

INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO DE ALÍVIO DE TENSÕES NA TENACIDADE AO IMPACTO DE AÇOS ESTRUTURAIS SOLDADOS COM ARAME TUBULAR RUTÍLICO ¹

José Mauro Moraes Júnior²

Resumo

Neste trabalho foi investigada a influencia do tratamento térmico de alívio de tensões na tenacidade ao impacto de juntas soldadas com arame tubular rutílico. Uma junta de aço estrutural com 60 mm de espessura foi soldada na posição vertical ascendente. Uma metade desta junta foi tratada termicamente para alívio de tensões, e a outra mantida como soldada. Foi realizado ensaio de impacto Charpy-V em ambas condições. Comparando os resultados, observa-se uma queda da tenacidade após tratamento térmico. Analisando as superfícies dos corpos de prova Charpy-V rompidos pode-se observar uma maior fração de superfície característica de fratura frágil nos CP's tratados termicamente em relação aos CP's mantidos como soldado. Não foi identificada mudança significativa na microestrutura obtida por microscopia óptica e não foi identificada precipitação na escala MEV após tratamento térmico, exigindo um estudo mais criterioso, utilizando microscópio eletrônico de transmissão (MET).

Palavras-chave: Arame tubular rutílico; Tratamento térmico; Alívio de tensões; Tenacidade ao impacto.

INFLUENCE OF POSTWELD HEAT TREATMENT IN IMPACT TOUGHNESS OF STRUCTURAL STEELS WELDED BY RUTILE FLUX-CORED

Abstract

On this paper was investigated the influence of postweld heat treatment in impact toughness of joints welded with rutile flux-cored. One joint of structural steel with 60 mm thickness was welded on an ascending vertical position. Half of this joint was heat treated for stress relief, and the other half was kept as welded. Charpy-V impact test was carried out on both conditions. Comparing the results, it can be observed a decrease on the toughness after the heat treatment. Analyzing the surfaces of Charpy-V test broken samples it can be observed a higher percentage of characteristic surface of brittle fracture on the specimens heat treated than the others. Significant change was not identified in the microstructure analyzed on an optic microscopy and was not identified precipitation on SEM scale after heat treatment, demanding this way a more detailed study, using transmission electron microscopy (TEM).

Key words: Rutile flux-cored wire; Heat treatment; Stress relief; Impact toughness.

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

² *Engenheiro metalúrgico, mestrando em engenharia de materiais na EEL/USP, em Lorena/SP; trainee do departamento de Engenharia Industrial, Confab.*

INTRODUÇÃO

O processo de soldagem Flux Cored Arc Welding (FCAW), ou soldagem com arame tubular, é um processo com alto rendimento, qualidade e produtividade. A utilização de arame tubular dá uma alta qualidade ao metal de solda depositado, excelente aparência ao cordão de solda, boas características de arco, além de diminuir o número de respingos e possibilidade de soldagem em todas as posições de chapas de espessura grossa e fina. Muitas vezes é utilizado em grandes espessuras onde a geometria da junta e a posição de soldagem não permitiriam a aplicação de outros processos de alto rendimento tal como arco submerso ou eletroescória.

Porém, como observado por Vieira,⁽¹⁾ mesmo depois de quase 20 anos do desenvolvimento de arames tubulares rutilicos para alta tenacidade, ainda são poucos os arames capazes de serem utilizados em aplicações que exijam tratamento térmico de alívio de tensões pós-soldagem (PWHT – Postweld Heat Treatment). Nestes arames tubulares, que apresentam excelentes valores de tenacidade na condição como soldados, ao ser aplicado tratamento térmico de alívio de tensões, é observado uma acentuada queda na tenacidade.

Não se sabe exatamente a causa da queda na tenacidade do arame tubular rutilico após tratamento térmico, o que motiva uma investigação mais criteriosa. É importante salientar a falta de literatura sobre o assunto, o que torna o desafio maior.

Aços Estruturais

As propriedades dos aços estruturais variam dependendo do tipo de estrutura que será aplicado e das condições de serviço. Para estruturas *offshore*, por exemplo, usa-se principalmente aço C-Mn de alta resistência, com limite de escoamento entre 350 e 480 MPa. Estas estruturas costumam ter espessuras entre 30 e 90 mm, podendo, em alguns casos, ultrapassar 100 mm.

Processo de Soldagem com Arame Tubular

É um processo de soldagem por fusão semelhante ao processo MIG/MAG, diferindo deste pelo fato de possuir um arame no formato tubular, que possui no seu interior um fluxo composto por materiais inorgânicos e metálicos que possuem várias funções, entre as quais a melhoria das características do arco elétrico, a transferência do metal de solda, a proteção do banho de fusão e em alguns casos a adição de elementos de liga, além de atuar como formador de escória.⁽²⁾

Um tipo de arame tubular muito utilizado é o chamado Arame Tubular Rutilico, que possui rutilo na composição do fluxo. Como descrito por Fortes,⁽³⁾ o rutilo, uma forma de dióxido de titânio (TiO_2), tornou-se a base mais empregada nos eletrodos revestidos nos idos de 1930. Ele permitiu que o ponto de fusão e a viscosidade da escória fossem controlados por uma faixa muito mais larga que a disponível com escórias básicas, de tal modo que fosse possível fabricar eletrodos com escórias consistentes para a soldagem na posição vertical ou escórias fluidas para a soldagem a altas velocidades na posição plana. Adicionalmente, o titânio é um bom estabilizador do arco e é frequentemente adicionado a sistemas básicos, na forma metálica ou mineral, para resultar num arco mais suave.

Tratamento Térmico de Alívio de Tensões

Durante a soldagem por fusão ocorre aquecimento de regiões localizadas das peças, permanecendo o restante destas em temperaturas muito inferiores. As regiões aquecidas tendem a se dilatar, mas esta dilatação é dificultada pelas partes adjacentes submetidas a temperaturas menores, o que resulta no desenvolvimento de deformações elásticas e plásticas no metal aquecido. Como consequência, ao final do processo de soldagem, tensões internas (tensões residuais) e mudanças permanentes de forma e de dimensões (distorções) ocorre na peça. As tensões residuais podem afetar de modo importante a utilidade e o desempenho da estrutura soldada, sendo fundamental o tratamento térmico de alívio de tensões pós-soldagem.⁽⁴⁾

Fortes⁽³⁾ chama a atenção para o fato de que o tratamento térmico de alívio de tensões é realizado tipicamente na temperatura entre 550 – 650 °C, por uma hora para cada polegada de espessura, seguido de um resfriamento lento e uniforme até a temperatura ambiente. Como esta temperatura está abaixo de Ac1, não deve haver mudança significativa na microestrutura do metal base e do metal depositado.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foi usado como metal base neste trabalho um aço C-Mn micro-ligado de alta resistência, fabricado por tratamento termo-mecânico.

As dimensões da junta de teste são 60 x 400 x 1600 mm. A Figura 1 mostra a junta de teste montada. No detalhe pode-se observar a trava usada para fixação das duas partes.

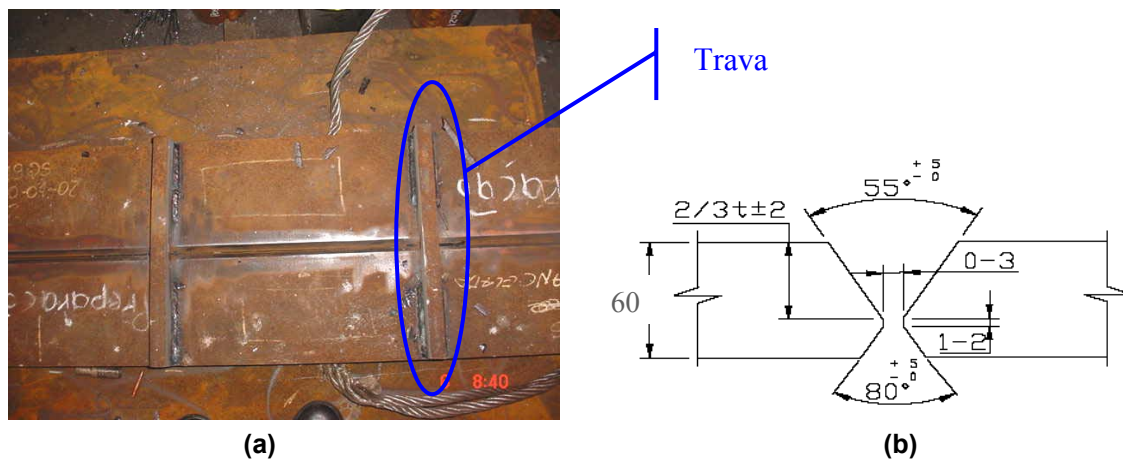


Figura 1– Junta de teste. (a) Junta montada; (b) Croqui do chanfro da junta (dimensões em milímetro).

O arame usado foi o AWS E81T1 Ni1, com 1,2mm de diâmetro. A composição do gás usado é 75%Ar – 25%CO₂.

A Tabela 1 mostra a composição química da solda e do metal base.

Tabela 1 - Composição química.

Elemento	Solda [% wt]	Metal base [% wt]
C	0,05	0,08
Mn	1,41	1,48
P	0,011	0,011
S	0,010	0,005
Si	0,40	0,28
Ni	0,777	0,291
Cr	0,027	0,032
Mo	0,007	0,011
V	0,023	0,003
Ti	0,075	0,008
Nb	0,017	0,019
Al	0,012	0,034
N	0,0048	0,0058
B	0,0067	0,0003
Cu	0,023	0,020
CE*	0,349	0,357

* $CE = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15$ (Carbono Equivalente)

Antes do início da soldagem faz-se um pré-aquecimento das chapas, para diminuir a velocidade de resfriamento, evitando o comprometimento da microestrutura. De acordo com a norma Petrobras N-133, o pré-aquecimento para chapas com espessura de 60 mm deve ser de 125°C. O pré-aquecimento foi feito por chama e foi usado um lápis térmico para controle da temperatura.

Após pré-aquecimento realizou-se soldagem com arame tubular rutilico do primeiro lado (lado A), como mostra a Figura 2. A corrente variou de 194 a 228 A, e a tensão de 24 a 24,6 V. A velocidade foi de 9,38 cm/min próximo à raiz e 22,24 cm/min próximo à superfície. O aporte térmico resultante dos parâmetros anteriores foi de 35,9 kJ/cm na raiz e 12,6 kJ/cm próximo à superfície. A posição de soldagem foi 3G (vertical) ascendente, considerada a mais crítica em relação à resistência ao impacto. Um parâmetro importante é a temperatura interpasses, que não pode ultrapassar 250°C, para não comprometer a microestrutura da região da solda e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas. O controle da temperatura interpasses também foi feito com auxílio do lápis térmico.



Figura 2 – Soldagem da junta de teste

Após a soldagem do lado A virou-se a junta e removeu-se totalmente a solda de ponteamto e parte da raiz por goivagem, utilizando um eletrodo de grafite e posterior esmerilhamento para acabamento.

Após goivagem faz-se ensaio não-destrutivo (END) de partículas magnéticas (MT), conforme norma Petrobras N-1852. Não foi detectada nenhuma descontinuidade. Assim, após aprovação por MT, foi realizado o enchimento e acabamento do outro lado (lado B), com os mesmos parâmetros usados na soldagem do lado A.

A Figura 3 representa, de forma esquemática, a seqüência de soldagem realizada.

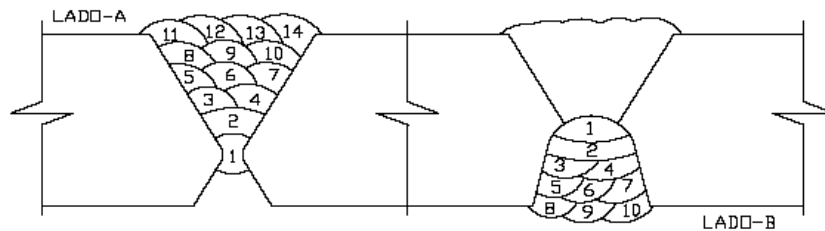


Figura 3 – Sequência de soldagem

Após soldagem total da junta, foram realizados ensaios não-destrutivos de partículas magnéticas (MT), ultra-som (UT) e raio-X (RT), conforme norma Petrobras N-1852. Novamente nenhuma descontinuidade foi encontrada.

Após aprovação por ensaios não destrutivos a junta soldada foi cortada em duas partes, sendo uma tratada termicamente para alívio de tensões pós-soldagem, e a outra mantida como soldada.

O tratamento térmico foi realizado numa estufa de resistência elétrica. A temperatura de patamar foi de $585 \pm 10^\circ\text{C}$ e tempo de 6 horas, correspondendo a 3 ciclos de 2 horas cada. A taxa de aquecimento é de 70°C/h (max.) e a taxa de resfriamento é de 80°C/h (max.). A Figura 4 mostra a junta sendo tratada termicamente.



Figura 4 – Tratamento Térmico

Após tratamento térmico as juntas foram cortadas numa serra de fita para preparação dos corpos de prova para ensaio de resistência ao impacto Charpy-V e dureza.

O método usado no ensaio de dureza foi o Método Vickers, com carga de 50N, conforme ASTM E-92; foram feitas impressões ao longo de linhas distando 1mm das superfícies do material, conforme Figura 5.

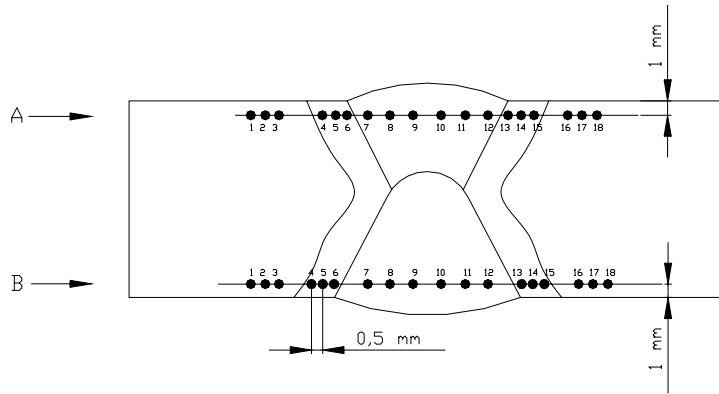


Figura 5 - Localização das impressões para ensaio de dureza (N-1852)

O ensaio Charpy foi realizado conforme AWS D1.1 (2004) e N-1852. Os CP's foram preparados de acordo com ASTM A-370, entalhe em V, tipo A. Foram retirados 21 CP's a 2mm da face, sendo 12 na solda, 3 na linha de fusão, 3 a 2mm da linha de fusão e 3 a 5 mm da linha de fusão. Além disso, foram retirados 12 CP's na solda raiz. Desta forma, foram preparados 33 CP's em cada condição (sem e com tratamento térmico), totalizando 66 CP's. A Figura 6 mostra, de forma esquemática, o local de retirada dos corpos de prova ao longo do comprimento e da espessura da junta. Na solda 2mm da face e solda raiz foram retirados um número maior de CP's por se tratar da região de maior interesse.

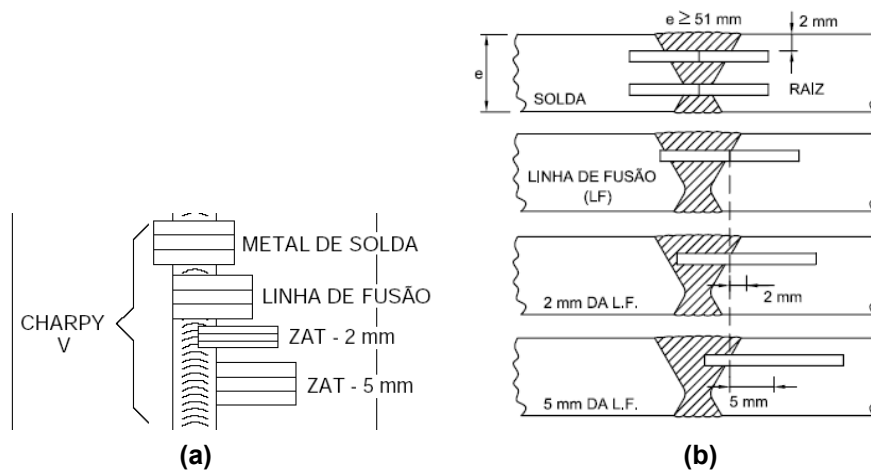


Figura 6 – Posição de retirada dos CP's de ensaio de impacto (N-1852) – (a) ao longo do comprimento; (b) ao longo da espessura.

A Tabela 2 mostra a energia de impacto mínima exigida para a junta, na temperatura de -30 °C. É importante ressaltar que, conforme a N-1852, nenhum dos corpos de prova pode apresentar energia absorvida inferior a 75% do valor requerido para média. Este parâmetro é chamado de Valor Individual.

Tabela 2 - Resistência ao impacto - Norma Petrobras N-1852

Temperatura de ensaio (Tc) [°C]	Média [J]	Individual [J]
-30	50	38

Antes do início do ensaio, os corpos de prova Charpy são mantidos à temperatura de -30°C por um tempo de encharque de 10 minutos, para completa homogeneização da temperatura. A Figura 7 mostra o teste de impacto, com o termopar no detalhe.

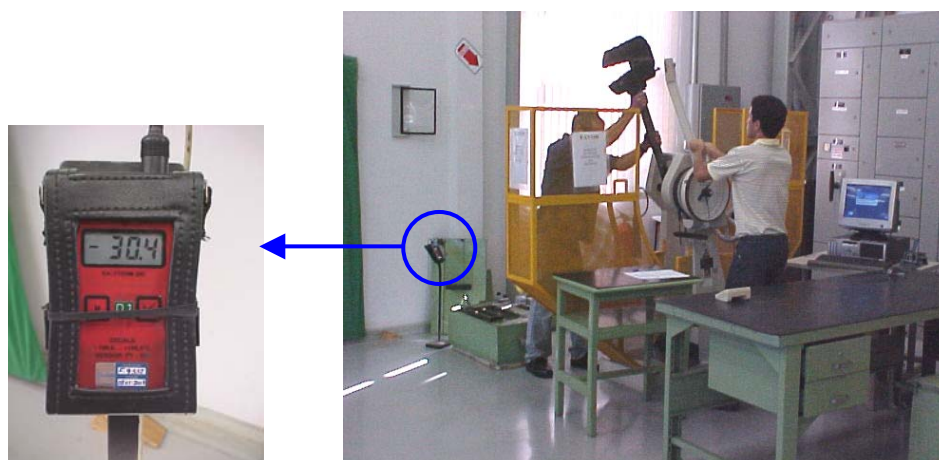


Figura 7 – Ensaio de impacto Charpy-V

Após realização do ensaio de impacto foi feita uma caracterização microestrutural da solda, com auxílio do microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura (MEV). Além disso, foi realizada caracterização da fratura conforme ASTM E-23.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No gráfico da Figura 8 nota-se claramente que a dureza diminuiu após tratamento térmico em todas as regiões (Metal de Base, ZTA e Metal de Solda). Os pontos de dureza estão indicados na Figura 5.

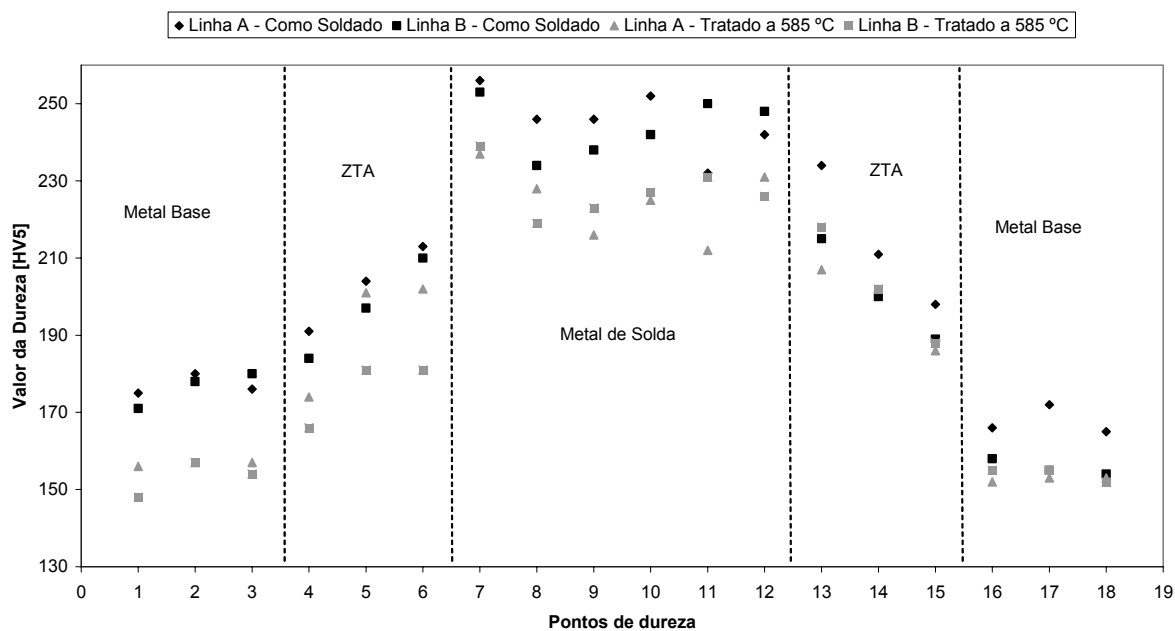


Figura 8 - Resultado do Ensaio de Dureza

O gráfico da Figura 9 mostra os resultados obtidos no teste de impacto. Os valores correspondem à média de 3 resultados para a LF, LF + 2mm e LF + 5mm. Para a Solda Raiz e Solda a 2mm da Face, por se tratar de regiões de maior interesse, os valores correspondem à média de 12 resultados.

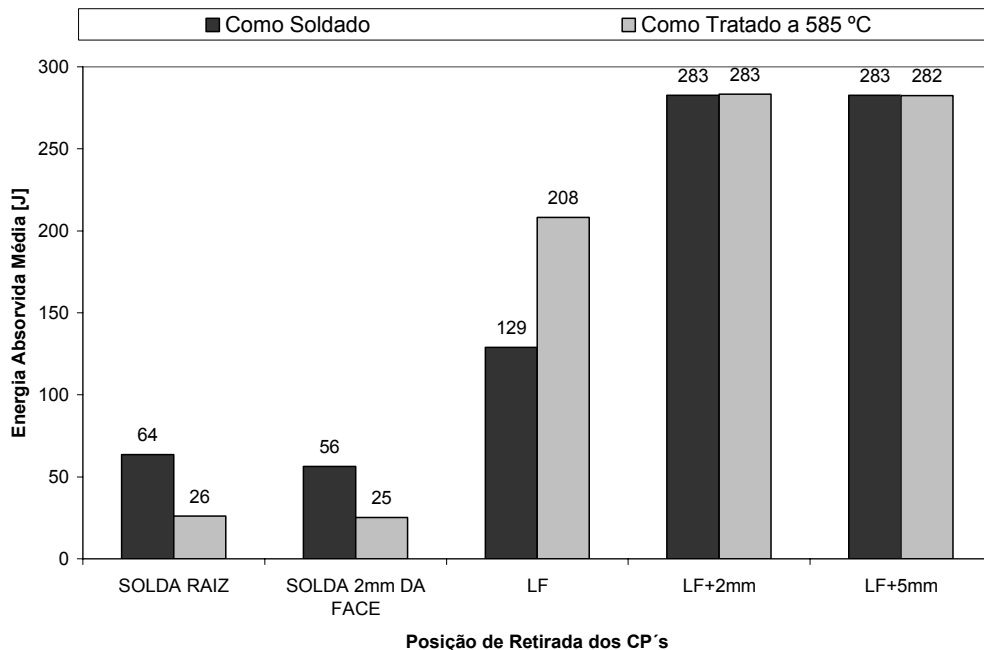


Figura 9 – Resultado do Ensaio de Impacto Charpy-V

Nota-se claramente no gráfico da Figura 9 que a tenacidade ao impacto do metal de solda diminuiu fortemente após o tratamento térmico de alívio de tensões, mostrando a influencia negativa deste. Por outro lado, a tenacidade aumentou na Linha de Fusão (LF). A LF engloba metal de solda e ZTA. Acredita-se que os resultados obtidos para LF não foram influencia do tratamento térmico, e sim da posição de retirada dos CP's, que pode englobar diferentes proporções da ZTA e do metal de solda, influenciando fortemente o resultado do teste. A tenacidade ao impacto do metal base não foi influenciada pelo tratamento térmico, o que já era esperado. A Figura 10 mostra a superfície de fratura de alguns corpos de prova Charpy-V. Na legenda das figuras encontram-se a energia absorvida do ensaio de impacto e a porcentagem de fratura dúctil encontrada, de acordo com a ASTM E-23.

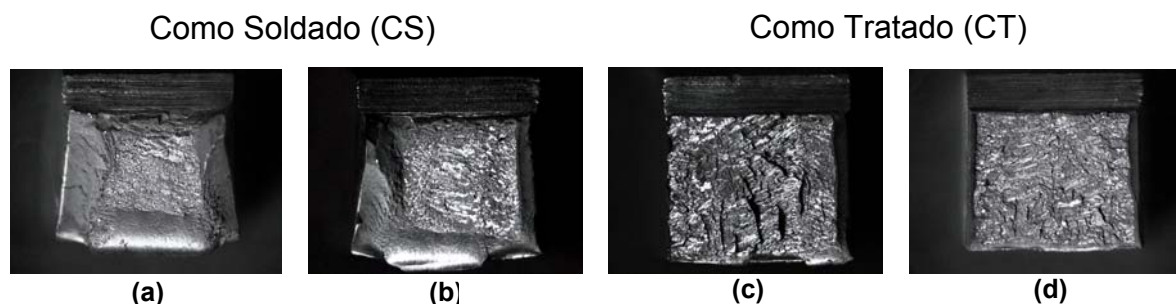


Figura 10 – Aparência da Fratura dos Corpos de Prova Charpy, conforme ASTM E-23 (a) Solda Raiz CS, 106J, 74% Dúctil; (b) Solda 2mm da Face CS, 72J, 53% Dúctil; (c) Solda Raiz CT, 12J, 17% Dúctil; (d) Solda 2mm da Face CT, 17J, 18% Dúctil.

Pode-se observar claramente o aspecto mais frágil dos CP's que foram tratados termicamente.

As Figuras 11 e 12 mostram a caracterização microestrutural da solda realizada por microscopia óptica, sem e com tratamento térmico, respectivamente.

Foram identificados nas micrografias os microconstituintes: ferrita acicular (AF), ferrita de segunda fase (FS) e ferrita primária (FP).



Figura 11 – Microscopia óptica do cordão de solda na condição “Como Soldado” Ataque Nital 2%, 500X



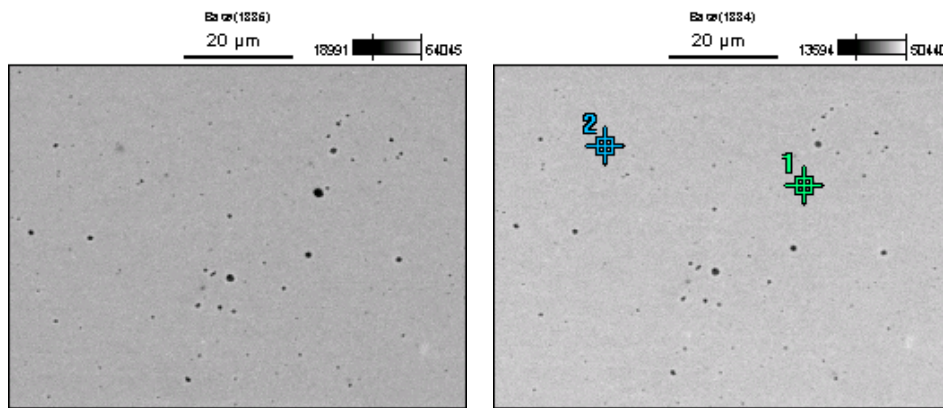
Figura 12 – Microscopia óptica do cordão de solda na condição “Como Tratado” Ataque Nital 2%, 500X

As micrografias obtidas por microscopia óptica não apresentam diferença significativa antes e após tratamento térmico, o que já era de se esperar, pois o tratamento térmico foi realizado na temperatura de 585°C, ou seja, abaixo de Ac1.

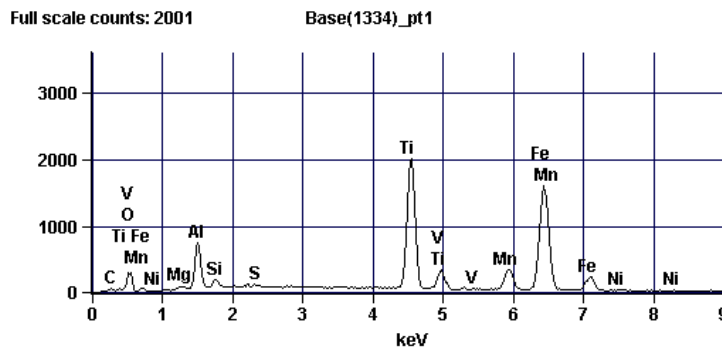
O resultado leva a crer que a queda da tenacidade pode estar ocorrendo devido à precipitação.

As amostras “Como Soldada” e “Como Tratada” foram analisadas em MEV e foram identificadas segregações de titânio, sendo este proveniente do fluxo (rutilo – TiO₂), como mostra a Figura 13. Daí vem o Ti identificado na análise química apresentada na Tabela 1.

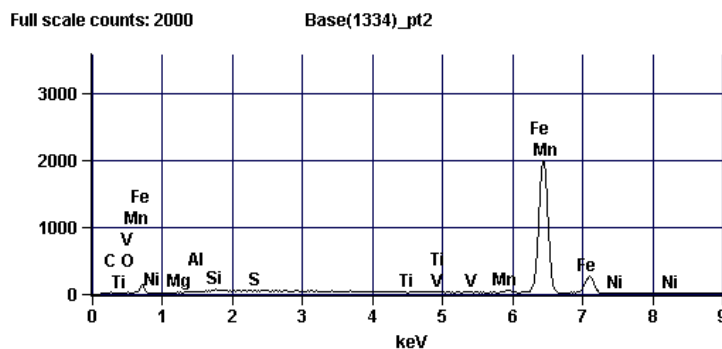
O ponto 1 corresponde à inclusão, e o ponto 2 à matriz. A análise por EDS do ponto 1 mostra claramente que se trata de uma segregação de Ti. O Fe e o Mn identificados no ponto 1 correspondem à matriz ao redor da segregação.



(a)



(b)



(c)

Figura 13 – Espectroscopia por energia dispersiva das segregações. (a) Segregações; (b) Espectro da segregação; (c) Espectro da matriz.

Na tentativa de identificar algum tipo de precipitado após tratamento térmico foi realizada caracterização microestrutural por microscopia eletrônica de varredura, como mostra a Figura 14 e a Figura 15.

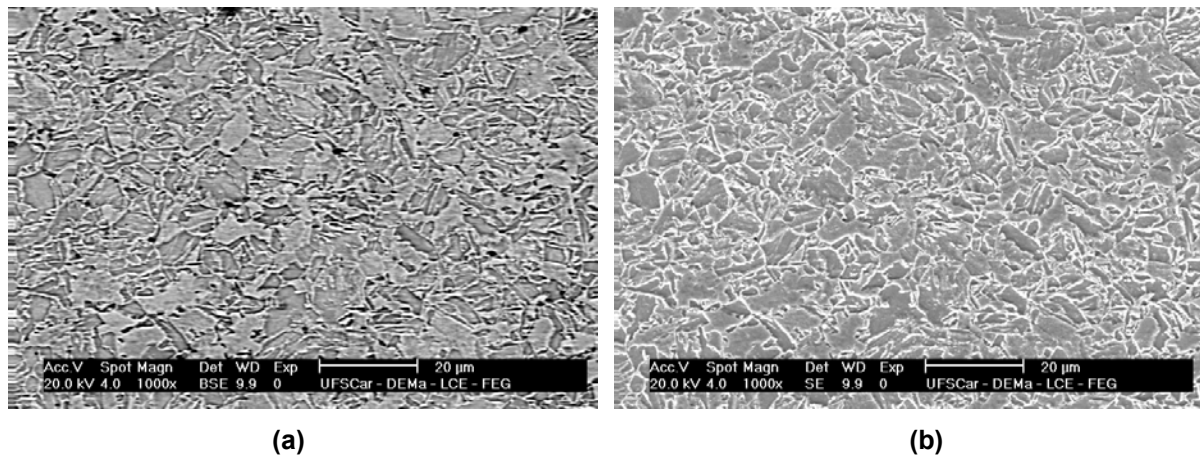


Figura 14 – Microscopia eletrônica de varredura do cordão de solda na condição “Como Soldado”. (a) Elétrons Retroespalhados; (b) Elétrons Secundários.

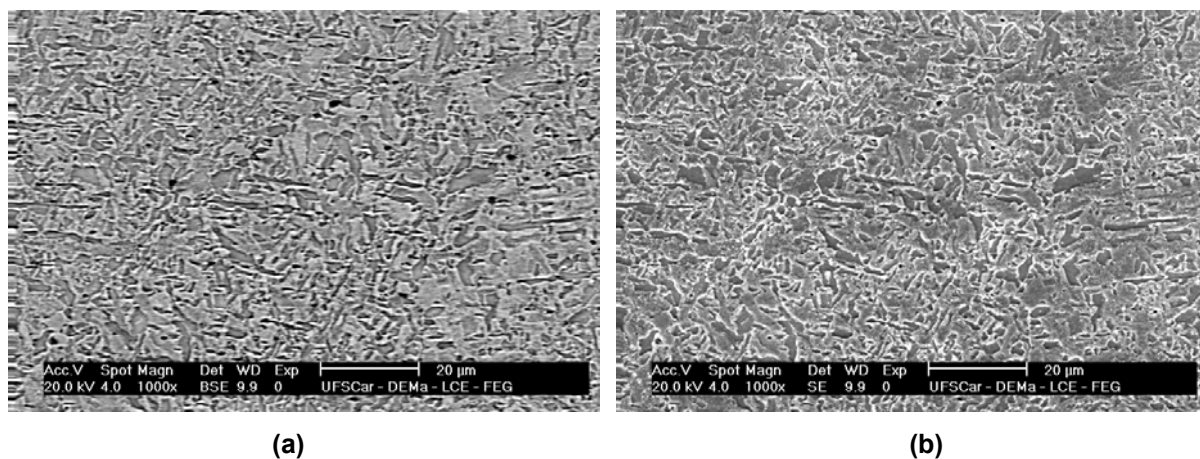


Figura 15 – Microscopia eletrônica de varredura do cordão de solda na condição "Como Tratado". (a) Elétrons Retroespalhados; (b) Elétrons Secundários.

As amostras foram analisadas por elétrons retroespalhados (BSE), cujo mecanismo de contraste mais importante é o contraste de composição, e por elétrons secundários (SE), cujo mecanismo de contraste mais importante é a topografia.

Pode-se observar na Figura 14 e na Figura 15 que não há indícios de precipitação. Mesmo em aumentos maiores, observáveis em MEV, não foi identificada nenhuma partícula que pudesse ser caracterizada como precipitação.

CONCLUSÕES

1. A tenacidade ao impacto de solda vertical ascendente produzida com arame tubular rutilico em juntas espessas de aço estrutural é influenciada negativamente por tratamento térmico de alívio de tensões pós-soldagem.

2. Os resultados de ensaio Charpy podem ser influenciados pela posição de retirada dos corpos de prova, como verificado no ensaio de impacto da ZTA. Os resultados dependem da quantidade de cada região (metal base ou metal de solda) existente na posição do entalhe dos CP's.

3. De acordo com os resultados encontrados na avaliação das micrografias obtidas por microscopia óptica, percebe-se que o tratamento térmico de alívio de tensões não modifica de forma significativa as frações dos microconstituintes presentes no metal de solda. Este resultado nos induz a pensar que está ocorrendo precipitação, que pode estar provocando a queda da tenacidade ao impacto. Porém, se está ocorrendo precipitação, esta é muito fina, e não foi possível a identificação em escala de MEV. É necessária uma micro-análise através de microscopia eletrônica de transmissão (MET) para tentar identificar possíveis precipitados muito finos.

Agradecimentos

O autor agradece o apoio da ESAB, da USP (Lorena) e da UFSCar (São Carlos) para a realização deste trabalho, bem como o apoio técnico, a cessão de amostras e realização de ensaios e análises por parte da Tenaris Confab e Confab Equipamentos.

REFERÊNCIAS

- 1 VIEIRA, L. A. **Avaliação da Tenacidade após Tratamento Térmico de Alívio de Tensões em Soldas Produzidas com Arames Tubulares Rutilicos que Contenham Níquel**, Belo Horizonte, MG, p. 1, abril de 2006.
- 2 JOAQUIM, Roberto. **Arame Tubular**. p. 2. Disponível em: www.infomet.com.br. Acesso em: 26 de janeiro 2006.
- 3 FORTES, Cleber. **Arames Tubulares OK**. p. 12 - 40, Maio de 2003. Disponível em: www.esab.com.br. Acesso em: 07 de maio 2005.
- 4 MODENESI, P. J. **Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico**, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, p. 1, dezembro de 2001.