

TENACIDADE NA JUNTA SOLDADA DE AÇOS API-DNV, FABRICADOS POR LAMINAÇÃO CONTROLADA SEGUIDA DE RESFRIAMENTO ACELERADO ¹

João Mauricio Godoy²
Benedito Carlos Cavalheiro³

Resumo

Este trabalho apresenta valores de tenacidade à baixa temperatura obtidos na junta soldada de tubos fabricados a partir de chapas de aço laminadas a quente seguido de resfriamento acelerado. Os valores reportados são resultados de testes de CHARPY “V” e CTOD, aplicados em corpos de prova retirados do metal de solda e da zona termicamente afetada. A utilização destes aços na fabricação de tubos soldados por processo arco-submerso em dois passes utilizando arcos múltiplos, tem apresentado resultados de tenacidades confiáveis e superiores aos obtidos a partir de chapas laminadas pelo processo de laminação controlada sem resfriamento acelerado, principalmente em espessuras de 16 mm e superiores. Os requisitos do teste de tenacidade especificados pela norma DNV-OS –F101 aplicados em tubos fabricados de acordo com a norma API 5L, são considerados críticos. A criticidade é função dos valores mínimos a serem obtidos e também da frequência estabelecida para ser aplicada em cada corrida de aço utilizada na produção de cada item de fabricação.

Palavras-chave: Tenacidade; Junta soldada; Tubo de aço; Laminação controlada; Resfriamento acelerado.

TOUGHNESS IN THE WELDED JOINT OF API-DNV STEELS MANUFACTURED BY THERMO-MECHANICAL PROCESS(TMCP) PLUS ACCELERATED COOLING(ACC)

Abstract

This paper presents low temperature toughness values, obtained of welded pipes manufactured from hot rolled followed by accelerated cooling steel plates. The reported values are the results of Charpy “V” and CTOD tests applied on specimens removed from the weld metal and from the heat affected zone. The application of this type of steel on the manufacture of multi-arc two pass submerged-arc pipes, has presented trustful values and higher than the values obtained from controlled rolling without accelerated cooling steel plates, mainly for 16 mm and upper wall thickness. The toughness test requirements specified by DNV–OS-F101 to be applied on pipes manufactured in accordance to the API 5L, are considered critical. The criticality is function of the minimum values to be reached and also to the test frequency to be applied on each steel heat used for each production item.

Key words: Toughness; Welded joint; Steel pipe; Controlled rolling; Accelerated cooling.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Membro da ABM, Mestrando em Engenharia de Materiais FEG-UNESP, Departamento da Qualidade da TenarisConfab.*

³ *Técnico em Metalurgia, Departamento da Qualidade da TenarisConfab.*

1 INTRODUÇÃO

A demanda em propriedades mecânicas da junta soldada de tubos fabricados seguindo a especificação API 5L em graus até X80, tem mostrado que para espessuras de 16 mm e maiores, ocorre uma comprovada dificuldade em cumprir com os valores de tenacidade em temperaturas de teste de -10°C (menos dez graus Celsius) e mais baixas. A dificuldade é ainda mais relevante nos testes feitos em corpos de prova retirados da zona termicamente afetada (ZTA), principalmente os localizados na linha de fusão e à 2 mm da linha de fusão.

Está bem conhecido que uma microestrutura bainítica de baixo carbono (ferrita acicular) apresenta uma excelente combinação de resistência e tenacidade, especialmente quando formada a partir da austenita não recristalizada.

Os projetos recentes de tubulações para instalação principalmente *offshore* especifica aços com composição química e limpidez que seleciona o roteiro de fabricação na usina siderúrgica indicando o uso de desgaseificação a vácuo, tratamento com cálcio e microligantes nos processos de aciaria e é finalizado por uma laminação em processo controlado termomecanicamente seguido de resfriamento acelerado.

1.1 Antecedentes

Durante as últimas décadas, as indústrias siderúrgicas dirigiram seus esforços na produção de aços com alta tenacidade, melhor soldabilidade e redução no uso de elementos de liga devido ao custo destes. Concorrentemente, tem sido a tendência, o uso de aços de alta resistência para reduzir o peso e assim reduzir os custos de fabricação. Isto tem sido parcialmente possível pela introdução dos aços controlados termomecanicamente os quais combinam a laminação controlada com resfriamento acelerado.

Como abordado por Gray,^[1] a composição química tem um profundo efeito na microestrutura, nas propriedades mecânicas, na soldabilidade e na resistência à corrosão dos aços de construção das tubulações e também impacto no custo de fabricação do aço.

Através da laminação controlada tornou-se possível reduzir o carbono equivalente de chapas grossas e ainda uma considerável redução no percentual dos elementos de liga, possível devido ao vigoroso refinamento do tamanho de grão. Este novo recurso colocado em prática permitiu a simultaneidade do aumento do limite de escoamento e da tenacidade.

Os aços para fabricação de tubos soldados tem evoluído continuamente desde 1959, conforme citado por Gray,^[1] e atualmente estão disponíveis com Limite de Escoamento de até 100Ksi (689 Mpa) ou em desenvolvimento com L.E. até 120 Ksi (827 MPa).

1.2 Laminação Controlada Termomecanicamente e Resfriamento Acelerado

Com a finalidade de obter microestrutura homogênea de grãos refinados, melhoria de resistência mecânica, melhoria na tenacidade e ainda melhoria na resistência ao trincamento induzido por hidrogênio, em comparação aos aços produzidos por laminação convencional, o processo de resfriamento acelerado foi introduzido como etapa adicional no processo de laminação controlada termomecanicamente.

O processo metalúrgico que ocorre durante a laminação controlada termomecânica em conjunto com o resfriamento acelerado pode ser explicado esquematicamente a partir da Figura 1, onde os mais importantes estágios e parâmetros a ser controlados são ilustrados.

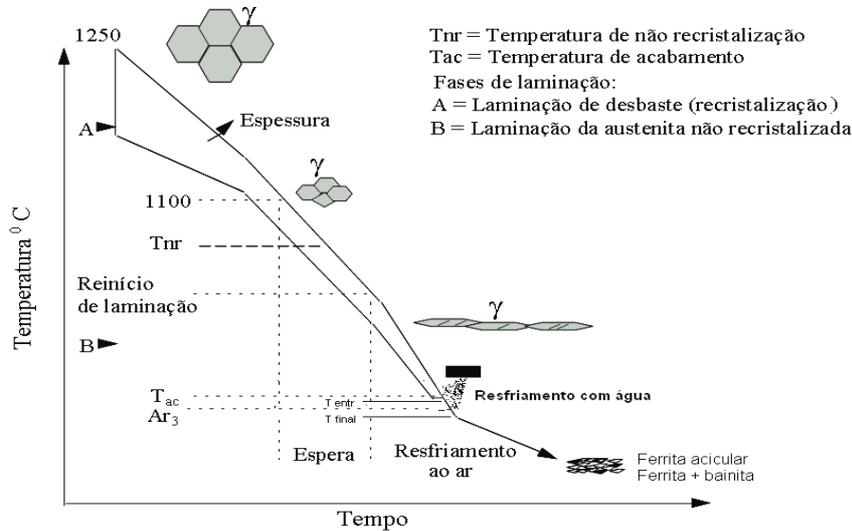


Figura 1- Representação esquemática do processo de laminação controlada com resfriamento acelerado.

A laminação controlada é o processo pelo qual os vários estágios de laminação têm temperatura controlada, sendo ainda a quantidade de redução pré-determinada em cada passe e a temperatura de acabamento precisamente definida. Este processamento é largamente utilizado para obtenção de aços destinados a dutos, estruturas offshore e outras aplicações de engenharia. O objetivo básico da laminação controlada é deformar os grãos de austenita durante o processo de laminação para obtenção de grãos de ferrita finos durante o resfriamento. Isto resulta em um aumento (simultâneo) de resistência e tenacidade e tem possibilitado a redução da quantidade de carbono nos aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), melhorando a soldabilidade destes aços. Normalmente para se obter um menor tamanho de grão de ferrita, utiliza-se laminar a austenita em temperaturas (T_{nr}) onde a recristalização não ocorra. Nesta região, proporciona-se a maior redução possível em intervalos de temperatura (antes do início da transformação da ferrita) para que a austenita seja deformada sem recristalizar. Relacionado ao gráfico da Figura 1, esta faixa de temperatura varia de 950°C até a temperatura A_{r3} (abaixo desta haverá formação de ferrita). Como o tempo para recristalização entre os passes é insuficiente, podem-se obter grãos de ferrita, no resfriamento posterior, com tamanhos da ordem de $3\ \mu\text{m}$ a $6\ \mu\text{m}$.

1.3 Tubos de Aço Formados por Prensagem e Soldados por Arco Submerso.

Brensing e Sommer^[2] citam em seu trabalho que, já em 1825, James Whitthouse patenteou o processo de fabricação de tubo soldado. Em 1931, o processo de soldagem de topo em 1 passe, nomeado como processo Fretz-Moon foi estabelecido. Na atualidade, os processos de soldagem por fusão predominam e são usados extensivamente na produção de tubos de diâmetros a partir de $323,9\ \text{mm}$ ($12\ 3/4''$).

Os pré-requisitos essenciais para fabricação de tubos de aço, para que cumpram os mais altos parâmetros de qualidade, é a existência de eficientes equipamentos de fabricação e tecnologias atualizadas de controle da qualidade. O registro e arquivo de dados gerados nos vários estágios de produção e os testes realizados são requisitos mandatórios da especificação API 5L,^[3] sendo atualmente feito por meio de um sistema informatizado integrado. Um sistema informatizado é classificado como integrado quando engloba todos os estágios de fabricação, desde a fabricação da chapa na siderúrgica até a liberação do tubo para instalação, e assegura uma completa rastreabilidade de dados. A rastreabilidade é um requisito indispensável para que as fábricas de tubos sejam qualificadas e licenciadas por agências certificadoras e pelas companhias usuárias, como por exemplo, agências como: API, Loyds Register, Bureau Veritas, Det Norske Veritas e companhias como: Petrobras, Shell, ExxonMobil, Acergy, Aramco, British Petroleum, Total, Agip, Comgas, Enagas, etc.

1.4 Estudo da Zona Termicamente Afetada de Solda por Arco Submerso

Na soldagem por Arco Submerso, a seleção de valores apropriados para os parâmetros de soldagem (tensão, corrente e velocidade de soldagem) é essencial para o controle do tamanho da zona termicamente afetada, e também para obtenção do cordão de solda com dimensões e qualidade adequadas. Conforme Gunaraj e Murugan,^[4] em qualquer processo de soldagem a microestrutura da região soldada é afetada por consideráveis mudanças em função dos ciclos de aquecimento e resfriamento inerentes ao processo específico que se está empregando. No entanto, somente é possível a obtenção da junta soldada com propriedades adequadas se a microestrutura da zona termicamente afetada tiver propriedades adequadas. Em geral, alguns dos parâmetros de soldagem e algumas condições operacionais influenciam as características da microestrutura da zona termicamente afetada, e assim determinando as propriedades tais como dureza, tenacidade e susceptibilidade ao trincamento. Excessivo aporte de calor, por exemplo, pode conduzir na obtenção de uma zona termicamente afetada muito larga e com valores baixos de energia obtidos no ensaio de Charpy, particularmente tratando se do processo de soldagem por Arco Submerso.

Do ponto de vista metalúrgico, a zona termicamente afetada pode ser dividida em 4 regiões, a saber: (1) região de grãos grosseiros, (2) região de normalização, (3) região intercrítica e (4) região subcrítica, como podem ser visto na Figura 2.

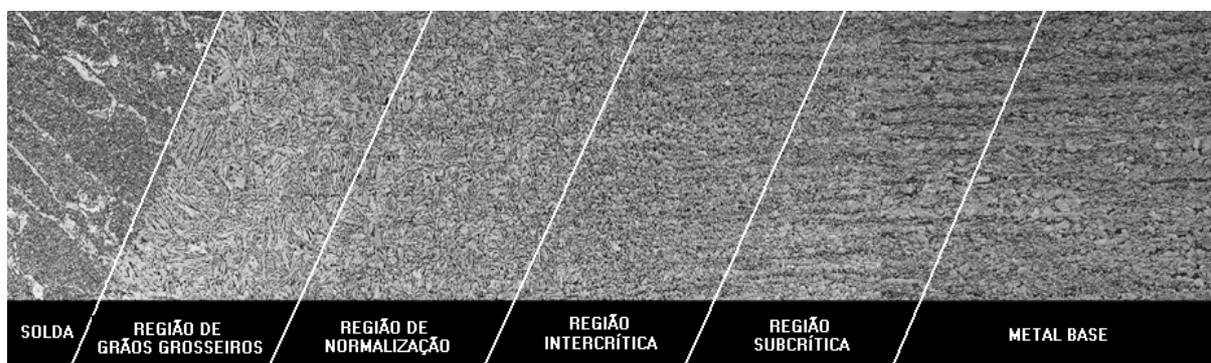


Figura 2- Diferentes áreas da ZTA

Na prática, como recurso para um controle de propriedades nestas regiões, usa-se impor limite máximo ao aporte de calor, pois este afeta diretamente a extensão da zona de crescimento de grãos e o ciclo térmico. As mudanças de microestrutura das zonas intercríticas e subcríticas já são muito menores e concorrem com influência menor nas propriedades da junta soldada.

Liessem e Erdelen-Peppler,^[5] em estudo sobre a significância da tenacidade na zona afetada termicamente da solda longitudinal de tubos de aço, abordaram o fato de que dentro da zona termicamente afetada ao longo do comprimento da solda, ocorrem regiões discretas com microestrutura propensa a apresentar baixos valores de tenacidade, e que não podem ser evitadas. Estas regiões são comumente denominadas de zonas de fragilidade localizadas (ZFL). A natureza destas zonas tem sido intensamente investigada, e seu conhecimento é amplamente explorado atualmente na tecnologia de fabricação dos aços, na laminação de chapas e na fabricação de tubos.

A tenacidade na ZTA é melhorada pela redução de constituintes MA e pelo refinamento dos grãos austeníticos, mas isto não impede áreas localizadas de baixa tenacidade dentro da região de granulometria mais grosseira da ZTA. Na prática, isto tem sido amplamente aceito porque a confiabilidade estrutural de tubos soldados produzidos e inspecionados através de métodos muito precisos, mostra não apresentar influência devido a que estas regiões de baixa tenacidade são de tamanho e localização limitadas. Isto foi comprovado através de numerosos programas de testes em escala real onde se executaram testes de Charpy, CTOD e teste de Estouro (Burst Test). A conclusão destes programas de testes é que a fratura na ZTA de tubos soldados ocorre a partir de defeito com tamanho crítico no sentido da espessura, e é independente da tenacidade. Entretanto, muitas especificações de fabricação de tubos de aço, estabelecem um critério específico para os valores de tenacidade na ZTA, e no caso de falhas nestes testes, um programa de retestes está definido para estabelecer as condições de aceitação do lote de produção.

1.4.1 Variáveis de Processo

As variáveis de processo as quais afetam a geometria do cordão e a qualidade da junta soldada são: Tensão do Arco (V =Volts), Velocidade de alimentação dos eletrodos (F =m/min), Velocidade de soldagem (S =m/min) e Distância bocal-peça (N =mm). Podem ser controladas independentemente de forma manual ou automaticamente por meio de programa de computador.

a) Tensão do arco

Gunaraj e Murugan,^[4] em estudo para simular as características da zona termicamente afetada, partindo da constatação de vários pesquisadores: Linnert (1994), Lancaster (1987), Patchet (1987) e outros de que a tensão do arco (Volts) não tem efeito significativo na dimensão da zona termicamente afetada, chegaram a resultados diferentes. Foi constatado que a tensão do arco (V) tem um efeito menor que a velocidade de alimentação do eletrodo (F), mas, no entanto, um aumento de “ V ” representa um aumento no tamanho da ZTA. A explicação é dada pelo fato de que aumentando “ V ”, há um aumento do aporte de calor (heat input), e assim uma redução na taxa de resfriamento.

b) Velocidade de alimentação dos eletrodos

A largura da ZTA é afetada pela variação de “F”, de maneira que um aumento de “F” representa um aumento na largura da ZTA, porque há um aumento do aporte de calor, e assim uma redução na taxa de resfriamento.

c) Velocidade de soldagem

É comprovado por muitos pesquisadores que a velocidade de soldagem é o principal fator para controle do aporte de calor e da largura da ZTA.

Sendo o aporte de calor inversamente proporcional à velocidade de soldagem, qualquer aumento de “S” representa um decréscimo do aporte de calor. A equação básica para cálculo do aporte de calor é:

$$AC = A \times V / S \quad \text{onde,} \quad (1)$$

AC = Aporte de calor (heat input) (KJ/cm)

A = Corrente de Soldagem (Amperes)

V = Tensão do Arco (Volts)

S = Velocidade de Soldagem (cm/min)

d) Distância bocal-peça

Esta variável é a que menos tem influência na largura da ZTA, pois embora haja um pequeno decréscimo no tamanho da ZTA com um aumento da distância bocal-peça, este decréscimo é muito pequeno, não interferindo nas propriedades mecânicas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Para realização deste trabalho foi utilizado uma de produção de tubos de 610 mm de diâmetro e 22,2 mm de espessura, fabricados conforme as normas API 5L^[3] e DNV-OS-F101.^[6] As chapas utilizadas foram fabricadas pelo processo de laminação controlada, seguida de resfriamento acelerado para atender ao grau X65 da norma API 5L.^[3]

2.1.1 Caracterização do material do tubo

Na Tabela 1, apresentamos a composição química típica do aço utilizado no processamento dos tubos .

Tabela 1 – Composição química típica do aço utilizado (% em peso)

C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Nb	Cr	V	Mo	N	Ti
0,04	1,50	0,007	0,001	0,34	0,015	0,018	0,041	0,170	0,006	0,005	0,004	0,015

Na figura 3 é apresentada uma distribuição estatística comparativa das propriedades mecânicas, em relação às variações entre chapa & tubo, obtidas durante a etapa de produção.

Esta comparação de propriedades na Chapa x Tubo é feita principalmente porque o requisito da norma API 5L é sobre valores obtidos em corpos de prova retirados do tubo pronto.

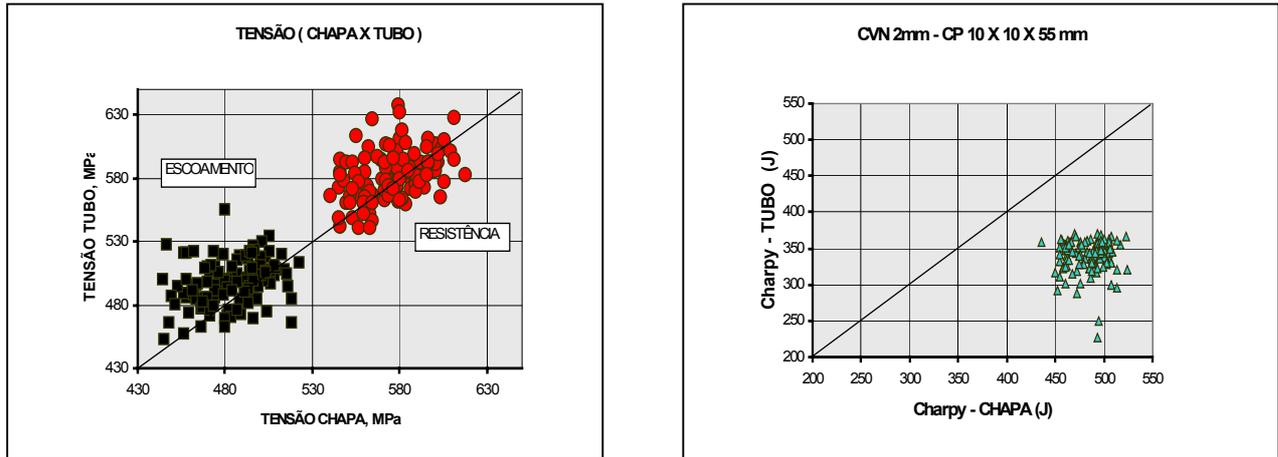


Figura 3 – Estatística de propriedades mecânicas

2.1.2 Caracterização do processo de soldagem por arco submerso

Os tubos foram soldados longitudinalmente, primeiro pelo lado interno, com o processo de 3 (três) arames e posteriormente pelo lado externo utilizando um processo de 4 arames. Detalhes da especificação de soldagem e dos consumíveis utilizados podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de soldagem

PASSE	INTERNO				EXTERNO			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Posição do Arame	1	2	3	4	1	2	3	4
Tipo do Arame	EA2	EA2	EA2	-	EA2	EA2	EA2	EA2
Calor Fornecido (Kj/cm)	42,5				43,6			

2.2 Métodos

2.2.1 Ensaio de Charpy “V”

Foi realizado em corpos de prova de dimensões 10x10x55 mm retirados do metal base, solda e ZTA. Ensaio realizado conforme norma ASTM

2.2.2 Ensaio de CTOD

Foi realizado em corpos de prova do tipo SE(B) de dimensões 40x270x20 mm retirados do metal base, solda e ZTA. A pré-trinca de fadiga foi realizada por máquina servo-hidráulica, sendo os entalhes nos corpos de prova feitos na mesma localização dos realizados nos corpos de prova de Charpy.

2.2.3 Micrografia

A preparação das amostras foi por lixamento e polimento em padrão micrográfico, seguido de ataque com Nital 3% e a análise foi feita por meio de Microscópio Ótico, com aumento de 200X.

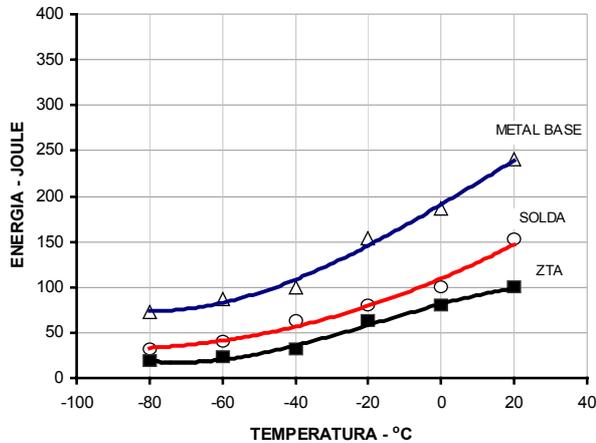
2.2.4 Análise química

A análise química foi realizada por Espectrometria de Emissão Ótica à Vácuo.

3 RESULTADOS OBTIDOS

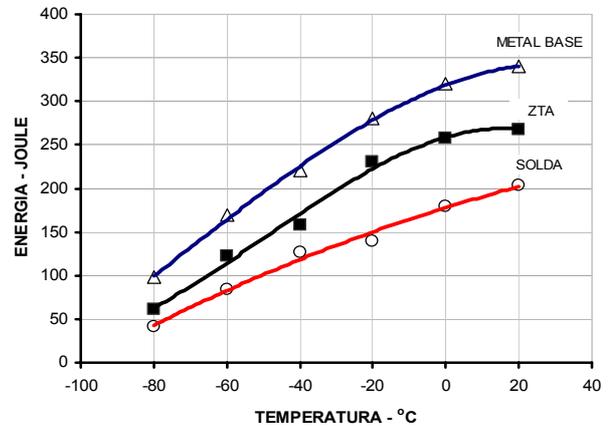
3.1 Curva de Transição-Ensaio Charpy “V “

CVN 2mm - CP 10 x 10 mm

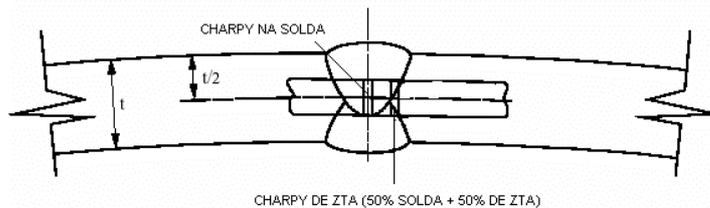


(a) Aço convencional

CVN 2mm - CP 10 x 10 mm



(b) Aço de resfriamento acelerado



(c) Localização do entalhe

Figura 4 – Curva de Transição de Charpy (teste conforme ASTM A 370)

3.2 Ensaio de CTOD-Corpos de Prova SE(B)

Tabela 3 – Resultados de CTOD

CORPO DE PROVA		MODO DE FRATURA	RESULTADO - mm	
			AÇO CONVENCIONAL	AÇO DE R. ACELERADO
METAL BASE	1	δ_m	0,56	1,56
	2	δ_m	0,54	1,60
	3	δ_m	0,46	1,58
ZTA	1	δ_m	0,18	0,92
	2	δ_m	0,23	1,24
	3	δ_m	0,21	1,34
SOLDA	1	δ_m	0,27	0,36
	2	δ_m	0,28	0,36
	3	δ_m	0,33	0,48

TEMPERATURA DE TESTE : - 15°C δ_m = carga máxima

4 DISCUSSÕES [7,8]

A zona afetada pelo calor (ZTA) da solda longitudinal de tubos de aço apresenta regiões de microestrutura de reduzida tenacidade conhecidas como zonas de

fragilidade localizada (ZFL). Em razão desta região permanecer por longos períodos a altas temperaturas, excedendo a 1.400°C , os grãos de austenita (γ) crescem notadamente. No processo de resfriamento após soldagem, a tenacidade da ZTA é reduzida porque a ferrita de 2ª fase forma-se no contorno de grão da austenita durante a transformação $\gamma \rightarrow \alpha$, enquanto no centro a microestrutura é transformada em bainita superior, incluindo constituintes martensita / austenita (M-A). Em geral, chapas de alta resistência tendem a apresentar um aumento no carbono equivalente (Ceq) e como resultado uma tenacidade de ZTA reduzida.

Consequentemente, para melhorar a tenacidade na ZTA, é necessário minimizar os grãos grosseiros e a solução do problema é o uso de um ótimo carbono equivalente, e assim os projetos de ligas para aços que serão laminados a quente seguidos por resfriamento acelerado são mais compatíveis.

A microestrutura na ZTA de um aço convencional e com resfriamento acelerado em solda por Arco submerso estão mostradas nas Figuras 5 e 6.

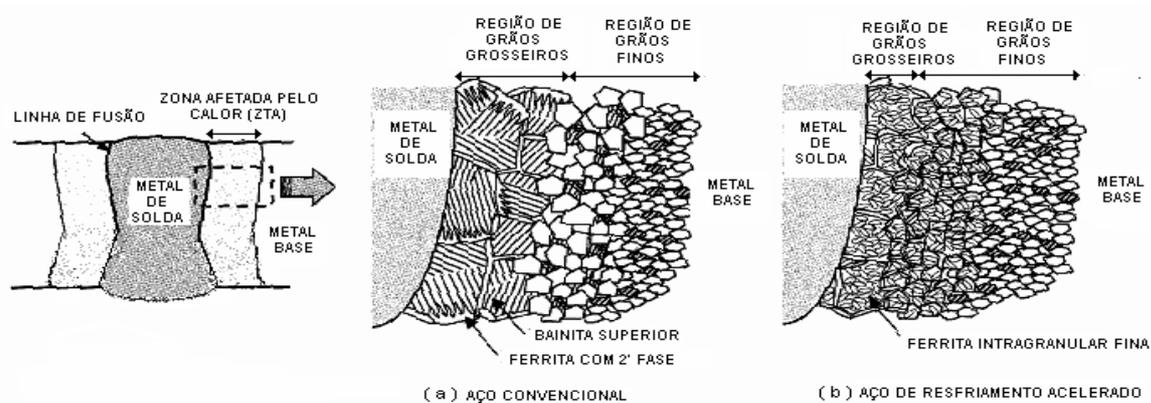
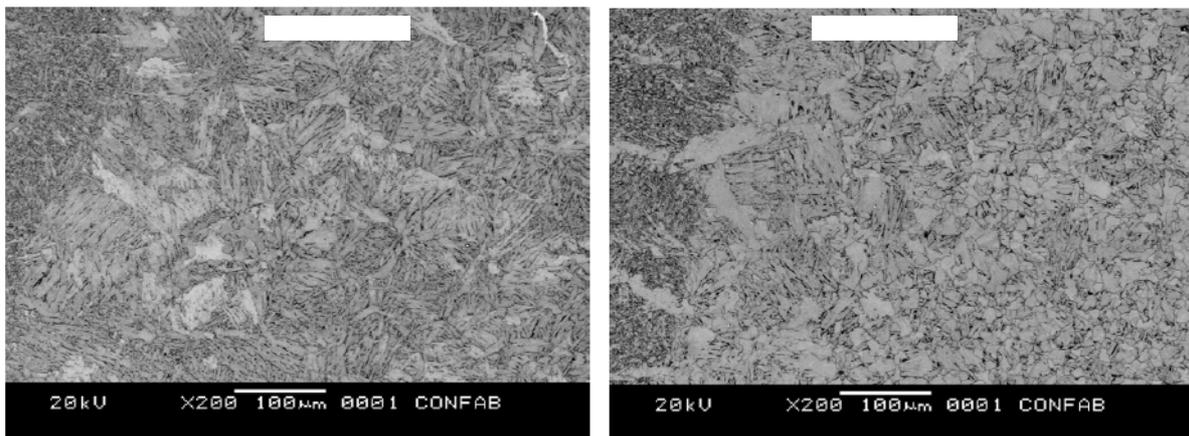


Figura 5 – Diagrama esquemático de uma junta soldada com alto aporte de calor



(a) Aço convencional

(b) Aço de resfriamento acelerado

Figura 6 – Comparativo de microestrutura da ZTA, Nital 3%.

5 CONCLUSÕES

Tubos de aço com requisito de tenacidade à baixa temperatura são fabricados por soldagem a arco-submerso em dois passes. A alta produtividade necessária para tornar os projetos economicamente viáveis, remetem ao uso de processo solda com alto aporte de calor que podem impactar na tenacidade da região adjacente ao

cordão de solda. Para prover uma zona afetada com alta tenacidade, o refino da microestrutura próximo à linha de fusão torna-se essencial e isto vem sendo estudado há décadas. As técnicas e as práticas de fabricação das chapas de aços e soldagem de tubos foram desenvolvidas e melhoraram a tenacidade da zona afetada pelo calor, tornando-se um padrão de referência para os usuários e fabricantes de tubos. O fator que mais contribuiu para este sucesso foi obtido na laminação da chapas de aço. Com o advento da laminação controlada, seguida de resfriamento acelerado (accelerated cooling) conseguiu-se produzir aços de alta resistência sem lançar mão dos elementos de liga e, com isto, baixou-se consideravelmente o poder de temperabilidade dos aços, promovendo uma zona afetada mais estreita e com microestruturas mais favoráveis a obtenção de alta tenacidade. Os requisitos de tenacidade, charpy e CTOD, especificados pela norma DNV-OS-F101,^[6] aplicados a tubos fabricados conforme a norma API 5L^[3] são consideravelmente críticos, mas alcançáveis se bem trabalhados durante a qualificação do processo de soldagem utilizando esta nova geração de aços.

Agradecimentos

Agradecemos a TenarisConfab pela oportunidade oferecida para podermos desenvolver este estudo, através de disponibilização dos laboratórios e os materiais para os testes.

REFERÊNCIAS

- 1 Gray, J. Malcom-A Guide for Understanding & Specifying Chemical composition of High Strength Linepipe Steels-Technical Report of EWI MICROALLOYING (July, 2007).
- 2 Brensing, K. H., Sommer, B.-Steel Tube and Pipe Manufacturing Process-1993.
- 3 Americam Petroleum Institute-Specification for Line Pipe. API 5L, 43rd Edition 2004.
- 4 Gunaraj, V., Murugan N.-Prediction of Heat Affected Zone Characteristics in Submerged Arc Welding of Structural Steel Pipes. Welding Journal (2002).
- 5 Liessem, A., Erdelen-Peppler, M.-A Critical View on the Significance of HAZ toughness testing. International Pipeline Conference IPC 2004-Calgary, Canadá.
- 6 Offshore Standard DNV-OS-F01 – Submarine Pipeline Systems, Edition 2003
- 7 Terada, Y., Kojima, A., Nakahima, T.- High-strength Linepipes with Excellent HAZ Toughness. Nippon Steel Technical Report No.90 July 2004.
- 8 Suzuki, S., Ichimiya, K., Akita, T.- High Tensile Strength Steel Plates with Excellent Toughness for Shipbuilding. JEF Technical Report No 5 Mar. 2005.