

Tema: Metalurgia física e comportamento de materiais em temperaturas elevadas

## EFEITO DA MICROESTRUTURA NA PERMEAÇÃO DE HIDROGÊNIO EM AÇOS 2,25Cr-1Mo-0,25V\*

Amanda SardinhaPereira<sup>1</sup>  
Dilson Silva dos Santos<sup>2</sup>  
Leandro Martins de Oliveira<sup>3</sup>

### Resumo

O uso dos aços 2,25Cr-1Mo-0,25V em reatores de hidrotreatamento cresceu significativamente devido ao seu excelente comportamento em fluência, elevada tenacidade e resistência à corrosão. Contudo, as propriedades mecânicas deste material podem ser afetadas pelo tipo de microestrutura. O objetivo desse trabalho foi estudar a influência da microestrutura do aço 2,25Cr-1Mo-0,25V, obtida por meio de diferentes tratamentos térmicos, na difusividade e solubilidade de hidrogênio. Foram realizados ataques químicos seletivos para revelar a austenita retida e ensaios de permeação eletroquímica do hidrogênio. A análise dos dados da permeação mostrou que a amostra revenida a 550<sup>o</sup>C ( $D_{ap} = 4,6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ) possui menor coeficiente de difusão comparada às amostras revenida a 375<sup>o</sup>C ( $D_{ap} = 6,9 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ) e revenida a 730<sup>o</sup>C ( $D_{ap} = 3,4 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

**Palavras-chave:** Aços 2,25Cr-1Mo-0,25V; Austenita retida; Permeação de hidrogênio; Difusibilidade do hidrogênio.

### EFFECTS OF MICROSTRUCTURE ON THE HYDROGEN PERMEATION OF 2,25Cr-1Mo-0,25V STEEL

### Abstract

The use of 2,25Cr-1Mo-0,25V steel increased significantly in hydrotreating reactors due to its excellent creep, high toughness and corrosion resistance. However, the presence of retained austenite can reduce that mechanical properties. The aim of this work was to study the influence of the microstructure of 2,25Cr-1Mo-0,25V, which was obtained by different heat treatment, on the diffusivity and solubility of hydrogen. The study included a color tint-etching to reveal the retained austenite and electrochemical permeation tests. Results showed that permeation of sample tempered at 550<sup>o</sup>C ( $D_{app} = 4,6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ) has a lower diffusion coefficient compared to the samples tempered at 375<sup>o</sup>C ( $D_{app} = 6,9 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ) and tempered at 730<sup>o</sup>C ( $D_{app} = 3,4 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

**Keywords:** 2,25Cr-1Mo-0,25V steels; Retained austenite; Electrochemical permeation; Diffusivity of hydrogen.

<sup>1</sup> Graduanda em Engenharia de Materiais, DEMM, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Físico, DSc, Professor Adjunto do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Meteriais, PEMM-COPPE-UFRJ Rio de Janeiro, RJ, Brasil

<sup>3</sup> Engenheiro Metalúrgico, PROPMEC, DEMM, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços 2,25Cr-1Mo-0,25V são utilizados para a fabricação de reatores de hidrotreatamento e hidrocraqueamento com até 300 mm de espessura. O processo de produção desses aços consiste em revení-los a 730<sup>0</sup>C durante cerca de 8h dependendo da espessura. A grande espessura dessas chapas tem como consequência a presença de austenita retida ao final do tratamento térmico de revenimento, a qual contribui para os fenômenos de degradação pelo hidrogênio e para a redução das propriedades mecânicas [1].

O hidrotreatamento (HDT) consiste na utilização de hidrogênio para a remoção de impurezas tais como enxofre e nitrogênio presentes nos combustíveis destilados nafta, querosene e diesel. Os produtos gerados através da hidrogenação, a severidade do processo, os ciclos térmicos e o ataque eletroquímico em paradas podem causar danos críticos aos reatores.

Embora, estes aços sejam revestidos por uma camada de aço inoxidável austenítico, durante o tempo em serviço, eles podem absorver hidrogênio, podendo ser observado ataque ou fragilização pelo hidrogênio. Os reatores de hidrotreatamento operam em uma faixa de temperatura em que os aços Cr-Mo não apresentam fragilização pelo hidrogênio. Entretanto, durante as paradas, esse fenômeno pode ocorrer, caso todo o hidrogênio dissolvido no material não tiver conseguido sair do aço durante o resfriamento [2].

A solubilidade do hidrogênio na austenita é maior do que na ferrita, uma vez que o raio do interstício da estrutura cúbica de face centrada (cfc) da austenita é maior que o da estrutura cúbica de corpo centrado (ccc). Já a difusão na estrutura cfc é muito menor devido ao maior caminho médio a ser percorrido pelos átomos. As diferenças entre as taxas de difusão e a solubilidade de cada estrutura permitem que a fase austenítica possa atuar efetivamente como um aprisionador de hidrogênio em aços martensíticos ou ferríticos .

Como o aço é uma liga metálica com microestrutura complexa e com inúmeras variações caracterizadas mediante parâmetros distintos, é imprescindível revisar a forma como as principais características microestruturais interagem com o hidrogênio e, principalmente, o mecanismo de aprisionamento das armadilhas [3].

Com base nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi estudar a influência da microestrutura do aço 2,25Cr-1Mo-0,25V, obtida por meio de diferentes tratamentos térmicos, nos fenômenos de degradação pelo hidrogênio. Amostras nas condições revenida a 375<sup>0</sup>C, revenida a 550<sup>0</sup>C e revenida a 730<sup>0</sup>C tratadas termicamente por 2h, foram estudadas através de ataques químicos seletivos e permeação eletroquímica do hidrogênio.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material estudado foi fornecido pela PETROBRAS sob a forma de placa grossa de dimensões 1m x 300mm x 180 mm. Peças cortadas com dimensões iguais a 25mm x 16mm x 25mm foram submetidas a diferentes tratamentos térmicos durante o mesmo período de tempo, conforme descrito na Tabela 1.

---

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

**Tabela 1.** Tratamentos térmicos realizados no aço 2,25Cr-1Mo-0,25V.

Amostra	Tratamento térmico
RV1	Austenitização a 1000°C por 1h, seguido de têmpera em água e revenimento a 375°C por 2h.
RV2	Austenitização a 1000°C por 1h, seguido de têmpera em água e revenimento a 550°C por 2h.
RV3	Austenitização a 1000°C por 1h, seguido de têmpera em água e revenimento a 730°C por 2h.

As amostras foram utilizadas para a realização de análises distintas como análise da microestrutura, composição química e ensaios de permeação eletroquímica. A microestrutura das amostras nas três condições descritas anteriormente foram comparadas com uma amostra de referência austenitizada a 1000°C por 1h e temperada em água.

A análise da composição química do material estudado é mostrada na Tabela 2 e foi realizada através da técnica de Espectrometria por Emissão Óptica, no equipamento SPECTROMAX.

**Tabela 2.** Composição química dos aço 2,25Cr-1Mo-0,25V.

Elementos	ASME 2098	Aço 2,25Cr-1Mo-0,25V
C	0,11- 0,15	0,135
Si	0,10 máx	0,08
Mn	0,30 - 0,60	0,50
P	0,015 máx	0,006
S	0,010 máx	0,005
Cr	2,00 - 2,50	2,70
Ni	0,25 máx	0,12
Mo	0,90 -1,10	1,10
V	0,25 - 0,35	0,264
Cu	0,20 máx	0,141
Ti	0,03 máx	0,0036
Nb	0,07 máx	0,014
B	0,002 máx	< 0,0005

A microscopia óptica (M.O.) foi realizada com auxílio do equipamento OLYMPUS – GX71 no laboratório da COPPE/UFRJ. As amostras foram preparadas usando lixas na sequência variando de 100 a 1200, polidas com pasta de diamante de 3 µm e 1 µm e, finalmente, atacadas quimicamente.

O procedimento do ataque consistiu na utilização de Nital 2% por 8 segundos, lavagem em água destilada, seguido de um novo ataque com solução aquosa de Metabissulfito de Sódio 10% por mais 20 segundos. Esse ataque teve como finalidade revelar a austenita retida, a qual aparece branca. A perlita, a bainita e a martensita aparecem em cores escuras e a ferrita em tons claros [4].

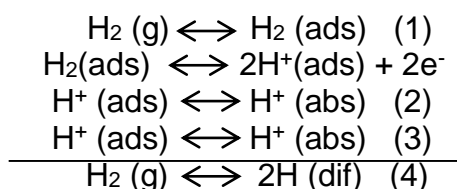
O uso do microscópio eletrônico de varredura (MEV) permitiu melhor resolução na visualização da austenita retida e da distribuição dos precipitados. As amostras

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

foram preparadas e atacadas com Nital 2% por 8 segundos. Utilizou-se o microscópio JEOL JSM 6460 do laboratório de microscopia eletrônica do PEMM/COPPE – UFRJ.

A permeação eletroquímica do hidrogênio foi realizada usando amostras com espessura entre 0,3mm e 1mm preparadas com acabamento metalográfico. A amostra foi colocada entre os dois compartimentos da célula eletroquímica. Inicialmente, uma solução de NaOH 0,1M foi adicionada no compartimento de detecção, enquanto o outro compartimento da célula permanecia vazio, para realizar a medição do potencial de circuito aberto. O compartimento de geração de H foi preenchido com uma solução de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,1M para gerar hidrogênio através da aplicação de um potencial catódico.

O processo de dissolução do hidrogênio na superfície exposta do metal ocorre em quatro etapas: (1) adsorção física, (2) adsorção química, (3) penetração através da superfície e (4) difusão [5]. Entretanto, quando o hidrogênio chega na superfície metálica por via eletroquímica ou por via gasosa parcialmente ionizado e/ou dissociado, a reação de dissociação não é necessária [6].



Nos processos em que a difusão é a etapa controladora da velocidade de reação é necessário determinar o perfil de concentração dos átomos do gás dissolvido no metal e a sua dependência com o tempo. Essas grandezas podem ser encontradas ao serem resolvidas as equações da primeira e segunda lei de Fick para a difusão, respectivamente [7].

A primeira lei de Fick descreve o estado estacionário para fluxo unidirecional, onde o fluxo na varia com o tempo e a espessura conforme a equação:

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (1)$$

Onde J é o fluxo de átomos de hidrogênio (mol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>), D é o coeficiente de difusão (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>) e x é a espessura em metros. O sinal negativo indica que a direção da difusão se dá contra o gradiente de concentração.

A Segunda Lei de Fick descreve o estado transiente, no qual o fluxo de difusão e o gradiente de concentração variam com o tempo e com a espessura.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2)$$

Para as seguintes condições de contorno: C(x,0) = 0 e J(0,t) = J<sub>0</sub>C(L,t)<sub>t>0=cte</sub>, a resolução da segunda Lei de Fick é dada por:

$$\frac{J_L}{J_0} = 1 + \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D t}{4L^2}\right) \quad (3)$$

Onde J<sub>L</sub> é o fluxo de hidrogênio no metal, D é o coeficiente de difusão, t é o tempo (s), L é a espessura (m) e n = 1,2,3...

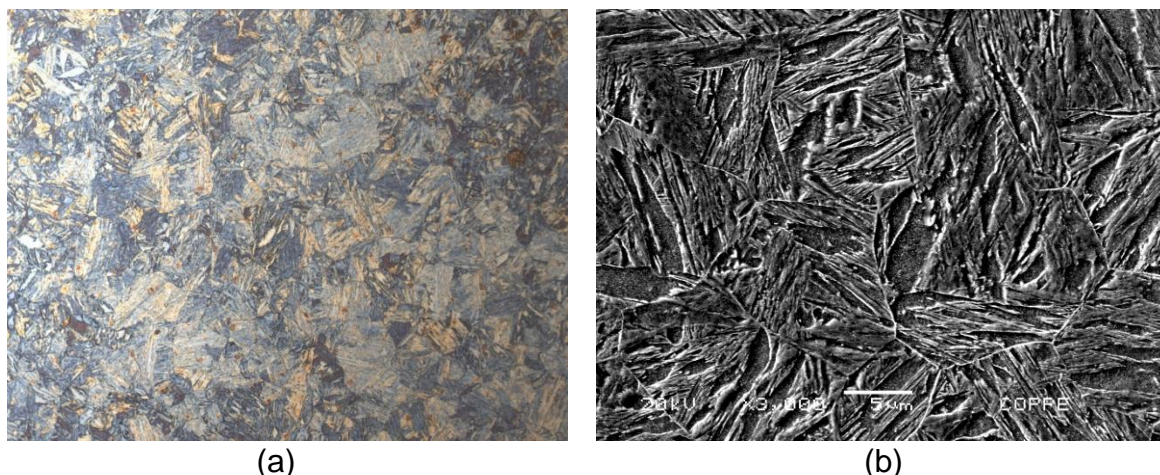
A interseção do ponto de inflexão com o nível inicial J<sub>L</sub>=0 no gráfico J x t, fornece o tempo t<sub>b</sub>, que também pode ser calculado pela expressão a seguir:

$$t_b = \frac{L^2}{14 D} \quad (4)$$

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

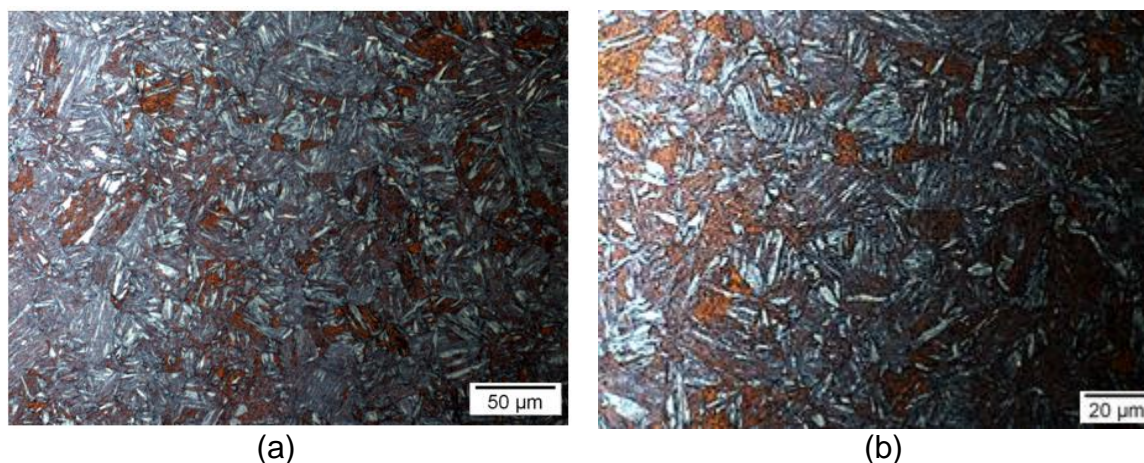
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra a micrografia da amostra austenitizada a 1000°C por 1h e temperada em água, a qual foi usada como referência para as demais microestruturas. Observa-se a presença de uma microestrutura martensítica e regiões sem precipitação, típicas de austenita retida.



**Figura 1** – Micrografia da amostra 2,25Cr-1Mo-0,25V austenitizada e temperada em água, sendo (a) M.O. aumento de 1000 x (b) MEV aumento de 3000 x.

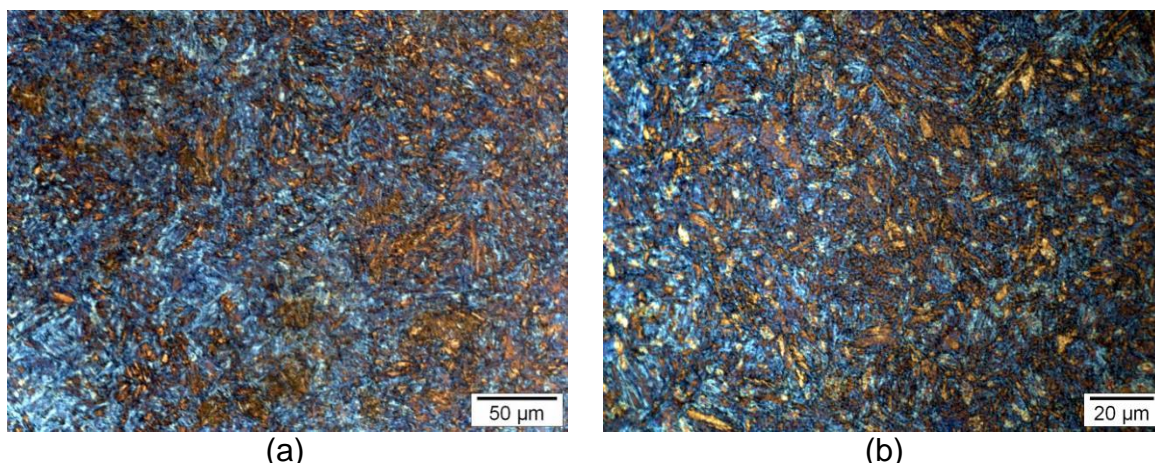
A Figura 2 apresenta a micrografia da amostra RV1 em diferentes aumentos. O ataque utilizado permitiu identificar a presença de austenita retida (branca) e sugere que as áreas marrons correspondem à martensita revenida.



**Figura 2** – Micrografia referente à condição revenida a 375<sup>o</sup>C obtida por M.O. (a) aumento de 500x (b) aumento de 1000x.

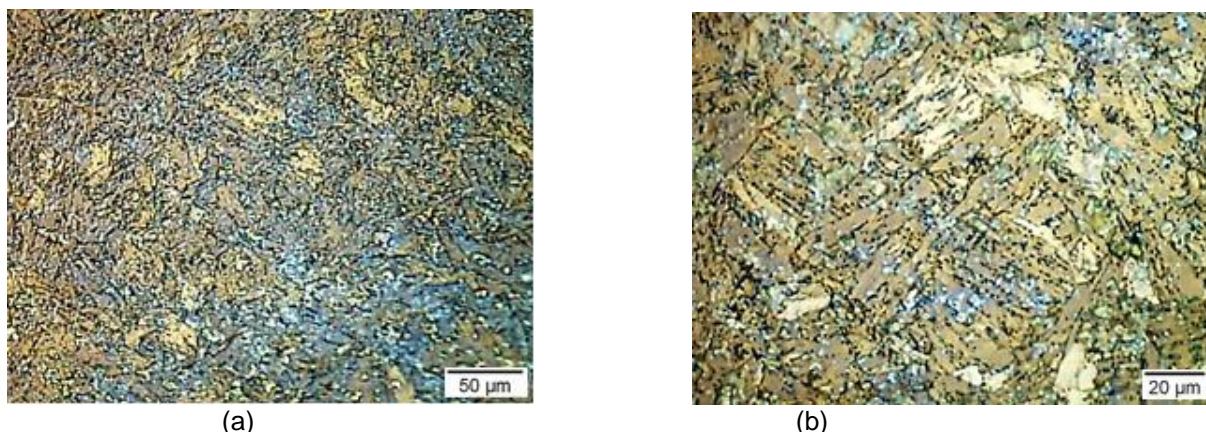
A Figura 3 mostra a microestrutura da amostra RV2, na qual a ferrita é observada na cor marrom. Nesta condição de revenimento, é provável que ocorra a recuperação de discordâncias dos contornos das ripas de martensita, o que origina uma estrutura ferrítica acircular de baixa densidade de discordâncias.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



**Figura 3** – Micrografia referente à condição revenida a 550°C obtida por M.O. (a) aumento de 500x (b) aumento de 1000x.

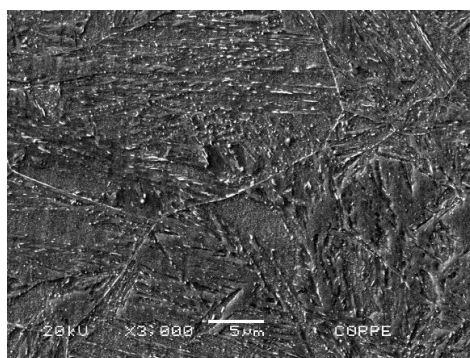
A Figura 4 mostra a microestrutura da amostra RV3, na qual a ferrita aparece na cor marrom. A bainita possui uma aparência acircular na forma de ripas, semelhantes às maclas de deformação e plaquetas de martensita.



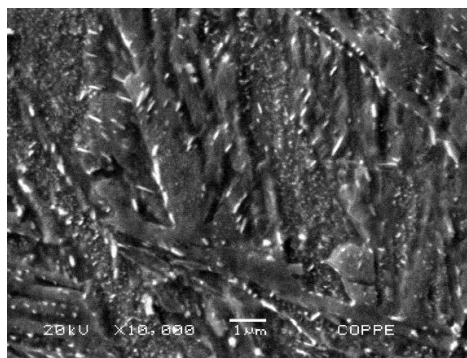
**Figura 4** – Micrografia referente à condição revenida a 730°C obtida por M.O. (a) aumento de 500x (b) aumento de 1000x.

A seguir são apresentadas as análises realizadas por MEV das mesmas mostras anteriores. A Figura 5 mostra a microestrutura do aço 2,25Cr-1Mo-0,25V na condição revenida a 375°C. Observa-se uma microestrutura contendo carbonetos típicos de uma estrutura martensítica revenida. Os carbonetos estão finamente dispersos na matriz na forma de bastão, o que é característico de aços resfriados muito rapidamente e revenidos a baixa temperatura. Nota-se também a presença de precipitados nos contornos de grão e, ainda, de ripas de martensita.

\* Contribuição técnica ao 69<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14<sup>o</sup> ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



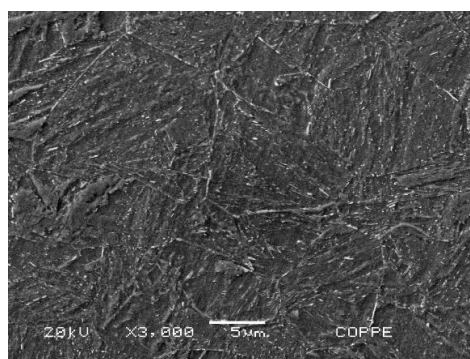
(a)



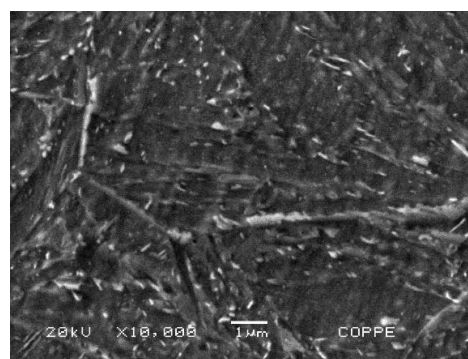
(b)

**Figura 5** – Micrografia do aço 2,25Cr-1Mo-0,25V revenido a 375°C obtida por MEV (a) aumento de 3000x (b) aumento de 10000x.

A Figura 6 mostra a micrografia do aço 2,25Cr-1Mo-0,25V na condição revenida a 550°C. Os carbonetos adquiriram um formato esferoidal. Esses carbonetos nuclearam preferencialmente nos contornos de ripas e nos contornos da austenita prévia, além de forte precipitação na matriz.



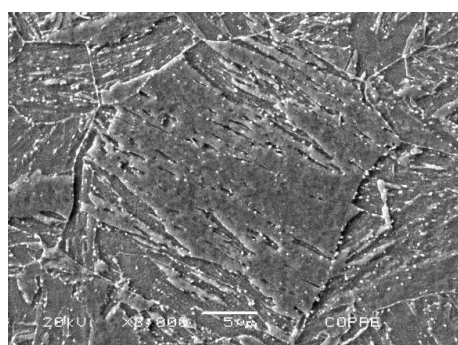
(a)



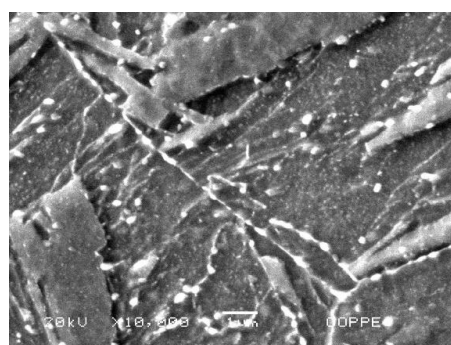
(b)

**Figura 6** – Micrografia do aço 2,25Cr-1Mo-0,25V revenido a 550°C C obtida por MEV (a) aumento de 3000x e (b) aumento de 10000x.

A Figura 7 mostra a microestrutura do aço 2,25Cr-1Mo-0,25V na condição revenida a 730°C. Nota-se uma morfologia acircular na forma de agulha característica da bainita superior, obtida devido à elevada temperabilidade do aço estudado. Observa-se a predominância de carbonetos finos e pequenos dispersos na matriz ferrítica, além daqueles presentes no interior e nos contornos de grãos bainíticos.



(a)



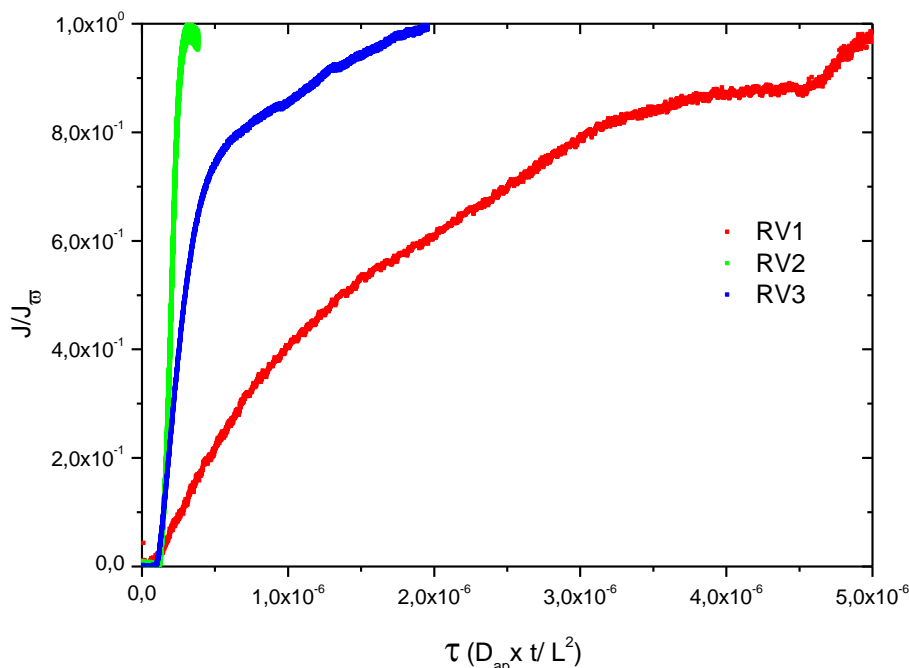
(b)

**Figura 7** – Micrografia do aço 2,25Cr-1Mo-0,25V revenido a 730°C obtida por MEV (a) aumento de 3000x (b) aumento de 10000x.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Os resultados de permeação de hidrogênio são mostrados e discutidos a seguir. A Figura 8 apresenta as curvas de permeação de hidrogênio por via eletroquímica das amostras RV1, RV2 e RV3. As curvas foram obtidas para amostras de diferentes espessuras, portanto foi necessário parametrizá-las, considerando no cálculo do tempo a espessura de cada uma e a sua respectiva difusividade aparente.

$$\tau = \frac{D_{ap} \times t}{L^2} \quad (5)$$



**Figura 8** – Curva de permeação eletroquímica do hidrogênio no aço 2,25Cr-1Mo-0,25V em diferentes condições de tratamento térmico.

A Tabela 3 apresenta os valores de difusividade aparente para cada condição. Nota-se que a difusão do hidrogênio está diretamente relacionada à microestrutura resultante de cada tratamento térmico.

**Tabela 3.** Cálculo da difusividade aparente.

Amostras	espessura (mm)	$D_{ap}(m^2.s^{-1})$
RV1	0,39	$6,9 \times 10^{-11}$
RV2	0,77	$4,6 \times 10^{-12}$
RV3	0,78	$3,4 \times 10^{-11}$

A Tabela 4 mostra os valores dos parâmetros da permeação de hidrogênio obtidos a temperatura ambiente para o aço 2,25Cr-1Mo-0,25V.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



**Tabela 4.** Parâmetros da permeação do hidrogênio.

Amostra	Difusividade (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	J <sub>∞</sub> (mol H/m <sup>2</sup> .s)	S <sub>ap</sub> (mol H/m <sup>3</sup> )
RV1	6,9 x 10 <sup>-11</sup>	1,4 x 10 <sup>-6</sup>	7,7
RV2	4,6 x 10 <sup>-12</sup>	5,1 x 10 <sup>-7</sup>	84,7
RV3	3,4 x 10 <sup>-11</sup>	8,2 x 10 <sup>-7</sup>	18,6

A análise comparativa entre os valores apresentados na Tabela 3 permite observar que a precipitação de carbonetos na amostra RV2 resultou em uma menor difusibilidade comparado às outras duas condições. O aumento da temperatura de revenimento propiciou a maior decomposição da austenita retida em ferrita e cementita e, ainda, a precipitação de carbonetos capazes de aprisionar mais hidrogênio.

Os resultados indicam que o coeficiente de difusão e, portanto, o transporte de hidrogênio são fortemente influenciados pelos constituintes aprisionadores. A combinação de aprisionadores fortes como as interfaces entre ripas de martensita e/ou grãos ferríticos e/ou austeníticos e finos precipitados presentes na amostra revenida a 550<sup>o</sup>C resultou em um menor valor de difusibilidade das três condições estudadas.

A amostra revenida a 375<sup>o</sup>C também apresenta, em diferentes proporções, os aprisionadores descritos, porém foi a que apresentou maior coeficiente de difusão, o que sugere que outros fatores influenciam como a distribuição, a composição química e a morfologia dos carbonetos, além da possibilidade de algum tipo de curto circuito promovido pela microestrutura. A quantidade de austenita retida também mostrou ser um fator relevante, principalmente na comparação entre as amostras RV1 e RV3. Embora a condição revenida a 730<sup>o</sup>C possua uma matriz bainítica, a mesma apresentou menor coeficiente de difusão que a condição revenida a 375<sup>o</sup>C. Isto sugere que, em maior temperatura, a precipitação gerada é mais efetiva em aprisionar o hidrogênio, o que reflete nos valores de solubilidade exibidos pelas duas condições de tratamentos térmicos nas amostras RV2 e RV3.

#### 4 CONCLUSÃO

A influência da microestrutura é um fator importante no estudo da difusibilidade e solubilidade do hidrogênio nos 2,25Cr-1Mo-0,25V em diferentes condições de tratamento térmico.

Os testes de permeação resultaram em uma menor difusibilidade para a condição revenida a 550<sup>o</sup>C ( $D_{ap} = 4,6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ) quando comparada com as amostras revenidas a 375<sup>o</sup>C ( $D_{ap} = 6,9 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ) e revenida a 730<sup>o</sup>C ( $D_{ap} = 3,4 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ). A amostra revenida a 550<sup>o</sup>C apresentou maior valor de solubilidade. Os valores de solubilidade foram 7,7 mol.H/m<sup>3</sup> para a condição revenida a 375<sup>o</sup>C, 84,7 mol.H/m<sup>3</sup> para a revenida a 550<sup>o</sup>C e 18,6 mol.H/m<sup>3</sup> para a revenida a 730<sup>o</sup>C.

Os resultados mostram que a microestrutura dos aços 2,25Cr-1Mo-0,25V tratados termicamente influencia fortemente os valores de difusibilidade e solubilidade do hidrogênio nestes aços.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro dado pelo CNPq, pela CAPES e pela PETROBRAS.

## REFERÊNCIAS

- 1 Solheim KG, Solberg JK, Walmsley J. et al. The role of retained austenite hydrogen embrittlement of supermartensitic stainless steel. *Engineering Failure Analysis*. 2013; 34:140-149.
- 2 Franco CSG. Fragilização pelo hidrogênio na junta soldada do aço 2,25Cr-1Mo-0,25V [Projeto de graduação]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2013.
- 3 Torres LFL. Influência de microestrutura com a interação do hidrogênio com o aço 2.25Cr-1Mo envelhecido [Tese de D.Sc]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2011.
- 4 De AK, Speer JG, Matlock DK. Color Tint-etching for Multiphase steels. *Advanced Materials & Processes*, 2013; 161: 27-31.
- 5 Siquara PC. Influência da microestrutura nas propriedades físicas e mecânicas dos aços 2,25Cr-Mo usados em ambientes ricos em hidrogênio. [Tese de M.Sc]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2006.
- 6 Oriani R. A brief survey of useful information about hydrogen in metals. *International Symposium on Cold Fusion and Advanced Energy Sources*. Minsk: Belarusian State University; 1994.
- 7 Miranda PEV, Rodrigues JA .Gases em Metais e Ligas – Fundamentos e Aplicações em Engenharia. Rio de Janeiro: Didática Científica Ltda, 1994.

---

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.