

DESENVOLVIMENTO DE AÇOS AO NIÓBIO PARA TROCADORES DE CALOR USADOS NA GERAÇÃO DE ENERGIA¹

Mariana Perez de Oliveira²
Marcos Stuart³

Resumo

A crescente demanda por energia elétrica e a necessidade cada vez maior de um controle de emissão de gases causadores do efeito estufa são as grandes responsáveis pela incessante busca na melhoria da eficiência das usinas termelétricas. A melhoria na eficiência da geração de energia a partir da queima de combustíveis fósseis está diretamente relacionada ao uso de maiores pressões de vapor d'água e, portanto, ao uso de maiores temperaturas. Com isso, criou-se uma grande necessidade por materiais que, além de possuírem boa resistência mecânica para suportar maiores pressões, devem também apresentar resistência a altas temperaturas e à corrosão, com os menores custos possíveis. As atenções voltaram-se principalmente ao desenvolvimento de aços inoxidáveis resistentes a altas temperaturas que, em sua grande maioria, apresentam variados teores de nióbio. O principal papel do nióbio nesses aços se refere a maiores resistências à fluência e à corrosão em altas temperaturas. O presente trabalho é uma revisão sobre os aços usados especificamente nos trocadores de calor das termelétricas, destacando a influência do nióbio nas suas propriedades em alta temperatura.

Palavras-chave: Nióbio; Geração de energia; Fluência; Corrosão em alta temperatura.

DEVELOPMENTS IN NIOBIUM CONTAINING STEELS FOR BOILERS USED IN POWER GENERATION INDUSTRY

Abstract

The increasing demand for energy, together with the rising concern on green house gases emissions are the main drivers of the efforts made to improve efficiency of power generation plants. Improvements in efficiency are strictly related to higher steam temperatures and pressures. To attend these new optimized parameters, new materials were necessary, presenting not only with improved mechanical resistance, to resist the higher pressures, but also with having high temperature and corrosion resistance with the lowest costs possible. Attention was driven mainly to the development of heat resistant stainless steels, most of them containing niobium. Niobium increases creep and corrosion resistance at high temperatures. This paper is a review about the steels used for boilers in the power generation industry, with special attention on niobium improvement in high temperature resistance.

Key words: Niobium; Power generation; Creep; High-temperature corrosion resistance.

¹ Contribuição técnica ao 46º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 27 a 30 de outubro de 2009, Santos, SP.

² Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM), e-mail : mariana.perez@cbmm.com.br

³ Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM), e-mail : marcos.stuart@cbmm.com.br

1 INTRODUÇÃO

O Brasil, por suas características territoriais, é um dos poucos países que podem explorar todas as alternativas não-poluentes como as energias hídrica, eólica e solar e também as energias renováveis como a da biomassa e do álcool. A matriz energética do Brasil em 2007 é mostrada na Figura 1, revelando que 46% da sua energia provêm de recursos renováveis como hídrico, biomassa e da cana de açúcar,⁽¹⁾ diferentemente de muitos países como a China onde o recurso não renovável do carvão, em 2006, correspondeu a 82% de sua matriz energética.⁽²⁾

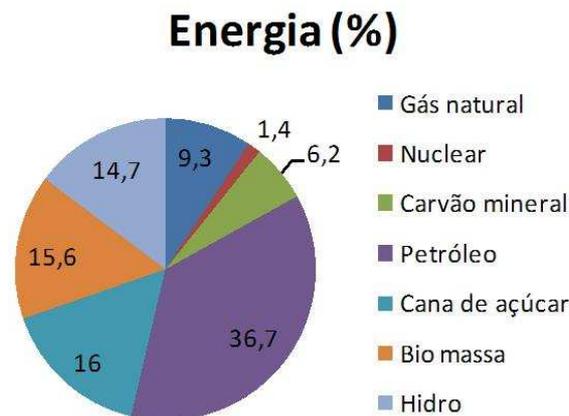
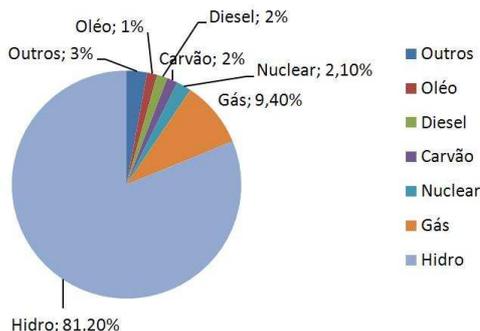


Figura 1: Matriz energética brasileira.⁽¹⁾

A geração de energia elétrica no Brasil está fortemente apoiada nas hidroelétricas, contando também com as termelétricas, que utilizam como fonte de energia o petróleo, o gás natural, a bio- massa e a energia nuclear. A previsão é que, para 2016, as hidroelétricas continuem sendo a principal base da matriz energética brasileira (Figura 2).

Mesmo com menores valores de geração de MW, as termelétricas brasileiras vêm representando um papel importante na matriz atual e futura. Na Figura 3, tem-se as previsões de crescimento de capacidade de geração de energia proveniente de hidroelétricas e termelétricas no Brasil, mostrando a importância do crescimento dessas últimas nos próximos 4 anos a 6 anos.⁽³⁾ A maior fonte de geração térmica das termelétricas brasileiras é o gás natural, componente que ganha importância ano a ano à medida em que novos campos de gás vão sendo disponibilizados no país. Entretanto, mundialmente, o carvão é o principal combustível utilizado. Existe uma atenção muito forte para a otimização do desempenho das termelétricas, devido à crescente preocupação com o meio ambiente, uma vez que a queima de combustíveis como carvão e gás gera CO₂, o grande responsável pelo efeito estufa. Esse trabalho mostra as principais solicitações a que os trocadores de calor presentes nas termelétricas ficam submetidos em serviço, a melhoria de eficiência destes ao longo do tempo, a evolução dos materiais aplicados nessas estruturas e o efeito do nióbio na família de aços desenvolvidos para atender a todas essas necessidades.

Participação das Fontes de Geração - Jan/2007



Participação das Fontes de Geração - Dez/2016

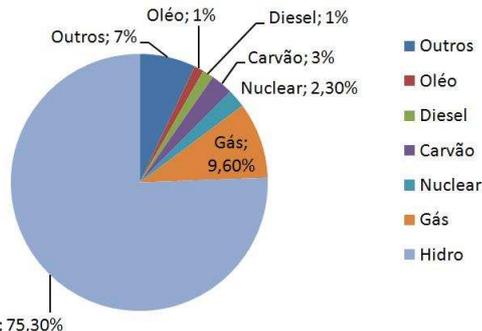


Figura 2: Participação dos diferentes tipos de fontes de geração de energia elétrica no Brasil em 2007 e previsão para 2016. 'Outros' inclui: energia eólica, bio energia e pequenas centrais hidroelétricas (PCH).⁽³⁾

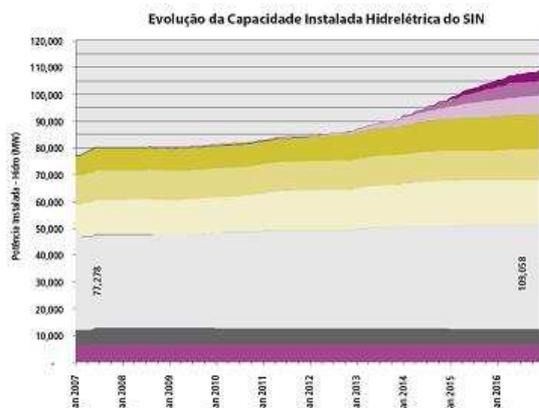


Figura 3: Evolução da capacidade de geração de energia elétrica proveniente de hidroelétricas e de termelétricas no Brasil.⁽³⁾

2 EFICIÊNCIA DAS TERMELETRICAS

Este trabalho discute a condição mais crítica enfrentada pelos trocadores de calor: a utilização de carvão como combustível. Ela gera produtos de combustão fortemente corrosivos que se depositam nos componentes do trocador, podendo levar à falha precoce do componente.

O princípio básico de funcionamento de usinas termelétricas (Figura 4), está na movimentação de uma turbina, conectada a um gerador, por meio de um fluido, normalmente vapor de água ou gás, que é aquecido por uma fonte geradora de calor.

O aquecimento da água é iniciado já na câmara onde o carvão é queimado. O refratário que compõe as paredes da câmara do boiler é revestido por uma tubulação na qual há a passagem de água (*waterwall*). Ao mesmo tempo em que a água ajuda a resfriar e proteger o refratário, ela sofre um pré-aquecimento e é convertida em vapor.

Na fase seguinte, o vapor sofre etapas graduais de aquecimento através de um sistema de superaquecedores, no qual ganha pressão e temperatura. Ele é então levado à turbina e, após a movimentação da mesma, é resfriado no condensador, completando o ciclo fechado.⁽⁴⁾

Adicionalmente, antes de ser condensado, o vapor de saída da turbina segue para um sistema de re-aquecedores, no qual recupera parcialmente a pressão e a temperatura e, então, volta novamente à turbina. Essa etapa adicional visa, através

do aproveitamento da energia térmica remanescente no vapor de saída da turbina, o aumento da eficiência do processo de geração de energia.

A Figura 5 mostra mais detalhadamente o interior de um boiler usado em termelétricas a carvão.

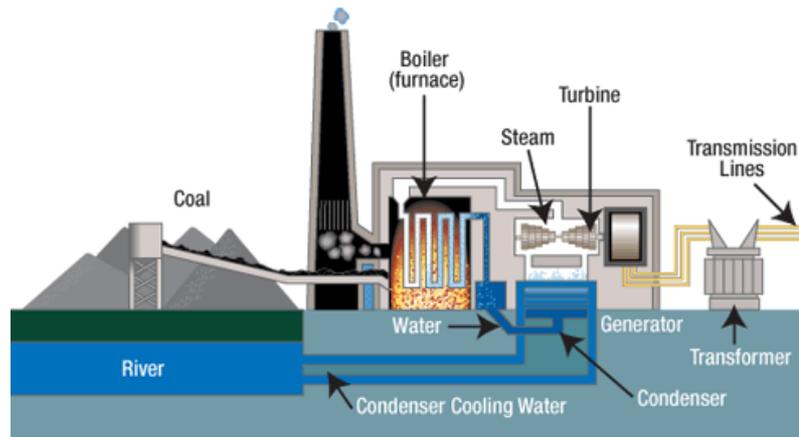


Figura 4: Esquema de uma termelétrica movida a carvão.⁽⁵⁾

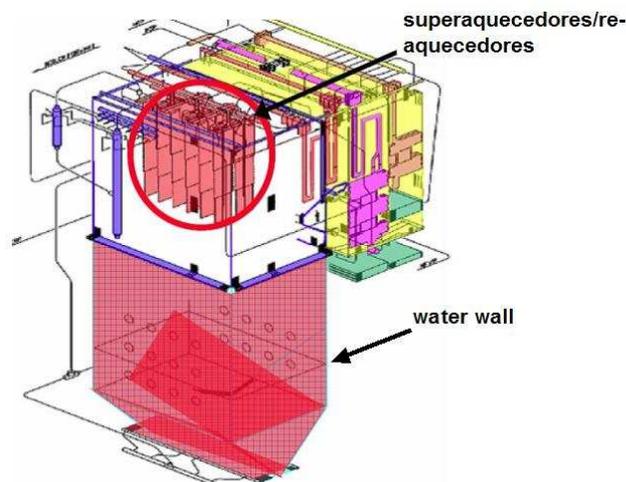


Figura 5: Modelo de boiler usado em termelétricas a carvão.⁽⁶⁾

Mundialmente, termelétricas que utilizam carvão geram aproximadamente 8 bilhões de toneladas de CO₂ todos os anos.⁽⁷⁾ Em 2007, na União Européia, a produção de energia foi responsável por 59% do total das emissões de CO₂.

A eficiência elétrica de uma planta é expressa em porcentagem e constitui a relação entre o total de energia elétrica gerada e a energia térmica fornecida pela queima do combustível.⁽⁸⁾

Antigas unidades apresentam eficiência da ordem de 30%, enquanto plantas mais recentes podem chegar a 45%. O limite técnico considerado para a eficiência é da ordem de 60% e, caso atingido, traria enormes economias de combustível e considerável queda na emissão de dióxido de carbono.⁽⁷⁾ Um aumento de 1% na eficiência térmica de uma turbina de geração de 800MW, por exemplo, evitaria a emissão de 1 milhão de toneladas durante a vida útil total desse componente, que é normalmente, de 20 anos.⁽⁹⁾

A eficiência é influenciada por diferentes fatores como tipo e qualidade do combustível a ser utilizado e a configuração da usina. Entre estes, a alta temperatura e a alta pressão do vapor de água são os parâmetros mais significativos e, ao mesmo tempo, as maiores barreiras quanto à escolha do material que compõe

os equipamentos de uma termelétrica, em especial, os trocadores de calor (boilers), as turbinas e toda a tubulação que os conecta.⁽⁸⁾

No ciclo de Carnot, a eficiência é definida como:

$$(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) / T_{m\acute{a}x}$$

Onde: $T_{m\acute{a}x}$ - temperatura máxima no ciclo termodinâmico

$T_{m\acute{i}n}$ - temperatura mínima (ambas em valores absolutos)

Isso evidencia que a rota mais prática para uma maior eficiência é o aumento da temperatura máxima de vapor. A diminuição da $T_{m\acute{i}n}$ é possível, mas apenas em algumas localidades específicas, pois necessita da disponibilidade de águas geladas para o resfriamento do vapor.⁽¹⁰⁾

As usinas podem ser classificadas em três categorias distintas, de acordo com as faixas de temperatura e pressões em que trabalham:

- Sub-Críticas: operam com temperaturas e pressões inferiores a 374°C e 22,1MPa, respectivamente;
- Super-Críticas (SC): operam com temperaturas que chegam a 566 °C e pressões de até 24,1MPa; e
- Ultra-super-críticas (USC): operam com pressões e temperaturas superiores a 24,1MPa e 566°C.

Como exemplificado na Figura 6, a eficiência aumenta e as emissões diminuem com o aumento da temperatura e da pressão de vapor.

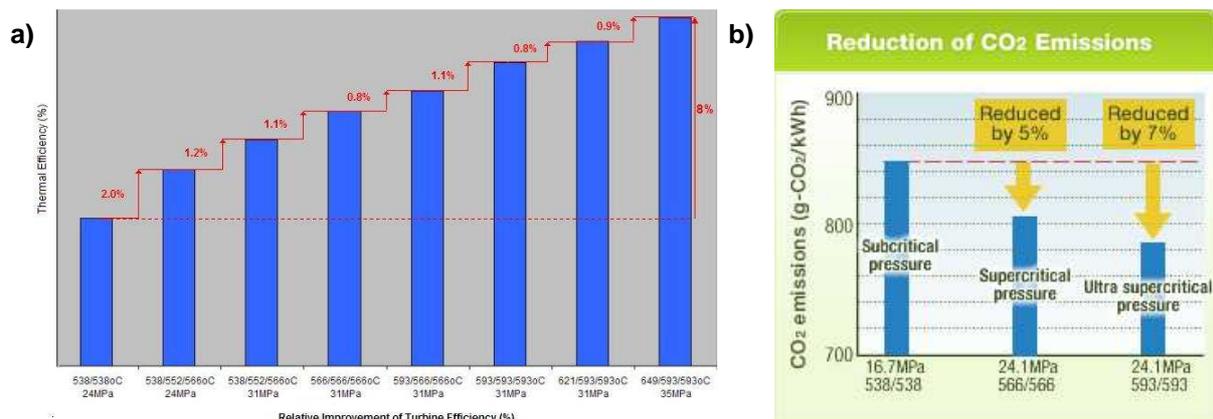


Figura 6: a) Relação entre eficiência térmica e as temperaturas e pressões atuantes;⁽¹¹⁾ b) Redução das emissões de CO₂ com aumento da temperatura e pressão para usinas sub, super e ultra-super críticas.⁽¹²⁾

3 MATERIAIS RESISTENTES A ALTAS TEMPERATURAS

Maiores valores de temperatura e pressão aceleram os processos de degradação das estruturas das termelétricas.⁽¹³⁾ Em 2001, os custos envolvendo a manutenção e perda de produtividade devido à corrosão, em usinas dos Estados Unidos que utilizam vapor d'água para geração de energia, chegaram à ordem de cinco bilhões de dólares.⁽¹⁴⁾

Isso exige o uso de materiais que sejam não só resistentes a altas temperaturas como também, à corrosão. Além disso, a seleção do material mais adequado também deve levar em consideração os custos de aquisição e manutenção.

O fenômeno de corrosão ocorre tanto internamente, através da oxidação causada pelo vapor em alta temperatura, quanto externamente, devido à exposição do material aos subprodutos gerados na queima do carvão, como os trissulfatos sódio- potássio-ferro presentes nas cinzas.⁽⁴⁾ Nas usinas que utilizam a queima do gás, as condições de corrosão são mais amenas, sem a formação desses subprodutos corrosivos.

A corrosão pode levar à falha prematura do componente com a diminuição da secção transversal do tubo, pois aumentam as tensões às quais o material é submetido. Ela também acelera a ocorrência da fluência, pela mesma redução da secção transversal, pois há o aumento progressivo da sua temperatura interna. Também podem ocorrer entupimentos, devido o acúmulo dos produtos resultantes da oxidação,⁽¹⁵⁾ causando a falha total do sistema.

A elevada resistência à corrosão e à fluência são as principais características que levaram à escolha dos aços inoxidáveis^a para a aplicação em boilers e tubulações que estão em contato direto com o vapor. Famílias de aços martensíticos, ferríticos e austeníticos foram e estão sendo desenvolvidas para esse propósito. A Figura 7 mostra essa evolução para a resistência a fluência.

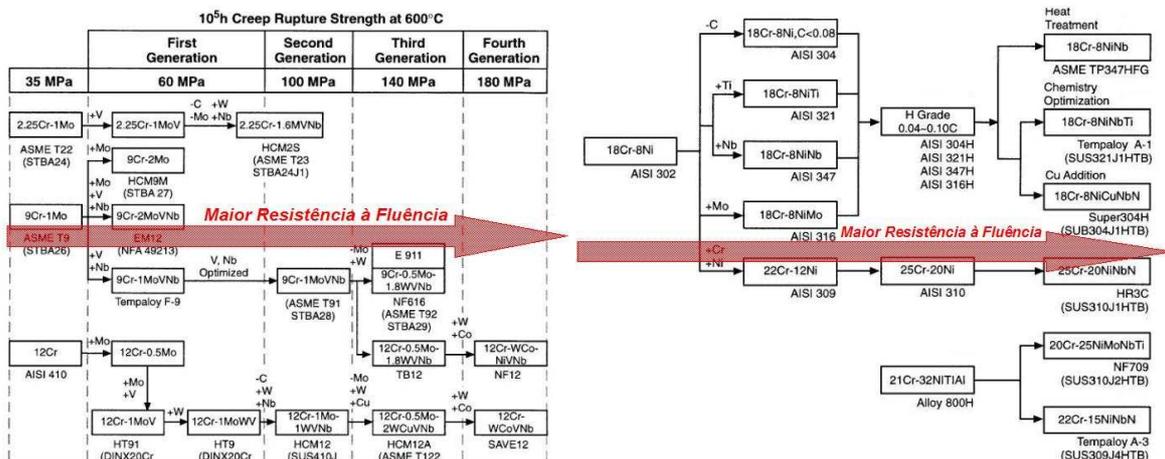


Figura 7: Evolução dos aços a) martensíticos/ferríticos e b) austeníticos com relação à resistência à fluência.⁽¹⁶⁾

Outro mecanismo atuante sobre os tubos é a fadiga térmica, crítica nos tubos de alta pressão que têm paredes grossas, uma vez que estes são submetidos a maiores tensões devido à ciclagem térmica geradas na operação.⁽¹⁷⁾ Tubos de parede grossa incluem headers e a tubulação que transporta vapor à alta pressão.⁽¹⁸⁾

Os headers (Figura 8), são responsáveis pela coleta e distribuição do vapor entre as diferentes etapas de superaquecimento e re-aquecimento e exigem grandes cuidados, já que possuem inúmeros cordões de solda que podem atuar como pontos de iniciação de trincas durante a fadiga térmica, levando a uma falha prematura do componente.

^a Para fins de simplificação de nomenclatura, neste trabalho aços inoxidáveis serão considerados aços com teor de cromo acima de 1% em massa.

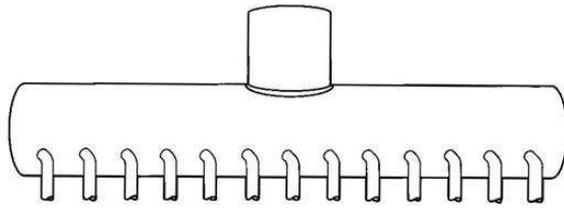


Figura 8: Modelo de header usado em usinas termelétricas a carvão.⁽¹⁹⁾

O resultado foram aços ferríticos/martensíticos capazes de operar em temperaturas de 600°C-620 °C (Figura 9). Atualmente, estudos têm sido feitos com o intuito de aumentar ainda mais esse limite de aplicação desses aços, chegando a 650°C.⁽²⁰⁾

Tabela 1 - Principais especificações de aços ferríticos/martensíticos usados em usinas termelétricas

	Steels	ASME	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	Co	V	Nb	B	N	Others
< 2%Cr	NF1H	-	0.12	-	-	1.25	1.0	-	-	0.2	0.07	-	-	-
	T/P11	T/P11	0.15	0.50	0.45	1.25	0.5	-	-	-	-	-	-	-
2%Cr	Tempaloy F-2W	-	-	-	-	2.00	0.6	1.0	-	0.25	0.05	-	-	-
	2.25Cr1Mo	T/P22	0.12	0.30	0.45	2.25	1.0	-	-	-	-	-	-	-
	2.25Cr1.6WVNb / HCM2S	T/P23	0.06	0.20	0.45	2.25	0.1	1.6	-	0.25	0.05	0.003	-	-
9%Cr	9Cr1Mo	T/P9	0.12	0.60	0.45	9.00	1.0	-	-	-	-	-	-	-
	9Cr2Mo / HCM9M	-	0.07	0.30	0.45	9.00	2.0	-	-	-	-	-	-	-
	9Cr1MoVNb	T/P91	0.10	0.40	0.45	9.00	1.0	-	-	0.20	0.08	-	0.05	-
	9Cr0.5Mo2WVNb	T/P92	0.07	0.06	0.45	9.00	0.5	1.8	-	0.20	0.05	0.004	0.06	-
	9Cr1Mo1WVNb	T/P911	0.11	0.30	0.45	9.00	1.0	1.0	-	0.20	0.08	0.003	0.06	-
	E911	-	0.12	0.20	0.51	9.00	0.9	0.9	-	0.20	0.06	-	0.06	0.25 Ni
12%Cr	LC9Cr1MoVNb	-	0.06	0.50	0.60	9.00	1.0	-	-	0.25	0.4	0.005	-	-
	9Cr2MoVNb	NFA49213	0.10	0.40	0.10	9.00	2.0	-	-	0.30	0.4	-	-	-
	12Cr1MoV / HT91	DINX20CrMoV121	0.20	0.40	0.60	12.00	1.0	-	-	0.25	-	-	-	0.5Ni
	12Cr1MoWV / HT9	DINX20CrMoWV121	0.20	0.40	0.60	12.00	1.0	0.5	0.25	-	-	-	-	0.5Ni
	Tempaloy F-12M	-	-	-	-	12.00	0.7	0.7	-	-	-	-	-	-
	12Cr1Mo1WVNb / HCM12	-	0.10	0.30	0.55	12.00	1.0	1.0	-	0.25	0.05	-	0.03	-
	12Cr0.4Mo2WVCuVNb / HCM12A	T/P122	0.11	0.10	0.60	12.00	0.4	2.0	-	0.20	0.05	0.003	0.06	1.0Cu
	TB12	-	0.08	0.05	0.50	12.00	0.5	1.8	-	0.20	0.05	0.3	0.05	0.1Ni
	11Cr2.6W2.5CoVNbBN / NF12	-	0.08	0.20	0.50	11.00	0.2	2.6	2.50	0.20	0.07	0.004	0.05	-
	11Cr3W3CoVNbTaNdN / SAVE 12	-	0.10	0.30	0.20	11.00	-	3.0	3.00	0.20	0.07	-	0.04	0.07Ta 0.04Nd

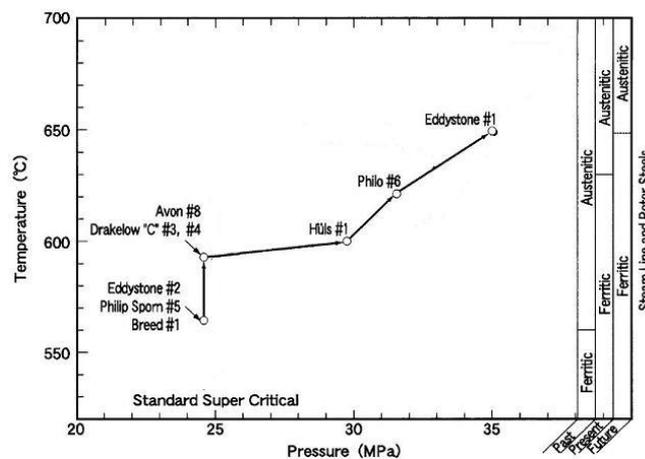


Figura 9: Evolução no uso de aços ferríticos nos tubos de paredes grossas de usinas termelétricas.⁽¹¹⁾

Além dos headers e dutos de paredes grossas com vapor a alta pressão, esses aços também podem ser usados nas chamadas waterwalls. Para tanto, é

necessário que haja a aplicação de revestimentos protetores devido a diferentes mecanismos de corrosão resultantes da queima de carvão.⁽¹⁵⁾

Para temperaturas acima de 620°C, são empregados os aços inoxidáveis austeníticos e as ligas de níquel, devido a suas maiores resistências à corrosão e à fluência (Tabela 2). É o caso dos tubos que compõem os superaquecedores e reaquecedores, que podem atingir temperaturas 25°C-35°C maiores do que a temperatura do vapor que transportam, operando numa faixa de 610°C-700°C.^(17,20) Nesses componentes é importante lembrar que a fadiga térmica não é tão crítica, pois possuem espessuras mais finas

Para temperaturas de operação que excedem os 700°C, o uso de ligas de níquel é o mais indicado, pois estas possuem resistência à fluência ainda maior que os austeníticos.

Tabela 2: Principais especificações de aços austeníticos e ligas de níquel usados em usinas termelétricas

	Steels	ASME	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	W	V	Nb	Ti	B	Others
18%Cr-8%Ni	18Cr8Ni	TP304H	0.08	0.60	1.60	8.00	18.0	-	-	-	-	-	-	-
	18Cr9NiCuNbN / Super 304H	TP304CuCbN	0.10	0.20	0.80	9.00	18.0	-	-	-	0.4	-	-	3.0Cu 0.10N
	18Cr10NiTi	TP321H	0.08	0.60	1.60	10.00	18.0	-	-	-	-	0.5	-	-
	18Cr10NiNbTi / TempaloyA-1	-	0.12	0.60	1.60	10.00	18.0	-	-	-	0.1	0.08	-	-
	16Cr12NiMo	TP316H	0.08	0.60	1.60	12.00	16.0	2.5	-	-	-	-	-	-
	18Cr10NiNb	TP347H	0.08	0.60	1.60	10.00	18.0	-	-	-	-	0.8	-	-
	18Cr10NiNb(FG)	TP347HFG	0.08	0.60	1.60	10.00	18.0	-	-	-	-	0.8	-	-
15%Cr-15%Ni	17Cr14NiCuMoNbTi	-	0.12	0.50	0.70	14.00	16.0	2.0	-	-	0.4	0.3	0.006	3.0Cu
	15Cr10Ni6MnVNBti	-	0.12	0.50	6.00	10.00	15.0	1.0	-	0.20	1	0.06	-	-
	Esshete 1250	-	0.12	0.50	6.00	10.00	15.0	1.00	0.20	1.00	-	0.06	-	-
	TempaloyA-2	-	0.12	0.60	1.60	14.00	18.0	1.60	-	-	0.24	0.10	-	-
20 to 25%Cr	25Cr20Ni	TP310	0.08	0.60	1.60	20.00	25.0	-	-	-	-	-	-	-
	25Cr20NiNbN / HR3C	TP310CbN	0.06	0.40	1.20	20.00	25.0	-	-	-	0.45	-	-	0.2N
	HR120	-	0.05	0.60	1.00	32.30	25.0	1.0	3.00	-	0.7	0.1	-	0.2N 0.3Co
	NF707	-	0.08	0.50	1.00	35.00	21.0	1.5	-	-	0.2	0.1	-	-
	21Cr32NiTiAl / Alloy800H	-	0.08	0.50	1.20	32.00	21.0	-	-	-	-	0.5	-	0.4Al
	22Cr15NiNbN / TempaloyA-3	-	0.05	0.40	1.50	15.00	22.0	-	-	-	0.7	-	0.002	0.15N
High Cr High Ni	20Cr25NiMoNbTi / NF709	-	0.15	0.50	1.00	25.00	20.0	1.5	-	-	0.2	0.1	-	-
	22.5Cr18.5NiWCuNbN / SAVE25	-	0.1	0.1	1	18	23	-	1.5	-	0.45	-	-	3.0Cu 0.2N
	30Cr50NiMoTiZr / CR30A	-	0.06	0.30	0.20	50.00	30.0	2.0	-	-	-	0.2	-	0.03Zr
	23Cr43NiWNbTi / HR6W	-	0.08	0.40	1.20	43.00	23.0	-	6.00	-	0.18	0.08	0.003	-
	Inconel 617	-	0.40	0.40	54.00	22.0	8.5	-	-	-	-	-	-	12.5Co, 1.2Al
High Cr High Ni	Inconel 671	-	0.05	-	-	51.50	48.0	-	-	-	-	-	-	-
	Alloy 213	-	0.06	0.40	0.60	56.00	20.0	6.0	-	-	-	2.00	0.005	20.0Co, 0.60Al

Independente do componente analisado é fundamental que todos tenham resistência à fluência, à corrosão ao vapor e aos produtos de combustão, no caso das usinas que utilizam carvão.

O nióbio foi a solução encontrada para o aumento da resistência à fluência e à corrosão pelo vapor em quase todos esses materiais, conforme detalhado a seguir.

4 EFEITO DO NIÓBIO NOS AÇOS PARA BOILERS

Num primeiro momento, a resistência de aços inoxidáveis à corrosão ao vapor pode ser considerada meramente função da composição química, ou seja, principalmente dos teores de cromo e níquel.⁽²¹⁾ Entretanto, a resistência à fluência também pode ser afetada por parâmetros metalúrgicos resultantes do processamento desses aços, como, por exemplo, tamanho de grão final, temperatura usada no tratamento de solubilização e dispersão e quantidade de precipitados, entre outros.⁽²²⁾

Em Maziasz,⁽²²⁾ um estudo comparativo é feito entre a resistência à fluência e à corrosão ao vapor de diferentes aços austeníticos e ligas de níquel, entre eles, aços como o NF709 e o HR120 (Tabela 2), com teores de 0,2% e 0,7% de nióbio, respectivamente.

A microestrutura resultante dos testes de fluência foi analisada por microscopia eletrônica de transmissão (Figura 10). É possível observar que ambos os aços contém precipitados do tipo NbC finamente dispersos no interior e nos contornos de grão, que foram formados durante o ensaio de fluência. Estes precipitados provocaram o ancoramento da rede de discordâncias, com conseqüente aumento da resistência à fluência.

Quanto ao tamanho de grão, é conhecido que a resistência à fluência aumenta quanto maior for o tamanho de grão, o que foi confirmado nesse estudo. Os materiais submetidos a um maior trabalho a frio tiveram recristalização mais acentuada e, portanto, apresentaram menores tamanhos de grão finais e menor resistência à fluência.⁽²²⁾

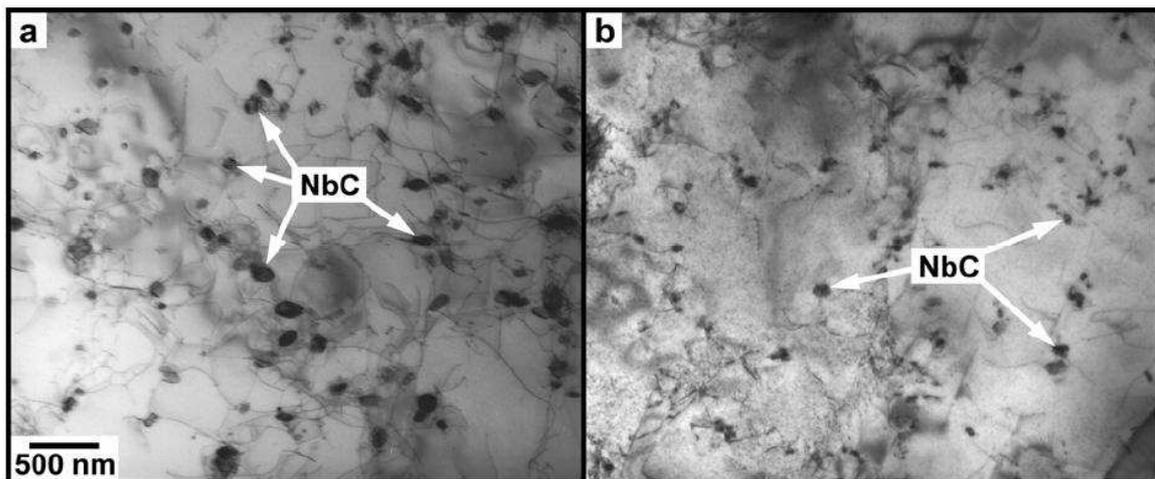


Figura 10: Micrografia feita em microscópio eletrônico de transmissão mostrando precipitados finos de NbC no interior dos grãos: a) aço NF709 (ruptura em teste de fluência após 5.015h); b) aço HR120 (ruptura em teste de fluência após 3.319 h). Ambos testados por fluência em 750°C e 100 MPa.

Estudos feitos com aços austeníticos aluminizados – Fe-(20-25)Ni-(12-15)Cr-(3-4)Al-(1-3)Nb% – também constataram que a presença de nióbio ajuda na resistência à fluência, por meio da precipitação, durante o ensaio de fluência, de nano-partículas de NbC (Figura 11).⁽²³⁾

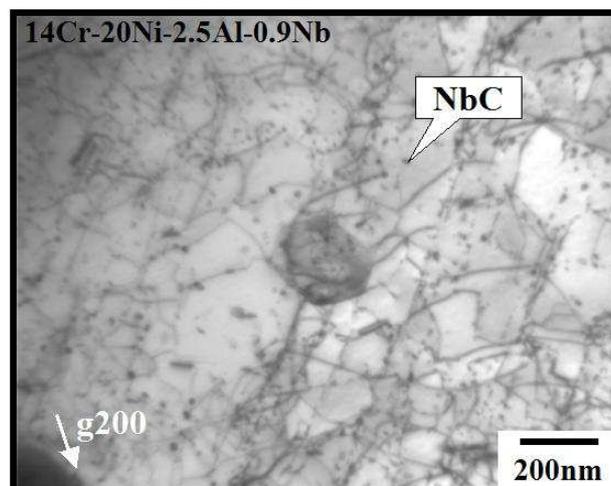


Figura 11: Microestrutura obtida em microscópio de transmissão eletrônica para o aço austenítico aluminizado 14Cr-20Ni-2.5Al-0.9Nb, evidenciando as nano-partículas de NbC.⁽²³⁾

Uma vez que os carbonetos devem ser finos e dispersos, é imperativo que as temperaturas de solubilização sejam elevadas o suficiente para que uma quantidade considerável de nióbio permaneça em solução. Com isso poderão ser formados os NbC durante os ensaios de fluência, ou, nos casos reais, durante a utilização dos componentes. Temperaturas elevadas de solubilização também favorecem maiores tamanhos de grão, com aumento adicional de resistência à fluência.

Esses estudos⁽²³⁻²⁵⁾ também mostram a contribuição do nióbio quanto à resistência à corrosão ao vapor ou oxidação (Figura 12). Os mecanismos atuantes ainda não são completamente conhecidos, mas dados experimentais evidenciam que o nióbio é um elemento chave no que diz respeito à oxidação em meios com vapor.

Acredita-se que haja uma relação entre o teor de nióbio e a menor solubilidade do oxigênio, o que favoreceria a formação do óxido de alumínio na superfície do aço, mais protetor e homogêneo e, com isso, uma maior quantidade de cromo estaria disponível na matriz austenítica, o que aumentaria ainda mais a resistência à oxidação.

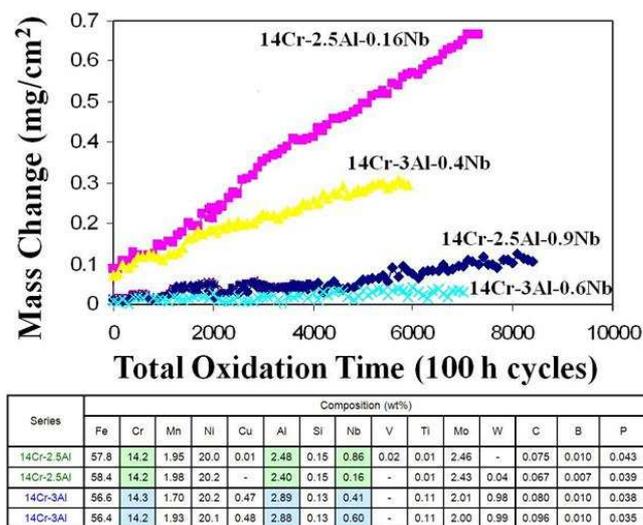


Figura 12: Oxidação em ar com 10% de vapor de água para quatro ligas experimentais de aço austenítico aluminizado, com diferentes teores de nióbio.

5 CONCLUSÃO

Apesar de inúmeras pesquisas sobre fontes limpas de geração de energia, as termelétricas ainda continuarão com papel importante na matriz energética do Brasil e do mundo. Além disso, os combustíveis fósseis, como o carvão e o gás natural, ainda serão as principais fontes de calor nessas usinas para as próximas décadas. Tendo isso em vista e considerando a crescente preocupação na preservação do meio-ambiente, são necessários fortes investimentos na melhoria da eficiência dessas usinas, procurando produzir mais energia com menos combustível, acarretando em menores emissões de gases como o CO₂. A melhoria na eficiência implica na operação das termelétricas com valores de pressão e temperatura crescentes e mais agressivos aos seus componentes, trazendo a necessidade de materiais cada vez mais resistentes à fluência e à corrosão em altas temperaturas. Com o aumento das temperaturas e das pressões de trabalho, tem-se um melhor desempenho com os aços inoxidáveis ferríticos & martensíticos até 620°C, com os austeníticos entre 620°C e 700°C, e com as ligas de níquel para temperaturas acima

destas últimas. Em todos esses casos a utilização do nióbio mostrou-se decisiva para o aumento da resistência à fluência e à corrosão. O aumento da resistência à fluência ocorre por meio da precipitação de NbC finamente disperso, que provoca o ancoramento da rede de discordâncias. Quanto ao aumento da resistência à corrosão em altas temperaturas em meio de vapor, os mecanismos ainda não são completamente conhecidos, mas há evidências que o nióbio afeta a solubilidade do oxigênio e a formação dos óxidos na superfície do aço, tornando-os mais protetores.

REFERÊNCIAS

- 1 BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético: Resultados 2007. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2007.pdf. Acesso em 09.06.2009.
- 2 International Energy Agency. China's Power Sector Reforms – Where to next?. OECD/IEA, 2006
- 3 BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. Plano Decenal de Expansão de Energia: 2007 / 2016/ Ministério de Mina e Energia; Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético_Brasília: MME, 2 v, 2007.
- 4 Susta, M.R. et al. Supercritical and Ultra-supercritical Power Plants. PowerGen Asia, 2004.
- 5 Disponível em: <http://www.eei.org/ourissues/ElectricityGeneration/Pages/HowaPowerPlantWorks.aspx>. Acesso em 26.05.2009
- 6 The Babcock & Wilcox Company. Reliable and efficient steam generation systems for modern utility service. Catálogo da empresa The Babcock & Wilcox Company, 2004.
- 7 Taylor D. The role of advanced clean coal technologies in EU energy policy. Clean Coal Day, Japan, 2007.
- 8 International Energy Agency (IEA). Fossil Fuel-Fired Power Generation – Case studies of recently constructed coal and gas-fired power plants. International Energy Agency (IEA), page 33, 2007.
- 9 Thornton D.V. and Meyer K.H. apud Viswanathan R. And Bakker W.T. Materials for boilers in ultra supercritical power plants. Proceedings of 2000 International Joint Power Generation Conference, Florida, July 2000.
- 10 Wright, I.G, Masiasz, P.J., Ellis F.V., Gibbons T.B, Woodford, D.A. Materials issues for turbines in ultra-supercritical steam. Disponível em: <http://www.ms.ornl.gov/researchgroups/corrosion/staff/pdf/IGW-0417.pdf>. Acesso em: 09.06.2009.
- 11 Masuyama, F. History of Power Plants and Progress in Heat Resistant Steels. ISIJ International, Vol. 41, N° 6, pp.612-625, 200.
- 12 Disponível em : http://www.hitachi.com/environment/showcase/solution/energy/thermal_power.html. Acesso em 31.05.2009
- 13 Knezevic V., Sauthoff, G., Vilk, J., Inden, G., Schneider, A., Agamennone, R., Blum, W., Wang, Y., Scholz, A., Berger, C., Ehlers, J., Singheiser, L. Martensitic/Ferritic Super Heat-Resistant 650°C Steels – Design and Testing of Model Alloys. ISIJ International, vol. 42, no 12, pp. 1505-1514, 2002.
- 14 a EPRI. Cost of Corrosion in the Electric Power Industry. EPRI, Palo Alto, EPI Report no1004662, October 2001.

- 15 Viswanathan V., Purgert R., Rawls P. Coal - fired power materials: major advances in materials technology over the last decade have enabled building coal-fired power plants with much higher efficiencies than the current generation. *Advanced Materials & Processes, Powering the Future*, August, 2008.
- 16 Masuyama, M. apud Viswanathan R. And Bakker W.T. Materials for boilers in ultra supercritical power plants. *Proceedings of 2000 International Joint Power Generation Conference, Florida, July 2000.*
- 17 Oakey J.E., Pinder, L.W., Vanstone, R., Henderson, M., Osgerby, S. Review of status of advanced materials for power generation. *Department of Trade and Industry's Cleaner Coal Technology Transfer Programme Report*, February 2003.
- 18 Viswanathan R., Bakker W.T. Materials for boilers in ultra supercritical power plants. *Proceedings of 2000 International Joint Power Generation Conference, Florida, July 2000.*
- 19 Hovinga, M.N., Nakoneczny, G.J. Standard recommendations for pressure part inspection during a boilerlife extention program. *International Conference on Life Management and Life Extention of Power Plant, Ohio, USA, May 2000.*
- 20 Bugge J., Kjaer S., Stolzenberger C.. Europeans still aiming for 700°C steam. *Modern Power Systems*, Novemver 2004.
- 21 Pint, B.A., Peraldi, R. apud Maziasz, P.J., Shingledecker, J.P., Pint, B., Evans, N., Yamamoto, Y., More, K., Curzio, E. Overview of creep strength and oxidation of heat-resistant alloy sheets and foils for compact heat-exchangers. *Proceedings of GT2005, ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air, USA, June 2005.*
- 22 Maziasz, P.J., Shingledecker, J.P., Pint, B., Evans, N., Yamamoto, Y., More, K., Curzio, E. Overview of creep strength and oxidation of heat-resistant alloy sheets and foils for compact heat-exchangers. *Proceedings of GT2005, ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air, USA, June 2005.*
- 23 Brady, M.P. Yamamoto, Y., Santella, M. L., Pint, B.A. Effects of minor alloy additions and oxidation temperature on protective alumina scale formation in creep-resistant austenitic steels. *Scripta Materialia*, n° 57, pp.1117-1120, 2007.
- 24 Brady, M.P., Yamamoto, Y., Santella, M.L., Masiasz, P.J., Pint, B.A., Liu, C.T., Lu, Z.P., Bei, H. The development of alumina-forming austenitic stainless steels for high temperature structural use. *JOM*, pp. 71-77, July 2008.
- 25 Yamamoto, Y. et al. Development of alumina-forming austenitic stainless steels. Report from a paper for the 33rd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel systems, Florida, June, 2008.