

## GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO TÉRMICA - GGT

### DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE PREVISÃO DE VIDA REMANESCENTE DE COMPONENTES DE USINAS TERMELÉTRICAS BASEADA NA PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS

**ANDREA PEDROZA DA ROCHA SANTOS(1);HELOISA CUNHA FURTADO(1);BRUNO REIS  
CARDOSO(1);ROBERTA MARTINS DE SANTANA(1)  
CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA CEPEL(1)**

#### RESUMO

O aço 2,25Cr-1Mo é amplamente utilizado em aplicações em alta temperatura e pressões, deixando o aço susceptível ao fenômeno de fluência e, conseqüentemente, sujeito a instabilidades microestruturais. Estas alterações podem levar à diminuição da vida útil de componentes industriais ou até a falhas inesperadas em serviço. Com o objetivo de se aprimorar o conhecimento sobre o aço 2,25Cr-1Mo, o presente trabalho apresenta os resultados do estudo da evolução microestrutural e do comportamento mecânico desse aço, avaliando, assim, possíveis influências na resistência à fluência do material quando este é submetido a condições de altas temperaturas e tensões.

#### PALAVRAS-CHAVE

Aço 2,25Cr-1Mo, carbonetos, fluência, aços Cr-Mo, precipitação

#### 1.0 INTRODUÇÃO

O aço 2,25Cr-1Mo foi desenvolvido para substituir o aço carbono que apresentava uma resistência à fluência insatisfatória em aplicações que envolviam temperaturas elevadas. Ele é aplicável até uma temperatura operacional de 650°C sem a presença de hidrogênio ou 480°C em um ambiente rico em hidrogênio [1]. Suas microestruturas típicas são ferrita-perlita e ferrita-bainita.

O aço 2,25Cr-1Mo apresenta uma excelente combinação de resistência à oxidação e à fluência em alta temperatura sem elevar muito o custo de produção em virtude do seu baixo teor de elementos de liga. É extensivamente empregado na fabricação de equipamentos utilizados nas indústrias petroquímicas e nas usinas termoeletricas que estarão sujeitos a ciclos térmicos e condições severas (altas temperaturas e altas pressões), como reatores, vasos de pressão, trocadores de calor, válvulas, rotores de turbinas, tubulações etc.

As boas propriedades do aço 2,25Cr-1Mo estão relacionadas à sua composição química e à sua microestrutura. A presença de cromo oferece resistência satisfatória à corrosão e oxidação, enquanto o molibdênio melhora a resistência à fluência em altas temperaturas.

A sequência da precipitação em aços 2,25Cr-1Mo assume relevância no contexto do comportamento de fragilização dos aços. Diferentes estudos estão disponíveis na literatura sobre as transformações de precipitados em aços 2,25Cr-1Mo após operação em altas temperaturas, em que geralmente observa-se a presença de cinco tipos possíveis de carbonetos:  $M_3C$ ,  $M_2C$ ,  $M_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$  e  $M_6C$ . Como a cinética de precipitação é fortemente influenciada pela composição química do aço, diferentes evoluções de precipitados são descritas na literatura para os aços Cr-Mo. [2-8].

A microestrutura de um aço Cr-Mo é considerada estável, mesmo quando sujeita a altas temperaturas e pressões. Essa estabilidade tem impacto positivo na resistência do material, principalmente pela presença de finos carbonetos que impedem a movimentação das discordâncias. Devido a isso, a vida útil do aço 2,25Cr-1Mo está além de 20 anos em uma temperatura de operação na faixa de 520-560°C. No entanto, é inevitável que transformações ocorram durante longos períodos de serviço em condições severas, levando a uma perda da estabilidade e conseqüentemente a uma degradação microestrutural do aço. O resultado desse processo é uma atenuação nas suas propriedades, levando a uma fragilização local – e às vezes total – do material.

Com o objetivo de se aprimorar o conhecimento sobre o aço 2,25Cr-1Mo, o presente trabalho procura estudar a evolução microestrutural e o comportamento mecânico deste aço, avaliando assim possíveis influências na resistência à fluência do material quando este é submetido a condições de altas temperaturas e tensões.

Com esta pesquisa, procura-se melhorar a compreensão de como as condições em serviço podem afetar a microestrutura do material, pois subestimar o tempo de vida remanescente de uma caldeira, dentre outras conseqüências, gera custos desnecessários com novas inspeções e possíveis substituições prematuras de componentes ao segmento de geração de energia. Superestimar esse tempo, traz conseqüências ainda mais graves, pois além da perda econômica, danos ambientais e perdas de vidas humanas podem ocorrer.

Para se entender as propriedades de resistência de um aço a longo prazo, mudanças microestruturais e danos sofridos durante a exposição em diferentes condições de fluência precisam ser investigados. Apesar de haver na literatura muitos estudos sobre o aço 2,25Cr-1Mo [9-13], os critérios para avaliação do quanto a evolução dos precipitados influencia no envelhecimento são ainda muito conservadores. Sendo assim, a presente pesquisa tem como objetivo a formulação de um novo critério para avaliar o nível de degradação microestrutural em aços 2,25Cr-1Mo e assim estimar de forma mais eficaz e confiável a vida útil do material. Procura-se compreender melhor a evolução dos precipitados durante o envelhecimento e identificar quaisquer parâmetros que podem ser indicadores úteis e precisos de exposição em serviço e, portanto, aplicáveis na avaliação da vida remanescente.

## 2.0 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

### 2.1 Análise Química

Para a realização deste estudo, foi utilizado um aço ferrítico 2,25Cr-1Mo empregue em um coletor de saída do superaquecedor de vapor de uma caldeira de usina termelétrica. O aço permaneceu em operação durante 280.000 horas (aproximadamente 32 anos) a uma temperatura de 515°C e pressão interna de 12,26Mpa, com tensão equivalente calculada de 57 MPa, em condição controlada e sem falhas.

A composição química do material, obtida por análise no Laboratório de Análises Químicas do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), está apresentada na Tabela I, juntamente com a composição química de um aço 2,25Cr-1Mo, cuja especificação equivale ao ASTM A213 – Grade T22 [14].

Tabela I: Composições químicas (%peso) do aço 2,25Cr-1Mo, especificada pela norma ASTM A213 [14], e do material estudado.

	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>
<b>ASTM A213-T22</b>	0,05-0,15	0,30-0,60	0,03	0,03	0,50 max	1,90-2,60	0,87-1,13
<b>MATERIAL ESTUDADO</b>	0,13	0,47	0,01	0,02	0,43	1,90	0,94

### 2.2 Ensaios mecânicos

Para caracterizar as propriedades mecânicas do material estudado, ensaios de dureza e de tração foram realizados e seus resultados estão apresentados na Tabela II, juntamente com os valores estabelecidos pela norma ASTM A213 para um aço 2,25Cr-1Mo (T22) [14].

Tabela II: Propriedades mecânicas segundo a norma ASTM A213 [14] e valores experimentais do aço 2,25Cr-1Mo estudado.

	<b>Limite de escoamento (MPa)</b>	<b>Limite de resistência (MPa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>	<b>Dureza HRB</b>
<b>ASTM A213-T22</b>	≥ 205	≥ 415	≥ 22	≤ 85
<b>MATERIAL ESTUDADO</b>	234,0 ± 3,0	534,0 ± 3,0	28,9 ± 0,6	73,6 ± 3,6

### 2.3 Ensaios de fluência

Para a realização dos ensaios de ruptura por fluência, foram confeccionados corpos de prova segundo especificações da norma DIN 50125 [15]. Os corpos de prova foram retirados no sentido circunferencial do coletor, por ser a posição na qual a tensão de operação atua de forma mais crítica.

Os ensaios de fluência a carga constante foram realizados no CEPEL com a utilização de três máquinas de fluência modelo STM/MF1000, com sensores de deslocamento do tipo LVDT (Linear Variable Differential Transformer) segundo a norma ASTM E139 [16]. Durante a realização do ensaio, são utilizados dois termopares: o primeiro controlando a temperatura no interior do forno e o segundo acompanhando a temperatura do corpo de prova. A carga constante é aplicada por meio de blocos com massas específicas conhecidas, e o cálculo da carga é feito a partir da tensão que se deseja aplicar, da área da seção transversal útil do corpo de prova e de um fator de conversão dependente de cada equipamento.

Como o aço utilizado no estudo esteve em serviço a uma temperatura e tensão de aplicação de 515°C e 57 Mpa, respectivamente, para a escolha das condições dos ensaios de fluência, foram utilizados como base os dados do NRI (National Research Institute for Metals) [17] referentes a ensaios de fluência do aço 2,25Cr-1Mo para as temperaturas mais próximas a 515°C disponíveis.

No total, foram realizados onze ensaios, variando entre duas temperaturas (500°C e 550°C) e sete tensões (108, 117, 127, 137, 147, 157 e 177 MPa).

### 2.4 Análise Microestrutural

Com o objetivo de identificar a microestrutura e analisar a degradação ocorrida devido à exposição prolongada a temperaturas elevadas, análises metalográficas foram realizadas em microscópio ótico e microscópio eletrônico de transmissão (MET).

Após os ensaios de fluência, as amostras passaram pelo procedimento metalográfico padrão de preparação, sendo cortadas e embutidas em baquelite, passando por lixamento com lixas de 120 a 1200 mesh e polimento com suspensões de diamante de 9 e 1  $\mu\text{m}$ . O ataque químico foi feito por imersão em solução de Nital 2% por 10 segundos. As imagens por microscopia de luz visível foram adquiridas utilizando o microscópio Olympus, modelo GX71, disponível no Laboratório de Metalografia do CEPEL.

Com o objetivo de se obter informações mais precisas sobre tamanho, forma e composição química dos carbonetos presentes no material após os ensaios de fluência, análises por microscópio eletrônico de transmissão (MET) foram realizadas utilizando o modelo FEI-Titan localizado no Núcleo Multiusuário de Microscopia do PEMM/COPPE-UFRJ. Tal equipamento permite realizar não só uma análise da morfologia dos precipitados, como também a identificação e quantificação dos elementos químicos presentes nos mesmos por meio de um detector de análise química por espectroscopia dispersiva de energia (EDS).

Para tal análise, foram preparadas réplicas de carbono de cada corpo de prova após finalizado o ensaio de ruptura por fluência. As réplicas são feitas a partir da amostra embutida, já lixada e polida, que é atacada com Nital 10%. Após o ataque químico, é feita uma deposição de um filme de carbono (método Sputtering), utilizando-se um vaporizador iônico modelo Polaron CA7615 pertencente ao Laboratório de Metalografia do CEPEL. É feita então uma imersão das amostras primeiramente em uma solução de Villela e posteriormente em água destilada, fazendo com que partes do filme de carbono se desprendam da superfície do aço, sendo então capturadas por uma grade de cobre de 300 mesh e 3 mm de diâmetro.

## 2.5 Difração de Raios X (DRX)

Com o objetivo de identificar e quantificar os tipos de precipitados presentes no material após os ensaios de fluência, foi realizada uma análise por difração de raios X utilizando um difratômetro do tipo D8 Discover da marca Bruker, pertencente ao Laboratório de Ensaios Não Destrutivos, Corrosão e Soldagem (LNDC).

Para a realização da análise de DRX, as amostras foram submetidas a uma preparação onde cada corpo de prova teve uma parte dissolvida (cerca de 5g) em solução de HCl 1:1. Depois de completada a dissolução, foi realizada uma filtragem a vácuo (0,3 - 0,4bar) utilizando-se um filtro de membrana de celulose com tamanho de poro de 0,2  $\mu\text{m}$  e diâmetro de 47mm. Após o procedimento, os precipitados ficam retidos no filtro de membrana, o qual foi utilizado para a análise de DRX.

Para a aquisição dos dados de difração (difratogramas) foi realizada uma análise utilizando-se um intervalo angular ( $2\theta$ ) variando de 30° a 110°, com um passo angular (step) de 0,01 e um intervalo de contagem de 0,5 seg/step. A fonte de radiação utilizada foi a de cobalto, com comprimento de onda igual a 1,789Å.

Os carbonetos presentes foram identificados pela indexação dos picos de difração no programa EVA utilizando-se o banco de dados de padrões de difração fornecido pelo PDF Maint-4.

## 3.0 RESULTADOS

### 3.1 Ensaios de fluência

A Tabela III apresenta os resultados obtidos a partir dos ensaios de fluência realizados e seus respectivos valores para o aço não envelhecido obtido por NIRM [17]. A análise da Tabela III mostra uma acentuada redução no tempo de ruptura quando se compara o material novo (NIRM) com o material envelhecido em serviço (Cepel). Estes resultados retratam significativa perda de sua resistência à fluência, como era de se esperar após o longo tempo de exposição em serviço.

Tabela III: Comparação entre os resultados dos ensaios de fluência do aço novo (NIRM [17]) e do envelhecido em serviço (Cepel).

Temperatura (°C)	$\sigma$ (MPa)	Tempo de ruptura (h)		Deformação (%)		Identificação
		NIRM	Cepel	NIRM	Cepel	
500	127	63.537,1	25731,6	28,0	33,7	F <sub>500,127</sub>
	137	29.437,7	4.877,7	33,0	30,8	F <sub>500,137</sub>
	147	16.346,4	2.835,7	35,0	26,6	F <sub>500,147</sub>
	157	9.445,7	1.500,9	37,0	25,9	F <sub>500,157</sub>
	177	4.027,3	422,0	49,0	21,5	F <sub>500,177</sub>
550	108	8.013,8	2.902,2	41,0	26,2	F <sub>550,108</sub>
	117	5.000,0	1.207,8	45,0	19,5	F <sub>550,117</sub>
	127	3.472,0	351,4	52,0	20,5	F <sub>550,127</sub>

	137	783,0	226,9	53,0	23,1	F <sub>550,137</sub>
--	-----	-------	-------	------	------	----------------------

### 3.2. Análise Microestrutural

Dois exemplos de micrografias encontradas estão apresentados na figura 1. Em geral, nas micrografias das amostras submetidas aos ensaios de fluência foi observado um alongamento dos grãos na direção preferencial da tensão aplicada durante o ensaio, principalmente nas amostras com elevado carregamento. Na amostra F<sub>500,127</sub> nota-se maior dispersão das áreas previamente perlíticas, devido às condições em fluência a qual foi submetida que permitiu sua ruptura após 4877,66 horas. Também foram encontradas decoesões dos contornos de grão, caracterizadas como vazios de fluência.

O material envelhecido a 515°C por 280.000 horas e tensão média de 57 MPa chegou ao estágio D de degradação e com mais 4877,66 horas de ensaio de fluência a 137MPa chegou-se ao estágio E de TOFT e MARSSEN [18], indicando que há uma aceleração na degradação da microestrutura do aço estudado, não somente, com o aumento de temperatura, mas também com o acréscimo da tensão.

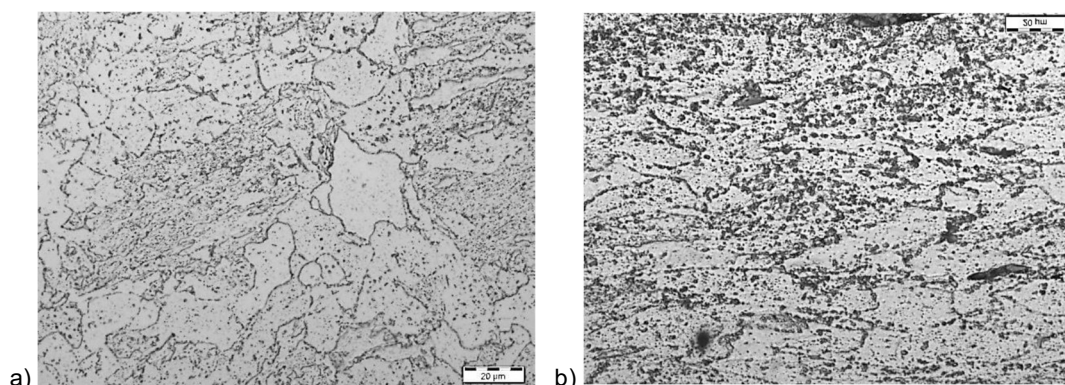


Figura 1. Microestruturas (a) do aço envelhecido em serviço e (b) do aço envelhecido em serviço submetido à fluência (500°C e 137MPa) por 4877,66 horas. Aumento nominal de 1000X.

Para a análise por MET, inicialmente, foram adquiridas diferentes regiões de cada réplica referente a um ensaio de fluência, obtendo-se uma imagem dos precipitados com um aumento de 10000x. O passo seguinte foi adquirir diferentes mapas, com maiores aumentos, chegando a até 80000x. Nestes mapas, é possível diferenciar os principais elementos presentes (ferro, cromo, molibdênio) em cada carboneto selecionado a partir do uso da técnica de EDS. Foi utilizada uma diferenciação de cores para cada elemento, além de ter sido realizada uma quantificação dos mesmos em cada precipitado. Assim, é possível relacioná-los aos precipitados característicos de um aço 2,25Cr-1Mo de acordo com dados da literatura.

Em geral, foi possível identificar precipitados em formato de bastões e globulares ricos em cromo e ferro, estando associados aos carbonetos do tipo M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> e M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>. Na Figura 2, referente a amostra F<sub>550,127</sub>, estes carbonetos estão caracterizados pela cor azul e seu espectro de EDS está apresentado na Figura 3a.

Foram observados também precipitados ricos em molibdênio e ferro em formato globular e elipsoide, associados aos carbonetos do tipo M<sub>6</sub>C. Na Figura 2, referente a amostra F<sub>550,127</sub>, estes carbonetos estão caracterizados pela cor laranja e seu espectro de EDS está apresentado na Figura 3b.

Foram observados também carbonetos em forma de agulha e alguns em formato globular, ricos em molibdênio, indicando serem do tipo M<sub>2</sub>C. Na Figura 4a, referente a amostra F<sub>550,127</sub>, estes carbonetos estão caracterizados pela cor vermelha e seu espectro de EDS está apresentado na Figura 4b.

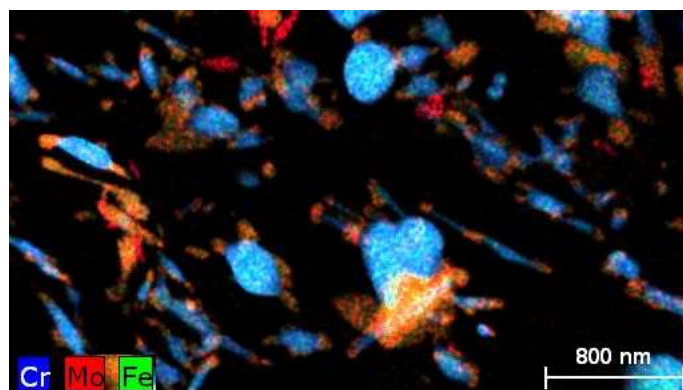


Figura 2: Imagem obtida por MET, mostrando carbonetos do tipo  $M_7C_3$  ou  $M_{23}C_6$  (azul) e  $M_6C$  (laranja) – aumento de 20000x.

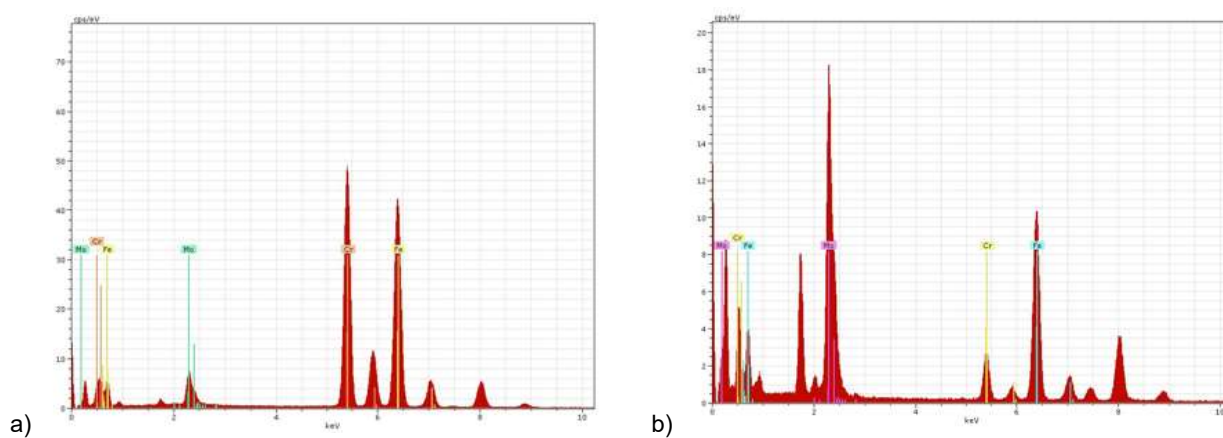


Figura 3: Espectros de EDS característico dos carbonetos (a)  $M_7C_3$  ou  $M_{23}C_6$  e (b)  $M_6C$ , obtidos por MET.

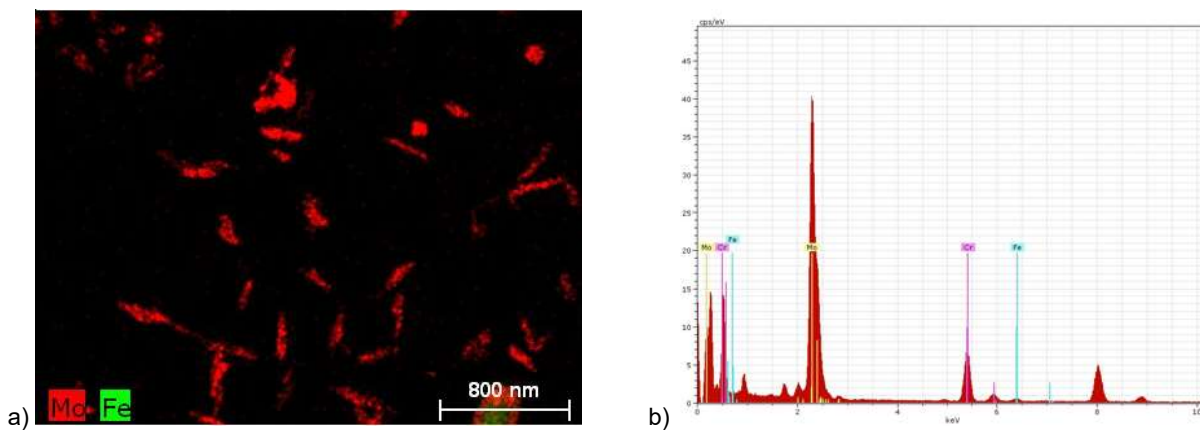


Figura 4: (a) Imagem obtida por MET mostrando carbonetos do tipo  $M_2C$  - aumento de 20000x. (b) Espectro de EDS característico dos carboneto  $M_2C$ , obtidos por MET.

### 3.3 Difração de raios X

A Figura 5 apresenta alguns dos difratogramas obtidos com suas respectivas identificações de carbonetos encontrados. É possível observar a presença de  $M_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$ ,  $M_2C$  e  $M_6C$  em todas as amostras. Observa-se também que nenhuma apresentou carboneto do tipo  $Fe_3C$ .

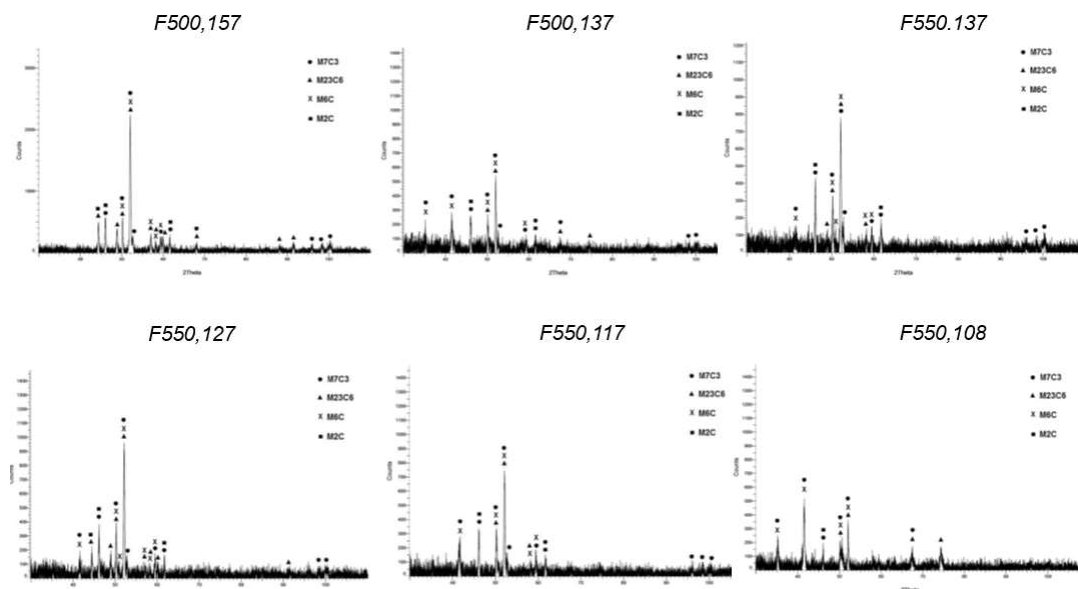


Figura 5: Difratoigramas de diferentes amostras

#### 4.0 DISCUSSÃO

Pelo gráfico da Figura 6, é possível observar uma variação da degradação por fluência dependendo das condições de tensão e temperatura de ensaio em que o material foi submetido. Conforme aumenta-se a tensão de ensaio, menor o tempo de duração do mesmo. Comportamento similar ocorre com o aumento da temperatura.

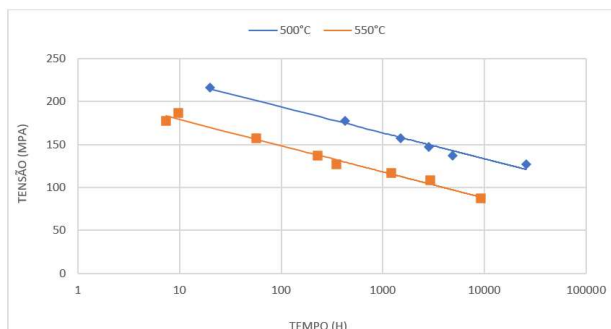


Figura 6: Variação da degradação por fluência em diferentes condições de tensão e temperatura de ensaio.

Na análise de MET, utilizando-se a técnica de EDS, é possível quantificar o teor de cromo, molibdênio e ferro em cada precipitado selecionado. Para essa primeira análise, foram coletados os espectros pontuais de EDS de cerca de 50 precipitados em cada condição, tendo sido montado, então, um diagrama ternário para cada amostra. Alguns estão apresentados na Figura 7.

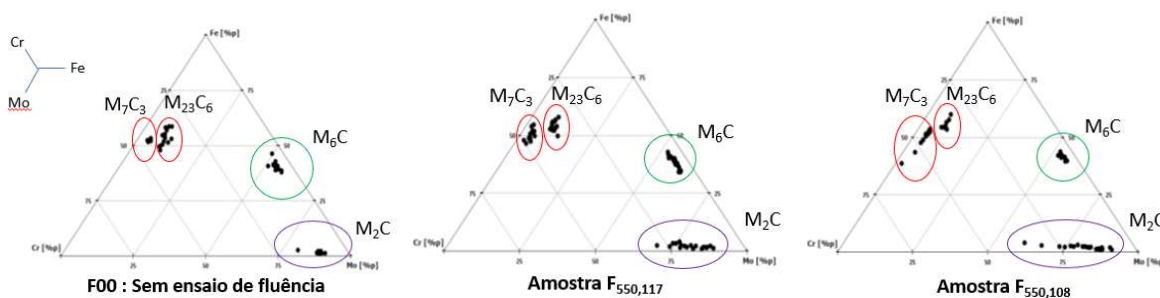


Figura 7: Representação ternária Fe-Cr-Mo para os carbonetos encontrados.



Uma análise dos diagramas nos mostra um grupo de precipitados com teores em geral acima de 75% de molibdênio, sendo associados aos carbonetos do tipo  $M_2C$ .

Um segundo grupo é observado apresentando um teor de molibdênio em torno de 55% com cerca de 40-50% de ferro. Tal grupo seria referente aos carbonetos do tipo  $M_6C$ .

Em teores de molibdênio abaixo de 15%, em conjunto com teores de ferro e cromo entre 50-60% e 30-45%, respectivamente, notam-se dois grupos bem próximos de precipitados, estando associados aos carbonetos  $M_{23}C_6$  e  $M_7C_3$ .

A Tabela IV apresenta os valores médios obtidos para cromo, ferro e molibdênio para cada tipo de carboneto identificado nas amostras.

Tabela IV: Valores médios obtidos para Cr,Fe,Mo para cada tipo de carboneto identificado nas amostras.

CARBONETO	ELEMENTO	%PESO
$M_6C$	Fe	$40,2 \pm 1,4$
	Cr	$4,8 \pm 0,4$
	Mo	$55,0 \pm 1,5$
$M_2C$	Fe	$1,7 \pm 0,5$
	Cr	$13,8 \pm 3,1$
	Mo	$84,4 \pm 3,4$
$M_7C_3$	Fe	$51,6 \pm 1,7$
	Cr	$44,3 \pm 1,7$
	Mo	$4,1 \pm 0,3$
$M_{23}C_6$	Fe	$54,4 \pm 2,2$
	Cr	$36,7 \pm 1,6$
	Mo	$9,0 \pm 0,8$

De fato, como esperado, o carboneto do tipo  $M_6C$  é rico em ferro e cromo, os do tipo  $M_7C_3$  e  $M_{23}C_6$  são ricos em ferro e cromo e o do tipo  $M_2C$  é rico em molibdênio. Foi possível observar que a composição química de  $M_6C$  se manteve praticamente constante em todas as amostras analisadas. Em todas as amostras o carboneto do tipo  $M_2C$  apresentou porcentagem de molibdênio superior a 80%. Ainda neste elemento, foi possível observar uma tendência de queda em seu teor conforme se diminui a carga de ensaio, ou seja, aumenta-se a duração do ensaio de fluência.

## 5.0 CONCLUSÕES

- A análise dos resultados por microscopia eletrônica de transmissão (MET) se mostra uma ótima opção na identificação dos carbonetos presentes nas amostras após sofrerem ensaios de fluência com diferentes temperaturas e cargas, sendo possível identificar a presença de carbonetos dos tipos  $M_2C$ ,  $M_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$ ,  $M_6C$  nas amostras, estando coerentes com o que se encontra na literatura;

- O aço estudado não apresentou carbonetos do tipo  $Fe_3C$  nas amostras analisadas;

- Os carbonetos do tipo  $M_2C$  apresentam teores em geral acima de 80% de molibdênio;

- Há indícios claros de formação de carboneto do tipo  $M_6C$ , considerado prejudicial à vida útil do material quando em serviço;

- Os carbonetos do tipo  $M_6C$  identificados nas amostras analisadas por MET apresentam um teor de molibdênio em torno de 55% com cerca de 40-50% de ferro.

## 6.0 REFÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS

[1] METALS HANDBOOK, Properties and selection: irons, steels, and high performance alloys, v. 1, 10ed., ASM International, 1990.

[2] BAKER, R.G., NUTTING, J. "The tempering of 2,25Cr-1Mo steel after quenching and normalizing", Journal of the Iron and Steel Institute, v. 192, pp. 257-268, 1959.

[3] PARAMESWARAN, P., VIJAYALAKSHMI, M., RAGHUNATHAN, V.S. "The influence of prior microstructure on tempering stages in 2.25Cr-1Mo steel", High Temperature Materials and Processes, v. 21, pp. 251-267, 2002.

[4] PIGROVA, G.D., SEDOV, V.M., ARCHAKOV, Y.I. "Carbide Transformations in Cr-Mo steels in the process of long-term aging and operation", Metal Science and Heat Treatment, v. 39, pp. 371-375, 1997.

- [5] KLUEH R.L., LEITNAKER J.M. "An analysis of the decarburization and aging process in 2.25Cr-1Mo steel", Metallurgical Transactions A, v. 6A, pp. 2089-2093, 1975.
- [6] WADA T., BISS, V.A. "Restoration of elevated temperature tensile strength in 2.25Cr-1Mo steel", Metallurgical Transactions A, v. 14A, pp. 845-855, 1983.
- [7] PILLING J., RIDLEY N. "Tempering of 2.25 Pct Cr-1 Pct Mo low carbon steels", Metallurgical Transactions A, v. 13A, pp. 557-563, 1982.
- [8] LIMA W.F., RIGUEIRA G., FURTADO H.C., et al. "Microstructure evolution and creep properties of 2.25Cr-1Mo ferrite-pearlite and ferrite-bainite steels after exposure to elevated temperatures", Materials Research, v. 20, pp. 418-422, 2017.
- [9] YANG, J.R., HUANG, C.Y., YANG, C.N., et al. "Microstructural examination of 2.25Cr-1Mo steel steam pipes after extended service", Materials Characterization, v. 30, pp. 75-88. 1993.
- [10] MITCHELL, D.R.G., BALL, C.J. "A quantitative X-ray diffraction and analytical electron microscopy study of service-exposed 2.25Cr-1Mo steels", Materials Characterization, v. 47, pp. 17-26, 2001.
- [11] MOSS, C.J., KELLY, P.M. "The mechanisms and detection of embrittlement in Cr-Mo pressure vessel steels", Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures, v. 17, pp. 369-380, 1994.
- [12] MITCHELL, D.R.G., SMALL, R. "Microstructural evolution in seven 2.25Cr-1Mo superheater outlet headers due to service exposure", Science and Technology of Welding and Joining, v. 6, pp. 1-9, 2001.
- [13] KIM, C.S., PARK, I., JHANG, K. "Nonlinear ultrasonic characterization of thermal degradation in ferritic 2.25Cr-1Mo steel", NDT&E International, v. 42, pp. 204-209, 2009.
- [14] ASTM A213/A213M - 17 – Standard Specification for Seamless Ferritic and Austenitic Alloy-Steel Boiler, Superheater, and Heat-Exchanger Tubes. ASTM, USA, 2017.
- [15] DIN 50125:2016 - 12 – Testing of metallic materials – Tensile test pieces. DIN, Berlin, Germany, 2016.
- [16] ASTM E139 - 11 – Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials. ASTM, USA, 2011.
- [17] National Institute for Materials Science, Data Sheets on the Elevated-Temperature Properties of 2.25Cr-1Mo Steel for Boiler and Heat Exchanger Seamless Tubes (STBA 24), NIMS Creep Data Sheet No. 3B, Japan, 1986.
- [18] TOFT, L.H, MARSDEN, R.A., "Structural processes in creep: special report no. 70", Iron & Steel Institute, pp. 238-244, London, 1961.



## DADOS BIOGRÁFICOS



Possui graduação em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE-UFRJ). Atualmente está no último ano do doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro.

## (2) HELOISA CUNHA FURTADO

Engenheira metalúrgica e de materiais formada pela UFRJ, tendo concluiu o mestrado e o doutorado na COPPE/UFRJ na mesma área. Realizou curso d MBA em Energia no IBMEC e pós-doutorado no Instituto Técnico de Lisboa na área de materiais para usinas termelétricas. Trabalha desde 1986 no CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) atuando na área de Avaliação de Integridade Estrutural em Plantas Térmicas. É membro da ABRAGE desde a sua fundação, atuando no grupo de Trabalho de manutenção de Usinas termelétricas (GTMT). É coordenadora da Comissão de Inspeção de equipamentos do Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP).

## (3) BRUNO REIS CARDOSO

Possui graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (2004), mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (2007) e doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2017). Atualmente é pesquisador II do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Engenharia de Materiais e Metalúrgica, atuando principalmente nos seguintes temas: alta temperatura, avaliação de integridade, fluência, estimativa de vida residual.

## (4) ROBERTA MARTINS DE SANTANA

Formada em Licenciatura em Matemática pela Unigranrio e Mestra em Ciências, em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela UFRJ. Atualmente cursando o Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela UFRJ. Técnica em Mecânica Industrial pelo CEFET-RJ atuando na área desde 1998. Trabalha desde 2006 no área de metalografia e análise de falhas no CEPEL – Ilha do Fundão. Experiência em Microscopia Eletrônica, Preparação Metalográfica de Amostras e Preparação de Amostras para Microscopia Eletrônica, Análise de Falhas, Ensaios de Fluência e Fluência Small Punch e Inspeção em Caldeiras Termelétricas. Trabalhou de 2000 a 2001 na GE Aircraft Engines Petrópolis/RJ