

Os novos aços inoxidáveis EUROFER utilizados em fusão nuclear

(The new EUROFER stainless steels for nuclear fusion)

Resumo

Os aços ferrítico-martensíticos de atividade reduzida, que emitem baixos níveis de radioatividade após a vida em serviço, são fortes candidatos para aplicação nas tecnologias de fusão nuclear como materiais estruturais. Propriedades importantes, tais como boa resistência mecânica em altas temperaturas, boa conformabilidade, elevada tenacidade e boa resistência à oxidação, estão presentes nesses aços. Formam uma martensita macia (em torno de 20 Rockwell C) após resfriamento ao ar, quando aquecidos acima da temperatura A_1 . Usualmente são utilizados na condição revenida para aumentar a tenacidade.

Esses aços possuem uma microestrutura muito refinada, que pode variar de totalmente martensítica a totalmente ferrítica. Para aprimorar a resistência sob fluência, essa estrutura pode ser endurecida por uma fina dispersão de partículas (compostas à base de ítria e carbonetos do tipo $M_{23}C_6$). As principais características desses aços serão apresentadas e discutidas nesse trabalho.

Palavras-chave: EUROFER, ODS-EUROFER, ITER, Fusão Nuclear.

Abstract

Reduced activation ferritic-martensitic (RAFM) steels display low-level radioactivity after their lifetime and have been considered for applications in fusion technology as structural materials. Unique properties such as good mechanical strength at high temperatures, good formability, high toughness and good oxidation resistance are found in these steels. Upon air cooling, they form a soft martensite (around 20 Rockwell C) when heated above the A_1 temperature.

These steels are usually employed in the as-tempered condition. This class of steels has a very refined microstructure that varies from fully martensitic to fully ferritic. To improve creep strength, this structure can be strengthened by a fine dispersion of particles (Y-based compounds and $M_{23}C_6$ -type carbides). The main characteristics of these steels will be presented and discussed in the present paper.

Keywords: EUROFER, ODS-EUROFER, ITER, Nuclear Fusion.

Angelo J. O. Zimmermann

Engenheiro de Fundição pela
SOCIESC, Membro da RNF
E-mail: angelozim@usp.br

Hugo R. Z. Sandim

Professor Doutor da EEL-USP,
Membro da RNF
E-mail: hsandim@demar.eel.usp.br

Angelo Fernando Padilha

Professor Doutor da EPUSP,
Membro da RNF
E-mail: padilha@usp.br

1. Introdução

Frequentemente novas (ou modificadas) classes de materiais são desenvolvidas para atender exigências rigorosas e bastante específicas de indústrias de alta tecnologia, tais como as indústrias aeronáutica, bélica e nuclear. Posteriormente, esses materiais têm seu campo de aplicação ampliado e são incorporados ao rol de materiais disponíveis ao engenheiro projetista, ou seja, transformam-se em “soluções à procura de problemas”. A decisão recente de construir um reator experimental de fusão nuclear deverá deslocar o centro de gravidade das pesquisas da física (principalmente da física de plasma) para a engenharia, onde os materiais certamente desempenharão um papel decisivo.

Nesse trabalho, é apresentada uma nova classe de materiais, os aços inoxidáveis ferrítico-martensíticos de reduzida atividade radioativa, desenvolvidos para utilização em reatores termonucleares de fusão. Essas ligas estão sendo desenvolvidas e aperfeiçoadas em diversos países (Japão, EUA, China e na União Européia). As ligas européias são denominadas EUROFER e foram desenvolvidas em duas variantes, com e sem dispersão de óxidos (ODS; “*Oxide Dispersion Strengthened*”).

2. A fusão nuclear

A fusão nuclear foi proposta em março de 1938, durante uma conferência nos EUA, pelo físico germano-estadunidense Hans Albrecht Bethe (1906-2005). A sua teoria sobre a produção de energia nas estrelas foi publicada em 1939 e lhe valeu o prêmio Nobel de Física de 1967. O maior obstáculo a ser vencido na construção e funcionamento apropriado de um reator nuclear de fusão é a dificuldade de se manter por confinamento magnético, durante um tempo razoável, determinada quantidade de plasma de deutério e trítio em condições adequadas de temperatura e pressão para que ocorra a fusão, liberando uma quantidade de energia maior que a consumida.

A construção de um reator experimental de fusão nuclear, ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), foi anunciada em junho de 2005, após complexas e demoradas negociações, principalmente sobre o local onde será construído o reator. Este será construído em Cadarache, no sul da França. O ITER (vide Figura 1) poderá representar um caminho viável para obtenção no futuro de energia limpa e renovável. Nesse sentido, é interessante mencionar que, em latim, *iter* significa *caminho*. O programa ITER, que reúne como sócios a União Européia, Rússia, China, Japão, Estados Unidos e Coréia do Sul, conta com um orçamento superior a 10 bilhões de euros e haverá um prazo de 30 anos para o reator ser construído e colocado em operação.

O ITER será um marco como reator experimental, pois, a partir dos resultados gerados por ele, serão estudados os conceitos para finalizar o projeto do primeiro protótipo de reator comercial, o reator de demonstração DEMO. Sua construção está prevista para o começo da próxima década de 2020. Na primeira fase da operação do DEMO, não é esperado um grande rendimento, este será usado para testar novos conceitos, que são os projetos de melhorias do diversor (em inglês, *divertor*) e da camada fértil (em inglês, *breeding blanket*). Haverá então, alterações no diversor e na camada fértil (similar ao que acontece nos intervalos na vida de uma usina nuclear comercial) e o DEMO entrará na sua fase de maior rendimento, que poderá demonstrar a viabilidade comercial da energia da fusão [Smith, 2005].

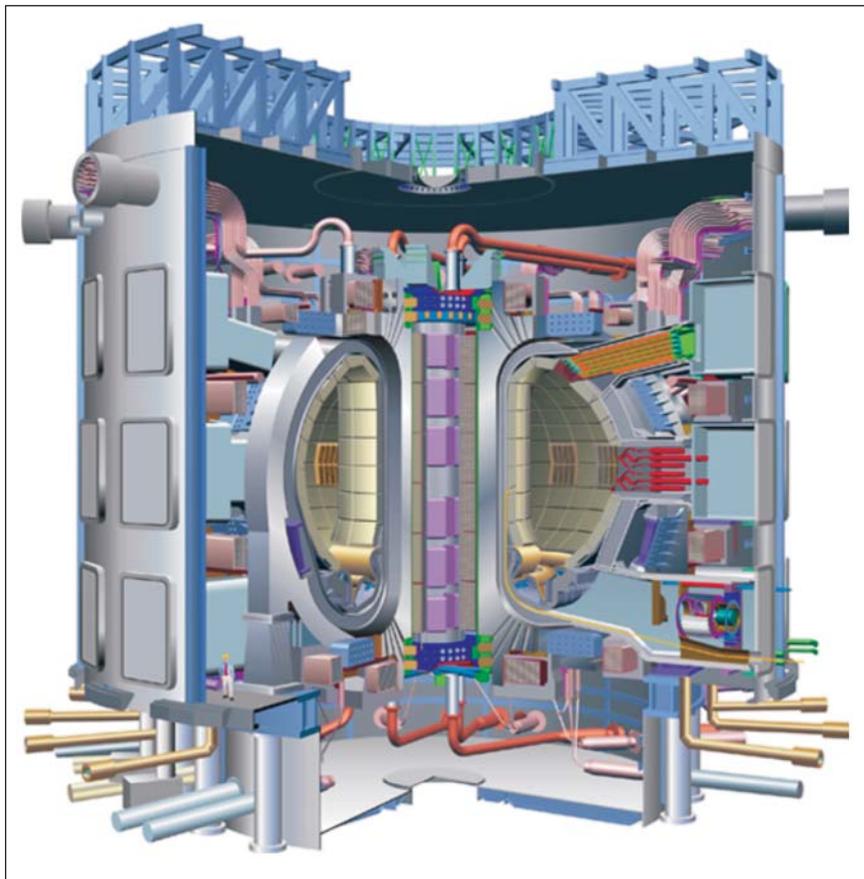


Figura 1 - Vista geral do Reator Termonuclear Experimental (ITER); para escala vide figura humana na parte inferior esquerda (página oficial do projeto ITER, na web (<http://www.iter.org/>)).

3. Materiais para o reator de fusão

A construção do reator de fusão envolve uma vasta gama de materiais cerâmicos e metálicos. Nos atuais conceitos de módulos de camada fértil indicados para o ITER, por exemplo, existem dezenas. Para refrigerantes, há metais líquidos como Li e Pb-17Li. Nos reatores de trítio e multiplicadores de nêutrons, há ligas de berílio e ligas de lítio. Para as partes estruturais, há ligas de cobre endurecidas por precipitação (Cu-Cr-Zr), ligas de vanádio (V-4Cr-4Ti) e aços inoxidáveis. São, ainda, dignos de nota materiais de alta tecnologia, como os supercondutores metálicos - para a construção dos magnetos para confinamento do plasma (Nb_3Sn e $NbTi$) -, tungstênio e suas ligas (W, W-ThO₂), compósitos de Cu-W e Cu-grafite para as regiões mais quentes do reator.

Um dos componentes mais importantes do reator de fusão é o divisor (vide Figura 2). Note que a geometria dessa peça é bastante complexa, exigindo boa conformabilidade dos materiais utilizados em sua construção.

A principal função do divisor é remover as chamadas “cinzas” da reação de fusão (partículas α , o combustível não queimado e as partículas arrancadas por erosão), que afetam, negativamente, a qualidade do plasma. O divisor é uma estrutura modular dividida em duas partes principais: a responsável pela blindagem térmica e a estrutural. Entre os materiais metálicos candidatos à construção do divisor (blindagem térmica), destacam-se os metais refratários e suas ligas, com ponto de fusão acima de cerca de 2500°C, tais como tungstênio, tântalo, molibdênio e nióbio, sendo que o tungstênio leva alguma vantagem devido a sua superior condutividade térmica e maior resistência à fragilização por hidrogênio.

Outro grupo importante de materiais metálicos pesquisados no projeto é constituído pelas ligas ferrítico-martensíticas endurecidas por dispersão de óxidos e denominadas ODS EUROFER para uso estrutural. Um terceiro grupo de materiais metálicos relevantes envolve, ainda, os aços inoxidáveis austeníticos, especialmente o aço AISI 316L(N), uma modificação do aço AISI 316L, contendo baixo carbono (abaixo de 0,03%) e nitrogênio na faixa de 0,08 a 0,16%.

4. Os aços inoxidáveis ferrítico-martensíticos de atividade radioativa reduzida

Os aços inoxidáveis do tipo ferrítico-martensítico já vêm sendo testados e comparados com inoxidáveis austeníticos desde a década de 1970 para uso em revestimentos de elementos combustíveis de reatores nucleares. Testes em reatores de fissão nuclear mostraram que suas propriedades radiológicas, térmicas e de inchamento (*swelling*) eram seu principal atrativo [Ehrlich, 1999]. Além de menor inchamento, os aços ferrítico-martensíticos possuem baixa suscetibilidade aos efeitos do hélio e podem ter composições químicas que favoreçam uma propriedade muito interessante: a atividade reduzida.

Materiais de atividade reduzida são aqueles materiais em que a composição química pode ser cuidadosamente controlada, praticamente excluindo todos os elementos que poderiam transmutar por interação com nêutrons de alta energia em elementos radioativos de longa vida [Lucon, 2006]. Esses materiais, expostos durante certo tempo a certa dose de radiação, conseguem liberar níveis menos danosos de radioatividade durante um tempo muito curto comparado a outros materiais, por exemplo, centenas de anos contra dezenas de milhares de anos, reduzindo, sensivelmente, o impacto ambiental. Em meados dos anos 80, essa idéia de materiais de baixa ativação se desenvolveu dentro dos programas de fusão internacionais.

Para os aços ferrítico-martensíticos de atividade reduzida (RAFM), a porcentagem de cromo pode ser limitada em torno de 9%, a qual é suficiente para resistência à corrosão e corresponde à menor temperatura de transição dúctil-frágil sob testes e impacto. É, também, necessária a substituição de elementos radioativamente indesejáveis, tais como o molibdênio, o nióbio e o níquel existentes nos aços comerciais, por elementos como tungstênio, vanádio, tântalo e titânio, os quais possuem efeitos similares na constituição e estrutura.

A origem dos aços martensíticos OPTIFER I e II na Europa vem dos bons resultados com a faixa de 7 a 9% de cromo. Aços de ativação reduzida com teores de cromo acima dessa faixa apresentam estrutura mista de martensita e ferrita, uma vez que os teores de carbono e manganês não podem ser aumentados. O aumento do teor de carbono causaria a diminuição da tenacidade, da soldabilidade e da resistência à corrosão; já o acréscimo de manganês aumenta a possibilidade de se formar fase χ durante irradiação, que promove a fragilização do material.

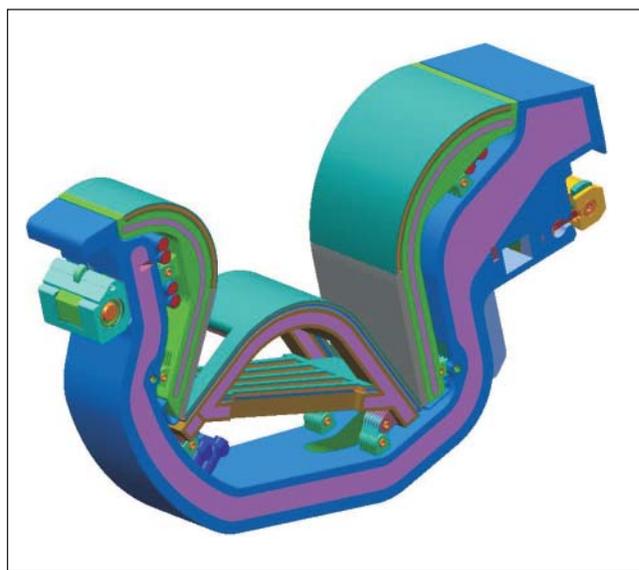


Figura 2 - Divisor proposto para uso no reator ITER (gentileza A. Möslang, FZK, Alemanha).

No caso específico do aço EUROFER, o aprimoramento de sua composição química visando à atividade reduzida foi alcançado substituindo-se o nióbio pelo tântalo e o molibdênio pelo tungstênio. Os elementos Nb, Mo, Ni, Cu, Al e Co foram restritos a valores de ppm. Cálculos auxiliados por programas computacionais de simulação apontam que o EUROFER é uma liga de reduzida atividade muito promissora. A Figura 3 mostra a evolução calculada dos aços de atividade reduzida; a região hachurada do gráfico indica a área de influência dos elementos Nb e Mo.

Por outro lado, as propriedades mecânicas dos aços ferrítico-martensíticos restringiam seu uso em temperaturas acima de 550°C. Posteriormente, a adição de uma fina dispersão de partículas possibilitou sua utilização em temperaturas mais elevadas (650°C), dando origem às ligas ferrítico-martensíticas endurecidas por dispersão de óxidos (ODS) [Lindau, 2005]. Até o momento, a mais promissora dessa série é a liga ODS-EUROFER. Essa liga de atividade reduzida foi desenvolvida pelo Centro de Pesquisas de Karlsruhe (Forschungszentrum Karlsruhe; FZK), em cooperação com a França e a Rússia, visando a aplicações nucleares.

O processo para a obtenção das ligas ODS é a moagem de alta energia (*mechanical alloying*) em atmosfera inerte. Em seguida, a mistura de pós (liga-mãe + Y_2O_3) é consolidada via prensagem isostática a quente, seguida de laminação a quente para a obtenção de chapas.

Essa rota de processamento, via metalurgia do pó, já é bastante utilizada na manufatura de ligas para aplicações em altas temperaturas na indústria aeroespacial e para reatores de fissão. Nessas aplicações, a ítria (Y_2O_3) é o óxido que tem sido mais utilizado [Cayron, 2004]. Em geral, a fração em peso de ítria, nesses aços, é inferior a 0,5%. Contudo existem experiências em aços de atividade reduzida com óxidos diferentes, como o espinélio ($MgAl_2O_4$). Em superligas, já foram testados os óxidos de titânio

(TiO_2) e de alumínio (Al_2O_3). Um dos desafios associados a essa tecnologia é a obtenção de dispersões finas e uniformes em todo o material, demandando pesquisas e investimentos na área.

A Figura 4 apresenta os resultados dos ensaios de tração nos aços EUROFER e ODS-EUROFER em diferentes temperaturas. Nota-se que há um ganho considerável de resistência mecânica com a incorporação da fina dispersão de óxidos, mantendo uma elevada ductilidade em altas temperaturas.

A Figura 5 apresenta os valores mais comuns do limite de escoamento e alongamento total de vários tipos de aços inoxidáveis: austeníticos (AUST), ferrítico-martensíticos (FER/MAR), aços dúplex (DPLX), inoxidáveis endurecidos por precipitação (EP), aços ferrítico-martensíticos de atividade reduzida (RAFM) e aços ferrítico-martensíticos de atividade reduzida endurecidos com dispersão de óxidos (ODS-RAFM). Essa figura possibilita uma visualização mais clara dos elevados valores de resistência obtidos pela adição da dispersão

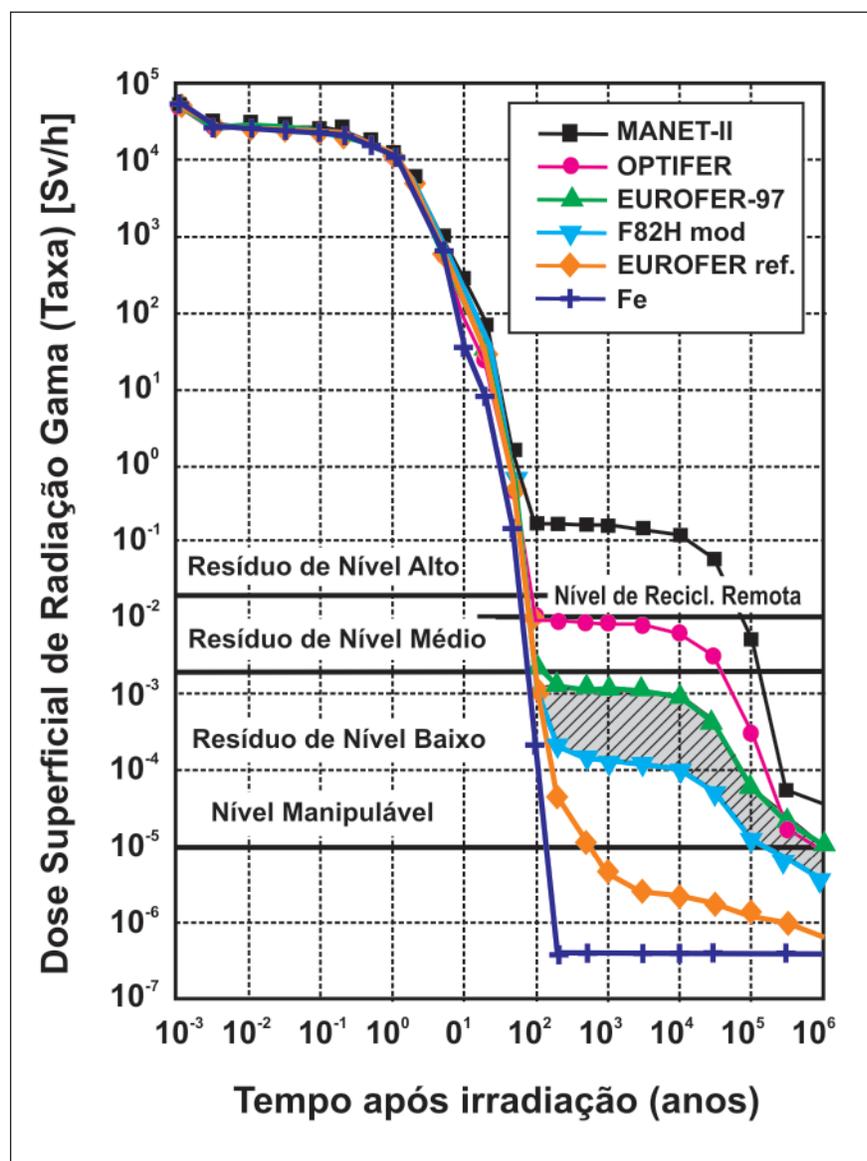


Figura 3 - Decréscimo calculado da taxa de dose superficial em ferro puro e aços ferrítico-martensíticos após irradiação (12.5 MW/m²) [Lindau, 2005].

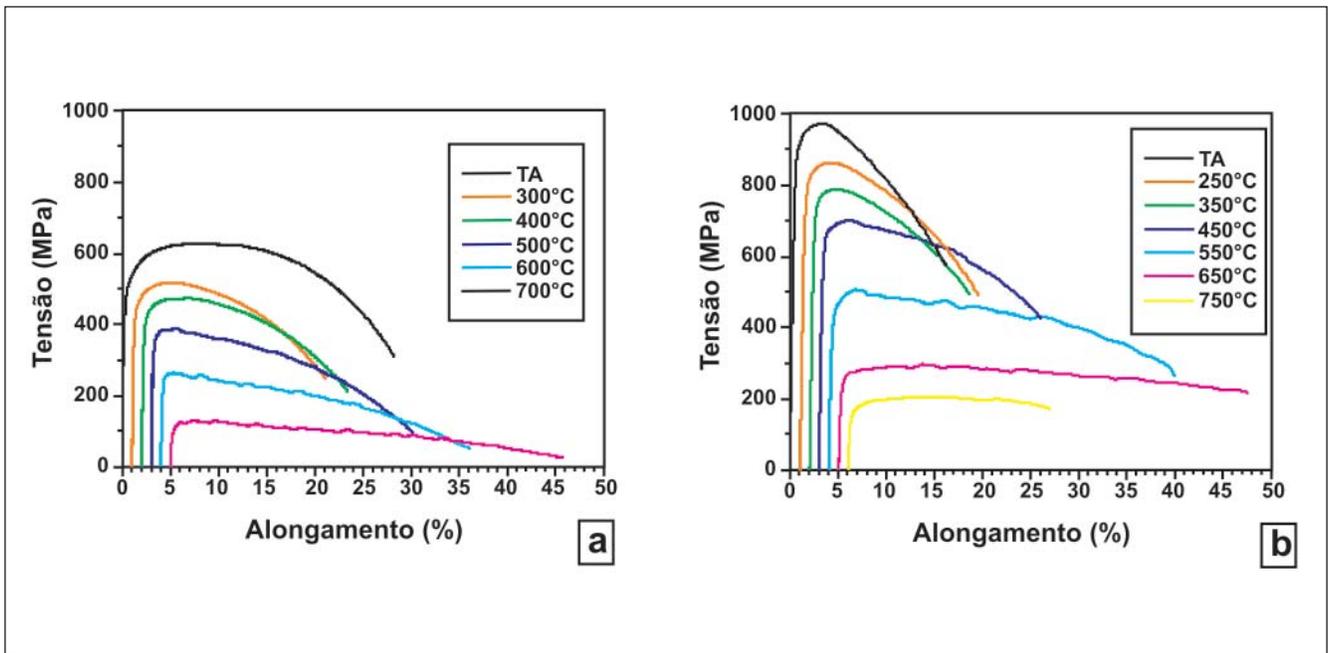


Figura 4 - Curvas tensão versus deformação obtidas em ensaio de tração em várias temperaturas, após os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento das ligas EUROFER 97 (a) e ODS EUROFER (b). (gentileza A. Möslang, FZK, Alemanha).

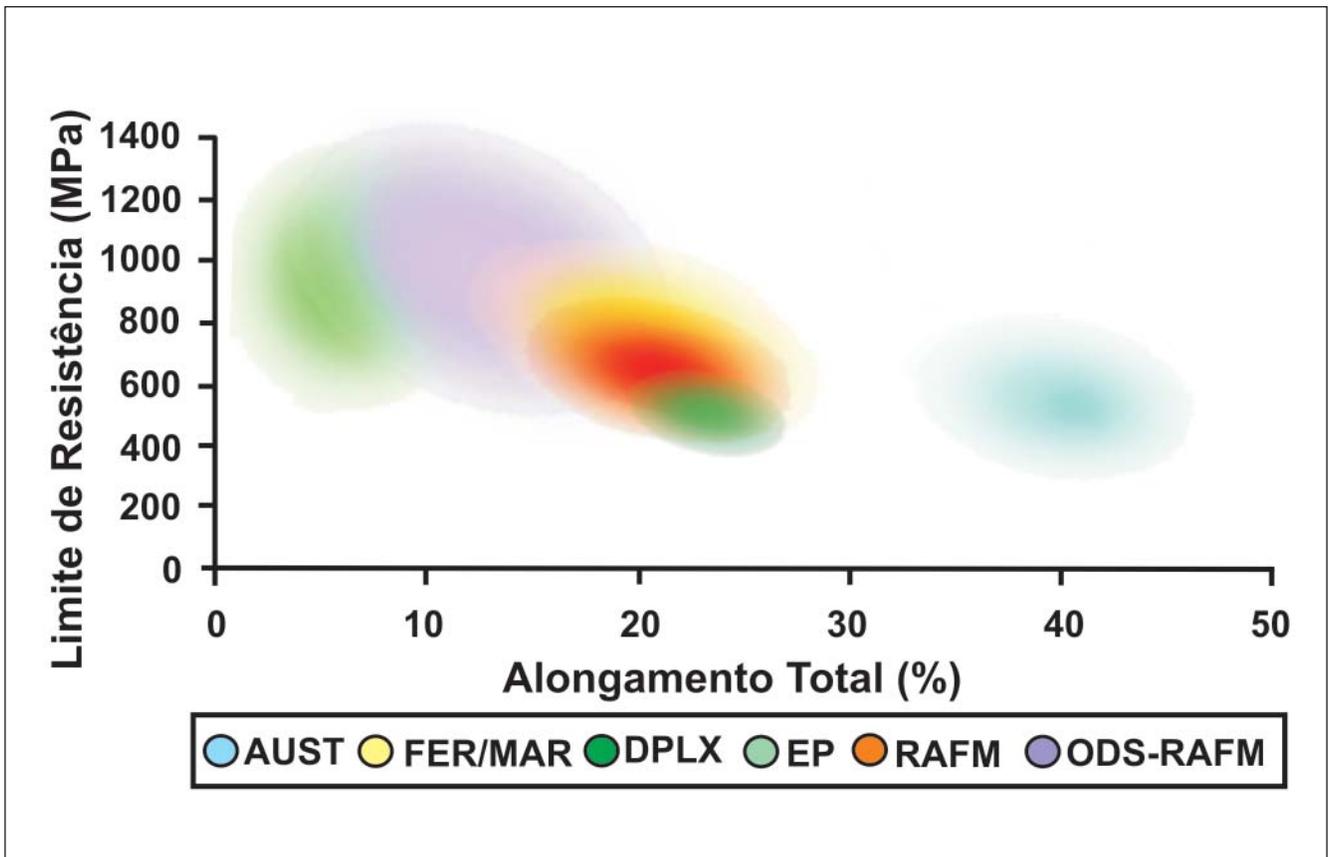


Figura 5 - Diagrama comparativo de alongamento total e limite de escoamento de vários tipos de aços inoxidáveis em temperatura ambiente.

de óxidos de ítrio no aço de atividade reduzida. Uma das vantagens dessa classe de materiais, em relação aos aços endurecidos por precipitação, é a sua maior resistência ao coalescimento dos precipitados durante a vida em serviço, devido à elevada estabilidade dos compostos à base de ítrio.

5. Considerações finais

O processamento e a caracterização dessa nova classe de aços inoxidáveis endurecidos por dispersão de óxidos envolvem desafios tecnológicos importantes. As pesquisas envolvendo a fabricação de ligas com atividade reduzida, o aumento da resistência à fluência e a diminuição da temperatura de transição dúctil-frágil após irradiação certamente se estenderão pela próxima década, até a obtenção de uma liga que produza resíduos de baixo nível de radiação após 80-100 anos quando utilizada no reator de demonstração DEMO [Tavassoli, 2002]. Contudo a combinação de propriedades já atingida pelos

aços EUROFER credencia essas ligas para aplicações em outras áreas da engenharia, não somente a nuclear; ou seja, elas já se constituem em “soluções à procura de problemas”.

6. Referências bibliográficas

- CAYRON, C., RATH E., CHU I., LAUNOIS S. Microstructural evolution of Y O and MgAl₂O₄ ODS EUROFER steels during their elaboration by mechanical milling³ and hot isostatic pressing. *Journal of Nuclear Materials*, v. 335, n. 1, p. 83-102, 2004.
- EHRLICH, K. The development of structural materials for fusion reactors. *Philosophy Transactions Royal Society London Series. A* 357, p. 595-617, 1999.
- ITER (página oficial na web), Disponível em: <http://www.iter.org/>. Acessado em: abril de 2009.
- LINDAU, R. MÖSLANG, A., SCHIRRA, M., SCHLOSSMACHER, P., KLIMENKOV, M. Mechanical and microstructural properties of a hiped RAFM ODS steel. *Journal of Nuclear Materials*. v. 307-311, parte 1, p. 769-772, 2005.
- LUCON E. et al. The European effort towards the development of a demo structural material: Irradiation behaviour of the European reference RAFM steel EUROFER. *Fusion Engineering and Design*, v. 81, n. 8-14, p. 917-923, 2006.
- LINDAU, R. MÖSLANG, A., RIETH, M., NORAJITRA, P. ODS-EUROFER- A Reduced Activation Ferritic Martensitic ODS-steel for application in blanket concepts. *Apresentação em Congresso - EUROMAT 2005*, Prague, Czech Republic, 2005.
- SMITH, C. L. The need for fusion. *Fusion Engineering and Design*. v. 74, n. 1-4, p. 3-8, 2005.
- TAVASSOLI, A. -A. F. Present limits and improvements of structural materials for fusion reactors - a review. *Journal of Nuclear Materials*. 302, n. 2-3, p. 73-88, 2002.

Artigo recebido em 05/11/2008 e aprovado em 05/06/2009.

**A
Rem
tem novo endereço eletrônico para
submissão de artigos:**

<http://submission.scielo.br/index.php/rem/index>

www.rem.com.br