



8º CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECANICA

Cusco, 23 a 25 de Outubro de 2007

PROPAGAÇÃO DE TRINCA POR FADIGA EM JUNTAS SOLDADAS DE AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO AISI 444 SOLDADO COM O CONSUMÍVEL AUSTENÍTICO AISI 316LSi

Daniel Fraga Pinto, Luiz Cláudio Cândido, Leonardo Barbosa Godefroid

Universidade Federal de Ouro Preto – REDEMAT
Campus Universitário – Escola de Minas – Sala 42. Ouro Preto, Brasil
leonardo@demet.em.ufop.br

RESUMO

A fratura de um componente estrutural sempre é considerada um acontecimento indesejável uma vez que ela coloca em risco vidas humanas e provoca perdas materiais. A falha por fadiga é perigosa, pois ela ocorre sem qualquer aviso prévio. Assim, torna-se imperativo o conhecimento sobre a resistência dos materiais à fratura, para que a sua aplicação estrutural esteja segura contra esse fenômeno.

Dessa forma, avaliou-se o comportamento de juntas soldadas constituídas pelo aço inoxidável ferrítico tipo AISI 444 soldado com o consumível austenítico AISI 316LSi quanto ao aspecto de propagação de trinca de fadiga na região do metal base, zona termicamente afetada e metal de adição em corpos-de-prova (CPs) tipo tração-compacto C(T), aplicando-se os conceitos de mecânica de fratura. O processo de soldagem utilizado foi o processo com proteção gasosa MIG. Os ensaios de fadiga foram realizados sob controle de carga com a amplitude de carregamento constante, e razão R entre tensões de 0,1 e 0,7.

Os resultados foram obtidos na forma de curvas (da/dN) vs. ΔK , sendo analisados, ainda, os aspectos fractográficos dos CPs. Pôde-se inferir das curvas que a região do metal de adição apresentou resistência a propagação de trinca de fadiga superior em relação à propagação de trinca na zona termicamente afetada.

Palavras-chave: Propagação de trinca por fadiga; Juntas soldadas; Aços Inoxidáveis

INTRODUÇÃO

Os aços denominados inoxidáveis são ligas que possuem no mínimo 10,5% (peso) em cromo. Esse elemento em presença de meios oxidantes sobre oxidação gerando uma película passivante de cromita (Cr_2O_3), com espessura em torno de 50\AA . Dentre os diferentes tipos de aços inoxidáveis tem-se os mais simples (praticamente isentos de níquel) que são os ferríticos (normalmente, imunes ao fenômeno de corrosão sob tensão fraturante, mas, quando não estabilizados, apresentam baixa soldabilidade em função do crescimento de grão); e, os austeníticos, que possuem além do cromo o níquel (apresentam ótima soldabilidade, mas são suscetíveis ao fenômeno de corrosão sob tensão fraturante) [1].

Normalmente, especifica-se nos procedimentos de soldagem que o metal de adição deva apresentar maior nobreza em relação ao metal base, no sentido de que a área catódica (cordão de solda) seja sempre menor que a área anódica (metal base) visando minimização da corrosão galvânica. Os aços inoxidáveis ferríticos, do tipo AISI 444, são ligas que têm molibdênio visando resistência à corrosão por pites (exemplo de aplicação: caixas d'água). Portanto, é usual soldar aços inoxidáveis ferríticos com metal de enchimento contendo aços inoxidáveis austeníticos.

Neste trabalho, foi avaliada a resistência à propagação de trinca por fadiga em juntas soldadas de aço inoxidável, tendo em vista que o fenômeno de degradação por fadiga é responsável pela perda da maioria dos componentes estruturais de engenharia [2-4]. Foram utilizados corpos-de-prova (CPs) do tipo tração-compacto C(T) com entalhe confeccionado nas regiões do metal de solda (MS), zona termicamente afetada (ZTA) e metal base (MB), objetivando avaliar a propagação de trincas em juntas constituídas por um aço inoxidável ferrítico do tipo AISI 444 soldado, pelo processo MIG (*Metal Inert Gas*), com o consumível austenítico do tipo AISI 316Lsi (portanto, um aço contendo principalmente Fe-C (baixo)-Cr-Ni-Mo e Si (para melhorar a fluidez no procedimento de soldagem)).

MATERIAIS E METODOS

Foram realizadas as soldas dos materiais utilizando-se como metal base o aço inoxidável ferrítico AISI 444 e como metal de adição ou enchimento o aço inoxidável austenítico AISI 316LSi. O processo de soldagem utilizado foi o MIG (Metal Inert Gas) utilizando a mistura argônio + 2% de oxigênio como gás de proteção. A partir das chapas soldadas, foram retiradas amostras para análise química e também foram confeccionados corpos-de-prova (CPs), objetivando a caracterização mecânica e química do material na condição soldada.

Os corpos-de-prova (CPs) para ensaios de tração possuem geometria e dimensões dadas pela Figura 1.

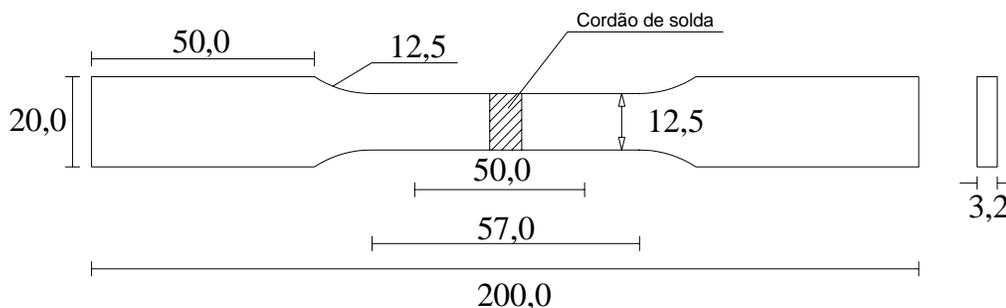


Fig. 1: Representação esquemática do CP para ensaios de tração.

No presente trabalho, foram estudadas três situações para propagação de trinca por fadiga: a primeira objetivando avaliar o comportamento na região da zona fundida (austenítico) (Figura 2(a)); a segunda objetivando avaliar o comportamento na zona termicamente afetada (ZTA), ou seja, na região ferrítica, Figura 2(b) e a terceira para avaliar o comportamento apenas no metal base (AISI 444), Figura 2(c).

Os CPs utilizados nos ensaios de propagação de trinca por fadiga foram confeccionados conforme a Figura 3.

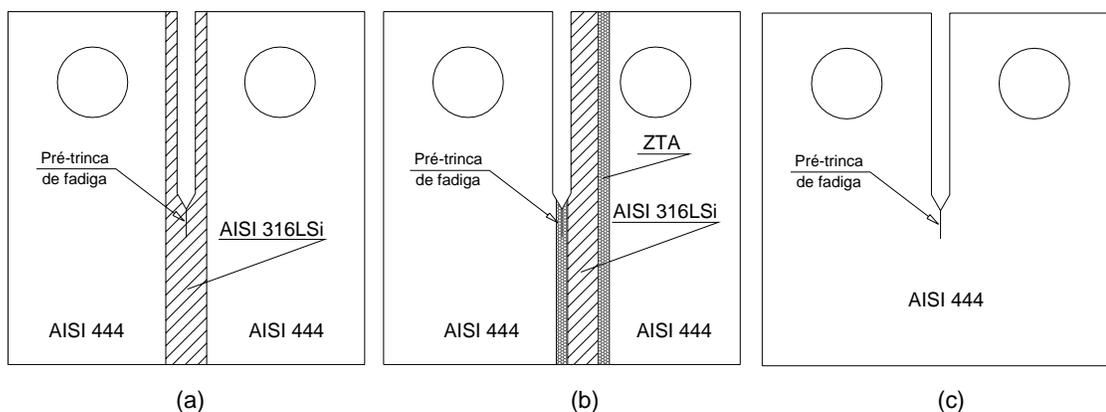


Fig. 2 : Representação esquemática das diferentes posições do entalhe em CPs do tipo tração-compacto, C(T) para ensaios de propagação de trinca por fadiga; (a) pré-trinca na zona fundida (austenítico); (b) pré-trinca na ZTA; (c) pré-trinca no metal base (ferrítico).

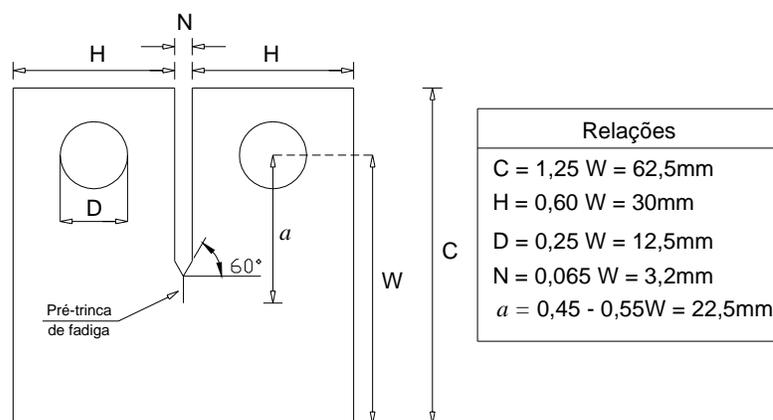


Fig. 3 : Representação esquemática do CP tipo tração-compacto, C(T), utilizado nos ensaios de propagação de trinca por fadiga.

Os ensaios de propagação de trinca por fadiga foram realizados sob controle de carga com amplitude de carregamento constante, onde foram considerados os seguintes parâmetros: frequência de 30Hz, temperatura ambiente, razão entre as tensões R ($R = \sigma_{\min.}/\sigma_{\max.}$) = 0,1 e 0,7, e acompanhamento da trinca feito através da flexibilidade elástica do corpo-de-prova, com utilização de clip-gage. Os ensaios foram realizados em uma máquina MTS servo-hidráulica de 10t.

Após os ensaios, os CPs foram retirados da máquina e as superfícies trincadas foram submetidas a ruptura mecânica por tração e, em seguida, à limpeza por ultra-som e, então, encaminhadas ao setor de microscopia eletrônica de varredura para análise fractográfica.

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Foram realizadas as soldas dos materiais utilizando-se como metal base o aço inoxidável ferrítico AISI 444 e como metal de adição ou enchimento o aço inoxidável austenítico AISI 316LSi. As tabelas I e II mostram, respectivamente, a composição química para esses materiais.

Tabela I : Composição química do aço inoxidável ferrítico AISI 444 (metal base).

Elemento	C	Cr	Mo	Nb	Ti	Ni	Mn	Cu
% em peso	0,009	17,68	1,81	0,17	0,14	0,2	0,14	0,039
Elemento	V	Al	Co	Si	P	S	N ₂ (ppm)	O ₂ (ppm)
% em peso	0,048	0,009	0,028	0,36	0,027	0,002	118	40

Tabela II : Composição química do aço inoxidável AISI 316LSi (metal de adição).

Elemento	C	Cr	Mo	Ni	Mn	Si	P	S
% em peso	0,020	17,5	2,8	12,2	1,7	1,0	0,020	0,007

A tabela III mostra os resultados obtidos dos ensaios de tração feitos para o material na condição soldada.

Tabela III - Propriedades mecânicas obtidas dos ensaios de tração.

AISI 444 (soldado)	Média			
	e (mm)	σ_{vs} (MPa)	σ_{uts} (MPa)	Along. (%)
	3,323	383,0	523,0	28,7

e: espessura; σ_{vs} : limite de escoamento; σ_{uts} : limite de resistência; Along.: alongamento percentual.

A Figura 4 (a,b) apresenta fotomicrografias mostrando algumas características microestruturais da junta soldada. Notam-se as três zonas principais: zona fundida (ZF), zona termicamente afetada (ZTA) e metal base (MB).

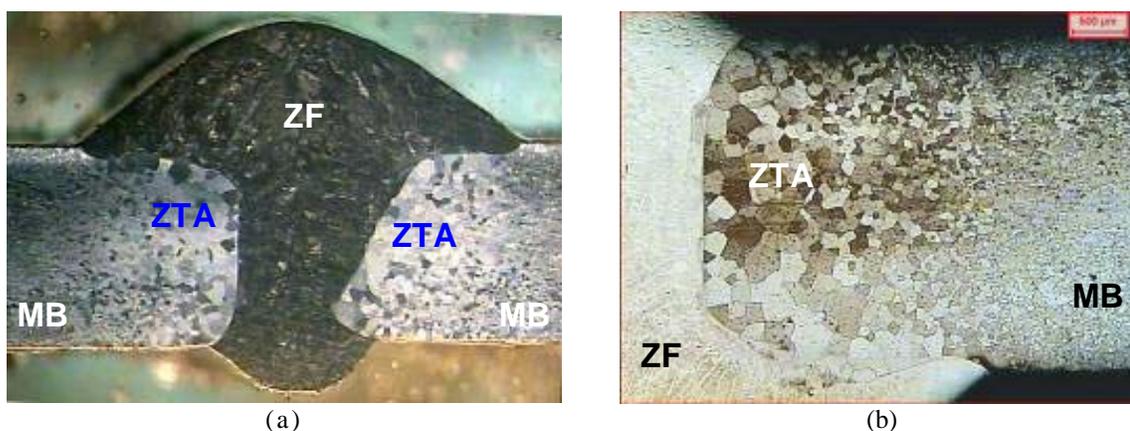


Fig. 4 : Junta soldada do aço inoxidável ferrítico AISI 444 soldado com o consumível austenítico AISI 316LSi; (a): vista frontal da junta (10X); (b): fotomicrografia mostrando as três zonas (100X); Reativo: Villela.

Pode-se observar, a partir da Figura 4, um aumento do tamanho de grão da zona termicamente afetada (ZTA). Oliveira e Faria [2] destacam que uma das maneiras mais utilizadas para controlar este tamanho de grão, além dos estabilizadores é através da energia de soldagem. Quanto menor o seu valor, menor é o tamanho de grão resultante. Isto se deve ao menor aporte térmico cedido à peça a ser soldada. Portanto, é aconselhável soldar com uma menor energia de soldagem possível para obtenção de grãos menores e uma ZTA com tamanho de grão próximo a do metal base.

A partir dos parâmetros de soldagem, a energia de soldagem foi determinada onde foi encontrado um valor 5,6kJ/cm. Brandi e Faria [5] consideram valores de energia da ordem de 5kJ/cm como sendo baixos valores de energia enquanto valores da ordem de 8kJ/cm são considerados altos valores de energia.

A Figura 5 mostra a curva obtida nos ensaios de propagação de trinca por fadiga de juntas soldadas com entalhe e pré-trinca de fadiga na região da zona fundida. Destaca-se o efeito da razão entre as tensões mínima e máxima, $R = 0,1$ e $R = 0,7$.

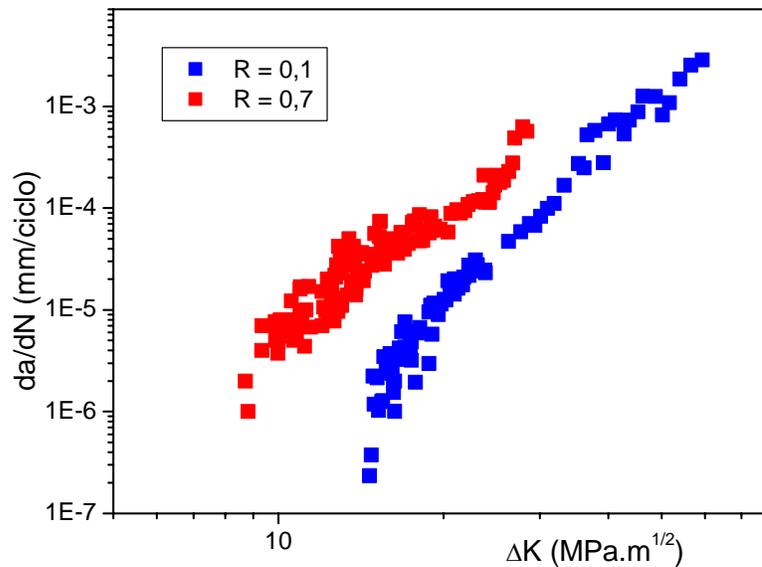


Fig. 5 : Curvas de propagação de trinca de fadiga da junta soldada, mostrando o efeito da razão R entre tensões na zona fundida.

A partir da Figura 5, pode-se observar que o aumento da razão entre tensões, R, tem como consequência a diminuição do valor do limiar ΔK_{th} . Este resultado pode ser explicado em função do fechamento de trinca desenvolvido, cuja evolução é mostrada na Figura 6 para as duas situações. Uma vez que o aumento de R implica em diminuição do fenômeno de fechamento de trinca, facilita-se, dessa forma, a propagação de trinca por fadiga. Estes resultados estão consistentes com diversas observações recentes para aços [6-14] e outros materiais [15-17].

A Figura 7 apresenta o efeito da posição do entalhe nos CPs ensaiados em fadiga. Os entalhes foram confeccionados na região do metal de adição (zona fundida), na região da zona termicamente afetada (ZTA) e na região do metal base (MB). Nota-se um comportamento semelhante na região II (Paris) para as diferentes posições de entalhe, porém com alguma dispersão de resultados. A diferença de comportamento se torna mais significativa na região I, região do limiar ΔK_{th} , que apresentou um maior valor na região do metal de solda.

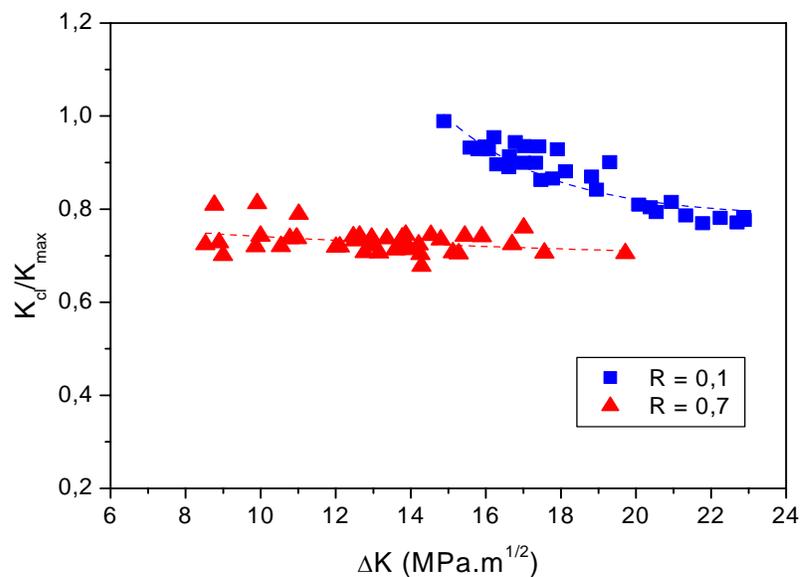


Fig. 6: Influência da razão R entre tensões no fechamento de trinca por fadiga da junta soldada com entalhe na zona fundida.

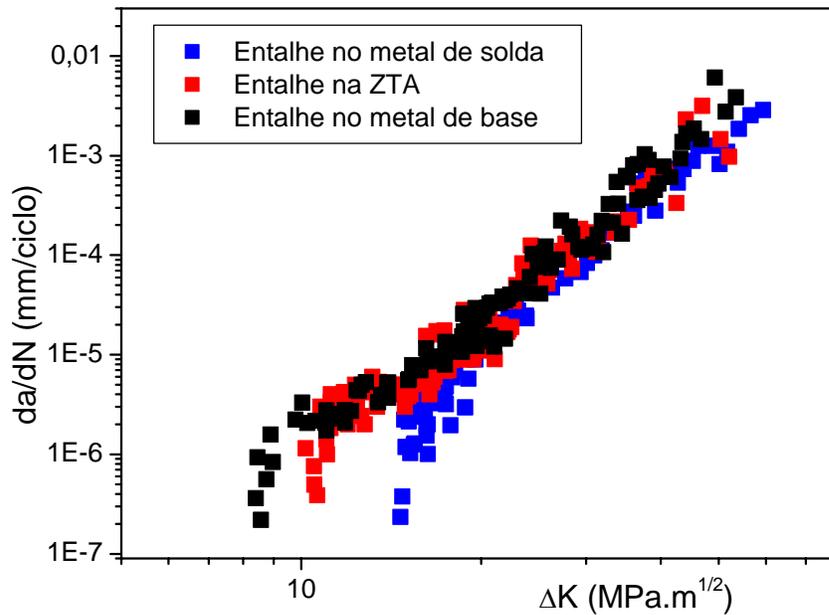


Figura 7 : Efeito da posição do entalhe na propagação de trinca por fadiga da junta soldada.

A diferença de comportamento por fadiga da junta soldada com relação ao posicionamento do entalhe também pode ser explicada em função do fechamento de trinca. A Figura 8 mostra os resultados obtidos, indicando o melhor desempenho da junta quando o entalhe está situado na zona fundida.

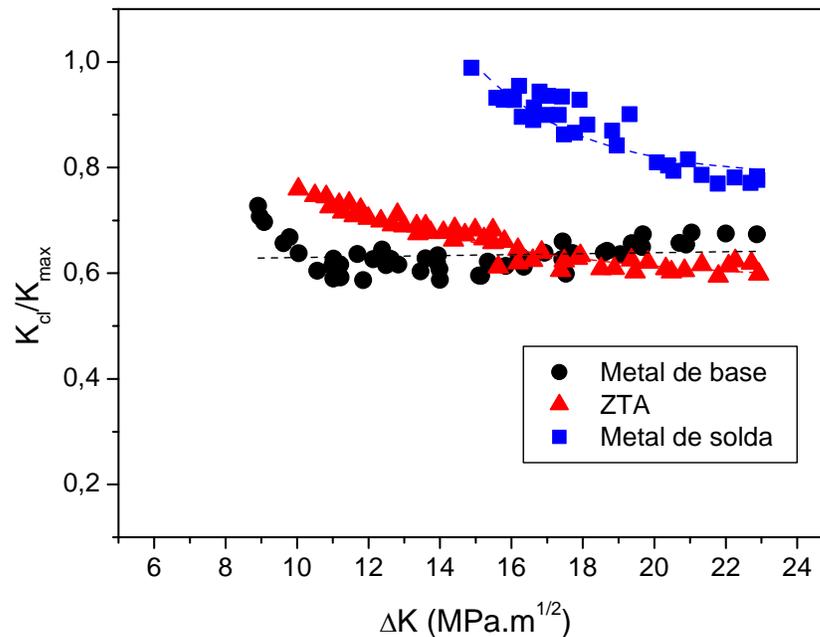


Fig. 8: Influência do posicionamento do entalhe no fechamento de trinca por fadiga da junta soldada.

A Figura 9 (a,b,c) apresenta microfratografias de um CP com entalhe no metal de solda (zona fundida) ensaiado em fadiga com razão entre tensões mínima e máxima, $R = 0,1$. Nota-se, na região de início de propagação (Figura 9(a)), a presença de facetas, com um aspecto mais cisalhado. A Figura 9(b) apresenta uma região de transição com tendência de mudança de mecanismo e a presença de estrias de fadiga. A região final (Figura 9(c)) também mostra a

presença de estrias de fadiga. Porém, estas se mostram mais afastadas uma vez que a velocidade de propagação é maior nessa região.

Já a Figura 10(a,b,c) apresenta os resultados da análise microfratográfica de um CP com entalhe no metal de adição (zona fundida) ensaiado em fadiga, porém com razão entre tensões mínima e máxima, $R = 0,7$. Nota-se, na região de início de propagação (Figura 10(a,)) que não há tantas regiões de cisalhamento quando comparada a região inicial para $R = 0,1$. Nota-se, ainda a presença de algumas regiões com estrias de fadiga na região de transição.

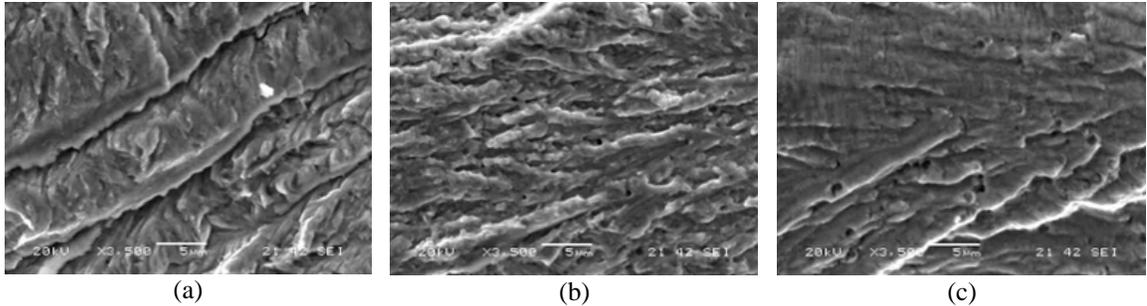


Fig. 9: CP ensaiado em fadiga; entalhe no metal de solda; $R = 0,1$; sistema: junta soldada de aço AISI 444/AISI 316LS, 3500X, MEV; (a) região de início da propagação; (b) região de transição; (c) região final de propagação.

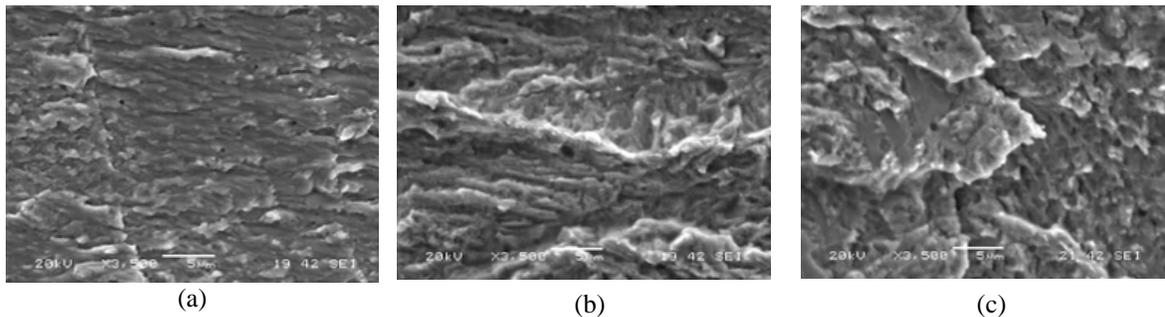


Fig. 10: CP ensaiado em fadiga; entalhe no metal de solda; $R = 0,7$; sistema: junta soldada de aço AISI 444/AISI 316LS, 3500X, MEV; (a) região de início da propagação; (b) região de transição; (c) região final de propagação.

A Figura 11(a,b,c) apresenta microfratografias de um CP com entalhe na ZTA ensaiado em fadiga com razão entre tensões mínima e máxima, $R = 0,1$. Nota-se, regiões distintas em relação ao metal de solda, o que significa diferentes mecanismos de propagação nessa região. Nota-se, também a presença de estrias de fadiga tanto na região de transição como na região final de propagação.

A Figura 12(a,b,c) apresenta microfratografias de um CP com entalhe no metal base ensaiado em fadiga com razão entre tensões mínima e máxima, $R = 0,1$. Novamente, nota-se, na região de início, um aspecto mais facetado, uma região mais cisalhada. A presença de estrias de fadiga também foi constatada nas regiões intermediária e final de propagação.

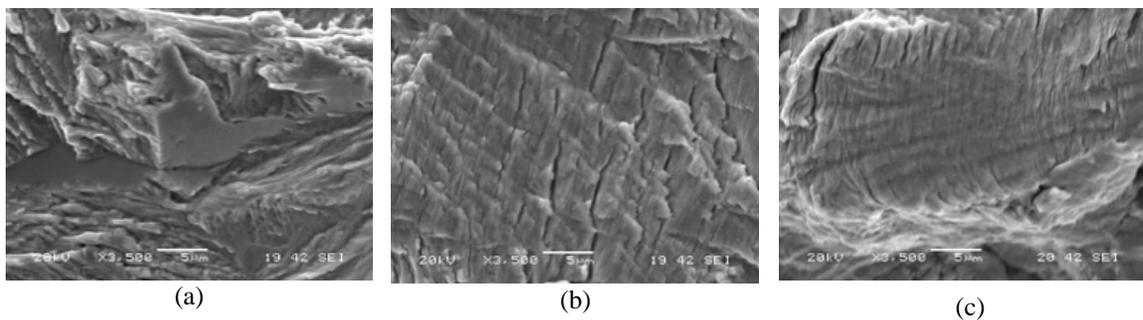


Fig. 11: CP ensaiado em fadiga; entalhe na ZTA; R = 0,1; sistema: junta soldada de aço AISI 444/AISI 316LSi; 3500X; MEV. (a) região de início da propagação; (b) região de transição; (c) região final de propagação.

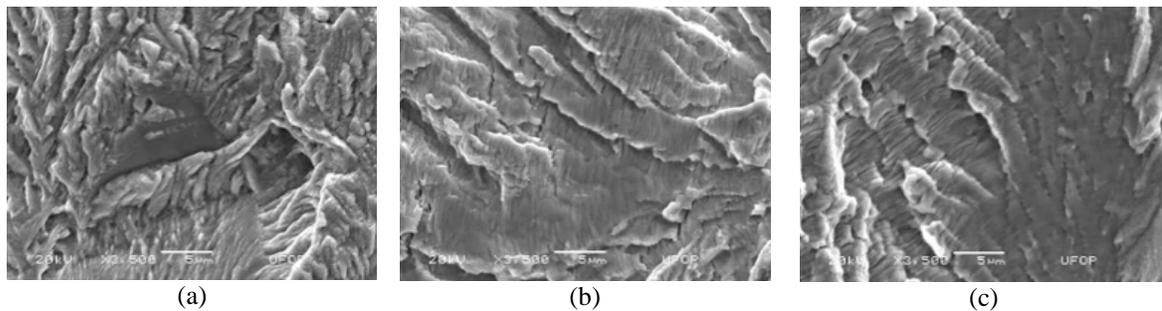


Fig. 12: CP ensaiado em fadiga; entalhe no metal base; R = 0,1; sistema: junta soldada de aço AISI 444/AISI 316LSi; 3500X; MEV. (a) região de início da propagação; (b) região de transição; (c) região final de propagação.

CONCLUSÕES

Em função dos parâmetros de soldagem, o valor encontrado para a energia de soldagem foi de 5,6kJ/cm, considerada baixa e desejável para uma junta.

Os CPs com entalhe e pré-trinca na região do cordão de solda (austenítico) foram ensaiados para valores de razão entre tensões $R = 0,1$ e $R = 0,7$. Os resultados obtidos mostraram o efeito deletério do aumento da razão R na resistência à propagação de trinca por fadiga, em função do fechamento de trinca desenvolvido.

Para os ensaios empregando-se $R = 0,1$, encontrou-se um valor de ΔK_{th} da ordem de $14\text{MPa}\sqrt{m}$. Para os ensaios empregando-se $R = 0,7$, encontrou-se um valor de ΔK_{th} da ordem de $10\text{MPa}\sqrt{m}$.

A partir da análise da curva (da/dN) versus ΔK , fica evidente a diferença de comportamento em relação as regiões do metal base, ZTA e metal de adição. Isto pode ser explicado, principalmente pela heterogeneidade da microestrutura da junta soldada obtida após o processo de soldagem, com consequentes efeitos no valor do fechamento de trinca. O melhor comportamento foi apresentado pelo CP com entalhe e pré-trinca na zona fundida (AISI 316LSi, austenítico). O pior comportamento se deu para o CP com entalhe no metal base (AISI 444, ferrítico).

Análises fractográficas mostraram os aspectos típicos da fratura por fadiga. A região de início apresentou características de cisalhamento, ou seja, uma região mais facetada. As regiões intermediária e final apresentaram estrias de fadiga, sendo as estrias mais afastadas na região final, tendo em vista que a velocidade de propagação foi maior nessa região.

REFERÊNCIAS

1. STAINLESS STEELS – ASM SPECIALITY HANDBOOK, ASM, 1994.
2. OLIVEIRA, T.R.; FARIA, R.A. SEMINÁRIO INOX 2000, 2000, São Paulo. p.85-92.
3. AKITA, M.; NAKAJIMA, M.; TOKAJI, K.; SHIMIZU, T. Materials & Design, Dezembro 2004.
4. GODEFROID, L.B., CÂNDIDO, L.C. E MORAIS, W.A.. Análise de Falhas – ABM. 2004. 467p. , Belo Horizonte, 2004.
5. BRANDI, S. D.; FARIA, R.A. , Relatório Técnico – Acesita S/A, 1999
6. SARWAR, M.; PRIESTNER, R., *J.Mater.Engng.Performance*, Vol.8, 1999, pp.245-251.
7. SUN, L., LI, S.; ZANG, Q. ; WANG, Z., *Scripta Metall.*, Vol.32, 1995, pp.517-521.
8. SHANG, J.K.; TZOU, J.L.; RITCHIE, R.O., *Metall. Trans. A*, Vol.18, 1987, pp.1613-1627.
9. RAMAGER, R.; JATA, K.; SHIFLET, G.; STARKE, E., *Metall. Trans. A*, Vol.8, 1987, pp.1291-1298.
10. TZOU, J.L.; RITCHIE, R.O., *Scripta Metall.*, Vol.19, 1985, pp.751-755.
11. CAI, X.L.; FENG, J.; OWEN, W.S., *Metall. Trans. A*, Vol.16, 1985, pp.1405-1415.
12. DUTTA, V.B.; SURESH, S.; RITCHIE, R.O., *Metall. Trans. A*, Vol.15, 1984, pp.1193-1207.
13. MINAKAWA, K.; MATSUO, Y.; MCEVILY, A.J., *Metall. Trans. A*, Vol.13, 1982, pp.439-445.
14. SUZUKI, H.; MCEVILY, A.J., *Metall. Trans. A*, Vol.10, 1979, pp.475-481.
15. RITCHIE, R.; YU, W.; BLOMA, A.; HOLMD, *Fat. Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol.10, 1987, pp.343-362.
16. ZAIKEN, E.; RITCHIE, R.O., *Metall. Trans. A*, Vol.16, 1985, pp.1467-1477.
17. UNANGST, K.D.; SHIH, T.T.; WEIR, P., *Engng. Fract. Mech.*, Vol.9, 1977, pp.725-734.