

# ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO EM TEMPERATURAS ELEVADAS DE LIGAS FeCr COM ADIÇÕES DE Al E Y

Marina Fuser Pillis<sup>1</sup>

Lalgudi Venkataraman Ramanathan<sup>2</sup>

Antonio Augusto Couto<sup>3</sup>

Arnaldo Homobono Paes de Andrade<sup>4</sup>

Mariano Castagnet<sup>5</sup>

Danieli Aparecida Pereira Reis<sup>6</sup>

## Resumo

Além de elevadas condutividades térmica e elétrica, e alta resistência à corrosão, o material utilizado como interconectores em células a combustível de óxido sólido (SOFC) deve ter propriedades mecânicas adequadas, tanto à temperatura ambiente, quanto em altas temperaturas. O objetivo deste estudo é avaliar o comportamento mecânico à temperatura ambiente e em temperaturas elevadas de ligas FeCr sem e com adição de ítrio e/ou alumínio. As ligas FeCr, FeCrY, FeCrAl e FeCrAlY foram obtidas por meio de fusão a vácuo em forno elétrico à indução. Os lingotes foram forjados e laminados. Foram preparados corpos-de-prova para ensaios de tração realizados nas temperaturas ambiente, 800°C e 900°C. A microestrutura e as superfícies de fratura foram observadas em microscópio eletrônico de varredura. Todas as ligas apresentaram um alto nível de inclusões. A liga FeCrAlY apresentou o melhor desempenho em relação ao comportamento mecânico, em todas as temperaturas investigadas. Todas as ligas apresentaram fratura dúctil, com mecanismo predominante de fratura por microcavidades.

**Palavras-chave:** Ligas FeCr; Comportamento mecânico; Célula a combustível; Interconectores.

## HIGH TEMPERATURE MECHANICAL BEHAVIOR OF FeCr ALLOYS CONTAINING Y AND/OR Al

### Abstract

Materials used as solid oxide fuel cell (SOFC) interconnects should have high electrical and thermal conductivities, high corrosion resistance and adequate mechanical strength at room as well as at high temperatures. In the light of this, the aim of this study is to determine the mechanical behavior of FeCr alloys without and with Y and/or Al additions at room and at high temperatures. Ingots of four alloys, FeCr, FeCrY, FeCrAl and FeCrAlY were prepared by induction vacuum melting and casting. These ingots were forged and rolled. Tensile test specimens were machined from the rolled sheets. The tensile tests were carried out at room temperature, 800°C and 900°C. Scanning electron microscopy was used to examine the microstructure of the alloys and the fractured surfaces after the tensile tests. The microstructure of all the alloys revealed a large number of inclusions. Among the alloys, FeCrAlY has the best mechanical behavior. The fracture surfaces of all the alloys tensile tested at the different temperatures revealed coalescence of micro-cavities (dimples) indicating ductile fracture.

**Key words:** FeCr alloy; Mechanical behavior; Fuel cell; Interconnects.

<sup>1</sup>Pesquisador do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, São Paulo - SP. Av. Lineu Prestes, 2.242, Cidade Universitária, Cep 05508-000, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: mfpillis@ipen.br

<sup>2</sup>Pesquisador do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, São Paulo - SP. Av. Lineu Prestes, 2.242, Cidade Universitária, Cep 05508-000, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: lalgudi@ipen.br

<sup>3</sup>Professor da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie e Pesquisador do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, São Paulo - SP. Rua da Consolação, 930, Consolação, Cep 01302-907, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: acouto@ipen.br

<sup>4</sup>Pesquisador do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, São Paulo - SP. Av. Lineu Prestes, 2.242, Cidade Universitária, Cep 05508-000, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: aandrade@ipen.br

<sup>5</sup>Mestrando do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, São Paulo - SP. Av. Lineu Prestes, 2.242, Cidade Universitária, Cep 05508-000, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: mcastag@ipen.br

<sup>6</sup>Pós-doutoranda do Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA/DCTA, São José dos Campos - SP. Praça Marechal Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, Cep 12228-900, São José dos Campos, SP, Brasil. E-mail: danielireis@hotmail.com

## I INTRODUÇÃO

A célula a combustível de óxido sólido (SOFC) é uma estrutura multicamada que consiste de materiais cerâmicos e metálicos. As aplicações industriais necessitam de centenas de volts e, para gerar essa quantidade, centenas de células e interconectores são montados em série formando, normalmente, um empilhamento vertical. A construção de uma SOFC plana implica no uso de um interconector para ligar o anodo de uma célula ao catodo da célula seguinte na pilha voltaica, para distribuir os gases no anodo e catodo e, ainda, para transportar a corrente eletrônica entre as células e no circuito externo.<sup>(1,2)</sup> Os interconectores cerâmicos à base de  $\text{LaCrO}_3$  dopados têm sido amplamente usados até agora em células a combustível<sup>(3)</sup> mas, além de apresentarem alguns problemas operacionais, o custo de fabricação desses interconectores para obtenção de componentes altamente densos é relativamente alto,<sup>(4)</sup> e a conformação mecânica é difícil. Recentemente, o uso de interconectores em material metálico despertou interesse, devido às facilidades de fabricação, baixo custo na conformação, e condutividade térmica adequada.<sup>(5)</sup> As células a combustível de óxido sólido operavam, em geral, em temperaturas da ordem de 1.000°C.

Nos últimos anos, avanços nos materiais e técnicas de fabricação de células a combustível de óxido sólido conduziram à diminuição da temperatura de operação.<sup>(6)</sup> Consequentemente, os aços inoxidáveis ferríticos, que têm coeficiente de expansão térmica condizente com os componentes cerâmicos das células, são agora considerados entre os candidatos mais promissores para confecção de interconectores.<sup>(7,8)</sup> Esses aços são resistentes à alta temperatura devido à formação de uma camada de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Há aproximadamente 60 anos descobriu-se que a adição de elementos reativos, como Y, Zr e Ce, entre outros, a ligas formadoras de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  melhora algumas das propriedades do óxido, melhorando assim o nível de proteção conferido à liga. Vários mecanismos têm sido propostos para explicar as melhorias sobre a resistência à oxidação, propiciadas pela adição de elementos como Hf, Zr e Y ou uma dispersão de seus óxidos. Nestes mecanismos as terras raras: a) atuam como sítios preferenciais para a nucleação de óxidos;<sup>(9)</sup> b) modificam a microestrutura do óxido podendo, como consequência, modificar as velocidades de difusão e as tensões na camada de óxido;<sup>(10)</sup> c) reduzem o acúmulo de vazios na interface metal/óxido;<sup>(11)</sup> d) promovem efeito de enchavetamento mecânico;<sup>(12)</sup> e) alteram o mecanismo de crescimento do óxido.<sup>(13)</sup> O mecanismo mais aceito atualmente é o de que íons de elementos de terras-raras se difundem para os contornos de grão do metal e do óxido, inibindo a difusão catiônica. Como consequência, tem-se uma queda na velocidade de oxidação da liga, que pode ser constatada pelo menor ganho de massa durante a oxidação e pela formação de uma camada mais fina, plástica e aderente de óxido sobre a superfície. Foi observado<sup>(14-16)</sup> que a adição de elementos reativos melhora também as propriedades elétricas das ligas.

Como a concentração de alumínio necessária para o estabelecimento de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  em ligas binárias pode resultar em propriedades mecânicas inaceitáveis, o cromo é normalmente adicionado a estas ligas, porque ele reduz a quantidade de Al necessária para o estabelecimento de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .<sup>(17)</sup> O mecanismo pelo qual o cromo facilita o estabelecimento de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  não está bem esclarecido. A hipótese

clássica é de que o cromo reaja com o oxigênio, reduzindo assim o fluxo do oxigênio para o interior da liga, enquanto o alumínio, que também está sendo removido da liga por oxidação, se difunda do interior da liga para a superfície, resultando no estabelecimento de uma camada rica em  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sobre ligas com concentrações relativamente baixas desse elemento. Entretanto, a hipótese clássica não é completamente consistente com observações da prática. Em geral, há pequena evidência da presença de cromo no óxido, que pode ser inteiramente  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Além das considerações relativas à condutividade térmica e resistência à corrosão, o material para uso como conector em células SOFC deve ter propriedades mecânicas adequadas, tanto à temperatura ambiente quanto em temperaturas elevadas, próximas à de operação da SOFC. Assim, o objetivo deste trabalho é estudar o comportamento mecânico à temperatura ambiente e em temperaturas elevadas de ligas FeCr para uso como interconectores em células a combustível estacionárias. Para realização do trabalho foram fabricadas ligas FeCr sem e com adições de Y e/ou Al. Foram feitos ensaios de tração nas temperaturas ambiente, 800°C e 900°C. A superfície de fratura dos corpos-de-prova ensaiados foram também observadas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

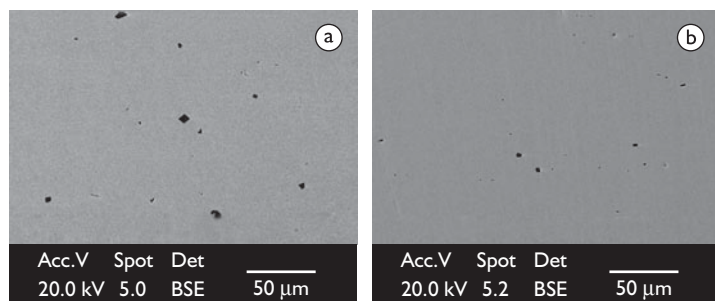
As ligas FeCr, FeCrY, FeCrAl e FeCrAlY, de pureza comercial, foram obtidas por meio de fusão a vácuo em forno elétrico à indução. A composição química dessas ligas foi obtida por fluorescência de raios X (FRX). Os lingotes foram forjados a 980°C e parte dos lingotes foi laminada a quente após o forjamento, para permitir a confecção de corpos-de-prova para os ensaios de tração. Amostras das quatro ligas foram cortadas, embutidas, lixadas e polidas para análise por microscopia eletrônica de varredura. A observação das amostras, sem ataque químico, foi feita em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) Philips acoplado a um sistema de análise química elementar por espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS). As ligas foram submetidas a ensaios de tração em uma máquina universal de ensaios mecânicos Instron. Os corpos-de-prova foram confeccionados conforme norma ASTM E 8M. Os ensaios foram conduzidos ao ar e nas temperaturas ambiente, 800°C e 900°C. Foram determinados o limite de escoamento, o limite de resistência e o alongamento dos corpos-de-prova durante os ensaios de tração.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

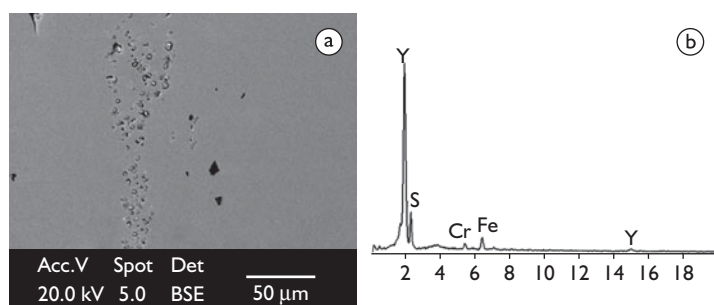
A composição química das ligas utilizadas neste trabalho está apresentada na Tabela I. Nota-se que ocorreram pequenas variações no teor de cromo com relação à composição básica das ligas com 20% de cromo. Na Figura 1a está apresentada a seção transversal da liga FeCr forjada e laminada a quente, observada por MEV. É possível observar a presença de inclusões ricas em Cr, conforme análises por EDS. Na Figura 1b está apresentada a seção longitudinal da liga FeCrAl forjada e laminada a quente, observada por MEV. Observa-se também nesta micrografia a presença de inclusões. Na Figura 2a está apresentada a seção longitudinal da liga FeCrY forjada e laminada a quente, sem ataque, em imagem obtida por MEV. Observam-se nesta figura partículas claras alinhadas que, análises por EDS, indicam serem ricas em Y, como mostra a Figura 2b. Na Figura 3a está apresentada a seção longitudinal da liga FeCrAlY forjada e laminada a quente, em imagem obtida por MEV. Análises por EDS indicam que as regiões brancas são ricas em ítrio, como mostra a Figura 3b. De uma maneira geral, nota-se que as quatro ligas estudadas apresentam um nível de inclusões acima do esperado, o que compromete as propriedades mecânicas do material.

**Tabela I.** Composição química das ligas estudadas (%p), obtida por FRX

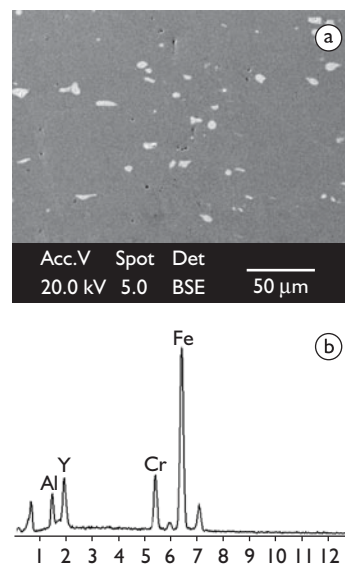
Ligas	Elementos			
	Cr	Al	Y	Fe
FeCr	19,74	-	-	Balanço
FeCrY	20,05	-	0,69	Balanço
FeCrAl	18,44	4,95	-	Balanço
FeCrAlY	18,70	5,40	0,58	Balanço



**Figura 1.** a) Seção transversal da liga FeCr forjada e laminada a quente; b) Seção longitudinal da liga FeCrAl forjada e laminada a quente.

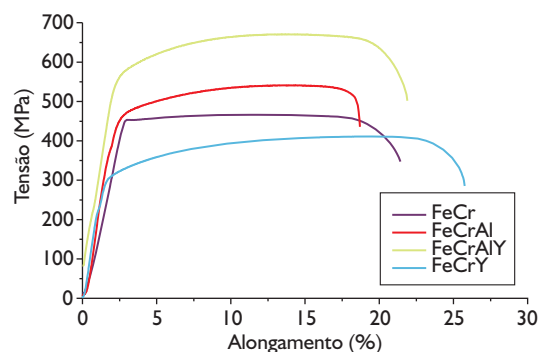


**Figura 2.** a) Seção longitudinal da liga FeCrY forjada e laminada a quente; b) Análise química por EDS das partículas claras.



**Figura 3.** a) Seção longitudinal da liga FeCrAlY forjada e laminada a quente; b) Análise química por EDS das regiões claras.

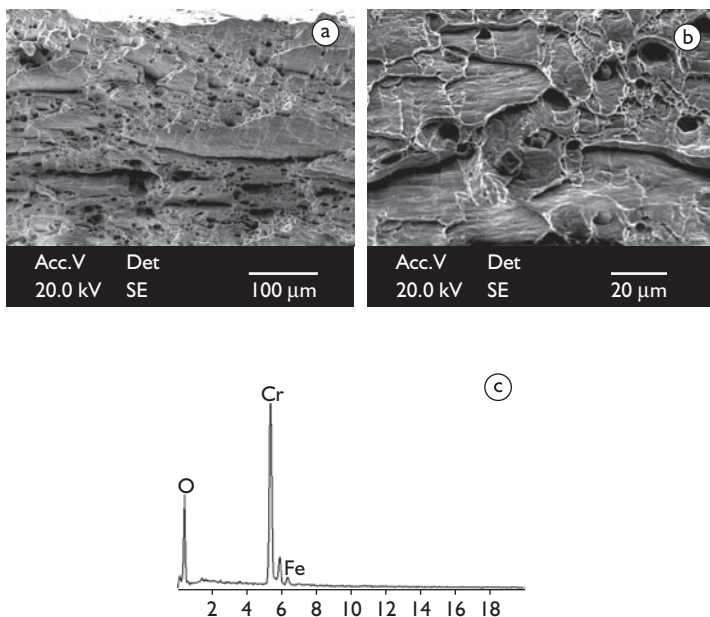
Na Figura 4 estão apresentadas as curvas obtidas em ensaios de tração à temperatura ambiente das ligas FeCr, FeCrY, FeCrAl e FeCrAlY. De uma maneira geral, todas as ligas apresentaram uma boa ductilidade à temperatura ambiente, demonstrada pelo alongamento da ordem de 20% ou acima. Assim, a quantidade de inclusões presente nas ligas não foi suficiente para causar fragilização. A liga FeCrAlY mostra o melhor comportamento mecânico em tração entre as ligas estudadas, com uma melhor combinação entre resistência mecânica e ductilidade. Numa análise sobre os efeitos dos elementos de liga nas propriedades mecânicas em tração à temperatura ambiente das ligas FeCr, não é possível identificar precisamente a contribuição de cada um deles. Enquanto a adição de Y provoca uma diminuição brusca na resistência mecânica da liga FeCr, o mesmo Y em conjunto com o Al acarreta os maiores valores de limite de resistência. Contudo, o Al separadamente não altera significativamente a resistência mecânica da liga.



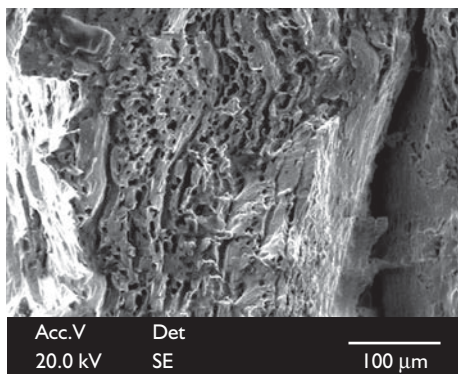
**Figura 4.** Curvas tensão x deformação obtidas em ensaios de tração à temperatura ambiente de corpos-de-prova das ligas FeCr, FeCrY, FeCrAl e FeCrAlY.

Na Figura 5a está apresentada a superfície de fratura de corpos-de-prova da liga FeCr ensaiados em tração à temperatura ambiente. Observa-se nesta figura a presença de microcavidades, características de fratura dúctil. Na Figura 5b observam-se inclusões no interior destas microcavidades, provavelmente advindas do processamento metalúrgico da liga. A análise por EDS realizada nessas inclusões, apresentada na Figura 5c, indica que elas são ricas em Cr, com evidências também da presença de oxigênio, o que sugere que estas partículas sejam óxido de cromo.

Na Figura 6 está apresentada a superfície de fratura de corpos-de-prova da liga FeCrY ensaiados em tração à temperatura ambiente. Como observado para a liga FeCr, nota-se também, nesta fractografia, uma grande quantidade de microcavidades, evidenciando o caráter dúctil da fratura.

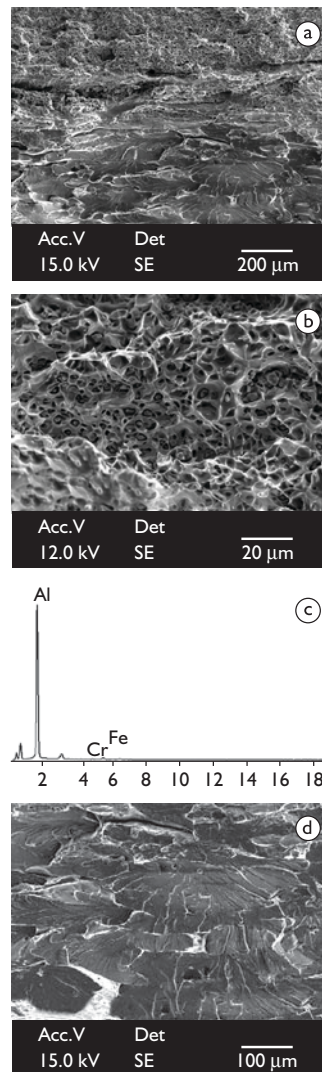


**Figura 5.** a-b) Superfície de fratura típica de corpos-de-prova ensaiados em tração a temperatura ambiente da liga FeCr; e c) Análise química por EDS das inclusões.



**Figura 6.** Superfície de fratura típica de corpos-de-prova ensaiados em tração à temperatura ambiente da liga FeCrY.

Na Figura 7a está apresentada a superfície de fratura de corpos-de-prova da liga FeCrAl ensaiados em tração à temperatura ambiente. Observa-se a existência de duas regiões, com mecanismos de fratura diferenciados. Na parte superior da fractografia da Figura 7a observa-se uma região de fratura dúctil, caracterizada pela presença de microcavidades, como mostra em detalhe a Figura 7b. Da mesma maneira que observado nas fractografias da liga FeCr, fica evidente a presença de inclusões no interior das microcavidades. Contudo, diferentemente do caracterizado nas ligas FeCr, onde as inclusões são ricas em Cr, nas ligas FeCrAl as inclusões são ricas em Al, como pode ser visto no espectro obtido por EDS destas inclusões, mostrado na Figura 7c. Na parte inferior da Figura 7a observa-se uma superfície de fratura distinta da parte superior, com aspecto predominante de fratura frágil, caracterizado pela presença de clivagem, como pode ser visto em detalhe na Figura 7d.

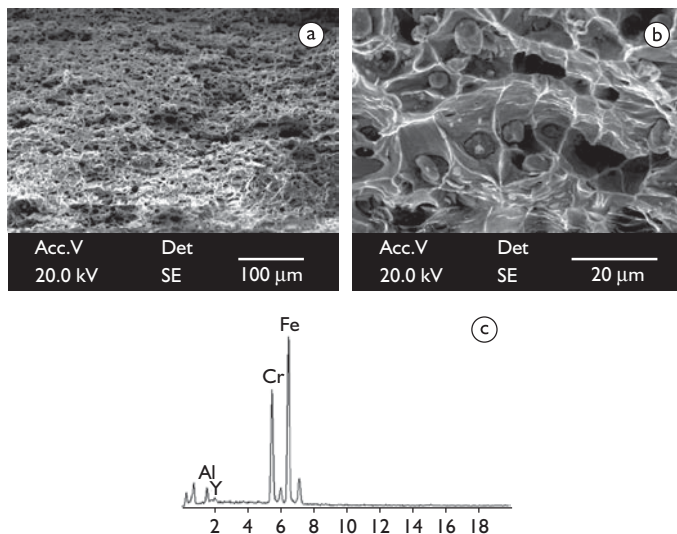


**Figura 7.** a) Superfície de fratura de corpos-de-prova da liga FeCrAl ensaiados em tração à temperatura ambiente; b) Detalhe da parte superior da Figura 7a; c) Análise química por EDS das inclusões; e d) Detalhe da parte inferior da Figura 7a.

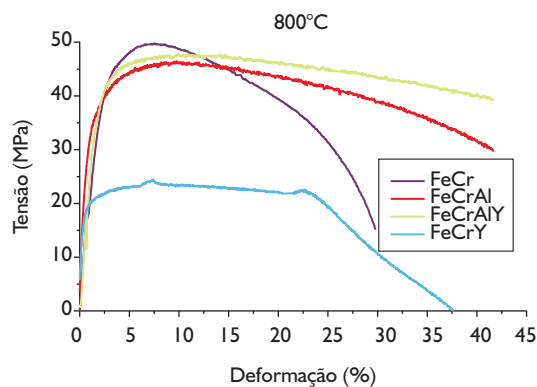


Na Figura 9 estão apresentadas as curvas obtidas em ensaios de tração a 800°C das ligas FeCr, FeCrY, FeCrAl e FeCrAlY. O melhor comportamento mecânico a 800°C, com uma melhor combinação entre resistência mecânica e ductilidade, foi obtido nas ligas FeCrAlY e FeCrAl, cujos resultados são bastante similares. Contudo, a liga FeCrAl havia apresentado propriedades mecânicas à temperatura ambiente um pouco inferiores ao apresentado pela liga FeCrAlY, o que pode ser explicado pelo caráter parcialmente frágil da fratura à temperatura ambiente da liga FeCrAl, como está mostrado na Figura 7. Como ocorreu à temperatura ambiente, a liga somente com adição de Y também apresenta a resistência mecânica mais baixa a 800°C. A liga FeCr sem adições, diferentemente do que ocorreu à temperatura ambiente, apresenta um alto valor de limite de resistência a 800°C. Contudo, o alongamento é relativamente mais baixo, decorrente, provavelmente, do alto nível de inclusões desta liga.

Na Figura 10 estão apresentadas as superfícies de fratura de corpos-de-prova das ligas FeCr, FeCrY, FeCrAl e FeCrAlY ensaiados em tração a 800°C. Na superfície de fratura da liga FeCr é constatada a presença de fratura dúctil, com a presença



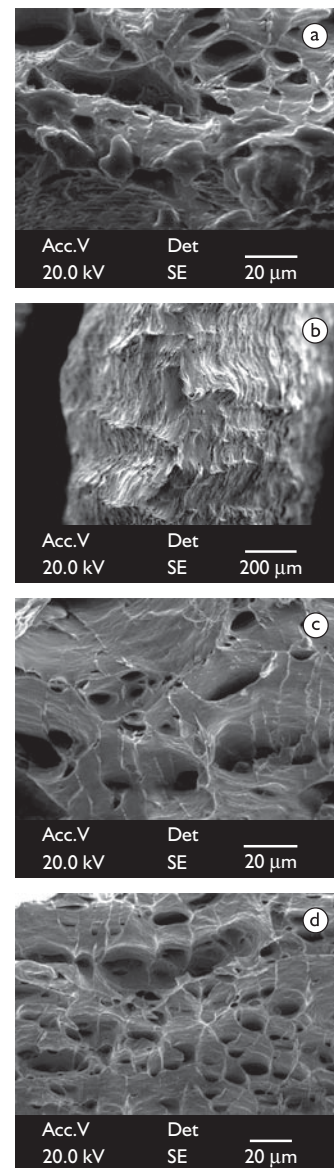
**Figura 8.** a) Superfície de fratura de corpos-de-prova da liga FeCrAlY ensaiados em tração à temperatura ambiente; b) Detalhe da fractografia da Figura 7a; e c) Análise química por EDS das inclusões.



**Figura 9.** Curvas tensão x deformação obtidas em ensaios de tração a 800°C, de corpos-de-prova das ligas FeCr, FeCrY, FeCrAl e FeCrAlY.

de microcavidades e inclusões ricas em cromo, como mostra a Figura 10a. Na Figura 10b está apresentada a superfície de fratura da liga FeCrY, onde se observam regiões com alto grau de deformação. As superfícies de fratura das ligas FeCrAl e FeCrAlY estão mostradas nas Figuras 10c e 10d, respectivamente. Nestas fractografias é evidenciada a presença de microcavidades. Contudo, não são observadas inclusões nestas superfícies de fratura.

Na Figura 11 estão apresentadas as curvas obtidas em ensaios de tração a 900°C das ligas FeCr, FeCrY, FeCrAl e FeCrAlY. Estas curvas seguem, praticamente, a mesma tendência do



**Figura 10.** Superfícies de fratura de corpos-de-prova ensaiados em tração a 800°C das ligas: a) FeCr; b) FeCrY; c) FeCrAl e d) FeCrAlY.

observado nos ensaios de tração das ligas FeCr, FeCrY, FeCrAl e FeCrAlY à temperatura ambiente e a 800°C. As melhores propriedades mecânicas a 900°C ocorrem na liga FeCrAlY, seguido da liga FeCrAl. Como aconteceu nas outras temperaturas de ensaio, a liga FeCrY apresenta os menores valores de resistência mecânica a 900°C. Contudo, a 900°C, a liga FeCr também não apresenta um bom desempenho mecânico quando comparado ao seu desempenho a 800°C. Além disso, a liga FeCr é a única a demonstrar algum encruamento em temperatura elevada. Esta constatação causa certa estranheza, não sendo possível sugerir o motivo para este comportamento com base nas investigações realizadas até o momento.

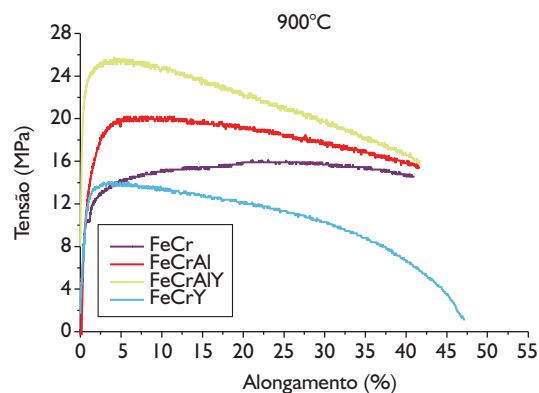
Na Figura 12 estão apresentadas as superfícies de fratura dos corpos-de-prova das ligas FeCr, FeCrY, FeCrAl e FeCrAlY, ensaiados em tração a 900°C. Nas superfícies de fratura das ligas FeCr (Figura 12a) e FeCrY (Figura 12b), ensaiadas a 900°C, é constatada apenas a existência de regiões altamente deformadas. Não é possível visualizar microcavidades nestas fractografias. Contudo, como as regiões observadas estavam altamente deformadas, provavelmente ocorre fratura dúctil nestas ligas a 900°C. Já nas superfícies de fratura das ligas FeCrAl (Figura 12c) e FeCrAlY (Figura 12d), ensaiadas a 900°C, podem ser observadas, além de regiões altamente deformadas, microcavidades e algumas inclusões. De uma maneira geral, as superfícies de fratura das quatro ligas investigadas evidenciam um comportamento de fratura dúctil.

#### 4 CONCLUSÕES

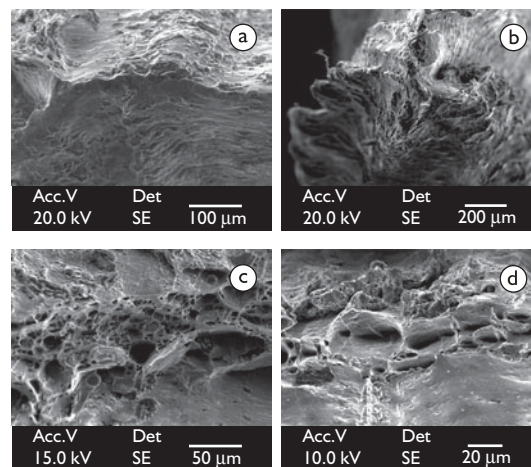
O estudo sobre o comportamento mecânico à temperatura ambiente e em temperaturas elevadas (800°C e 900°C) das ligas FeCr sem e com adições de Al e/ou Y permite concluir que a liga com o melhor desempenho em todas as temperaturas investigadas é a FeCrAlY. Todas as ligas, em todas as condições estudadas, apresentam fratura dúctil, com mecanismo predominante de fratura por microcavidades. Todas as ligas também apresentam um alto nível de inclusões, que prejudicaram o seu desempenho.

#### REFERÊNCIAS

- 1 BRYLEWSKI, T.; NANKO, M.; MARUYAMA, T.; PRZYBYLSKI, K. Application of Fe-16Cr ferritic alloy to interconnector for a solid oxide fuel cell. *Solid State Ionics*, v. 143, n. 2, p. 131-50, June 2001.
- 2 QUADAKKERS, W. J.; GREINER, H.; KOCK, W. Metals and alloys for high temperature SOFC application. In: EUROPEAN SOLID OXIDE FUEL CELL FORUM, I., 1994, Lucerne. *Proceedings...* Baden: European SOFC Forum, 1994. p. 522-41.
- 3 BADWAL, S. P. S.; DELLER, R.; FOGER, K.; RAMPRAKASH, Y.; ZHANG, J. P. Interaction between chromia forming alloy interconnects and air electrode of solid oxide fuel cells. *Solid State Ionics*, v. 99, n. 3-4, p. 297-310, Aug. 1997.
- 4 FONTANA, S.; CHEVALIER, S.; CABOCHE, G. Metallic interconnects for solid oxide fuel cell: Effect of water vapour on oxidation resistance of differently coated alloys. *Journal of Power Sources*, v. 193, n. 1, p. 136-45, Aug. 2009.
- 5 FERGUS, J. W. Metallic interconnects for solid oxide fuel cells. *Materials Science and Engineering A*, v. 397, n. 1-2, p.271-83, Apr. 2005.



**Figura 11.** Curvas tensão x deformação obtidas em ensaios de tração a 900°C de corpos-de-prova das ligas FeCr, FeCrY, FeCrAl e FeCrAlY.



**Figura 12.** Superfícies de fratura de corpos-de-prova ensaiados em tração a 900°C das ligas: a) FeCr; b) FeCrY; c) FeCrAl e d) FeCrAlY.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq o apoio financeiro concedido pelo projeto nº476019/2003-6.

- 6 YANG, Z.; XIA, G.; SINGH, P.; STEVENSON, J. Effects of water vapor on oxidation behavior of ferritic stainless steels under solid oxide fuel cell interconnect exposure conditions. *Solid State Ionics*, v. 176, n. 17-8, p.1495-503, May 2005.
- 7 QUADAKKERS, W. J.; PIRON-ABELLAN, J.; FLESH, U.; SHEMET, V.; SINGHERSER, L. Metallic interconnects for solid oxide fuel cells: a review. *Materials at High Temperature*, v. 20, n. 2, p. 115-27, 2003.
- 8 HORITA, T.; XIONG, Y.; YAMAJI, K.; SAKAI, N.; YOKOKAWA, H. Evaluation of Fe-Cr alloys as interconnects for reduced operation temperature SOFCs. *Journal of the Electrochemical Society*, v. 150, n. 3, p. A243-8, Mar. 2003.
- 9 RHYS-JONES, T. N.; GRABKE, H. J.; KUDIELKA, H. The effects of various amounts of alloyed cerium and cerium oxide on the high temperature oxidation of Fe-10Cr and Fe-20Cr alloys. *Corrosion Science*, v. 27, n. 1, p.49-73, 1987.
- 10 MOON, D. P. Role of reactive elements in alloy protection. *Materials Science and Technology*, v. 5, n. 8, p. 754-64, Aug. 1989.
- 11 PILLING, N. B.; BEDWORTH, R. E. The oxidation of metals at high temperatures. *Journal of the Institute of Metals*, v. 29, p. 529-91, 1923.
- 12 WHITTLE, D. P.; STRINGER, J. Improvements in high temperature oxidation resistance by additions of reactive elements or oxide dispersions. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. A295, n. 1413, p. 309-29, 1980.
- 13 PIERAGGI, B.; RAPP, R. A. Chromia scale growth in alloy oxidation and the reactive element effect. *Journal of the Electrochemical Society*, v. 140, n. 10, p. 2844-50, Oct. 1993.
- 14 FONTANA, S.; AMENDOLA, R.; CHEVALIER, S.; PICCARDO, P.; CABOCHE, G.; VIVIANI, M; MOLINS, R.; SENNOUR, M. Metallic interconnects for SOFC: Characterisation of corrosion resistance and conductivity evaluation at operating temperature of differently coated alloys. *Journal of Power Sources*, v. 171, n. 2, p. 652-62, Sep. 2007.
- 15 ALMAN, D.E.; JABLOUSKI, P.D. Effect of minor elements and a Ce surface treatment on the oxidation behavior of an Fe-22Cr-0.5Mn(Crofer22APU) ferritic stainless steel. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 32, n. 16, p.3743-53, Nov. 2007.
- 16 CABOURO, G.; CABOCHE, G.; CHEVALIER, S.; PICCARDO, P. Opportunity of metallic interconnects for ITSOFC: Reactivity and electrical property. *Journal of Power Sources*, v. 156, n. 1, p. 39-44, May 2006.
- 17 GOLIGHTLY, F. A.; STOTT, F. H.; WOOD, G. C. The relationship between oxide grain morphology and growth mechanisms for FeCrAl and FeCrAlY alloys. *Journal of the Electrochemical Society*, v. 126, n. 6, p. 1035-42, 1979.

Recebido em: 8/12/2008

Aprovado em: 5/11/2009