

ANÁLISE DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DO AÇO ASTM A516 Gr 55 APLICADO COMO VASO DE PRESSÃO PETROQUÍMICO ATRAVÉS DO ENSAIO $da/dN \times \Delta K$ ¹

Mikaele Tavares de Almeida Rocha²

Abraão Santos Silva²

Silvando Viera dos Santos³

Ricardo Estefany⁴

Sandro Griza⁵

Resumo

Na análise estrutural de equipamentos utilizados na indústria petroquímica, o uso de conceitos da mecânica da fratura é importante para observar a tenacidade à fratura de materiais quando há presença de descontinuidades. Assim, o objetivo deste estudo é analisar o comportamento mecânico do aço ASTM 516 Gr 55 aplicado em vasos de pressão, estabelecendo uma comparação entre a região do metal base e cordão de solda através da mecânica da fratura. Foram realizados ensaios de propagação de trinca ($da/dN \times \Delta K$), e análise de fratura com o auxílio da microscopia eletrônica de varredura. A partir de resultados obtidos, notou-se que o metal base teve aspectos levemente superiores que o cordão de solda. Assim, pode-se afirmar que este aço apresentou características que permitem a sua utilização como vaso de pressão.

Palavras-chave: Mecânica da fratura; Vaso de pressão; ASTM A516 Gr 55; Ensaios mecânicos.

ANALYSIS OF STRUCTURAL INTEGRITY OF STEEL ASTM A516 GR 55 VASE APPLIED AS PRESSURE THROUGH THE TESTING PETROCHEMICAL $da/dN \times \Delta K$

Abstract

In structural analysis of equipment used in the petrochemical industry, the use of concepts of fracture mechanics is important to observe the fracture toughness of materials when there are discontinuities. The objective of this paper is to analyze the mechanical behavior of steel ASTM 516 Gr 70 applied in pressure vessels, with a comparison between the area of the base metal and the weld bead by fracture mechanics. Tests of crack propagation ($da / dN \times K$), and fracture analysis with the aid of scanning electron microscopy. From the results, it was noted that the base metal had aspects slightly higher than the weld bead. Thus, it can be said that this steel had characteristics which allow its use as a pressure vessel.

Key words: Fracture mechanics; Pressure vessel; ASTM 516 Gr 70; Mechanical tests.

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

² Graduando em Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Sergipe. SE, Brasil.

³ Mestrando, Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (P2CEM), Universidade Federal de Sergipe, SE, Brasil.

⁴ Doutorando Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Matariais (P2CEM), Universidade Federal de Sergipe, SE, Brasil.

⁵ Prof. Dr., P2CEM e Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, SE, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o uso constante e crescente do gás natural e do petróleo como fontes de energia tem propiciado grandes investimentos dedicados a projetos que envolvem esses setores, aumentando a demanda na fabricação de equipamentos solicitados nessa área.⁽¹⁾ Assim, uma grande parcela das aplicações industriais consiste nos setores químicos, petroquímicos e de papel e celulose, geralmente em equipamentos cuja fabricação envolve operações de soldagem (vasos de pressão, torres de dessulfuração, estruturas de plataformas, trocadores de calor, entre outros). Nessas aplicações citadas, seja na fabricação ou na manutenção dos equipamentos ou componentes, a soldagem é utilizada.⁽²⁾

Com isso, a confiabilidade operacional associada ao nível de segurança está sendo cada vez mais exigidos, já que essa é a principal forma de obter uma redução de custos, aumento da vida útil, além da eliminação de acidentes ambientais e acidentes causados devido a falhas estruturais no material. Com a existência de juntas soldadas em diversos materiais, torna-se importante a avaliação de integridade em equipamentos, já que, do ponto de vista mecânico, diferenças entre o metal base e do metal de adição influenciam a resposta estrutural de juntas soldadas, provocando alterações nos campos de tensões e deformações.⁽³⁾

De certo modo, se faz necessário o monitoramento do crescimento e do tamanho crítico de defeitos que estão presentes e aqueles que possam surgir. Isso é fundamental na operação segura e livre de prejuízos econômicos, ambientais e sociais.⁽³⁾ Um dos maiores problemas atuais no acompanhamento da integridade de componentes mecânicos é a possibilidade de ocorrência de uma fratura frágil, repentina e inesperada, mesmo quando o componente esteja submetido a condições normais de operação. Um dano que pode ocorrer em uma estrutura, principalmente se houver a presença de um concentrador de tensão, vai depender, basicamente, da capacidade do material absorver deformações plásticas localizadas, gerando uma região deformada na ponta da trinca.⁽⁴⁾

Dessa forma, a aplicação dos conceitos da mecânica da fratura está cada vez mais presente no desenvolvimento e manutenção das estruturas e produtos de engenharia. A partir da caracterização dos materiais quanto à tenacidade a fratura é possível selecionar os materiais, projetar peças, determinar tamanhos críticos de defeito e avaliar o nível de segurança de sistemas industriais com a presença de descontinuidades.⁽⁵⁾ O grande mérito do estudo da Mecânica da Fratura é a de possibilitar ao projetista utilizar valores quantitativos de tenacidade do material permitindo projetos que aliem segurança e viabilidade econômica.⁽⁶⁾ Ou seja, calcular se um defeito de um tamanho propagará de maneira frágil sob carregamento de serviço.⁽⁷⁾ Diversos procedimentos de avaliação de trincas em componentes estruturais fazem uso de tais parâmetros de tenacidade obtidos a partir de espécimes convencionais de fratura para avaliar o impacto de defeitos na avaliação de integridade estrutural.⁽⁸⁾

Uma dessas aplicações consiste em vasos de pressão, que são materiais sujeitos a aplicações industriais, onde é exigido certo nível de segurança sendo, assim, um objeto de estudo da mecânica da fratura. Vasos de pressão podem ser definidos como um recipiente, de qualquer tipo, que seja capaz de conter um fluido pressurizado.⁽⁹⁾ Esses elementos são geralmente submetidos a grandes pressões internas e que necessitam de um alto grau de confiabilidade, pois a pressão interna é superior à pressão atmosférica, que contém fluidos no estado líquido ou gasoso.⁽¹⁰⁾

Segundo a American Society of Testing and Materials (ASTM), o tipo mais comumente utilizado de chapas de aço carbono para fabricação de vasos de pressão é o ASTM A516. Existem quatro tipos de chapas de aço ASTM A516 disponíveis comercialmente, classificadas em graus 55, 60, 65 e 70, contendo diferentes níveis de resistência mecânica em função da variação do teor de carbono.⁽¹⁰⁾

Assim, o objetivo desse estudo é verificar a integridade de chapas soldadas, que foram usadas para a formação de vagão de transporte de amônia, a fim de analisar a possibilidade da sua reutilização como vaso de pressão. Com isso, é necessário estudar as propriedades do metal base, da zona termicamente afetada (ZTA) e do metal de adição, como também seu comportamento em relação à tenacidade a fratura visando dar suporte a futuras avaliações de trincas nos vasos de pressão construídos a partir desse material por meio da mecânica da fratura.

Portanto, o presente estudo visa analisar o comportamento mecânico da chapa de aço ASTM A516 Gr 55 que foi reutilizado como vaso de pressão petroquímico. Esse estudo será feito através do comparativo da região do metal base com o cordão de solda, através do ensaio de propagação de trinca $da/dN \times \Delta K$, com auxílio de microscopia eletrônica, a fim de verificar a integridade estrutural do material.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os cilindros que constituem os vagões são feitos a partir de chapas do aço soldadas. Existem soldas na direção longitudinal do cilindro e soldas na direção circunferencial. Para a realização do ensaio $da/dN \times \Delta k$, foram usinados cinco corpos de prova de metal base no sentido longitudinal a laminação da chapa e cinco do cordão de solda no sentido longitudinal com traço no meio do cordão e outros cinco do cordão de solda circunferencial. Os corpos de prova apresentam o formato C(T), que é um dos modelos adotados para este ensaio segundo a norma ASTM E647-08, conforme ilustra a Figura 4.⁽¹¹⁾

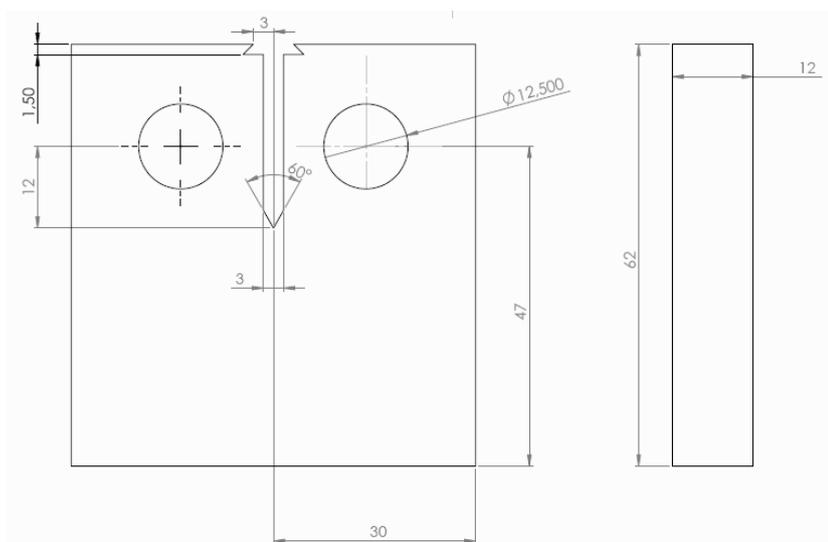


Figura 1. Dimensão (mm) dos corpos de prova, em formato C(T), para o ensaio de propagação de trinca $da/dN \times \Delta k$, de acordo com a norma ASTM E647-08.⁽¹¹⁾

Os corpos de prova e o procedimento de ensaio também foram conduzidos segundo a norma ASTM E647-08, usando a máquina de ensaio MTS modelo 661.20H-03 com a utilização do clip gauge modelo 632.02F-20, como mostra a Figura 2.⁽¹¹⁾

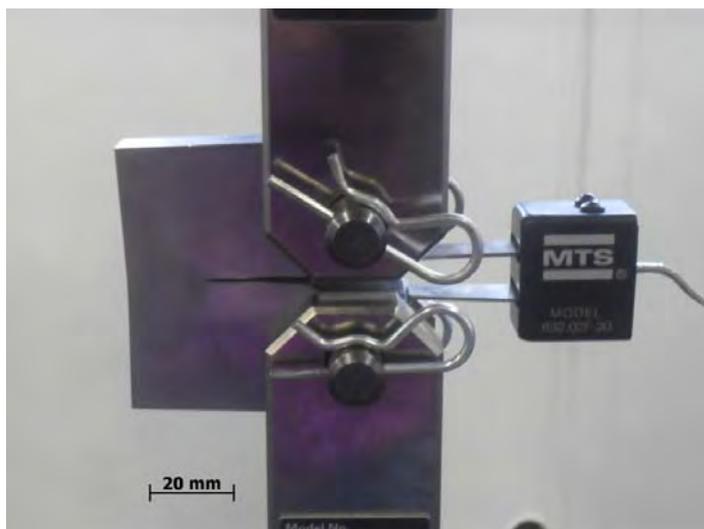


Figura 2. Ilustração do corpo de prova que foi ensaiado na máquina MTS Modelo 661.20H-03 para o ensaio de $da/dN \times \Delta k$, de acordo com a norma ASTM E647-08.⁽¹¹⁾

O método escolhido para a realização do ensaio foi o do Delta K crescente, isto é, à medida que a trinca cresce sob a ação de um carregamento externo cíclico de amplitude constante, aumenta o valor de ΔK aplicado acarretando, conseqüentemente, um aumento progressivo da taxa de propagação de trinca em fadiga. Para isso os valores teóricos colocados no programa de $K_{\text{máximo}}$ e o ΔK inicial foram de 17,78 e 16 MPa, respectivamente, cuja razão (R) foi de 0,1. Para a realização do ensaio foram utilizados também os dados obtidos do ensaio de tração baseados na norma ASTM E64-08.⁽¹¹⁾ Esses valores são tabelados para cada tipo de material que será ensaiado.⁽¹²⁾ Conforme a norma, o ensaio é dividido em duas partes, onde a primeira parte consiste na abertura de uma pré-trinca e a segunda na propagação da trinca. Então, o valor estabelecido para a pré-trinca foi de 04 mm, enquanto que a trinca foi propagada até o valor de 35 mm.⁽¹¹⁾

Vale ressaltar que para fabricação de vasos de pressão utilizando o aço ASTM A516 Gr 55, é preciso atender os requisitos os critérios de seleção conforme a norma ASTM A516-2010. Onde para esse tipo de aço a resistência à tração deve ser de 380 a 515 MPa, e tensão de escoamento maior que 205 MPa. Os valores percentuais admissíveis dos elementos químicos podem ser visto na Tabela 1.^(10,13) Segundo a norma ASTM E399, tem-se que, nos ensaios de propagação de trincas, para os corpos de prova do formato C(T) com tensão de escoamento até 353 MPa, o valor esperado para o K_{Ic} é de 35,61 (MPa.m^{0,5}).⁽¹⁴⁾

Tabela 1. Valores percentuais dos elementos químicos que devem estar presentes no aço ASTM A516 Gr 55

Elemento	C	Mn	P	Si	S
Valor (%)	0,18 – 0,26	0,55 – 0,98	- 0,025	0,13 – 0,45	- 0,025

Após a realização do ensaio de propagação da trinca, as trincas foram abertas para a realização de uma análise macroscópica. Logo após, as fraturas foram analisadas através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) Modelo Jeol JCM-5700 Carry Scope para análise dos micromecanismos de fraturas.

3 RESULTADOS

As curvas de propagação da trinca da/dN versus Δk podem ser vistas nas Figuras 3, 4 e 5 para o metal base e cordão de solda circunferencial e longitudinal, respectivamente.

As fraturas macroscópicas do metal base e do cordão de solda estão ilustradas nas Figuras 6 e 7.

Enquanto que as fraturas evidenciadas através da análise feita no MEV para o metal base são ilustradas nas Figuras 8, 9 e 10. O aspecto das fraturas dos corpos de prova dos cordões de solda circunferencial e longitudinal foram similares. Por isso, só serão ilustradas as micrografias obtidas para o cordão de solda circunferencial, representando, assim, ambos os cordões de solda. As fraturas obtidas para o cordão de solda circunferencial podem ser vistas nas Figuras 11 e 12.

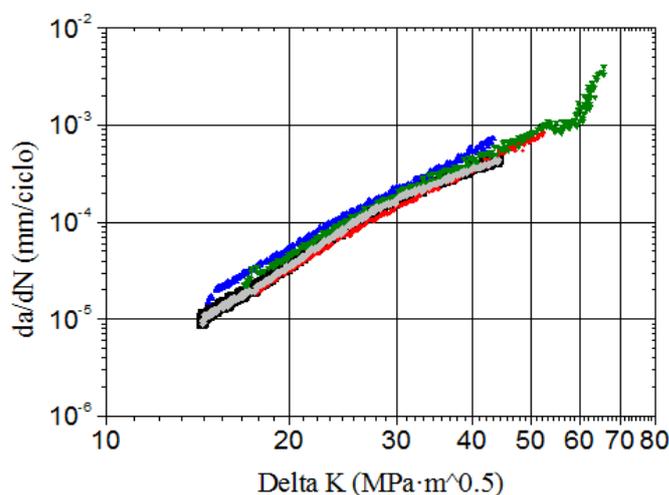


Figura 3. Curvas da/dN x Δk para o Metal Base do aço ASTM 516G70.

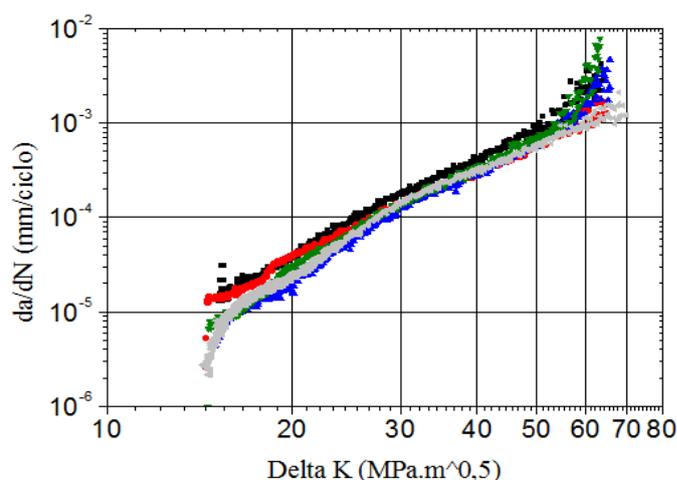


Figura 4. Representação gráfica das curvas da/dN x Δk para o Cordão de Solda Circunferencial.

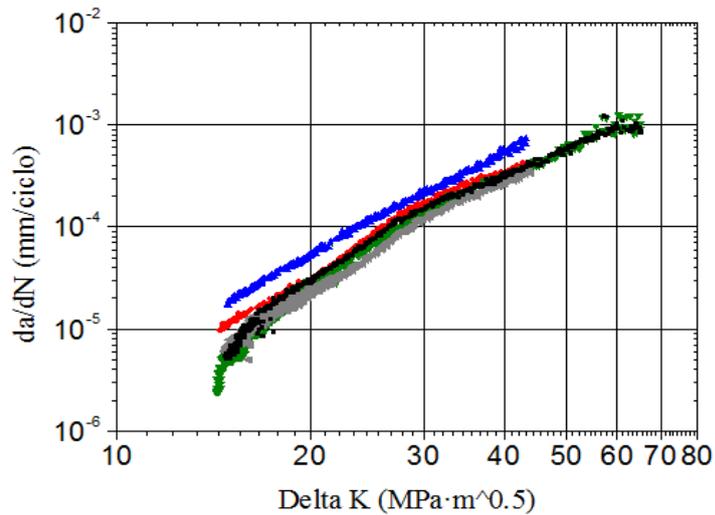


Figura 5. Representação gráfica das curvas $da/dN \times \Delta k$ para o Cordão de Solda Longitudinal.

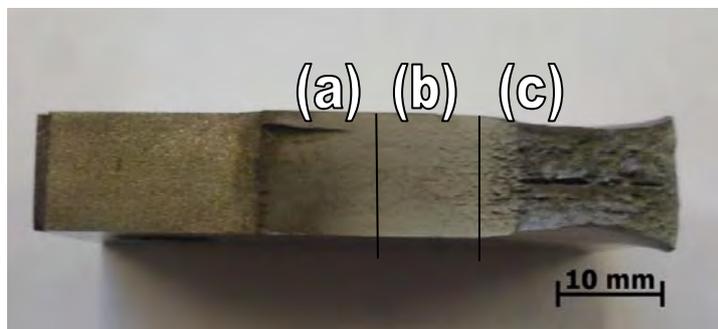


Figura 6. Identificação da propagação da trinca para o metal base.

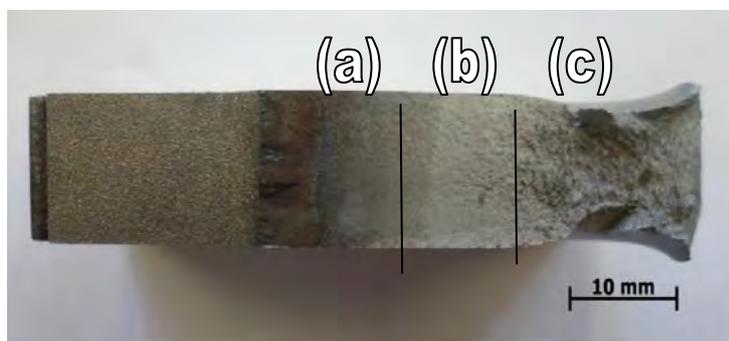


Figura 7. Identificação da propagação da trinca para o cordão de solda circunferencial.

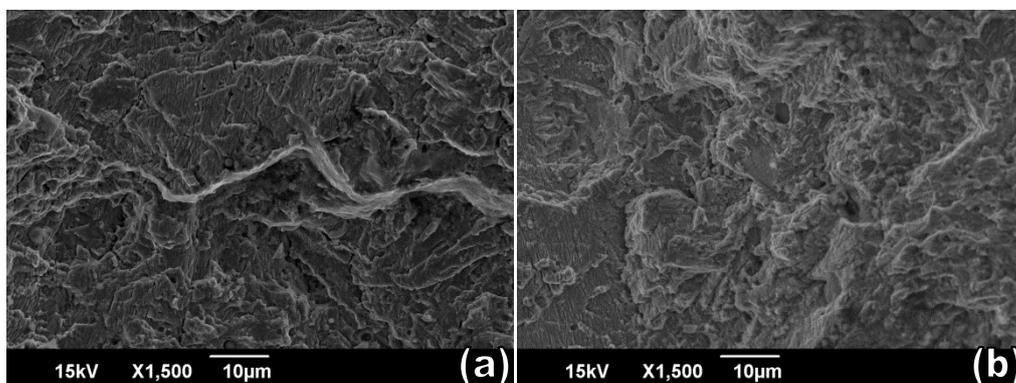


Figura 8. Micromecanismos de fratura do Metal Base. Regiões do início (a) e do meio (b) da propagação da trinca, onde é possível observar a presença de estrias.

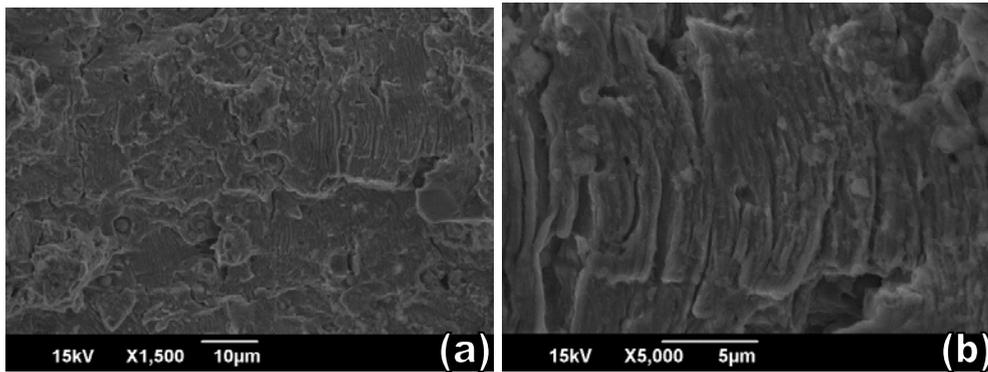


Figura 9. Micromecanismos de fratura do Metal Base. Em (a) e (b), regiões de propagação estável da trinca do metal base, onde nota-se a presença de estrias.

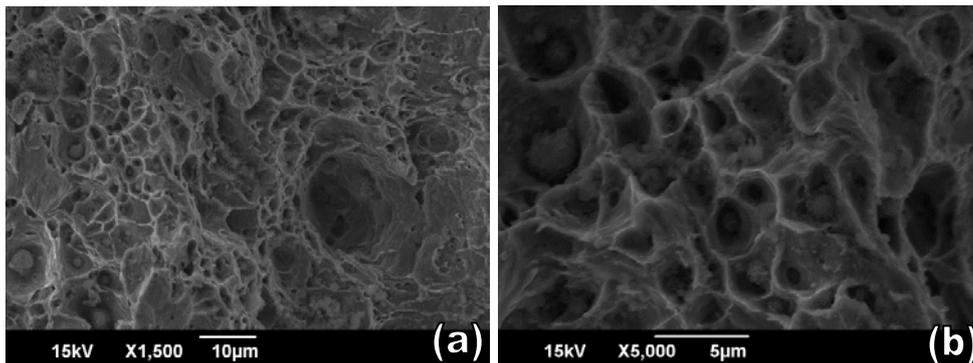


Figura 10. Micromecanismos de fratura do Metal Base. Em (a), região do final de propagação, onde é possível observar que há presença de dimples. Em (b), ruptura estática final mostrando a formação de dimples.

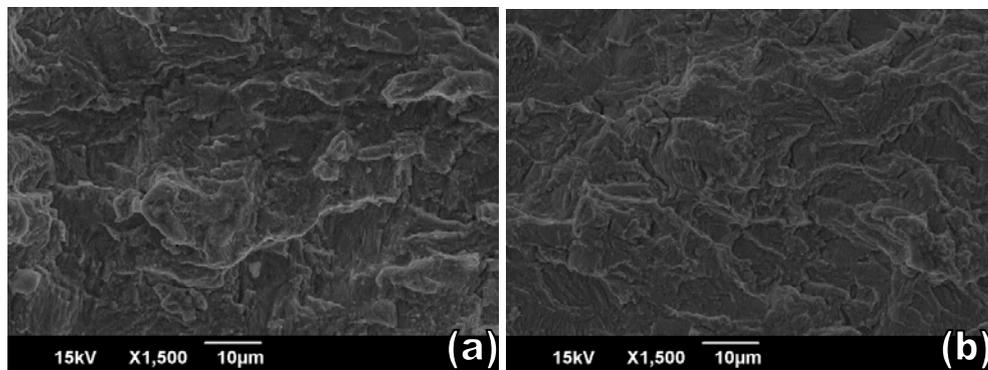


Figura 11. Micromecanismos de fratura para o Cordão de Solda Circunferencial. Regiões do início (a) e do meio (b) da propagação da trinca.

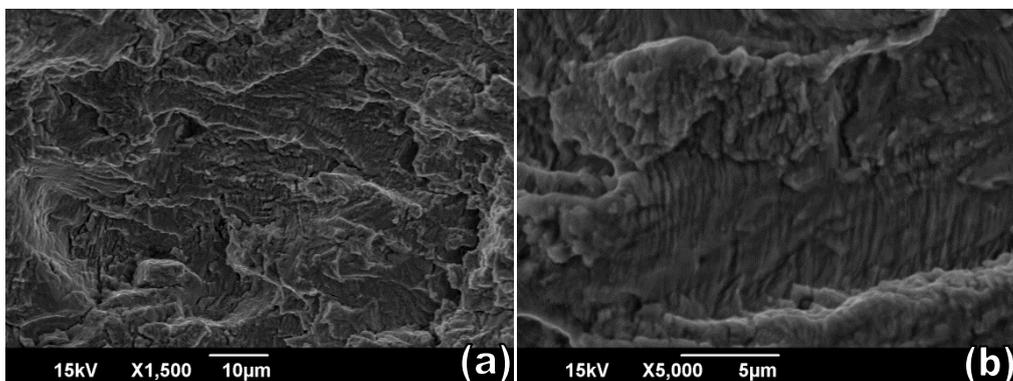


Figura 12. Micromecanismos de fratura para o Cordão de Solda Circunferencial. Em (a) e (b) região do final da propagação da trinca, onde nota-se a presença de estrias (a) e (b).

4 DISCUSSÕES

Os ensaios de propagação de trinca são muito importantes para a verificação da vida remanescente e integridade estrutural da estrutura. Através de tais ensaios é possível estimar a vida remanescente em fadiga mesmo na presença de um defeito cujas dimensões são conhecidas. A inclinação da parte reta da curva, predita por Paris, permite a correlação da taxa de propagação de trinca e da intensidade de tensões na ponta da trinca. Onde na fase II da curva $da/dN \times \Delta K$, a partir da regra de percebe-se que ΔK é diretamente correlacionável com as deformações cíclicas, e a carga de abertura e a tenacidade do material pouco influi nas taxas de propagação o crescimento das trincas é controlado por mecanismos contínuos, pouco sensíveis à microestrutura, à carga média, ao meio ambiente e à espessura da peça. Do ponto de vista microscópico, é nesta fase onde se observam as estrias características de fadiga.

A região II é considerada a mais importante do ensaio, pois ela indica a relação entre a propagação de trinca e o nível de tensões na estrutura. Percebe-se que as regiões do metal base e do cordão de solda circunferencial e longitudinal tiveram comportamentos semelhantes em relação à propagação estável da trinca.

Apesar do cordão de solda longitudinal apresentar maior tenacidade em relação ao metal base e ao cordão de solda circunferencial, nota-se que todas as regiões estudadas tiveram comportamentos semelhantes, evidenciando, assim, um comportamento mecânico parecido em toda a chapa.

As imagens macroscópicas da superfície da trinca para o metal base e o cordão de solda indicam que a região (a) corresponde ao baixo fator de intensidade de tensão inicial, fase da pré trinca do material. Já a região (b) corresponde ao comportamento de crescimento de trinca, ainda linear, com propagação estável da trinca. A região (c) corresponde ao final da zona de propagação estável, a partir do qual o fator de intensidade de tensões se aproxima do valor crítico. Ao final dessa região (c) observa-se a fratura aberta depois do teste, ou seja, uma região não apresenta interesse para a análise. Percebe-se que o aspecto da região final do metal base foi diferente do cordão de solda, mostrando, assim, fraturas diferentes para cada região.

A análise feita no MEV para o metal base mostrou a presença de estrias de fadiga de menor espaçamento junto à região de início da propagação, estrias mais espaçadas conforme segue-se a propagação, e a região final de propagação estável da trinca composta por estrias que estão acompanhadas de dimples, o que evidencia o aspecto de fratura dúctil do material. Para o cordão de solda, as fraturas tiveram os mesmos aspectos iniciais do metal base, entretanto sem a formação de dimples no final da propagação. Porém, a região instável de abertura de trinca é constituída de dimples como micromecanismo de fratura. Logo, pode-se afirmar que o aspecto dúctil foi preservado.

5 CONCLUSÕES

A partir das análises de fratura feitas no microscópio eletrônico, notou-se que devido à presença de estrias e dimples próximo ao final da propagação e sobre a superfície de fratura instável, tanto o metal base quanto os cordões de solda tiveram um comportamento de fratura dúctil.

A partir dos ensaios realizados, percebe-se que ambas as regiões (metal base e cordão de solda) tem comportamento mecânico semelhante, e não foram comprometidos em termos de sua integridade estrutural pelo uso prévio.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer o apoio financeiro das agências Cnpq, FINEP, Capes.

REFERÊNCIAS

- 1 GODOY, J.M. **Estudo da Ocorrência de Trinca por Fadiga em Tubos de Aço Soldados, devido ao Transporte**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.
- 2 NUNES, E. B., BATISTA, H. J., BARRETO, A. S., MARQUES, J. S., MOTTA, M. F. **Influência da Energia de Soldagem na Microestrutura e na Microdureza de Revestimentos de Aço Inoxidável Duplex**. Soldagem e Inspeção São Paulo, v. 17, nº 2, 2012.
- 3 DONATO, G. H. B. **Efeitos da heterogeneidade mecânicas sobre forças motrizes de trincas em juntas soldadas: determinação experimental da tenacidade e extensão de metodologias e avaliação de criticidade de defeitos**. Tese (Doutorado em Engenharia), Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2008.
- 4 GUIMARÃES, V. A., HEIN, L. R., O., FILHO ZANGRANDI, J. **Sistema de baixo custo para nucleação de pré-trincas por fadiga em corpos de prova de tenacidade à fratura**. In: CBECIMAT CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 14, Águas de São Pedro, 2001.
- 5 SCHIFELBAIN DE LIMA, T. R. **Desenvolvimento de tecnologia de curvas de resistência à fratura de materiais elasto-plásticos pela análise do campo deformacional à frente da ponta da trinca**. Tese (Doutorado em Engenharia), Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- 6 SOARES, P. A., STROHAECKER, T. R., SCANDICAN, C., MACÊDO, M. C. S. **Determinação da tenacidade à fratura do aço API X65 utilizado em tubos na indústria do petróleo e gás**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 7. São Luis, 2012.
- 7 MIQUERI, F. R. **Comportamento do crescimento de trinca por fadiga de um aço ABNT 1016 laminado a quente e soldado por GMAW**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- 8 DONATO, G. H. B., RUGGIERI, C., MAGNABOSCO, R. **Efeitos de dissimilaridade mecânica em soldas sobre os procedimentos de determinação experimental dos parâmetros de fratura J e CTOD**. In: CONFERÊNCIA DE TECNOLOGIA DE SOLDAGEM E INSPEÇÃO. Rio de Janeiro, 2008.
- 9 HUPPES, R. M. **Análise de falha de um vaso de pressão**. 2009. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- 10 TESKE, M. **Influência da Composição do Gás de Proteção na Soldagem do Aço ASTM A516 pelo Processo GMAW**, 2006, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- 11 ASTM E64-08. **Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates**. August, 2009.
- 12 T. L. Anderson. **Fracture and mechanics, fundamentals and applications**. 2 ed. Florida: Crc Press, 1994.

- 13 ASTM A516/A516M-10. Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, for Moderate- and Lower-Temperature Service. Published November 2010. For ASME Boiler and Pressure Vessel Code applications, see related Specification SA-516/SA-516M in Section II of that Code.
- 14 ASTM E399-09. Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials. Sep, 2010.