

# Efeito do tratamento térmico de recozimento na microestrutura e nas propriedades mecânicas do aço ferrítico 2,25Cr-1Mo

## Effect of heat treatment on microstructure and annealing on the mechanical properties of ferritic steel 2,25Cr-1Mo

Juliermes Carvalho Pereira<sup>1,2</sup>, Vitor Luiz Sordi<sup>3</sup>, Ayrton de Sá Brandim<sup>2</sup>, Renata Barbosa<sup>4</sup>, Joao Alberto Santos Porto<sup>1,2</sup>, José Francisco dos Reis Sobrinho<sup>2</sup>

### RESUMO

Aços 2,25Cr-1Mo são utilizados em sistemas de geração termoelétrica, submetido à fluência, podem ter suas propriedades degradadas em serviço provocada por alterações microestruturais típicas, portanto, o conhecimento dos ciclos de tratamentos térmicos destes aços são de extrema importância para se obter alta resistência mecânica aliada a baixa corrosão. Neste trabalho, procurou-se investigar o impacto do tratamento térmico de recozimento na microestrutura e nas propriedades mecânicas do aço, para tal, amostras do aço foram austenitizadas em atmosfera de argônio por 2h a 950 °C e resfriadas ao forno. A caracterização microestrutural mostrou fases perlita e ferrita com presença de carbeto dispersos na matriz. Ensaios de dureza mostraram que as amostras tratadas sofreram uma considerável redução em seus valores, já os ensaios de tração a quente apresentaram uma melhor resistência mecânica somente nas temperaturas de 25 °C e 500 °C.

**Palavras Chave:** Aço 2,25Cr-1Mo; Microestrutura; Tração a quente.

### ABSTRACT

2,25Cr-1Mo steels are much used in thermoelectric generation systems, submitted to creep, may have their degraded properties in service provoked by typical microstructural changes, therefore, the knowledge of the heat treatment cycles of this steel are of extreme importance to achieve high mechanical strength combined with low corrosion. In this work, sought to investigate the impact of heat treatment of annealing on microstructure and on the mechanical properties of steel, for such, steel samples were austenitization in argon atmosphere for 2h to 950 °C and cooled to the oven. The microstructural characterization showed phase perlite and ferrite and presence of carbides dispersed in the array. Hardness testing showed that the treated samples suffered a considerable reduction in their values, whereas the hot traction tests showed a better mechanical strength only in the temperature of 25 °C end 500 °C.

**Keywords:** Steel 2,25Cr-1Mo; Microstructure; Hot traction.

<sup>1</sup>Universidade Estadual do Maranhão – Departamento de Matemática e Física – Caxias (MA) – Brasil

<sup>2</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – Teresina (PI) – Brasil

<sup>3</sup>Universidade Federal de São Carlos – São Carlos (SP) – Brasil

<sup>4</sup>Universidade Federal do Piauí – Teresina (PI) – Brasil

**Autor correspondente:** Juliermes Carvalho Pereira – Universidade Estadual do Maranhão – Departamento de Matemática e Física – Praça Duque Caxias, Centro – CEP: 65604-290 – Caxias (MA) – Brasil  
E-mail: professorjuliermes@hotmail.com

**Recebido:** 25/07/2017 **Aprovado:** 22/11/2017

## INTRODUÇÃO

Atualmente os aços do grupo CrMo são amplamente utilizados em aplicações diversas na indústria química, petrolífera ou de gás, além de termoeletricas convencionais, superfícies e até ultracríticas. Estes fatores os tornam materiais atrativos para operar sob condições severas. A microestrutura, e consequentemente, as propriedades mecânicas desejadas nos aços Cr-Mo dependem da composição química e dos tratamentos térmicos aos quais foram submetidos<sup>(1)</sup>.

O tratamento térmico de recozimento de um material consiste na sua exposição a uma temperatura elevada durante um período de tempo prolongado e então resfriado lentamente<sup>(2)</sup>.

O aço 2,25Cr-1Mo que além da microestrutura ferrita e perlita comumente utilizada, outras duas possíveis microestruturas podem ser aplicadas, são elas: microestrutura ferrita com bainita oriundo do processo de normalização e revenido ou microestrutura martensita com bainita obtido pelo processo de têmpera seguido de revenido<sup>(3)</sup>.

Assim, o objetivo desse estudo foi avaliar o efeito do tratamento térmico de recozimento na microestrutura e nas propriedades mecânicas do aço Ferrítico 2,25C-1Mo de forma que os resultados possam contribuir para a viabilidade técnico econômica da utilização do mesmo.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O material de partida nesta pesquisa, foi o aço Ferrítico 2,25Cr-1Mo doado pela REPLAN - Refinaria de Paulínia/PETROBRÁS, de acordo com o fornecedor o material é comercializado na condição normalizada e revenida: normalização com austenitização na faixa de temperatura de 900 a 1016 °C seguida de resfriamento ao ar, e posteriormente revenimento na faixa de 580 e 720 °C. A composição química do aço proposto é mostrada na Tabela 1 de acordo com especificações da norma ASTM A 387 grau 22<sup>(4)</sup>.

Um total de quatro corpos de prova usados nesta pesquisa, foram tratados em forno tipo mulfla com taxa de aquecimento de 30 °C/mim, as amostras foram austenitizadas a 950 °C com um tempo de encharque de 2h em atmosfera de argônio, em seguida recozidas no interior do forno com taxa de resfriamento de 40 °C por hora.

Para avaliar a microestrutura das amostras, foi realizado metalografia seguida de ataque químico com reagente Nital 2% e caracterizadas por microscopia ótica MO e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Para determinação da fração volumétrica das fases presentes foi utilizado análises micrografias processadas através do software Image J. A caracterização dos carbeto foi realizada através do método da diluição em solução

**Tabela 1:** Composição Química do aço 2.25Cr-1Mo (% em peso).

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
0,05 - 0,15	0,30 - 0,60	0,035	0,035	0,50	2,00 -2,50	0,9 - 1,10

Fonte: ASTM A 387, grau 22.

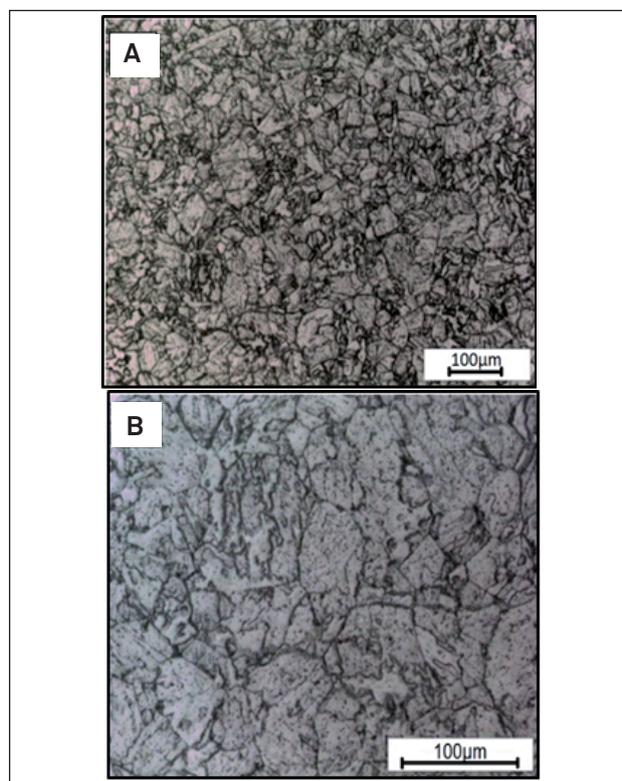
de Berzélius e filtradas para extração dos precipitados presentes em cada condição e identificados via difração de Raios - X.

Também foram realizados ensaios de dureza Rockwell de acordo com a norma ASTM E 92-82 e ensaios de dureza com microindentador Vickers de acordo com a norma ASTM E 384-99 e para a determinação do tamanho de grão foi utilizada a metodologia de Heyn da norma ASTM E112-96. Por fim, os parâmetros mecânicos do aço tratados foram obtidos através de ensaios de tração segundo a norma ASTM E -21 à temperaturas de 25, 500, 600, e 700 °C com taxa de deformação de 0,5 mm/mim.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Microestrutura do aço 2,25Cr-1Mo normalizado e revenido

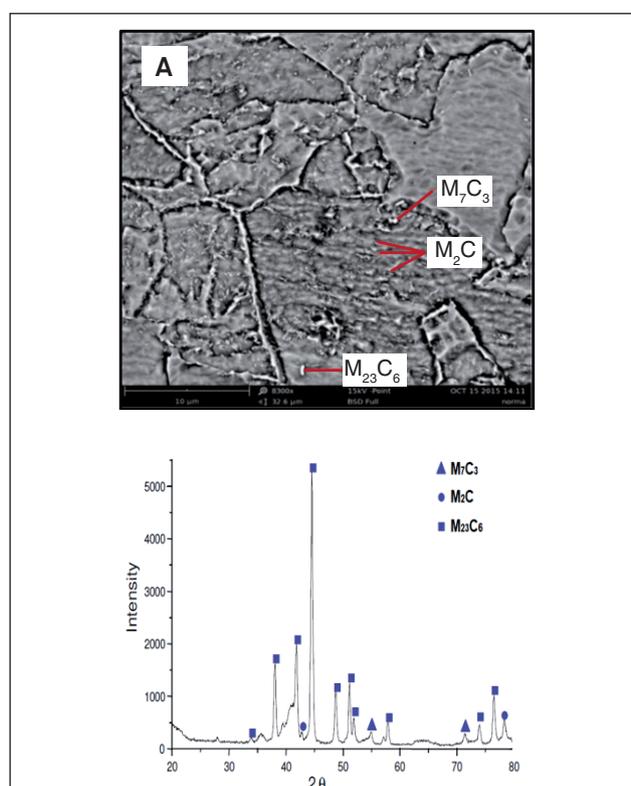
As Figs. 1a,b mostram a micrografia do aço 2,25Cr-1Mo obtida via microscopia ótica na condição de partida, nela é possível notar uma microestrutura bifásica com 60% de bainita e 40 % de ferrita, nesta condição o material apresentou tamanho de grão na ordem de 28 µm, considerado de tamanho 8 de acordo com a norma ASTM E 112- 63. O resultado da média dos testes de dureza Rockwell obtido por 5 indentações para o aço nesta condição



**Figura 1:** Microscopia ótica do aço 2,25Cr-1Mo normalizado e revenido. (A) aumento de 200X e (B) aumento de 500X.

foi de 85,5 HRB com desvio padrão de 2,2. A microestrutura apresentada pelo aço 2,25Cr-1Mo na condição inicial é típica do processo de fabricação relatado pelos seus fornecedores, e sendo também semelhante as microestruturas do mesmo material observado nas pesquisas de Sobrinho<sup>(5)</sup>.

A Fig. 2a mostra a micrografia via MEV do material de partida com aumento de 8300X, pela morfologia dos precipitados é possível notar que alguns carbeto em forma de agulhas ( $M_2C$ ), circulares ( $M_7C_3$ ) e bastões ( $M_{23}C_6$ ) aparecem distribuídos no interior da bainita e na ferrita. A Fig. 2b mostra o Difratoograma de Raios -X para os precipitados presentes na amostra, de acordo com as análises, é possível confirmar a presença dos carbeto  $M_2C$  rico em Molibdênio,  $M_7C_3$  rico em cromo e  $M_{23}C_6$  com maior frequência na amostra sendo rico em ferro, cromo e molibdênio.

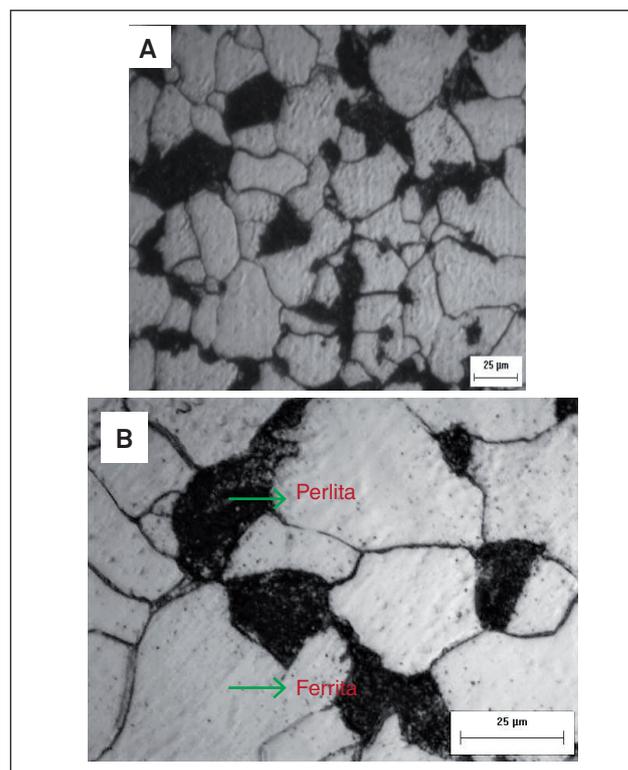


**Figura 2:** (A) Microscopia eletrônica de varredura do aço como recebido com identificação dos carbeto segundo sua morfologia (B) Difratoograma de Raios -X dos carbeto extraídos.

### Microestrutura do aço 2,25Cr-1Mo tratado por recozimento

As Figs. 3a,b mostram a micrografia do aço 2,25Cr-1Mo tratado termicamente por recozimento obtida via microscopia óptica e atacado com reagente Nital 2% onde é possível evidenciar microestrutura bifásica, típica de aço baixa liga composta por aproximadamente 80% de ferrita (grãos claros) e 20% de perlita (grãos escuros). A microestrutura apresentada pelo aço 2,25Cr-1Mo na condição tratada é semelhante as microestruturas do mesmo material observado na pesquisa de Rigueira<sup>(7)</sup>.

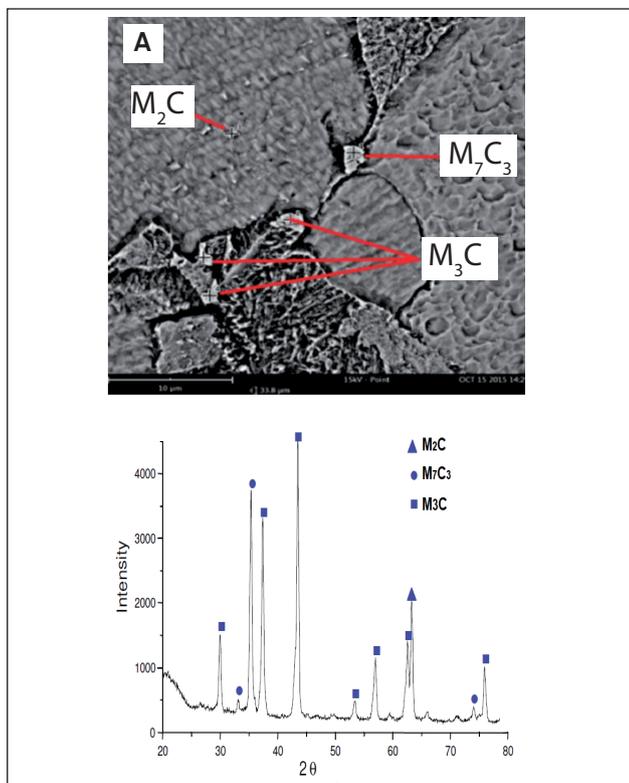
A amostra recozida apresentou tamanho de grão médio de  $45\mu m$ , considerado tamanho 6 de acordo com a norma ASTM E 112- 63, baseado nisso, foi observado que o tratamento térmico elevou o tamanho de grão das amostras tratadas, de acordo com Reed-Hill<sup>(6)</sup>, isso se deve à elevada energia interna presente no material durante a recristalização, ocasionando um crescimento anormal de alguns grãos provocado pelo processo de migração dos contornos de grãos em virtude da redução de sua energia superficial.



**Figura 3:** Microscopia óptica do aço 2,25Cr-1Mo Recozido a  $950\text{ }^\circ\text{C}$ , ataque Nital 2%. Aumento de (A) 200X e (B) 400X.

A Fig. 4a mostra a micrografia via MEV do material tratado em 8500X onde observa-se alguns carbeto distribuídos em toda a fase perlítica e ferrítica, tais precipitados foram identificados pelo difratograma obtido via Raios-X como mostra a Figura 4b, nela os picos confirmam a presença do carbeto  $M_2C$  ( $M_{23}C_6$ ) rico em molibdênio se apresentando com morfologia acircular disposto na matriz ferrítica, do carbeto  $M_7C_3$  ( $C_{17}C_3$ ) rico em cromo, se apresentando com forma globular entre os contorno de grãos e o carbeto que mais se evidenciou para a amostra tratada que foi o carbeto  $M_3C$  ( $Fe_3C$ ) rico em ferro e também conhecido como cementita.

A pesquisa de Silva<sup>(8)</sup>, sobre o Estudo da Fragilização pelo Hidrogênio no Aço 2,25Cr-1Mo Submetido a Tratamentos Térmicos de Envelhecimento, concluiu que o tempo de exposição de 100h foi suficiente para que a amostra envelhecida a  $500\text{ }^\circ\text{C}$  precipitasse carbeto estáveis e metaestáveis, finamente dispersos no interior dos grãos da microestrutura ferrítica e perlítica, evidenciando carbeto do tipo  $M_3C$  e  $M_{23}C_6$ .



**Figura 4:** Microscopia Eletrônica de Varredura do aço 2,25Cr-1Mo recozido, ataque com Nital 2% com aumentos (A) 1500X e (B) 3000X respectivamente.

Também foram realizados testes de dureza na modalidade HRB e dureza com microindentador na modalidade HV para cada microconstituente da amostra do aço 2,25Cr-1Mo na condição recozida, seus dados são indicados na Tabela 2.

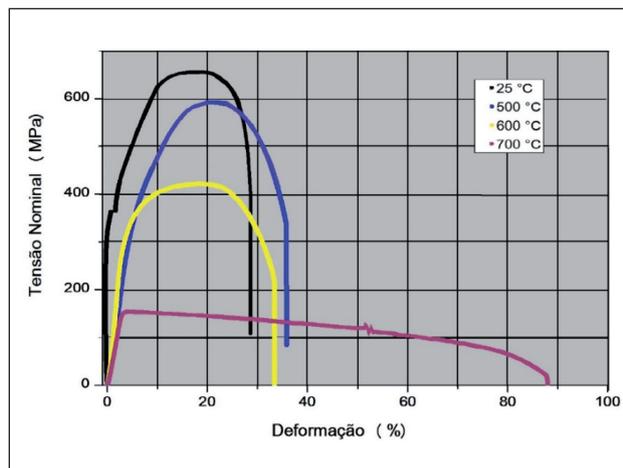
Analisando os resultados, é visto que o tratamento térmico de recozimento realizado nas amostras do aço 2,25Cr-1Mo, provocou uma redução na dureza e na microdureza se comparado com os valores da amostra na condição de partida. Na condição tratada, a dureza possui uma média de 73,6 HRB, já os resultados das medidas de dureza com microindentador avaliou-se a microdureza do grão ferrítico e perlíticos isoladamente, os valores são 216 HV e 121 HV respectivamente. A redução na dureza e dureza com microindentador já eram previsíveis, pois o recozimento total tem a finalidade de remover as tensões internas do material oriundas dos tratamentos mecânicos de deformação a frio ou a quente.

**Tabela 2:** Ensaios de dureza e dureza com microindentador para o aço 2,25Cr-1Mo Recozido.

Ensaios	Dureza (HRB)	Microdureza HV (Fase ferrítica)	Microdureza HV (Fase perlítica)
1	73,5	207	117
2	72,8	219	133
3	74,6	203	121
4	72,0	229	122
5	75,4	221	113
Desvio Padrão	1,4	10,6	7,5
Média	73,6	216	121

## Ensaio de Tração a Quente

Após o tratamento térmico de recozimento, corpos de prova do aço 2,25Cr-1Mo foram ensaiados por tração em quatro níveis de temperatura com mesma taxa de deformação. A Fig. 5 apresenta as curvas de tensão versus deformação do material na condição recozida, e ensaiada nas temperaturas de 25, 500, 600 e 700 °C com uma taxa de deformação de 0,5 mm/mim.



**Figura 5:** Curvas de ensaio com tração do aço 2,25Cr-1Mo na condição recozida.

De acordo com as análises, é possível notar que o material ensaiado à 25 °C apresenta escoamento nítido, que é indicativo do comportamento do material no estado recozido devido ao fenômeno de endurecimento por deformação (strain aging). Notou-se também o aparecimento do fenômeno de serrilhado (efeito Portevin-Le-Chatelier) na curva referente ao ensaio a 700 °C, esse efeito é atribuído ao comportamento coletivo das discordâncias móveis, o qual é influenciado pelo campo de tensões internas criados durante a deformação do corpo de prova. O mesmo fenômeno foi também observado por Dette<sup>(9)</sup> ao determinar as propriedades mecânicas do aço 2,25Cr-1MoNiNb nas temperaturas de 400 °C e 500 °C.

As curvas mostram que o material com maior nível de resistência foi a amostra ensaiada a 25 °C com 650 MPa de limite de resistência, também foi observado que o aumento da temperatura de ensaio reduz o nível de resistência do material seguido de um aumento na ductilidade, se destacando neste item a amostra ensaiada a 700 °C com deformação de 88 %.

Detle<sup>(9)</sup> também mostraram que o limite de escoamento e o limite de resistência a tração varia em função da temperatura, mantendo a taxa de deformação constante para ensaios de tração realizados no aço 2,25Cr-1MoNiNb em temperaturas que foram desde 20 °C a 530 °C com uma taxa de deformação de 0,01s<sup>-1</sup>.

A Tabela 3 mostra os resultados dos parâmetros dos ensaios de tração para o aço 2,25Cr-1Mo no estado recozido e ensaiados nas temperaturas de 25, 500, 600, e 700 °C.

Os dados mostram que o Módulo de elasticidade sofreu um decréscimo em seus valores com o aumento da temperatura, esse fato ocorre pela maior facilidade da movimentação das discordâncias em altas temperaturas, resultando em uma maior ductilidade.

Analisando os dados do comportamento do aço com relação à tensão de escoamento e limite de resistência, observa-se um decréscimo constante em seus valores com temperatura de tração principalmente nos níveis mais altos a partir de 500 °C. A amostra ensaiada a 25 °C mostrou escoamento nítido a aproximadamente 360 MPa, já a amostra ensaiada a 700 °C apresentou menor tensão de escoamento e menor limite de resistência, pois a precipitação neste caso não promoveu um endurecimento suficiente para aumentar a resistência do aço, já nas amostras ensaiadas a 500 °C e 600 °C, o endurecimento por precipitação foi mais atuante na resistência do material.

Quanto a redução da área, observa-se um aumento em seus níveis com o aumento da temperatura, sendo mais acentuado a 700 °C com praticamente 95%. Esse comportamento ocorre quando o aumento da dureza por encruamento é menor que a tensão aplicada no corpo de prova, assim o material sofre grande deformação até sua ruptura. Parker<sup>(10)</sup> em seu estudo sobre previsão de deformação e falha dos aços 0,5Cr-0,5Mo-0,25V e 2,25Cr-1Mo, também observou um comportamento semelhante no aço 2,25Cr-1Mo.

O expoente de encruamento para o aço tratado tem relação direta com a temperatura, os dados mostram que a amostra que apresentou maior grau de encruamento foi aquela ensaiada a 25 °C com  $n = 0,14$  e a menos encruada foi o material ensaiado com o maior nível de temperatura (700 °C) com  $n = 0,03$ , essas variações podem ser explicadas pelo fenômeno do Endurecimento Dinâmico por Deformação (EDD) que atua em temperaturas e velocidades de tração específicas.

No intuito de avaliar a Correlação entre os Comportamentos de Tração a Quente e Fluência do Aço 2,25Cr-1Mo na Faixa de Temperatura de 500 °C a 700 °C, Sobrinho<sup>(5)</sup>, realizou ensaios de

tração a quente do mesmo material de partida desta pesquisa e mesmos parâmetros de tração, a Fig. 6 mostra as curvas com seus resultados.

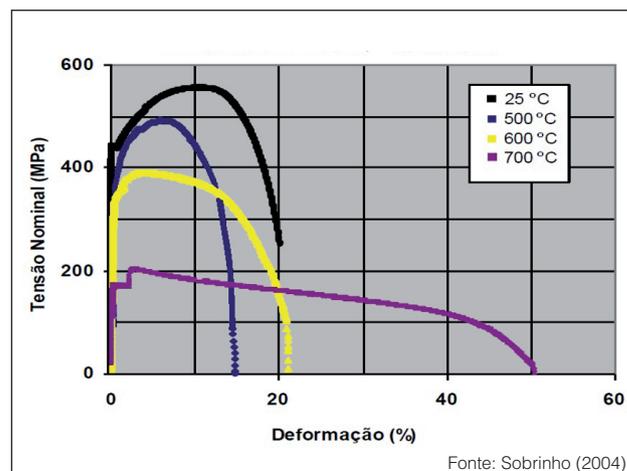


Figura 6: Curvas de ensaio com tração do aço 2,25Cr-1Mo Normalizado e Revenido.

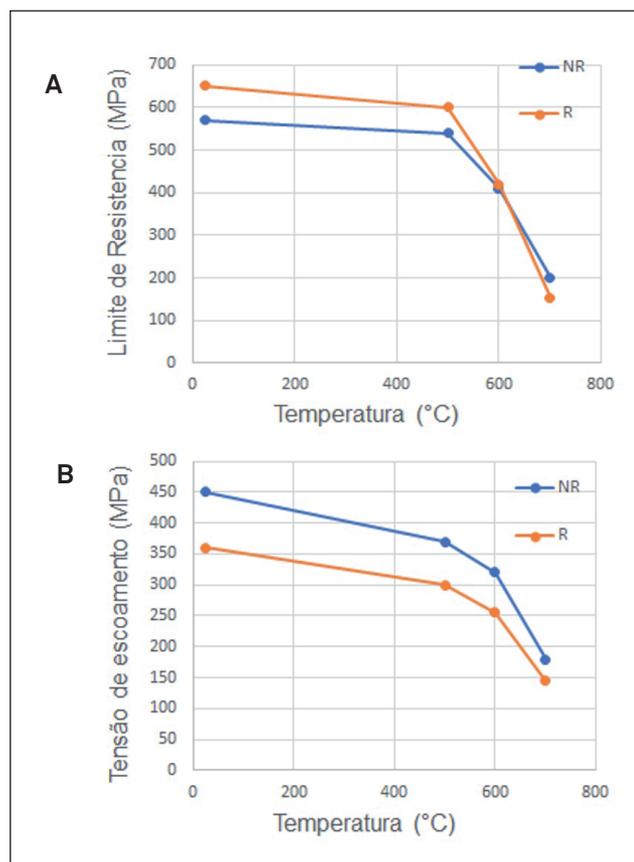
Quando se compara os resultados desta pesquisa com os dados encontrados por Sobrinho<sup>(5)</sup>, notamos que o tratamento térmico de recozimento elevou o nível de resistência a tração do material de 550 para 650 MPa na temperatura de 25 °C, de 500 para 600 MPa na temperatura de 500 °C, já quando comparados na temperatura de 600 °C se percebeu um leve aumento de 395 para 420 MPa, enquanto que na temperatura de 700 °C o material sofreu uma queda no limite de resistência de 153 para 200 MPa. Também é visto que o tratamento térmico elevou o grau de ductilidade do material em todos os patamares de temperatura investigado.

As Figs. 7a,b apresentam os resultados dos dados de tração (Limite de resistência e Tensão de escoamento) obtidos a temperatura de 25, 500, 600 e 700 °C do aço 2,25Cr-1Mo na condição recozida (R) deste trabalho comparados com os dados do mesmo material, só que na condição normalizado e revenido (NR) fornecidos pela norma ASTM – DS652(NR).

Os dados do aço 2,25Cr-1Mo na condição normalizada e revenida fornecidos pela norma ASTM – DS652(NR) mostram que o limite de resistência varia entre 200 a 575 MPa e a tensão de escoamento varia entre 180 a 450 MPa. Os dados também mostram que o material que recebeu o tratamento térmico de recozimento apresenta um limite de resistência que varia de 153 a 650 MPa e tensão de escoamento variando de 145 a 360 MPa.

Tabela 3: Resultados dos dados de tração a quente do aço 2,25Cr-1Mo recozido.

Amostra	Temperatura (°C)	Módulo elástico (MPa)	Limite de escoamento (0,25%)	Limite de resistência (MPa)	Redução de área (%)	Encruamento
A	25	220.000	360	650	68	0,14
B	500	157.732	300	600	71	0,08
C	600	11.904	255	420	76	0,05
D	700	5.714	145	153	95	0,03



**Figura 7:** Comparação dos dados de: (A) Limite de resistência; (B) Limite de escoamento do aço 2,25Cr-1Mo nas condições NR (normalizada e revenida) e R (recozida).

Comparando os dois resultados é possível notar que o aço 2,25Cr-1Mo na condição recozido, mostrou desempenho satisfatório nas temperaturas de 25 °C onde a resistência aumenta de 575 para 650 MPa e 500 °C onde limite de resistência aumenta de 540 para 600 MPa, precisamente na temperatura onde o aço é mais utilizado, não mostrando portando nenhum desempenho significativo para as temperaturas de 600 e 700 °C, isso se deve ao fato de que as amostras exibem Envelhecimento Dinâmico por Deformação (EDD) nesse patamar de temperatura.

## CONCLUSÃO

As condições utilizadas no tratamento térmico de recozimento do aço 2,25Cr-1Mo foram adequadas para transformação microestrutural do aço em ferrita e perlita com a presença de carbeto do tipo  $M_2C$ ,  $M_7C_3$  e  $M_3C$ . O tratamento elevou o tamanho de grão estimado em 45  $\mu m$ , considerado tamanho

de grão igual 6 de acordo com a norma ASTM E 112- 63. A alteração microestrutural reduziu a dureza do material para 73,6 HRB. Os resultados dos ensaios de tração comprovaram que as amostras do aço 2,25Cr-1Mo que receberam o tratamento térmico de recozimento tiveram sua resistência mecânica com níveis otimizados nas temperaturas de 25 °C e 500 °C onde são mais aplicados na indústrias de petróleo e gás, e sem desempenho perceptível quando ensaiados nas temperaturas de 600 e 700 °C.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UEMA, IFPI, UFPI, UFSCar e Refinaria de Paulínia/PETROBRÁS

## REFERÊNCIAS

- BENTO, E.A.P., Influência dos parâmetros de tratamento térmico pós soldagem nas propriedades mecânicas e microestruturais de um tubo de aço ASTM A 335. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.
- CALLISTER, Jr., W.D., Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução 9ª edição. LTC Editora, 2016, 401 pp.
- PARVATHAVARTHINI, N. et al., Studies on hydrogen permeability of 2.25Cr-1Mo ferritic steel. *Jornal off Nuclear Materials*, v. 288, n. 2-3, pp. 187-196, 2001.
- ASTM A-387, A Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Alloy Steels, Chromium - Molybdenum.
- SOBRINHO, J. F. R.. Correlação entre Comportamentos de Tração a Quente e Fluência do Aço 2,25 Cr – 1 Mo na Faixa de Temperatura de 500°C a 700°C. São Carlos: Departamento de Ciência de Materiais, UFSCar, 2004. Tese
- REED-HILL, R.E., Princípios de Metalurgia Física, Ed. Guanabara Dois, 2a. edição, 1982.
- RIGUEIRA, G.; FURTADO, H.C.; LISBOA, M.; ALMEIDA, L.H., Evolução microestrutural e alteração de dureza na bainita e na perlita em aços 2,25Cr1Mo após tratamento de envelhecimento. *Matéria (Rio J.)* vol.16 no.4 Rio de Janeiro 2011.
- SILVA, R.O., Estudo da Estudo da Fragilização pelo Hidrogênio no Aço 2,25Cr-1Mo Submetido a Tratamentos Térmicos de Envelhecimento. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.
- DETTE, M. HAHN, H. NIEUWLAND, H. C. D. TICHLER, J.W., Presentation of Properties of the Ferritic Alloy 2,25Cr-1MoNiNb for Steam Generator Application in FBR Systems. – *Nuclear Engineering and design* – 76. p. 219 – 232, 1983.
- PARKER J.D., Prediction of creep deformation and failure for 1/2Cr-1/2Mo-1/4V and 2 1/4Cr-1Mo steels. - *J. Pres. Ves. Technology*, vol.107, p.279-284, 1985.