

AVALIAÇÃO DA TENACIDADE AO IMPACTO DE UM AÇO C-MN SOLDADO POR FRICÇÃO COM PINO CONSUMÍVEL*

Bruna Brito Freitas¹

Letícia Leal¹

Marcelo Macedo¹

Lucas Mendonça²

Henrique Schwendler²

Diogo Trento Buzzatti¹

Rafael Eugenio dos Santos³

Jonas Trento Buzzatti¹

Mariane Chludzinski⁴

Telmo Strohaecker⁵

Resumo

O processo de soldagem por fricção é uma técnica recente que vem sendo desenvolvida a fim de melhorar a qualidade das estruturas *offshore*. Com a finalidade de aperfeiçoar essa técnica é importante estudar as propriedades metalúrgicas do material soldado. Este trabalho tem como objetivo avaliar a tenacidade ao impacto de um aço C-Mn soldado por fricção com pino consumível, conhecido como FHPP (Friction Hydro Pillar Process). Desta forma, no presente estudo o material foi soldado, tratado termicamente, e após avaliado através de análises metalográficas, de microdurezas e ensaios de impacto Charpy. Como resultados foram geradas microestruturas para as diferentes regiões da solda e foram obtidos valores de energia, segundo a norma ASTM E-23. Por fim, conclui-se que o material não processado apresentou uma tenacidade superior a região de interface soldada, devido as diferentes microestruturas geradas no processo.

Palavras-chave: Soldagem por fricção com pino consumível; Microestruturas; Tenacidade ao impacto Charpy.

EVALUATION OF THE IMPACT TOUGHNESS OF A C-MN STEEL WELDED BY FRICTION HYDRO PILLAR PROCESS

Abstract

The friction welding process is a recent technique that has been developed with the view to improve the quality of offshore structures. In order to improve this technique is important to study the metallurgical properties of the welded material. This study aims to assess the toughness of a C-Mn steel welded by Friction Hydro Pillar Process (FHPP). Thus, in this study was carried out the welding process, the heat treatment, the metallography analyses, the hardness test and the Charpy impact tests. As result, microstructures were generated for various regions of the welded joint and the energy values were obtained according to ASTM E-23 standard. Finally, could be concluded that the base material has a greater toughness than in the interfacial area, due to the different microstructures generated in the process.

Keywords: Friction hydro pillar process; Microstructures; Charpy impact test.

¹ *Engenheira Metalúrgica, mestranda, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.*

² *Engenheiro Metalúrgico, graduando, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.*

³ *Engenheiro Metalúrgico, doutorando, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.*

⁴ *Engenheira Metalúrgica, Doutora, Laboratório de Metalurgia Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.*

⁵ *Engenheiro Metalúrgico, Professor Doutor, Laboratório de Metalurgia Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O uso de processos de soldagem para a união e reparo de peças e componentes metálicos é um assunto que merece destaque. Processos convencionais de soldagem apresentam constantes limitações, incentivam o desenvolvimento e aperfeiçoamento de novos processos, como as técnicas de soldagem por fricção. Entre elas está a fricção com pino consumível (Friction Hydro Pillar - FHPP) [1].

FHPP é uma inovadora técnica de soldagem por fricção desenvolvida na década de 1990 pelo TWI capaz de unir e reparar estruturas metálicas [2]. Neste processo, a junta é produzida no estado sólido, uma vez que o calor é gerado através do atrito das superfícies dos componentes. A técnica envolve a rotação e consumo de um pino em uma matriz com uma abertura côncava enquanto é aplicada uma força, gerando calor de fricção, o que plastifica o material, propiciando a união metalúrgica [3]. A Figura 1 apresenta uma representação esquemática do processo FHPP.

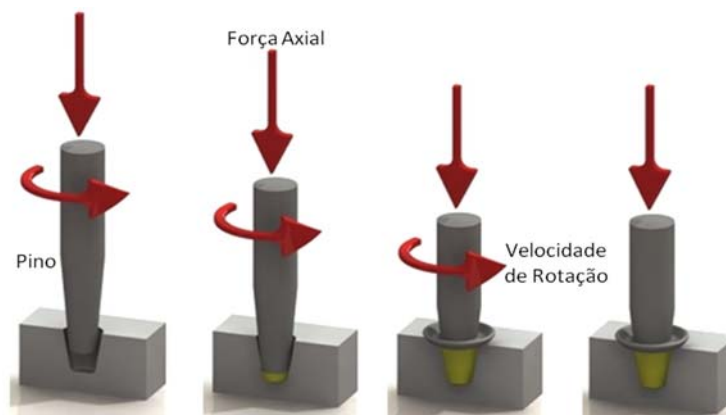


Figura 1. Sequência esquemática do processo de soldagem.

Como vantagem pode-se citar a menor geração de calor, pois não ocorre a fusão dos materiais envolvidos, o que inibe a ocorrência de defeitos associados à solidificação e, absorção e evolução de gases (H e N) [4]. Além disso, é possível produzir juntas soldadas com qualidade superior, por se processar no estado sólido, tornando esta técnica um atrativo para a indústria, principalmente para os setores petroquímicos em soldagem subaquática e instalações offshore, podendo substituir processos de soldagem convencionais a arco elétrico [5-7].

Os parâmetros de soldagem envolvidos no processo são: velocidade de rotação, força axial, força de forjamento e comprimento de queima [8-10], que é a quantidade de material processado. Eles são importantes pois são responsáveis pelos ciclos térmicos e, consequentemente, pela microestrutura e propriedades mecânicas formadas [11].

Deste modo, o presente trabalho tem por objetivo aprimorar o conhecimento acerca do comportamento metalúrgico obtido através do processo de soldagem com pino consumível. Sendo assim, a realização desse estudo irá correlacionar a tenacidade ao impacto com as microestruturas do material base e da interface.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização das juntas soldadas foi utilizado um aço C-Mn. Esse material foi escolhido por ser um aço utilizado na indústria petroquímica. A composição química foi obtida em um espectrômetro óptico marca Spectrolab e as médias de três análises

efetuadas estão na Tabela 1. Através da tabela pode-se perceber que se trata de um aço pertencente à série AISI 1330, equivalente ao DIN 30Mn5.

Tabela 1. Composição química do material de base

| C | Si | Mn | P | S | Al | Nb | Ti | V | W | Pb | Sn |
|------|------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,28 | 0,27 | 1,8 | 0,003 | 0,005 | 0,063 | 0,002 | 0,003 | 0,075 | <0,01 | <0,00 | 0,010 |
| 7 | 4 | 5 | 4 | 7 | 9 | 2 | 2 | 6 | 0 | 20 | 2 |

Os pinos consumíveis e as chapas foram usinados conforme a Figura 2a. Para a realização da soldagem pela técnica FHPP foi utilizada a Máquina de Processos por Fricção (MPF 1000), desenvolvida no Laboratório de Metalurgia Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul [12], mostrado na Figura 2b. A MPF 1000 possui capacidade de força axial de 1000 kN, torque máximo de 1060 Nm e rotação nominal de 1760 rpm, sendo que os parâmetros de processamento utilizados estão apresentados na Tabela 2. Este equipamento é conectado a um controlador central da marca MTS, onde são adquiridos os dados de força, deslocamento vertical, rotação do motor e potência. Através de um software também da marca MTS é possível o monitoramento instantâneo destes parâmetros durante o processo, bem como o controle da máquina.

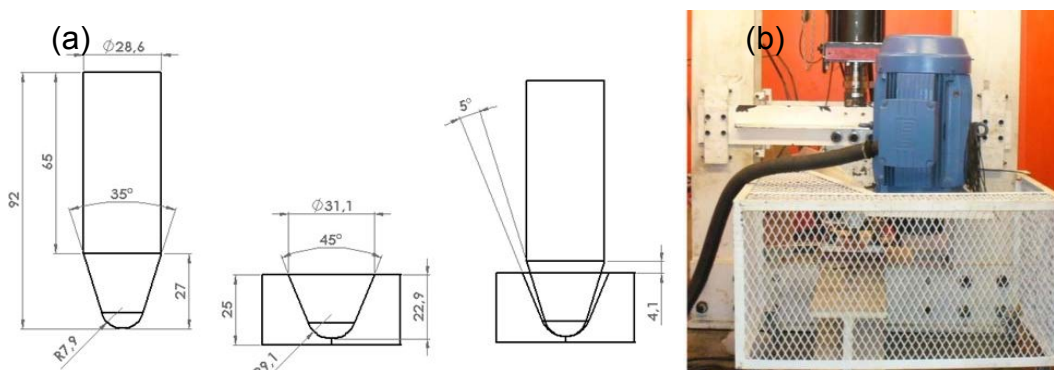


Figura 2. (a) Geometria utilizada para a confecção do pino consumível e da chapa base (medidas em mm); / (b) Equipamento de soldagem MPF 1000.

Tabela 1. Parâmetros de Processamento utilizados

| Solda | Rotação (rpm) | Força (kN) | Força de Recalque (kN) | Consumo (mm) |
|-------|---------------|------------|------------------------|--------------|
| C-Mn | 1500 | 100 | 100 | 7 |

Após o processo de soldagem as amostras foram revenidas por 1 hora a 650 °C. Por fim, foram realizadas análises metalográficas, ensaios de dureza e impacto Charpy. O procedimento de análise metalográfica foi dividido em macrografias e micrografias. Para as macrografias foi realizada apenas a etapa de lixamento. As micrografias consistiram de lixamento e polimento. Após essa preparação, as amostras foram atacadas com o reagente químico Nital 3%. A preparação dos corpos de prova foi executada conforme as normas ASTM E3 [13] e ASTM E340 [14].

Para a confecção dos corpos de prova do ensaio Charpy foi utilizada a norma ASTM E23-12c [15]. Os corpos de prova do material base foram dimensionados ao longo do pino, conforme a Figura 3a. Os corpos de prova da região soldada foram localizados na interface conforme a Figura 3b.

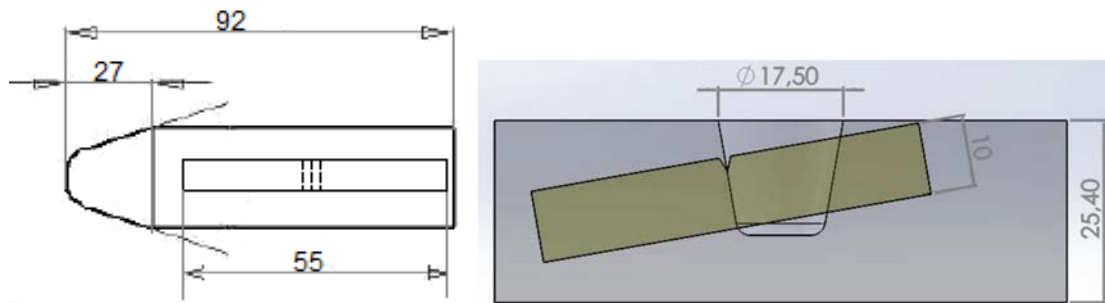


Figura 3. Representação dos corpos de prova para o ensaio Charpy (a) material base; (b) interface.

O ensaio de impacto Charpy foi realizado na temperatura de 0°C. Para isso, foi utilizado um termopar em um recipiente com água e gelo conectado a um computador, conforme a Figura 4a. Cada corpo de prova ficou aproximadamente 15min na temperatura de 0°C, de forma a estabilizar o material ensaiado. Para a realização do teste foi utilizado um equipamento para ensaio de impacto Charpy/Izod, da marca Instron modelo SI-1D3 com capacidade de 400J, velocidade de impacto do pêndulo igual a 5,19 m/s e seu peso é, aproximadamente, 20 kg. A Figura 4b mostra o equipamento utilizado para o ensaio Charpy. Os corpos de prova fraturados foram analisados em uma lupa, e avaliados com auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV).

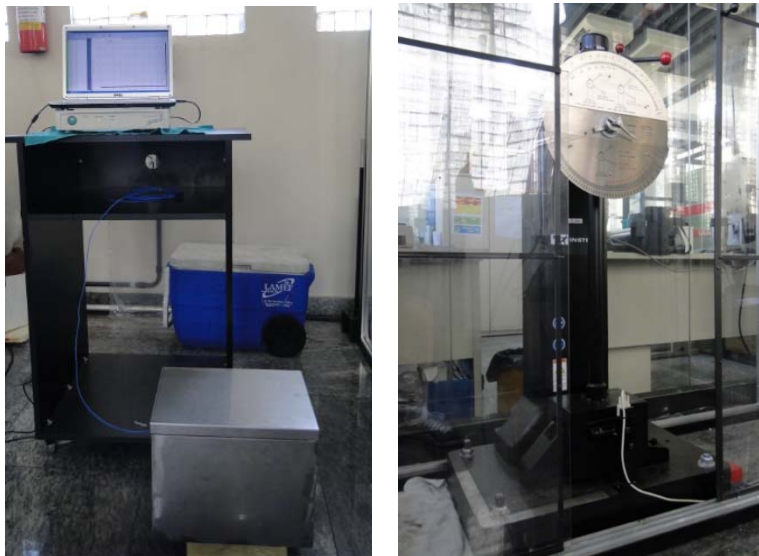


Figura 4. Ensaio Charpy (a) recipiente de armazenamento dos corpos de prova; / (b) máquina do ensaio Charpy.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As peças soldadas foram inicialmente cortadas e avaliadas macroscopicamente. A Figura 5 mostra a macrografia da junta soldada de um aço C-Mn. A partir dessa metalografia observa-se a zona afetada pelo calor (ZAC), com uma coloração mais clara que o restante da peça, além disso, percebe-se uma falta de preenchimento na região central, indicado por uma seta. Conforme estudos anteriores, defeitos como falta de preenchimento são encontrados devido a uma possível falta de adesão do material [16].

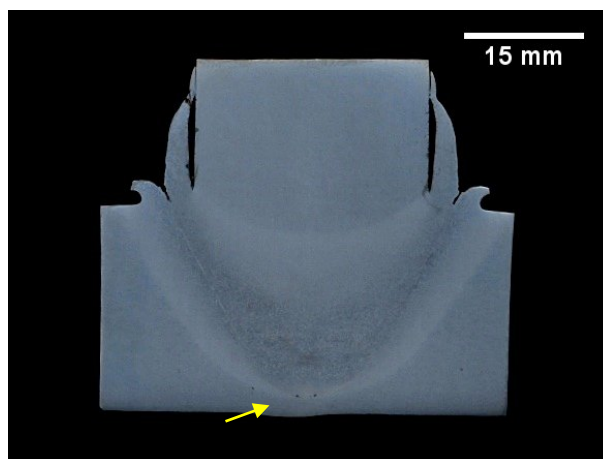


Figura 5. Macrografia da junta soldada de um aço C-Mn.

Ao estudarmos as micrografias, Figura 6 (a/b/c/d), percebe-se as diferentes estruturas formadas ao longo da junta soldada, possivelmente, devido à diferença dos ciclos térmicos gerados na peça [11]. Podemos observar na Figura 6a um bandeamento na microestrutura típico de um material previamente laminado. Observando com maiores aumentos o material base, Figura 6b, constatou-se a presença de ferrita, com ilhas de perlita e outros agregados de carbonetos, responsáveis por uma dureza de, aproximadamente, 210 HV. Essa microestrutura é típica de um material revenido a altas temperaturas.

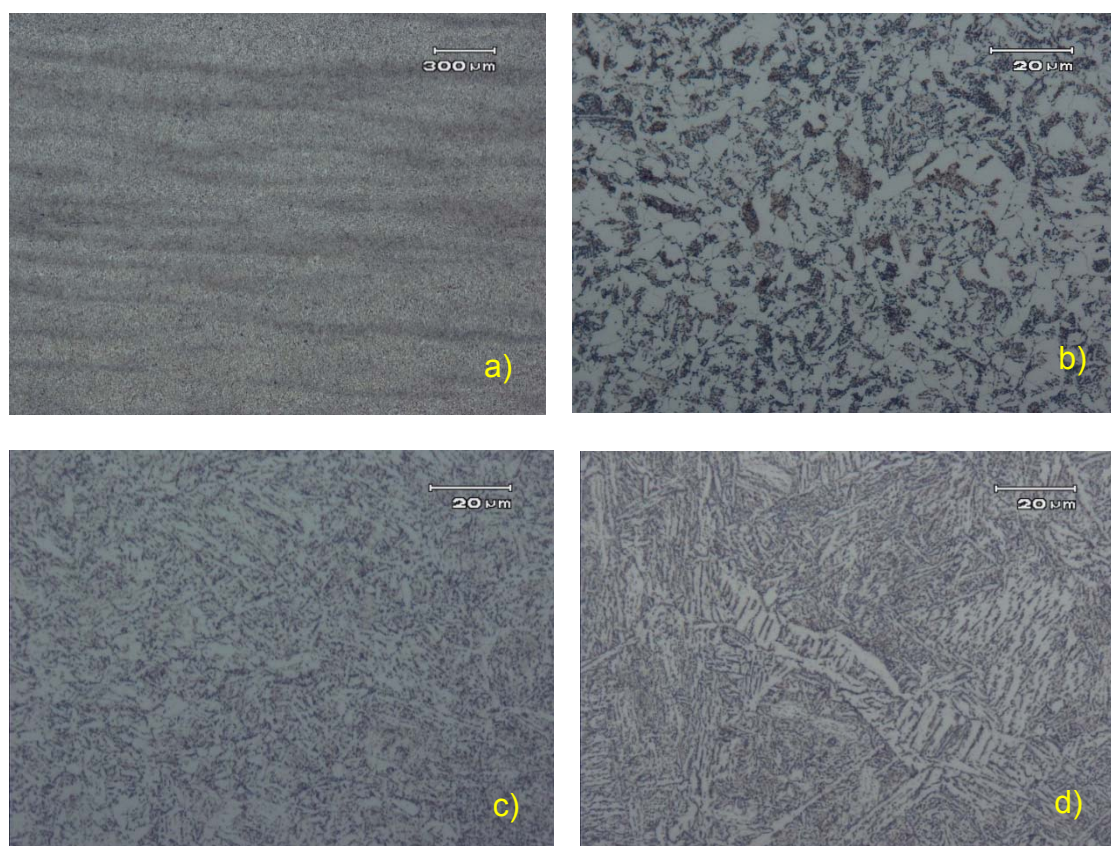


Figura 6. Micrografias do aço C-Mn (a) material base, menor aumento; (b) material base, maior aumento; (c) região central do pino; (d) interface soldada.

A metalografia identificada na Figura 6c mostra uma microestrutura diferente do material base, com ferrita alotriomórfica de contorno de grão, ferrita acicular e

carbonetos. Houve um aumento de dureza na região central do pino em comparação com o material base, resultando em valores na faixa de 270 HV. Essa diferença de dureza pode ser estar associada a mudança de fase e ao refino microestrutural.

As altas temperaturas a que o material é submetido somado com a deformação imposta pelo processo pode ser responsável por gerar uma recristalização dinâmica, sendo essa uma explicação condizente para a diminuição dos grãos [17-18]. Devido às altas temperaturas envolvidas, o material pode austenitizar e sofrer aumento do seu tamanho de grão. Segundo Lessa [19], o aumento do tamanho de grão austenítico e maiores taxas de resfriamento favorecem a formação da ferrita acicular, justificando a formação dessa microestrutura na região central do pino.

A microestrutura observada na região da interface, Figura 6d, é composta de bainita, martensita revenida, ferrita alotriomórfica, ferrita acicular, ferrita de Widmanstätten e carbonetos. A dureza nessa região atingiu valores com até 300 HV, possivelmente, devido à presença da martensita revenida.

A Tabela 3 mostra os valores de energia (J) absorvidos durante o ensaio Charpy, juntamente com a área útil dos corpos de prova e a porcentagem de deformação calculada referentes às amostras do material de base.

Tabela 3. Valores adquiridos nos ensaios Charpy para o material de base

| Solda | Energia (J) | Área Útil (mm ²) | Profundidade antes (mm) | Profundidade depois (mm) | Deformação (%) |
|-------------------|-------------|------------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------|
| CP 01 | 138 | 79,31 | 9,82 | 9,43 | 3,97 |
| CP 02 | 120 | 78,98 | 9,80 | 9,34 | 4,69 |
| CP 03 | 140 | 80,56 | 9,94 | 9,27 | 6,74 |
| Média | 133 | 79,62 | 9,85 | 9,35 | 5,13 |
| Desvio Padrão (%) | 11,02 | 0,83 | 0,08 | 0,08 | 1,44 |

Segundo a Tabela 3, a média dos corpos de prova do ensaio Charpy do material base apresentou um valor de 133 J e uma deformação de 5%. Podem ser atribuídas perdas de energia, que não foram absorvidas na fratura, mas deixaram marcas nos corpos de prova. Detalhes dessa perda são mostrados na Figura 7a, mostrando a deformação do corpo de prova denominado CP 01. Essas marcas são situadas paralelas ao entalhe, isso pode ser atribuído à distribuição da energia ao receber a batida do martelo, visto que, essas marcas são na região de encaixe dos corpos de prova na máquina de ensaio Charpy. Detalhes como esse, também foram observados pelo autor Duarte [20]. A Figura 7b mostra a fratura do corpo de prova CP 01, representando o material base. Através dessa imagem observa-se a deformação lateral do corpo de prova fraturado.

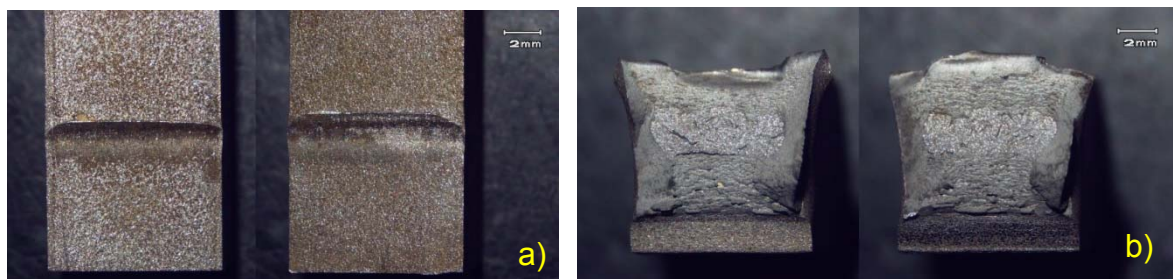


Figura 7. Representação do ensaio Charpy do material base: (a) deformação lateral do CP 02; (b) fratura do CP 01.

A Figura 8 mostra o mecanismo de fratura dúctil, localizado na extremidade do corpo de prova Charpy, através dessa imagem observam-se alguns *dimples* alinhados em uma direção preferencial, possivelmente, devido à deformação observada na Figura 7b. O valor de energia encontrado pode ser correlacionado com a microestrutura predominantemente ferrítica, mostrado na Figura 6b.

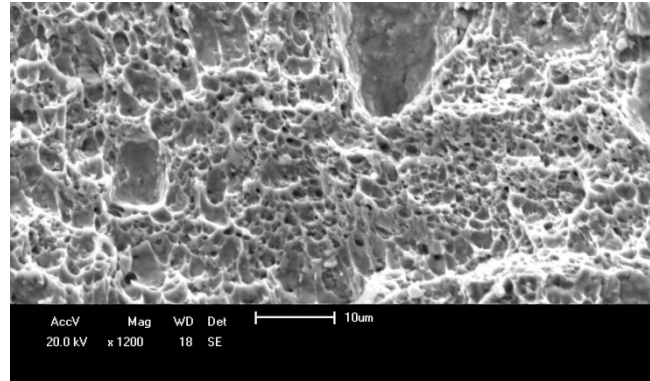


Figura 8. Fractografia enfatizando a fratura dúctil no corpo de prova CP 02.

A Tabela 4 mostra os valores de energia (J) absorvidos durante o ensaio Charpy, juntamente com a área útil dos corpos de prova e a porcentagem de deformação calculada referentes aos corpos de prova da interface soldada.

Tabela 4. Valores adquiridos nos ensaios Charpy para os corpos de prova da interface soldada.

| Solda | Energia (J) | Área Útil (mm ²) | Profundidade (mm) | d (mm) | Deformação (%) |
|-------------------|-------------|------------------------------|-------------------|--------|----------------|
| CP 05 | 8 | 80,52 | 9,97 | 9,85 | 1,20 |
| CP 06 | 8 | 80,30 | 9,93 | 9,88 | 0,50 |
| CP 08 | 6 | 80,04 | 9,95 | 9,85 | 1,01 |
| Média | 7,33 | 80,29 | 9,95 | 9,87 | 0,90 |
| Desvio Padrão (%) | 1,15 | 0,24 | 0,02 | 0,02 | 0,36 |

Conforme a Tabela 4 a média dos corpos de prova do ensaio Charpy das interfaces soldadas apresentaram um valor de 7 J e uma deformação de, aproximadamente, 1%. Na Figura 9a observa-se que a fratura não ocorreu unicamente no entalhe, o que pode significar a existência de um caminho preferencial, possivelmente, a interface da solda. Resultados semelhantes foram obtidos por Meyer [8], seu estudo mostrou corpos de prova Charpy, em que a fratura acompanhou a interface soldada.

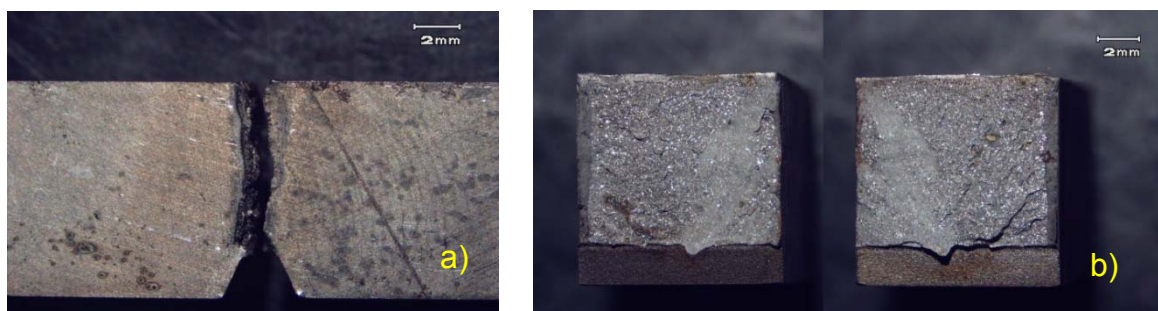


Figura 9. Representação do ensaio Charpy da interface soldada: (a) vista lateral do CP 08; (b) fratura do CP 06.

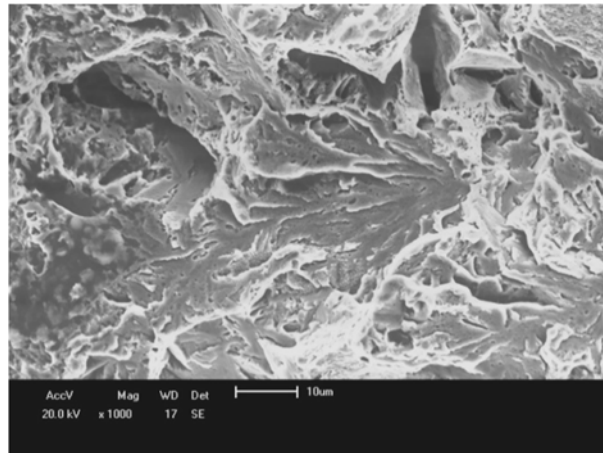


Figura 10. Fractografia enfatizando a região de fratura frágil no corpo de prova CP 08.

A figura 9b mostra a fratura do corpo de prova CP 06, onde se observa uma deformação lateral menor do que no material base. A Figura 10 evidencia o mecanismo de clivagem do CP 08, típico de uma fratura frágil.

Os resultados analisados da interface soldada mostraram uma fratura predominantemente frágil com baixa energia absorvida, caracterizando uma baixa tenacidade. Ao comparar os valores obtidos nos ensaios Charpy com as microestruturas, Figura 6d, pode-se atribuir a baixa tenacidade à modificação microestrutural e à heterogeneidade gerada na região da interface da solda. A heterogeneidade da região da interface age como um concentrador de tensões que aliado à microestrutura desfavorável causaram esse comportamento com baixa tenacidade.

4 CONCLUSÃO

Através desse trabalho pode-se perceber a interação existente entre a microestrutura e a tenacidade. Microestruturas predominantemente ferríticas, como a do material base, são capazes de deformar-se e por esse motivo absorver mais energia, ou seja, são oriundas de alta tenacidade. Microestruturas geradas na interface soldada são mais heterogêneas. Desta forma, podem gerar concentradores de tensões, além de microestruturas mais frágeis como martensita revenida, sendo responsáveis por baixas tenacidades.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, a CAPES e a PETROBRAS pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- 1 ASM International. Weld integrity and performance. 1997.
- 2 Thomas W, Nicholas ED, Jones SB, Lilly RH, Dawes CJ, Dolby RE. Friction Forming. 1992; Patent No.: EP 0 602 072 B1.
- 3 Nicholas ED. Friction processing technologies. *Welding in the World*. 2003; 47(11-12):2-9.
- 4 Andrews RE, Mitchell JS. *Met. Mater*. 1990;6(12):796-797.
- 5 Unfried J, Hermenegildo TF, Paes MT, Pope AM, Ramirez AJ. Influence of Process Parameters in the TMAZ Microstructural Evolution of C-Mn Steels Friction Hydro-Pillar

- Welded Joints. Proceedings of the 8th International Conference on Trends in Welding Research. 2008.
- 6 Blakemore GR. Applications of state of the art portable friction welding equipment euro-join. European conference on joining technology. 1984; 2:127-36.
 - 7 Blakemore GR. Friction welding-technology for the new millennium. Offshore Technology Conference. 1999; Paper 11063-MS.
 - 8 Meyer A. Friction hydro pillar processing. Thesis an der Technischen Universität Braunschweig. 2002.
 - 9 Pinheiro GA. Local Reinforcement of Magnesium Components by Friction Processing: Determination of Bonding Mechanisms and Assessment of Joint Properties. GKSS. 2008.
 - 10 Pinheiro GA. Costura por fricção: Fundamentos e Aplicações. 1º COBEF. 2001.
 - 11 Freitas, B. et al. Influência dos Parâmetros de Solda por Fricção com Pino Consumível em Aço para Amarras de Uso Offshore Grau R3. Congresso Nacional de Soldagem, XL CONSOLDA, 2014; 1-12.
 - 12 Mattei F. Desenvolvimento de Equipamento para estudo de Soldagem por Fricção. Dissertação: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. 2011.
 - 13 American society for testing and materials. ASTM E3: Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens, 2007.
 - 14 American society for testing and materials. ASTM E 340: Standard Test Method Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys, 2006.
 - 15 ASTM International. ASTM E23-12c, Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. West Conshohocken, PA, 2012; 1-25.
 - 16 Yeh FWT. Avaliação de descontinuidades e reparo em placas de aço por “Friction Hydro Pillar Processing” via ultrassom e micrografia. Dissertação. PPGE3M: UFRGS, Porto Alegre, RS, 2012; 1-58.
 - 17 Saeid T. et al. Effect of Friction Stir Welding Speed on the Microstructure and Mechanical Properties of a Duplex Stainless Steel. Materials Science And Engineering A. 2008;496:262-268.
 - 18 Padilha AF. Siciliano JR. F. Encruamento, Recristalização, Crescimento de grão e Textura. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 2005; 1-232.
 - 19 Lessa CRL. Soldagem FHPP – Processo e Metalurgia nas Transformações das Fases de um aço C-Mn. Dissertação. PPGE3M: UFRGS, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2011; 1-99.
 - 20 Duarte A. S. Metodologia básica para produção de materiais de referência para calibração indireta de máquinas pendulares de impacto Charpy. Dissertação. Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2006; 1-153.