

# TENACIDADE À FRATURA E CRESCIMENTO DE TRINCA POR FADIGA DE UM AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO DO TIPO AISI-439<sup>1</sup>

Wagner Duarte Flores<sup>2</sup>  
Ricardo Augusto Faria<sup>3</sup>  
Luiz Cláudio Cândido<sup>4</sup>  
Leonardo Barbosa Godefroid<sup>4</sup>

## Resumo

Este trabalho possibilitou a caracterização de um aço inoxidável ferrítico do tipo AISI 439, estabilizado duplamente com titânio e nióbio. Procurou-se demonstrar que nem sempre a utilização de ensaios tradicionais de tração e de dureza permite avaliar completamente o comportamento mecânico do material. A utilização de ensaios de mecânica de fratura, como tenacidade à fratura (CTOD de carga máxima) e crescimento de trinca por fadiga devem ser empregados para se ter uma avaliação mais rigorosa do material.

**Palavras-chave:** Aço inoxidável; Tenacidade à fratura; Fadiga.

## FRACTURE TOUGHNESS OF A AISI-439 FERRITIC STAINLESS STEEL

### Abstract

The purpose of this paper is to study the mechanical behavior of a AISI-439 ferritic stainless steel stabilized with Ti and Nb. It's not possible to characterize precisely the properties of the steel with the use of simple tension and hardness tests. Fracture mechanical tests, like CTOD of maximum load and fatigue crack growth were considered to a more rigorous analysis.

**Key words:** Stainless steel; Fracture toughness; Fatigue.

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

<sup>2</sup> *Aluno de Engenharia Metalúrgica, Escola de Minas da UFOP, Ouro Preto – MG.*

<sup>3</sup> *Engenheiro Metalurgista, ARCELORMITALL Timóteo, doutorando da REDEMAT, UFOP, Ouro Preto – MG.*

<sup>4</sup> *Professor, M.Sc., D.Sc., REDEMAT, UFOP, Ouro Preto – MG.*

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis são uma importante classe de liga na engenharia, com uma ampla faixa de aplicações em muitos meios. Fundamentalmente, os aços inoxidáveis são ligas a base de ferro-cromo (Fe-Cr) com adições de outros elementos de liga para finalidades específicas. Ligas de aço inoxidável cromo-níquel começaram a ser utilizadas como material de construção a partir de 1930. Atualmente, estima-se que existam por volta de 150 tipos de aços inoxidáveis, compreendendo cerca de 2 % da produção mundial de aço, com uma faixa de aplicação muito ampla e notáveis propriedades como resistência mecânica, formabilidade, soldabilidade e resistência à corrosão.

Os aços inoxidáveis ferríticos têm um reticulado CCC, sendo mais baratos e menos resistentes à corrosão que os aços inoxidáveis austeníticos, apesar de serem mais resistentes à corrosão-sob-tensão. São classificados na série AISI 400. Suas principais características são: sua resistência à corrosão generalizada é menor em relação aos aços inoxidáveis austeníticos e maior em relação aos aços inoxidáveis martensíticos; na soldagem apresentam alterações, como maior deformação de grãos (grãos menos recristalizados), na ZTA; portanto, quando não estabilizados sofrem crescimento de grãos; são magnéticos; não são transformáveis por tratamento térmico; boa ductilidade e formabilidade; resistência mecânica a altas temperaturas relativamente baixa e, em temperatura ambiente, é limitada.

A utilização dos aços inoxidáveis ferríticos é limitada pelo teor de elementos intersticiais (C, N, O, S), os quais influenciam na corrosão por pites e intergranular, bem como na tenacidade deles. O aumento dos teores de Cr e Mo levam a uma melhor resistência à corrosão por pites, mas uma menor tenacidade devido a precipitação de carbonetos de cromo. A utilização de elementos estabilizantes (Ti e Nb) tem a função de formar precipitados mais estáveis e, conseqüentemente, melhoram estas propriedades.

O presente trabalho teve como objetivo a caracterização de propriedades mecânicas de um aço inoxidável ferrítico, duplamente estabilizado com Ti e Nb. Procurou-se enfatizar as vantagens da utilização de ensaios de mecânica de fratura, como CTOD de carga máxima para a determinação da tenacidade à fratura, e crescimento de trinca por fadiga, com a determinação do fechamento de trinca por fadiga para explicar o comportamento do material.

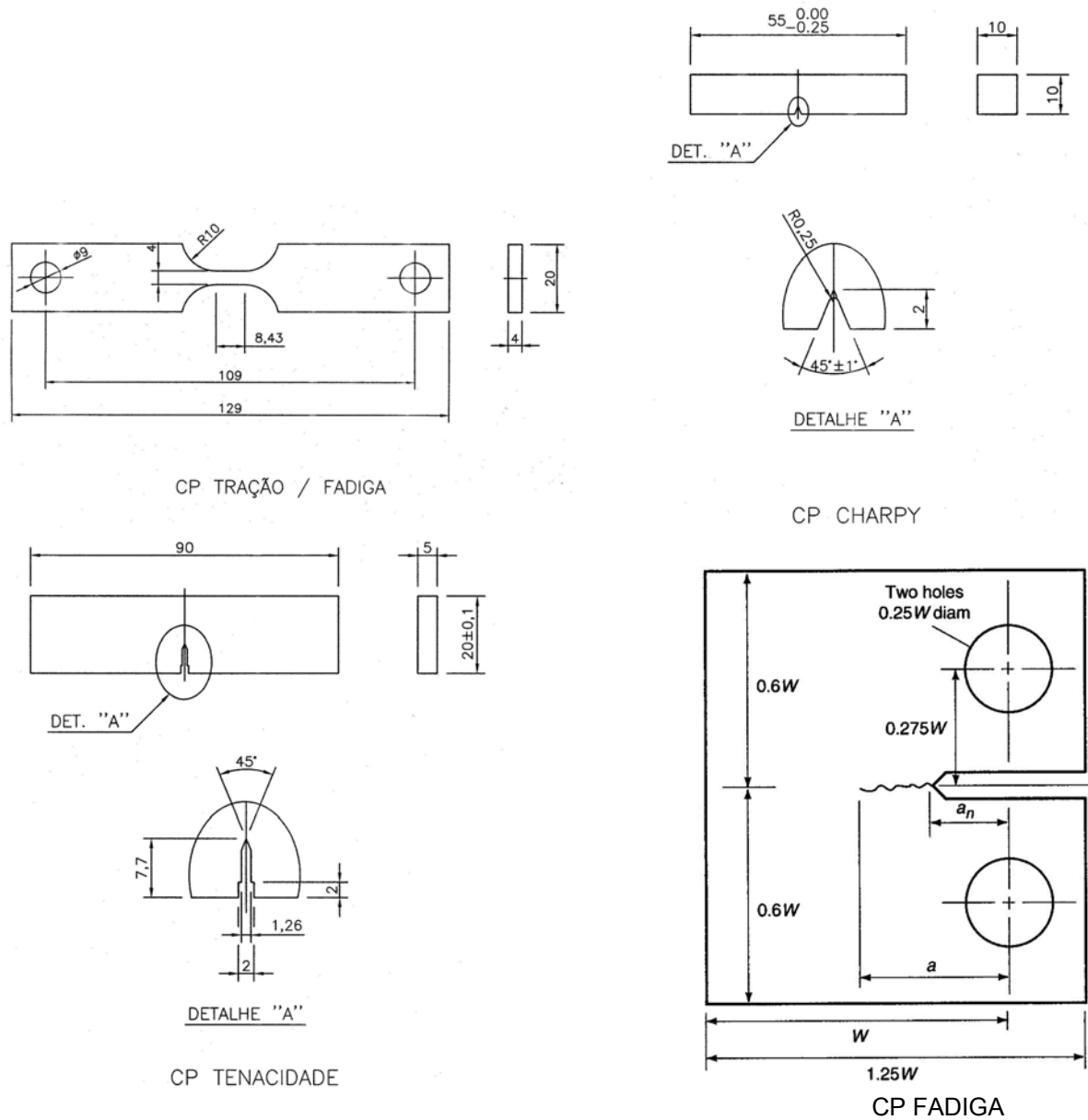
## 2 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A Tabela 1 apresenta a composição química do aço estudado. O primeiro aspecto a ser considerado é que o teor de cromo caracteriza o aço como sendo inoxidável. Observa-se que o aço em questão é do tipo AISI 439 ferrítico, uma vez que ele atende as faixas de composição para os elementos principais desta classe. O teor de carbono é relativamente baixo, indicando que se trata de uma nova geração destes aços. É importante comentar também que a composição química apresenta os elementos estabilizantes titânio e nióbio, em proporções que se adequam às especificações.

**Tabela 1:** Composição química do aço estudado (% em peso).

Aço\Elemento	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo		
AISI 439	0,016	0,459	0,180	0,003	0,023	0,136	16,913	0,041		
Aço\Elemento	Ti	Nb	V	Cu	W	Sn	Co	Al	Mg	Fe
AISI 439	0,162	0,199	0,068	0,022	0,011	0,003	0,036	0,009	0,019	81,70

Corpos-de-prova foram confeccionados para exame metalográfico no microscópio ótico, e ensaios mecânicos de tração, de dureza, de impacto, de tenacidade à fratura (CTOD de carga máxima) e de crescimento de trinca por fadiga. A Figura 1 apresenta esquemas dos corpos-de-prova.



**Figura 1:** Corpos-de-prova para os ensaios mecânicos.

A análise metalográfica foi realizada em um microscópio ótico LEICA, com analisador de imagens QWIN. As amostras metalográficas foram submetidas ao procedimento padrão de desbaste, lixamento, polimento, ataque e observação

através do microscópio ótico. Utilizou-se o reativo de Villela para revelação da microestrutura.

Os ensaios de tração, de tenacidade à fratura e de fadiga foram realizados em uma máquina servo-hidráulica MTS de 10 ton. Os ensaios de dureza (HRB) e de impacto foram realizados em equipamentos WOLPERT. Todos os ensaios foram realizados na temperatura ambiente, com umidade relativa de 70%. A Tabela 2 apresenta algumas características de cada um destes ensaios. A forma e dimensões das amostras ensaiadas assim como o procedimento dos ensaios seguem os padrões de normas técnicas da ASTM. Todos os corpos-de-prova foram posteriormente levados a um microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM-5510, com EDS, para análise fratográfica.

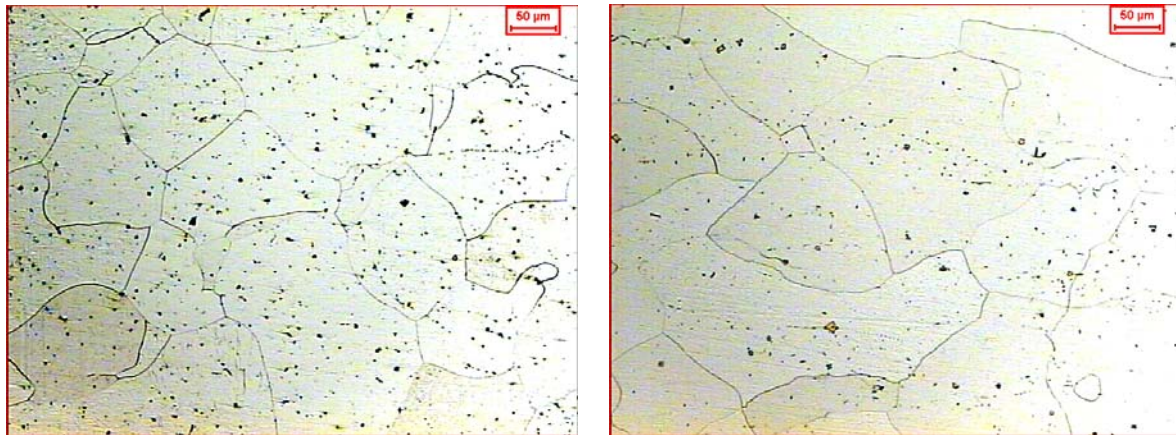
**Tabela 2:** Características gerais dos ensaios mecânicos.

ITEM \ ENSAIO	TRAÇÃO	IMPACTO	TENACIDADE	FADIGA
Tipo de CP	Barra c/seção retangular	Barra c/seção quadrada	Barra p/dobramento	C(T)
Dimensões do CP: LxWxB (mm)	50 x 10 x 5	55 x 10 x 10	90 x 20 x 10	60 x 50 x 10
Nº de CP's	2	6	3	2
Tipo de controle	Deslocamento	Carga	Deslocamento	Carga
Velocidade (mm/min)	5	-	-0,5	-
Pré-trinca (mm)	-	-	10	13

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2(a,b) apresenta a microestrutura do aço estudado, seção longitudinal e seção transversal em relação à direção de conformação mecânica. Inicialmente, percebe-se uma microestrutura monofásica, confirmando se tratar de um aço ferrítico. Como não há diferença significativa entre as duas fotos, conclui-se que o material não deve apresentar anisotropia. Percebe-se também a presença de precipitados, uns poucos provavelmente do tipo carbonitreto de titânio (identificado pela forma poliédrica) e muitos provavelmente de carboneto de cromo. Por outro lado, a microestrutura apresentou grãos de tamanho heterogêneo e demasiadamente elevado. Esta constatação mostra que o material provavelmente deve ter sido conformado em uma temperatura elevada, e que a presença dos elementos titânio e nióbio não foi suficiente para evitar o crescimento de grão. Pode ter acontecido também que a conformação ocorreu acima da temperatura de recristalização do aço em questão.

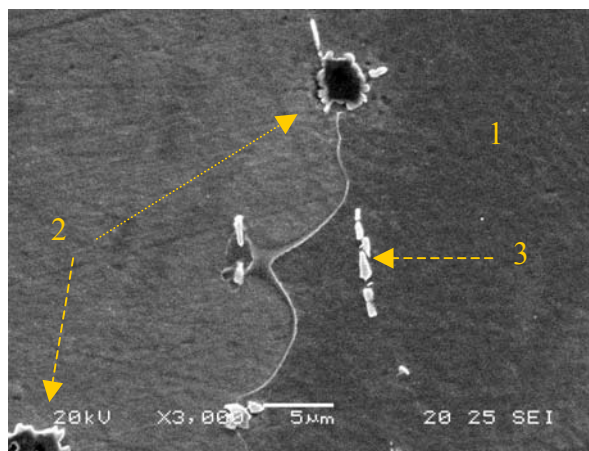
No sentido de esclarecer a natureza dos precipitados presentes na microestrutura, fez-se uma análise mais detalhada com a utilização do MEV. A Figura 3 mostra dois tipos de precipitados, com uma possível identificação.



(a) seção longitudinal.

(b) seção transversal.

**Figura 2:** Microestrutura do aço estudado. Microscópio ótico. 200X.



**Figura 3:** Presença de precipitados. MEV. 3000X.; (1): matriz de ferrita; (2) precipitado (Nb,Ti)C; (3) precipitado (Fe,Cr)<sub>23</sub>C<sub>6</sub>.

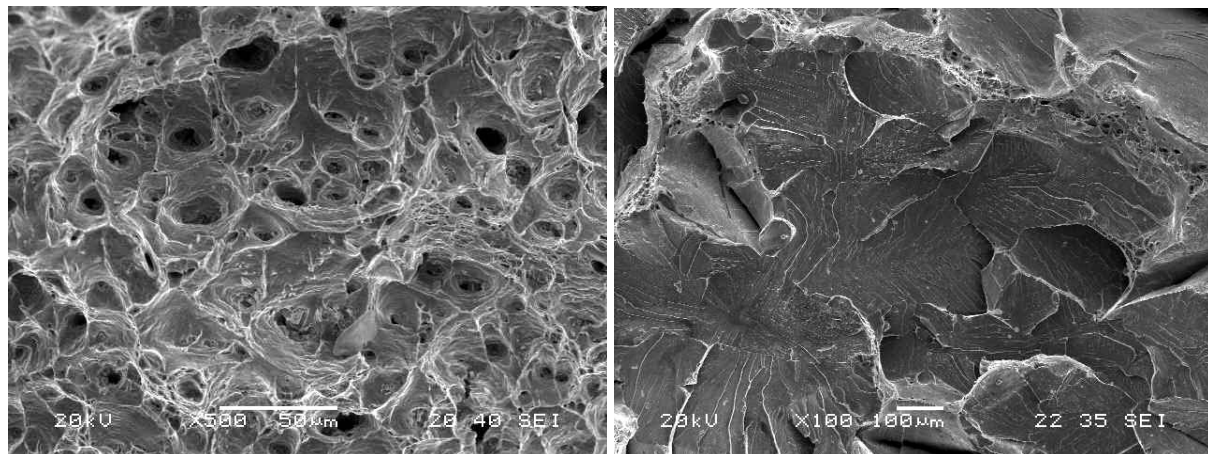
A Tabela 3 apresenta os resultados encontrados nos ensaios de tração (tensão limite escoamento  $\sigma_{LE}$ , tensão limite resistência  $\sigma_{LR}$  e deformação total  $\epsilon_t(\%)$ ) e dureza Rockwell. Verifica-se que o aço em questão atendeu as especificações da classe AISI 439. A Tabela 3 também inclui os resultados do ensaio de impacto (energia absorvida U e expansão lateral EL). Neste caso obtiveram-se valores muito baixos para o aço estudado, indicando comportamento frágil. Desta forma, conclui-se que o aço em questão apresenta uma sensibilidade muito grande à presença de entalhe. Este comportamento pode estar relacionado com a presença de precipitados em contornos de grãos, e com o tamanho de grão grosseiro do material.

**Tabela 3:** Resultados obtidos dos ensaios de tração, dureza e impacto do aço estudado.

Aço	$\sigma_{LE}$ (MPa)	$\sigma_{LR}$ (MPa)	$\epsilon_t(\%)$ (50mm)	U (J)	EL (mm)	HRB
439	$286 \pm 11$	$411 \pm 5$	$32 \pm 5$	$6,6 \pm 1,4$	$0,17 \pm 0,2$	$82,3 \pm 1$

A Figura 4(a) apresenta a fratura relativa ao ensaio de tração, enquanto que a Figura 4(b) mostra a fratura relativa ao ensaio de impacto. Pode-se observar que para solitação estática o comportamento do material é dúctil, com operação do mecanismo de nucleação, crescimento e coalescimento de microcavidades. Por

outro lado, para solicitação dinâmica o comportamento do material passa a ser frágil, com operação do mecanismo de clivagem.



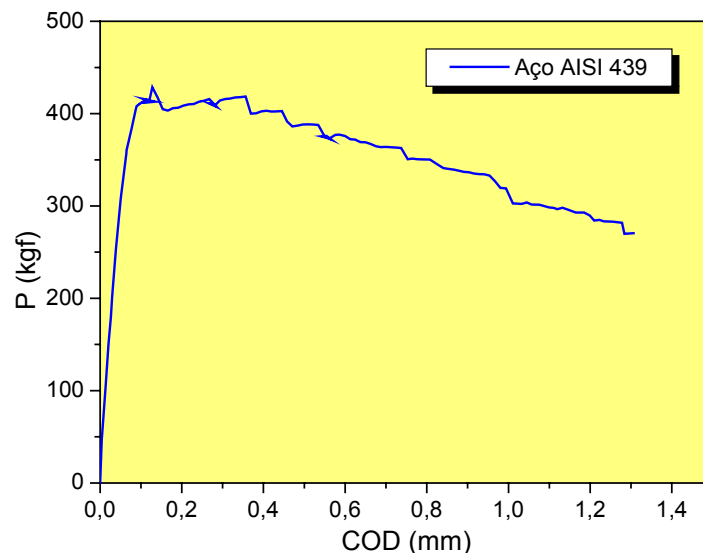
(a) Tração, 500X.

(b) Impacto, 100X.

**Figura 4:** Fratografias de corpo-de-prova ensaiado por tração e por impacto. MEV

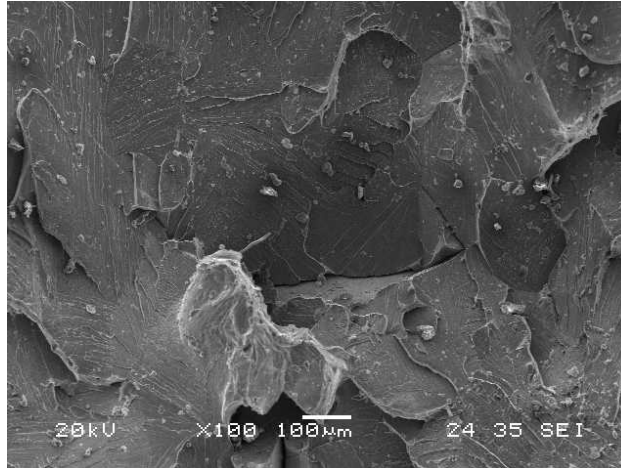
A Figura 5 mostra o gráfico utilizado para determinação da tenacidade à fratura do aço estudado, média dos ensaios realizados. Este gráfico foi traçado a partir do registro da carga  $P$  em função do deslocamento de abertura da boca do entalhe COD, até a fratura de cada corpo-de-prova. Pode-se observar que o aço atinge rapidamente a carga máxima, e depois fratura-se por um mecanismo descontínuo, indicando fragilidade.

De posse dos gráficos  $P \times COD$ , calculou-se o valor de CTOD de carga máxima na ponta do entalhe. O resultado médio encontrado foi de  $0,034 \pm 0,021$  mm, o que indica que o material teve comportamento bastante frágil. Observa-se também a dispersão de resultados.



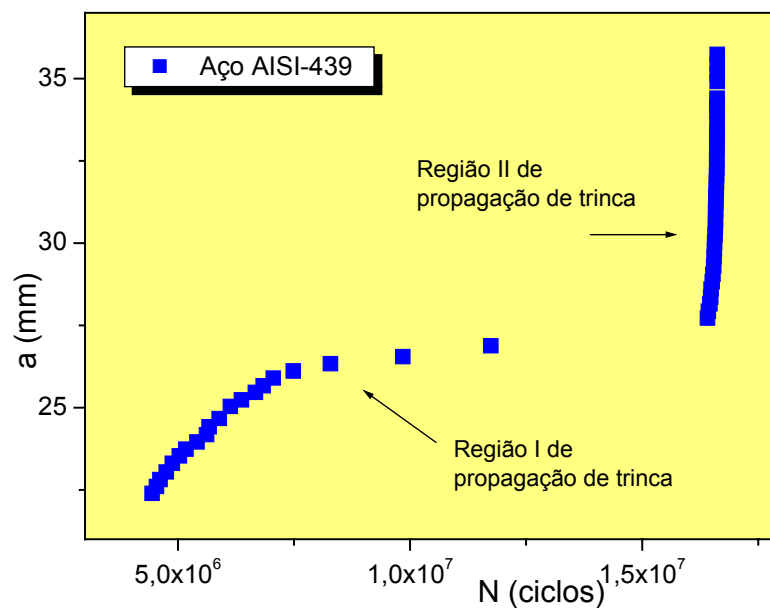
**Figura 5:** Gráfico de ensaio de tenacidade para o aço estudado.

A Figura 6 mostra a fratura relativa ao ensaio de tenacidade à fratura. Confirma-se o comportamento frágil do aço em questão, com operação do mecanismo de clivagem.

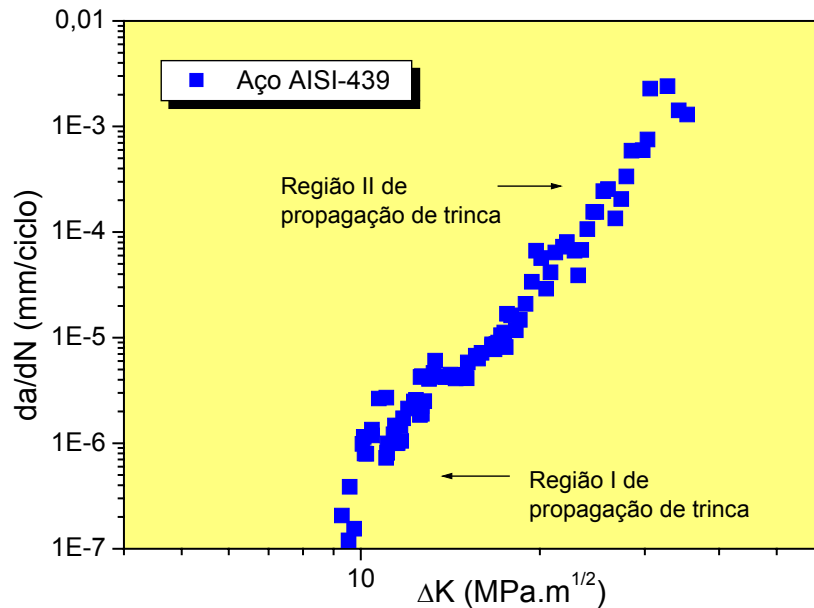


**Figura 6:** Fratografia de corpo-de-prova de tenacidade à fratura. MEV.

A Figura 7 mostra a curva tamanho de trinca versus número de ciclos, obtida para o aço em questão em um ensaio de propagação de trinca por fadiga. A curva apresentada consiste de duas regiões distintas. A primeira região refere-se ao ensaio realizado com decréscimo de carga, para determinação do limiar  $\Delta K_{th}$ , daí a curva apresentar uma taxa decrescente de propagação de trinca. A segunda região refere-se ao ensaio com carga constante, para determinação do restante da curva de propagação de trinca. A partir desta figura, tem-se a Figura 8 que representa a taxa  $da/dN$  de propagação de trinca por fadiga em função da força motriz  $\Delta K$ .

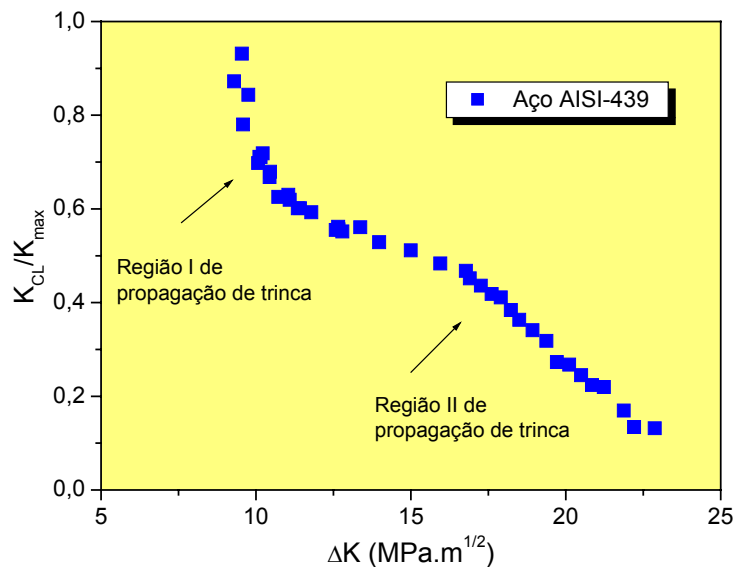


**Figura 7:** Curva de tamanho de trinca versus número de ciclos por fadiga para o aço estudado, duas regiões de propagação.



**Figura 8:** Curva de taxa de propagação de trinca por fadiga versus força motriz  $\Delta K$  para o aço estudado, duas regiões de propagação.

A Figura 9 mostra a curva de variação de fechamento de trinca com a força motriz  $\Delta K$  aplicada. Pode-se perceber que o aço do presente estudo consegue desenvolver um fechamento de trinca razoável na região do limiar. Por outro lado, pelos baixíssimos valores atingidos para o fechamento de trinca no final do ensaio, conclui-se que o aço em questão não está conseguindo desenvolver nenhum mecanismo de fechamento de trinca, o que confirma a sua fragilidade.

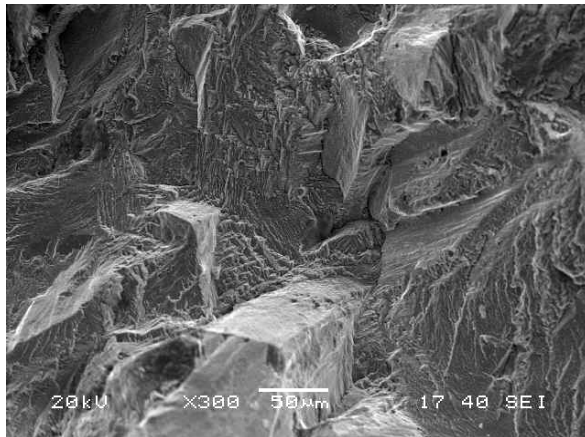


**Figura 9:** Curva de fechamento de trinca por fadiga versus força motriz  $\Delta K$  para o aço estudado, duas regiões de propagação.

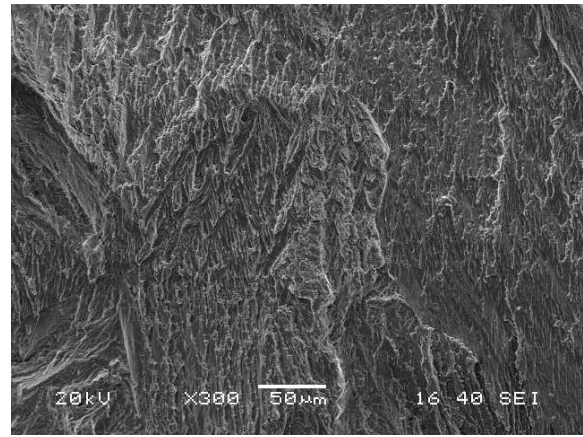
A Figura 10 mostra as fractografias relativas ao ensaio de fadiga. Observa-se que o mecanismo de fratura na região do limiar  $\Delta K_{th}$  é cristalográfico, uma vez que a trinca propaga-se nesta região em planos distintos de cisalhamento. À medida que a taxa



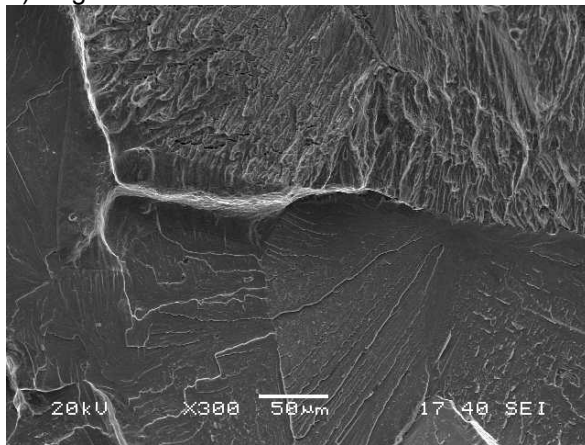
de propagação de trinca vai crescendo, o mecanismo de fratura para ser de formação de estrias, até a ruptura final por clivagem.



a) Região do limiar  $\Delta K_{th}$ . 300X.



b) Propagação intermediária. 300X.



c) Fratura. 300X.

**Figura 10:** Fratografias de corpo-de-prova de fadiga. MEV.

#### 4 CONCLUSÕES

O material estudado apresentou uma composição química que está de acordo com a especificação para a classe de aço inoxidável ferrítico do tipo AISI 439. A microestrutura do aço consistiu de grãos de ferrita, com um tamanho de grão heterogêneo e relativamente exagerado, e presença de precipitados do tipo  $M_{23}C_6$  e MC. Os resultados encontrados nos ensaios de tração mostraram valores de propriedades mecânicas conforme esperado para a classe de aço do tipo AISI 439, com comportamento relativamente dúctil. O mesmo pode ser dito para os resultados dos ensaios de dureza. Os resultados encontrados nos ensaios de impacto mostraram valores muito baixos para este tipo de material, indicando comportamento frágil na presença de entalhe. Os resultados encontrados nos ensaios de tenacidade à fratura também indicaram um comportamento frágil para o material na presença de entalhe. Os resultados encontrados nos ensaios de propagação de trinca mostraram um comportamento relativamente normal na região do limiar  $\Delta K_{TH}$ , mas um comportamento frágil na região de fratura, com fechamento de trinca tendendo para zero.

## REFERÊNCIAS

- 1 Faria, R.A.: Tese de doutorado, REDEMAT/UFOP, 2006.
- 2 ACESITA: documentos consultados na internet – [www.acesita.com.br](http://www.acesita.com.br)
- 3 Sousa, F.M.: Relatório PROMET/DEMET, 2005.
- 4 Vieira, D.H.: Relatório PROMET/DEMET, 2004.
- 5 Cândido, L.C.: Notas de Aula, disciplina “Aços Especiais”, GESFRAM/UFOP.
- 6 Godefroid, L.B.: Notas de Aula, disciplina “Fadiga e Fratura”, GESFRAM/UFOP.
- 7 Cândido, L.C., Godefroid, L.B. e Moraes, W.A.: Apostila “Análise de Falhas”, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.