura 1). Entretanto, os entalhes foram usinados com o auxílio de uma máquina de eletroerosão a fio.

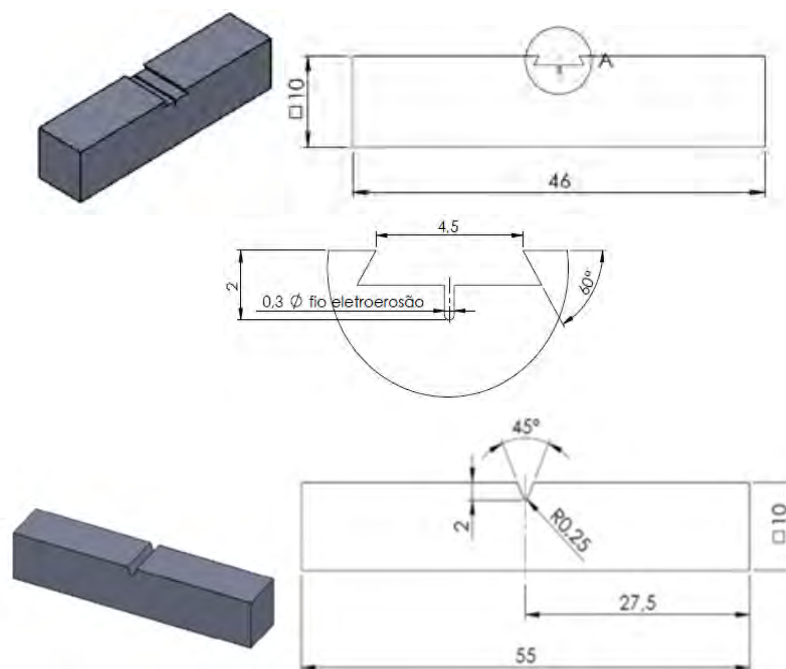


Figura 1. Corpo de prova para CTOD, conforme norma BS EN ISO 15653 e corpo de prova para Charpy-V conforme norma ASTM E-23.

Também foi extraída uma amostra da junta soldada para análise metalográfica a qual foi preparada conforme a norma ASTM E3-95.⁽⁴⁾ Após esta etapa as amostras foram atacadas com Nital 5% e Nital 2% para caracterização macrográfica e micrográfica, respectivamente. Posteriormente, utilizando a mesma amostra, realizaram-se os perfis de dureza Vickers de acordo com a norma Petrobras N-133 revisão J.⁽⁵⁾ A carga utilizada foi de 5,0 Kg aplicados sobre a superfície durante 10 segundos e com distância entre pontos ilustrados na Figura 2.

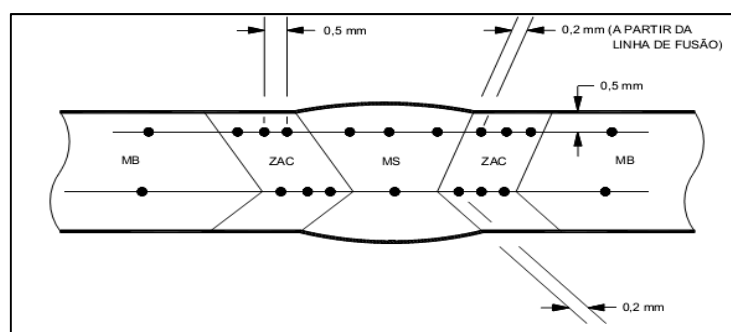


Figura 2. Desenho mostrando os pontos de realização da análise de dureza Vickers.⁽⁵⁾

Os ensaios de CTOD foram desenvolvidos em uma máquina servo hidráulica MTS 810 em um ambiente com temperatura mantida em 0° C. A etapa de abertura da pré-trinca seguiu com os seguintes parâmetros: $K_{final} = 17 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$, frequência de 30 Hz e uma razão de carregamento de 0,1. Após o ensaio de CTOD as fraturas dos corpos de prova foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

As etapas do ensaio de CTOD estão representadas no fluxograma da Figura 3.

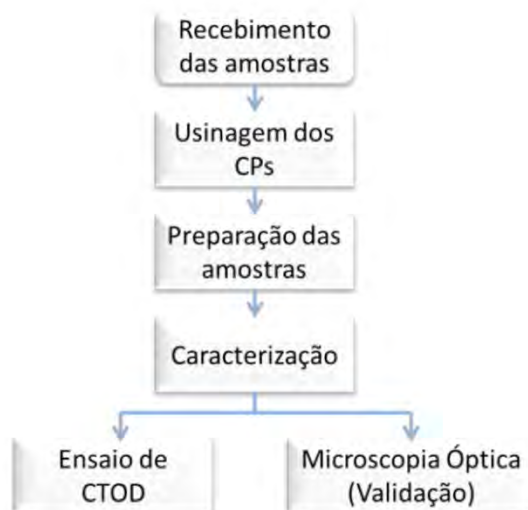


Figura 3. Fluxograma apresenta a metodologia do ensaio.⁽⁶⁾

O tratamento térmico das amostras para CTOD e Charpy seguiram os parâmetros da norma Petrobras N-1859⁽¹⁾ Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros utilizados no tratamento térmico

Parâmetros de tratamento térmico	Valores absolutos
Taxa de aquecimento	200°C/h
Taxa de resfriamento	250°C/h
Tempo de patamar	25 min
Temperatura de patamar	625°C
Tempo total do tratamento	6 horas

Os ensaios de Charpy foram conduzidos em uma máquina eletromecânica Instron Impact modelo SI-102 em temperatura de 0°C. Este ensaio visou comparar as energias absorvidas dentre todos os corpos de prova deste trabalho, sejam eles na condição de como soldado (CS) ou como tratado (CT).

3 RESULTADOS

3.1 Análise Química

A Tabela 4 mostra a composição química que se refere a um aço API 5L Grau B, sendo está realizada através da análise por espectrometria de emissão ótica (equipamento Spectrolab tipo LAVMB08B).

Tabela 4. Resultado da análise química dos tubos

Elemento Químico	%C	% Mn	% P	% S
API 5L Grau B	0,19	0,462	0,0016	<0,001

Comparando a Tabela 4, com os valores máximos estabelecidos para a composição química do material base pela API (Tabela 1), observamos que todos os elementos químicos estão dentro do estabelecido, ou seja, não aparece nenhum elemento fora do especificado que possa interferir na microestrutura da junta soldada. Para o cálculo do carbono equivalente utilizou-se a equação $CE = \%C + \%Mn/6 +$

$(\%Cr+\%Mo+\%V)/5 + (\%Cu+\%Ni)/15$, cujo resultado foi de $CE= 0,2742$. Resultado o qual representa um material com relativa médio-baixa temperabilidade em relação a aços que contém maiores teores de elementos de liga em sua composição.

A Tabela 5 apresenta a composição química do eletrodo revestido ER 7018-1 utilizado neste trabalho. Comparando os resultados com os valores fornecidos pelo fabricante (Tabela 2), apenas o carbono apresentou valor um pouco acima do estabelecido.

Tabela 5. Resultado da análise química do eletrodo utilizado

Elemento Químico	%C	% Si	% Mn
ER 7018-1	0,089	0,461	1,4

Os elementos químicos mais efetivos, que parecem influenciar na temperabilidade do metal de solda e na possível formação de ferrita acicular, devem ser o carbono, manganês e, possivelmente o silício.⁽⁷⁾

3.2 Macrografia

Conforme é mostrado na Figura 4, as macrografias referem-se respectivamente a condição de como soldado (CS) e como tratado (CT). Pode ser visto que houve penetração total que, na maioria dos casos, garante as propriedades mecânicas da junta unida. Também é possível visualizar o passe de raiz realizado pelo o processo GTAW e os passes de enchimento/acabamento realizados com o eletrodo revestido (SMAW).

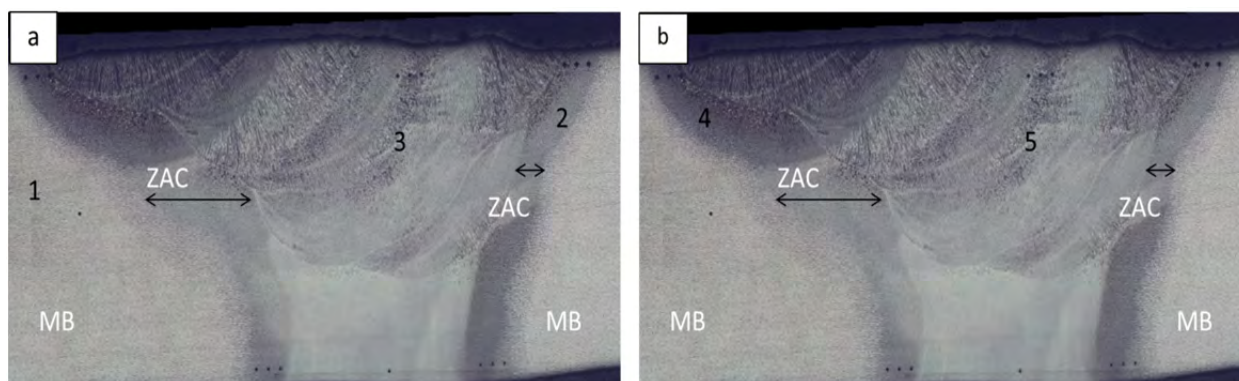


Figura 4. Macrografia da junta soldada pelo processo GTAW e SMAW. (a) Como soldado e (b) Como tratado.

3.3 Micrografia

Nesta sessão serão apresentadas as micrografias referentes às juntas soldadas para as duas condições de como soldado (CS) e como tratado (CT).

Os números de 1 a 5 que aparecem nas macrografias da Figura 4 referem-se aos pontos onde foram realizadas as micrografias.

Na Figura 5 podemos ver a microestrutura do metal base API 5L grau B. Esta microestrutura é composta basicamente por grãos irregulares finos de ferrita e perlita bandeados no sentido de laminação Figura 5a, altamente refinados devido ao processo termomecânico que este material foi submetido durante a fabricação. A Figura 5b mostra com maior clareza a ferrita em maior quantidade (região clara), e colônias isoladas de perlita (região escura).

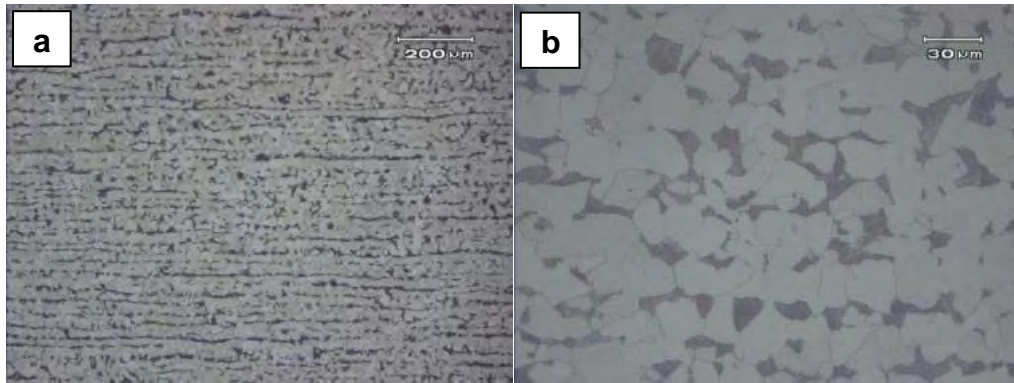


Figura 5. Microestrutura do metal base (a) 100X e (b) 500X.

A Figura 6 mostra as micrografias das regiões 2 e 4. Nota-se nitidamente a transição das zonas do metal de base, passando pela zona termicamente afetada, e chegando ao metal de solda nas Figuras 6a e 6b. Todavia, não se percebe nitidamente esta transição na amostra tratada termicamente conforme as Figuras 6c e 6d, devido, possivelmente ao refinamento da estrutura decorrente do tratamento térmico de alívio de tensões.

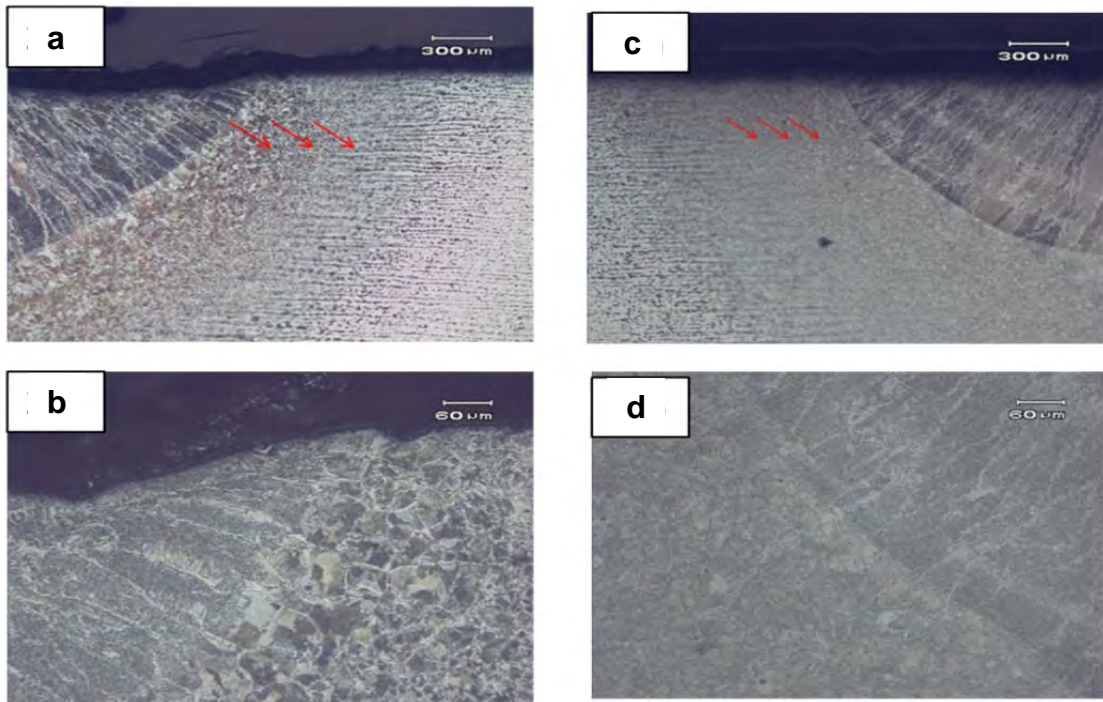


Figura 6. Micrografias da ZAC. Em 2.(a) amostra como soldada (CS), 50X e 2.(b) a mesma amostra como soldada, em 200X. Em 4.(a) amostra como tratada (CT), 50X em 4.(b) mesma amostra como tratada, em 200X.

As metalografias presentes na Figura 7 mostram as microestruturas formadas no metal de solda. Basicamente encontramos um ou dois tipos diferentes de formação de ferrita na microestrutura: ferrita de segunda fase alinhada (ou ferrita de Widmanstätten) e ferrita de contorno de grão.

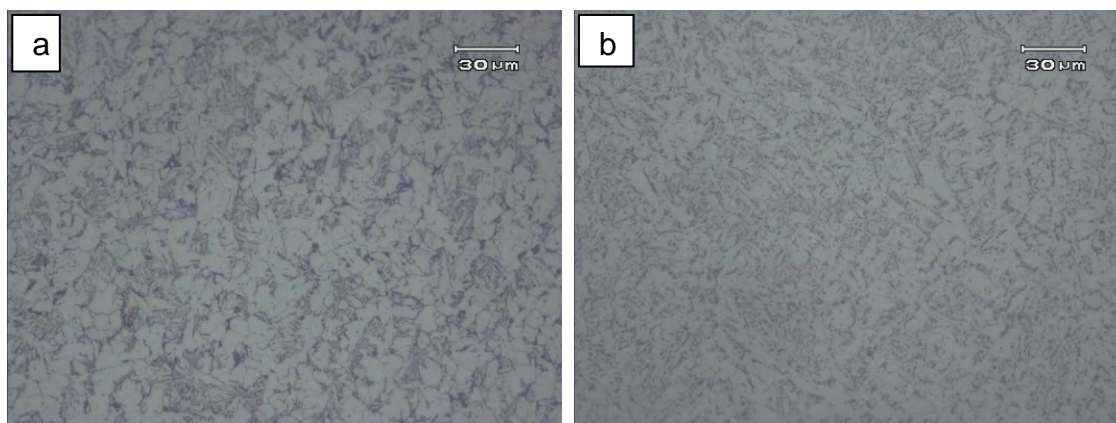


Figura 7. Metalografias do metal de solda como soldado (a), 500X e como tratado (b), 500X.

3.4 Perfil de Dureza

Os resultados obtidos nos perfis de dureza das juntas soldadas, nas condições de como soldado e como tratado, são apresentados na Tabela 6. Os pontos de realização das medidas seguem conforme a Figura 2.

Tabela 6. Valores obtidos na realização do perfil de dureza Vickers

PERFIL DE DUREZA VICKERS - COMO TRATADO												
	MB	ZAC				MS			ZAC			MB
PERFIL SUPERIOR	120	151	155	164	194	180	185	180	173	165	120	
PERFIL INFERIOR	120	146	147	151		133		142	149	138	120	
PERFIL DE DUREZA VICKERS - COMO SOLDADO												
	MB	ZAC				MS			ZAC			MB
PERFIL SUPERIOR	120	151	155	164	194	180	185	180	173	165	120	
PERFIL INFERIOR	120	162	168	169		158		175	176	169	120	

3.5 Ensaio de CTOD

A Tabela 7 apresenta os valores e os resultados obtidos para os ensaios de tenacidade à fratura, sendo quatro corpos de prova na condição de como soldado (CS) e quatro na condição de como tratado (CT).

Tabela 7. Valores e resultados do ensaio de CTOD para CS e CT

Corpo de Prova	Condição	V_p (mm)	P_m (N)	CTOD δ_m (mm)
1	CS	1,26	4509	0,35
2		1,34	4967	0,36
3		1,34	4737	0,36
4		1,58	5174	0,46
Média				0,38
Incerteza				0,08
5	CT	1,57	4722	0,41
6		2,15	4482	0,56
7		1,7	4608	0,43
8		1,76	4530	0,47
Média				0,47
Incerteza				0,11

Percebe-se que na condição de como tratado (CT) o valor médio de CTOD apresentou resultado superior à condição de como soldado (CS). Pode-se atribuir esse comportamento a microestrutura mais refinada do metal de solda. Além disso, todos os resultados da condição CT foram superiores aos requisitos mínimos da norma Petrobras N-1859,⁽¹⁾ enquanto que um dos resultados da condição CS apresentou valor inferior ao estabelecido pela norma (CTOD $\geq 0,35\text{mm}$). Todos os valores de CTOD para todas as amostras ensaiadas correspondem ao valor de carga máxima como poder ser visto na Figura 8.

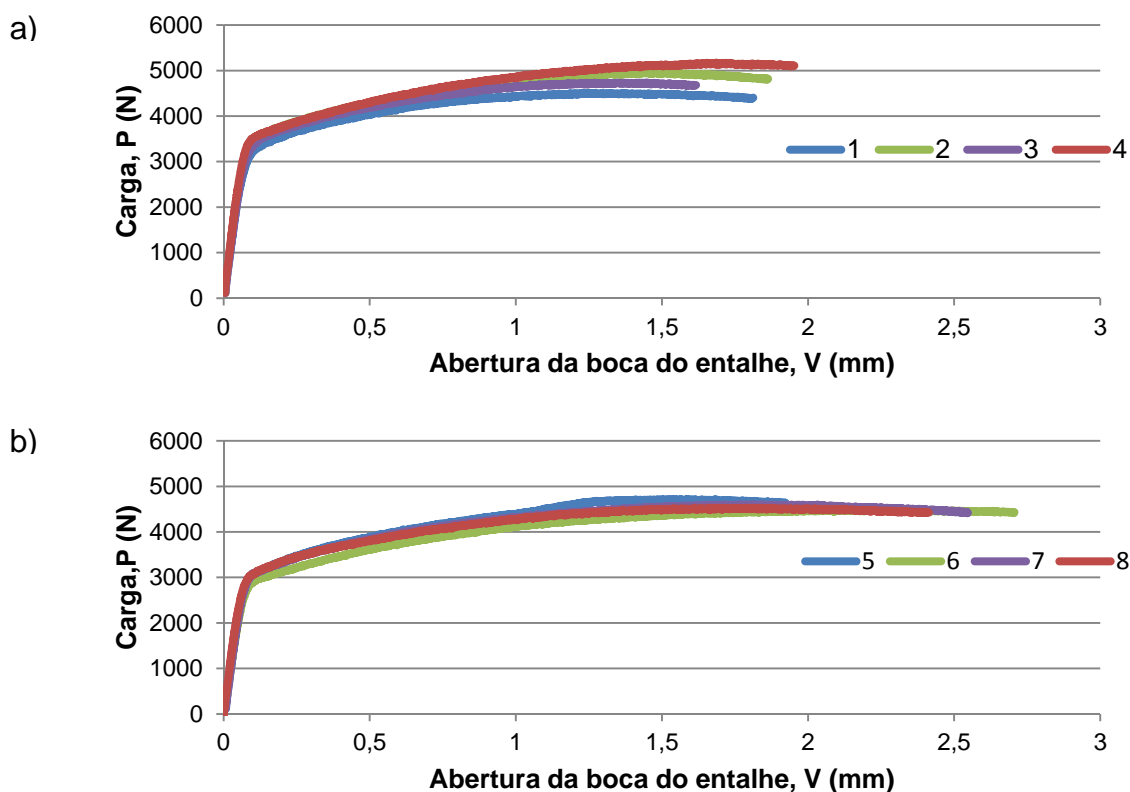


Figura 8. Curva Carga versus Abertura da boca do entalhe para condição como soldado (a) e como tratado (b).

Depois da realização dos ensaios de CTOD, mediu-se o tamanho inicial de trinca (a_0) para todas as amostras segundo a norma BS EN ISO 15653⁽²⁾ através de nove medidas ao longo da espessura com o auxílio de um projetor de perfil. A Figura 9 apresenta uma amostra na qual foi realizada a medição do a_0 .

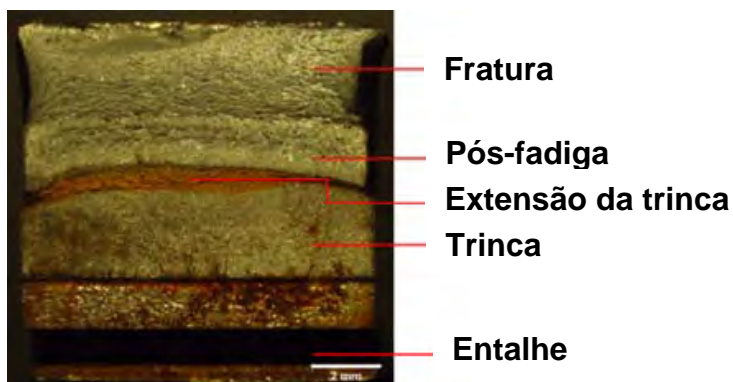


Figura 9. Fractografia mostrando as principais regiões.

Utilizando as mesmas amostras analisou se as fractografias através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) para que pudéssemos observar o micromecanismos de fratura das juntas soldadas. A Figura 10 apresenta uma fractografia representativa para cada condição ensaiada.

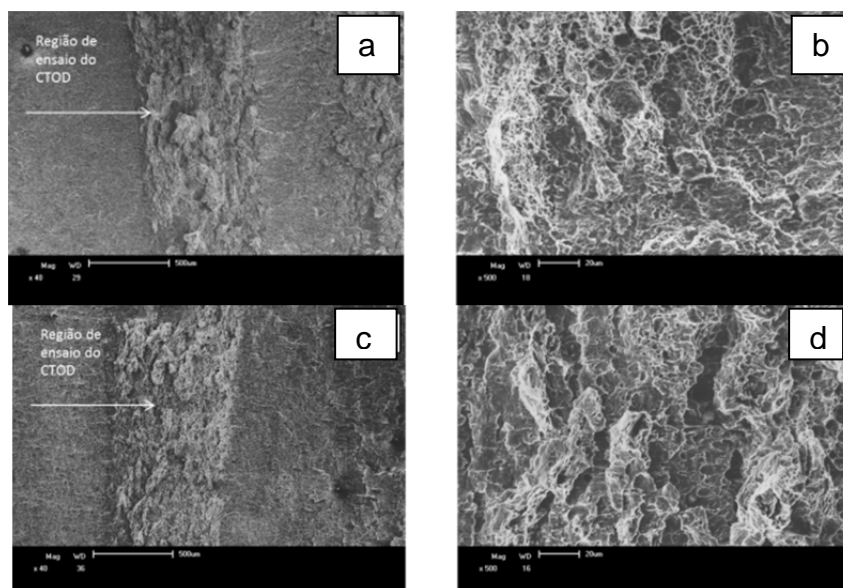


Figura 10. Fractografia (a) região onde propagou o ensaio de CTOD (CS) - 40X, (b) superfície da fratura do CP (CS) - 500X, (c) região onde propagou o ensaio de CTOD(CT) - 40X, (d) superfície da fratura do CP (CT) - 500X.

A partir da Figura 10 percebe-se que em ambas as condições a fratura ocorreu por coalescência de microcavidades, iniciadas geralmente nas inclusões de sulfetos presentes no material, aspecto que possivelmente configurou em uma fratura dúctil.

3.6 Ensaio de Charpy

Para a determinação dos valores de energia de impacto absorvida em função da temperatura do material, foi utilizado um conjunto de 12 corpos de prova, dos quais 6 corpos de provas para cada condição de ensaio (CS) e (CT). A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos no ensaio.

Tabela 8. Resultado da energia absorvida pelos corpos de prova

Corpo de Prova	Condição	Energia Absorvida (J)
1	CS	148
2		121
3		139
4		142
5		120
6		128
Média		133
7	CT	172
8		172
9		176
10		154
11		230
12		180
Média		180

4 DISCUSSÃO

Primeiramente, pode-se observar que a dureza do metal de solda em ambas as condições obtiverem valores absolutos maiores que as outras zonas observadas, tais como a ZAC e o metal de base. Isto se deve pelo fato de que o metal de adição tem valores de resistência maior que o do metal de base, caracterizando a junta soldada como em condição de *overmatching*.

Considerando a norma BS EN ISO 15653⁽²⁾ para validação dos ensaios de CTOD do conjunto de corpos de prova ensaiados, onde para condição CS o mínimo é de $\delta_m = 0,35$ mm e para condição CT é de $\delta_m = 0,25$ mm, o valor de CTOD será respectivamente $\delta_m = 0,35$ e $\delta_m = 0,41$. Portanto, como nenhum CP ficou abaixo do limite mínimo para cada condição, o lote foi considerado adequado segundo a norma Petrobras N-1859.⁽¹⁾

Observa-se a configuração de uma fratura dúctil proveniente do coalescimento de microcavidades com base na análise das fractografias. Quando a estrutura trincada é carregada, surge uma tensão e deformação local na ponta da trinca suficiente para a nucleação de cavidades. Essas cavidades crescem e eventualmente se ligam a trinca principal.⁽⁸⁾

Analisando os resultados do ensaio Charpy, constatou-se que a avaliação da tenacidade ao impacto dos corpos de prova ficou consideravelmente acima dos valores mínimos exigidos por norma. A energia absorvida individual mínima de cada corpo de prova na condição (CS) e (CT) ficou acima de 29,5J, como previsto pela norma Petrobras N-1859.⁽¹⁾ Portanto, tanto a energia mínima individual, quanto a energia média mínima do conjunto de corpos de prova para esta condição CS e CT foi aprovado de acordo com a norma.

5 CONCLUSÃO

Analisando os perfis de dureza ficou evidente a influência do *overmatchting* do eletrodo revestido utilizado em relação ao metal de base.

Na análise do ensaio de CTOD, percebeu-se que, em ambas as condições de serviço, o consumível utilizado teve resultados satisfatórios em relação aos níveis mínimos aceitáveis por norma, CS: $\delta_m = 0,35$ mm e CT: $\delta_m = 0,41$ mm.

Analisando os resultados do ensaio Charpy, constatou-se que a avaliação da tenacidade ao impacto dos corpos de prova ficou consideravelmente acima dos valores mínimos exigidos por norma.

Ficou evidenciado o melhor desempenho do consumível para condição de como tratado para os ensaios de CTOD e Charpy. Este desempenho pode estar relacionado à eficiência do tratamento térmico realizado para alívio de tensões.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CNPQ pelo apoio e a empresa UTC Engenharia pelo suporte.

REFERÊNCIAS

- 1 Petrobras, N-1859 ver. E – Consumível de Soldagem com Propriedade Assegurada – Agosto de 2005.
- 2 BS EN ISO 15653: Metallic materials - Method of test for the determination of quasistatic fracture toughness of welds. 2010.

- 3 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM E 23: Standard Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. Philadelphia, PA, 1989.
- 4 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E3-95: Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. West Conshohocken, PA, 1993.
- 5 Petrobras, N-133 rev. J – Soldagem – Julho de 2005.
- 6 HAAG, J. et al. Avaliação da tenacidade à fratura de uma junta soldada através do ensaio de ctod em aço API 2h grau 50. CONTRIBUIÇÃO TÉCNICA AO 67^o CONGRESSO ABM - INTERNACIONAL, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. p. 1458-1459.
- 7 FARRAR, R. A., HARRISON, P. L. Acicular ferrite in carbon-manganese welds Metals: an overview. Journal of Materials science 22, 1987. p 3812-3820.
- 8 ANDERSON, T. L. Fracture Mechanics - Fundamentals and Applications, 3ed. Boca Raton, CRC Press, 2005.