

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TUBOS TREFILADOS EM AÇO MICROLIGADO AO VANÁDIO A PARTIR DE ROTAS DISTINTAS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS *

Gabriela Deslandes Cardoso¹
Mirelle Oliveira Spindola²
Ronaldo de Faria Antunes³

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo avaliar as propriedades mecânicas de tubos trefilados à frio em aço microligado ao Vanádio a partir de diferentes rotas de tratamento térmico, sendo elas: normalização, normalização seguida do recozimento subcrítico e apenas o recozimento subcrítico. A realização do recozimento subcrítico após a normalização propiciou resultados para o limite de escoamento superiores aos das amostras somente normalizadas. Este aumento está vinculado principalmente à precipitação de Carbonetos de Vanádio. Já para a rota em que se utilizou somente o recozimento subcrítico foram obtidos os maiores valores de limite de escoamento.

Palavras-chave: Precipitação; Vanádio; Propriedades mecânicas.

MECHANICAL PROPERTIES EVALUATION OF COLD DRAWN TUBES ON VANADIUM MICROALLOYED STEEL USING DIFFERENT HEAT TREATMENT ROUTES

Abstract

The present work aims to evaluate the mechanical properties of cold drawn seamless tubes on Vanadium microalloyed steel grade submitted to different heat treatment routes: normalizing, normalizing followed by subcritical annealing and subcritical annealing. The execution of the subcritical annealing after normalizing provided yield strength results higher than those exhibited by samples only normalized. This mechanical property increment is associated, mainly, due to Vanadium Carbides precipitation. Concerning the route that uses only subcritical annealing it was possible to achieve the highest values for yield strength.

Keywords: Precipitation; Vanadium; Mechanical properties.

¹ Engenheira Metalurgista, Engenheira de Qualidade, Superintendência de Tubos Trefilados e Forjados, Vallourec Soluções Tubulares do Brasil, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

² Engenheira Metalurgista, Engenheira Coordenadora de Qualidade, Superintendência de Tubos Trefilados e Forjados, Vallourec Soluções Tubulares do Brasil, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenheiro Mecânico, Dr. em Engenharia Mecânica, Gerente de Qualidade, Superintendência de Tubos Trefilados e Forjados, Vallourec Soluções Tubulares do Brasil, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) tem sido foco de estudo em diversos segmentos industriais, uma vez que a adição de elementos de liga com alta afinidade com o Carbono e Nitrogênio conferem alta resistência e boa tenacidade aos materiais. Kusiak [1] afirma que o ganho de propriedade mecânica nos aços ARBL está associado à composição química, distribuição de fases na microestrutura, fração volumétrica, tamanho e morfologia destas fases.

Um dos principais mecanismos de endurecimento dos aços microligados é o endurecimento por precipitação, no qual os precipitados podem ser encontrados na forma de Carbonetos, Nitretos e Carbonitretos. Estes precipitados podem ser formados em três fases distintas: na austenita (γ) (altas temperaturas), na transformação da austenita para a ferrita (resfriamento); na ferrita (α) já transformada (estrutura final).

A estrutura cristalina da austenita (CFC) apresenta maior solubilidade que a estrutura cristalina da ferrita (CCC). Assim, a precipitação na austenita ocorre preferencialmente no interior do grão devido à dissolução das partículas. Durante o resfriamento inicia-se a transformação γ/α sendo que, a matriz ferrítica pode apresentar-se supersaturada ou com precipitação nos contornos de grãos e nas deslocações, aumentando a dureza do material [2].

Estes compostos promovem o endurecimento por precipitação durante o resfriamento, uma vez que só são dissolvidos na ferrita quando em excesso. Em casos de reaquecimento, os precipitados de Vanádio auxiliam no controle do crescimento do grão austenítico até a sua temperatura de dissolução, e, durante o resfriamento, estes precipitados facilitam a nucleação da ferrita, tornando a recristalização mais rápida [2].

De acordo com Zajac [3], o Vanádio é o elemento de microliga de maior solubilidade, sendo que sua atuação no controle do crescimento de grão ocorre de duas formas. Os Carbonitretos de Vanádio possuem menor tamanho e são mais efetivos na nucleação de grãos ferríticos. Porém, os Nitretos possuem uma morfologia mais grosseira e, por isso, são mais úteis no controle de grão austenítico. Conforme ilustrado na Figura 1, a presença dos Carbonitretos precipitados na interfase da ferrita é mais vantajoso, já que estes possuem dimensões menores, funcionando como nucleadores e inibidores do crescimento de grãos menores.

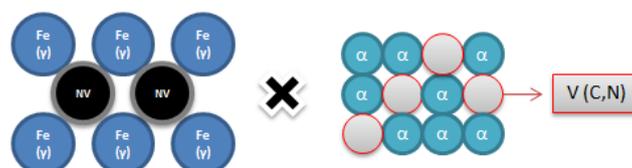


Figura 1 – Comparativo dos precipitados de Vanádio funcionando como inibidores dos grãos ferríticos e austeníticos.

Neste estudo serão avaliados os efeitos de três rotas distintas de tratamentos térmicos nas propriedades mecânicas de um aço microligado ao Vanádio.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A faixa de composição química do aço utilizado está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Faixa de composição química do aço utilizado.

Faixa de Composição Química (%p/p)						
C	Si	Mn	P	S	N	Nb+Ti+V
máx 0,25	máx 0,60	1,10 - 1,70	máx 0,03	máx 0,02	máx 0,02	máx 0,25

Após trefilação à frio, dividiu-se o material em três rotas distintas de tratamento térmico, conforme parâmetros apresentados na Figura 2.

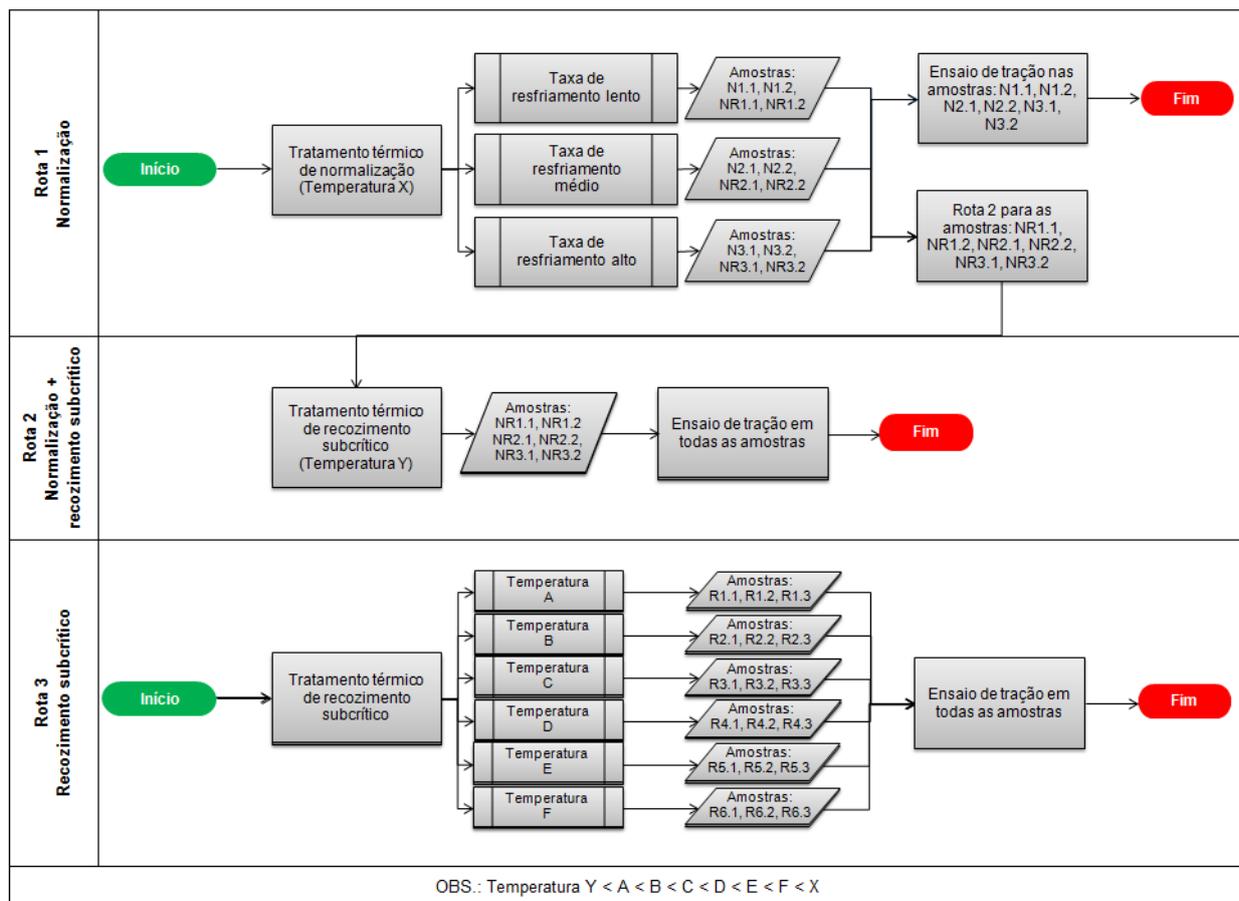


Figura 2 - Fluxograma demonstrativo dos procedimentos adotados.

3 RESULTADOS

3.1 NORMALIZAÇÃO

Após o tratamento térmico de normalização as amostras foram submetidas ao ensaio de tração longitudinal. A média dos resultados de limite de escoamento (LE), resistência à tração (RT) e alongamento (AL) estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados obtidos no ensaio de tração longitudinal – Rota 1.

Ensaio de Tração Longitudinal			
Amostra	LE (MPa)	RT (MPa)	AL (%)
N1	452	642	27
N2	396	718	22
N3	399	749	21

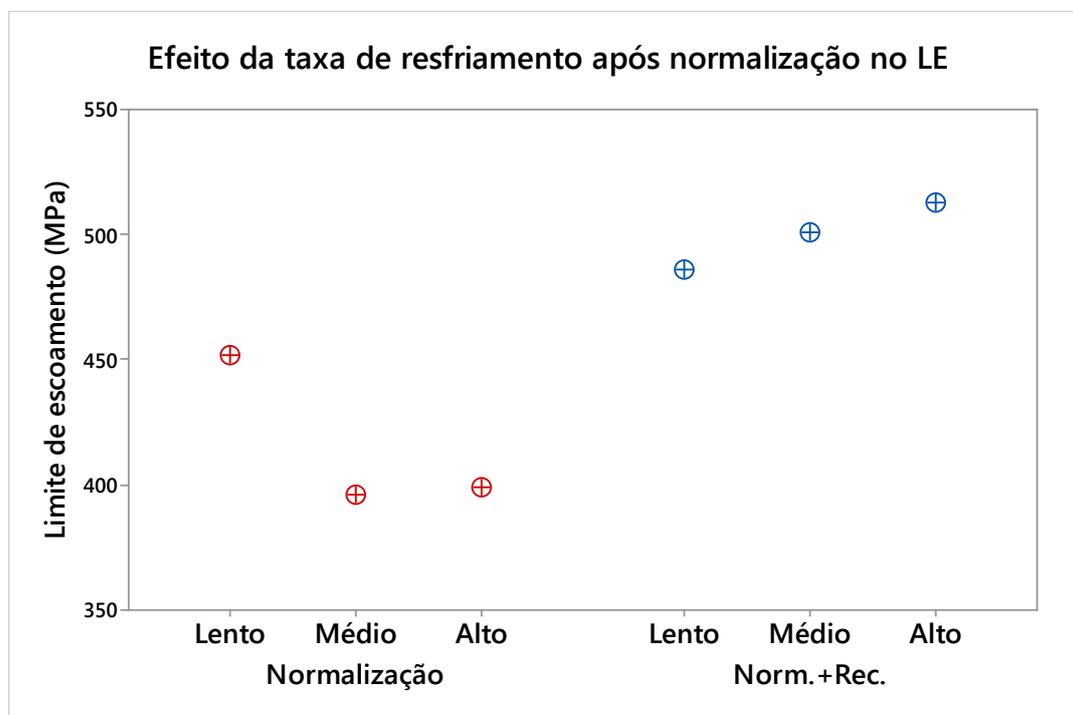
3.2 NORMALIZAÇÃO + RECOZIMENTO SUBCRÍTICO

Os resultados obtidos no ensaio de tração longitudinal estão apresentados na Tabela 3.

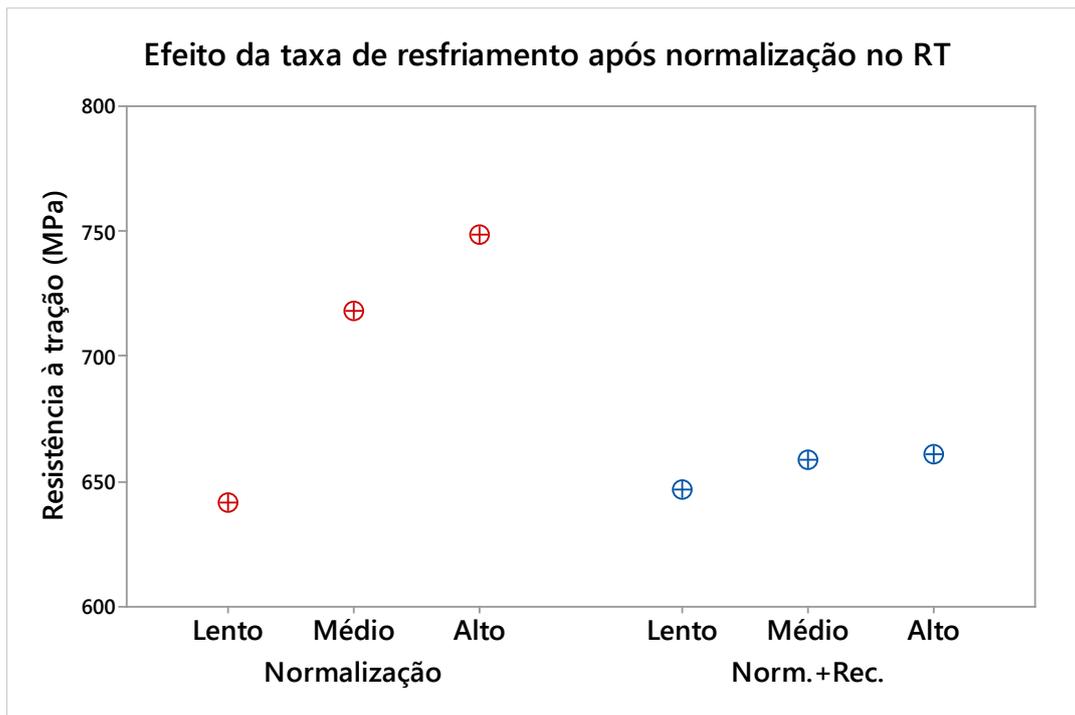
Tabela 3 – Resultados obtidos no ensaio de tração longitudinal – Rota 1 e rota 2.

Resultado Ensaio de Tração Longitudinal				Parâmetros	
Amostra	LE (MPa)	RT (MPa)	AL (%)	Tratamento	Taxa de Resf. na Normalização
N1	452	642	27	Normalização	lento
N2	396	718	22	Normalização	médio
N3	399	749	21	Normalização	alto
NR1	486	647	27	Normalização + Recozimento	lento
NR2	501	659	29	Normalização + Recozimento	médio
NR3	513	661	26	Normalização + Recozimento	alto

A Figura 3 apresenta o efeito da taxa de resfriamento no limite de escoamento e resistência à tração, antes e após o tratamento térmico de recozimento subcrítico.



(a)



(b)

Figura 3 – Efeito da taxa de resfriamento no (a) limite de escoamento e (b) resistência à tração antes e após o recozimento subcrítico.

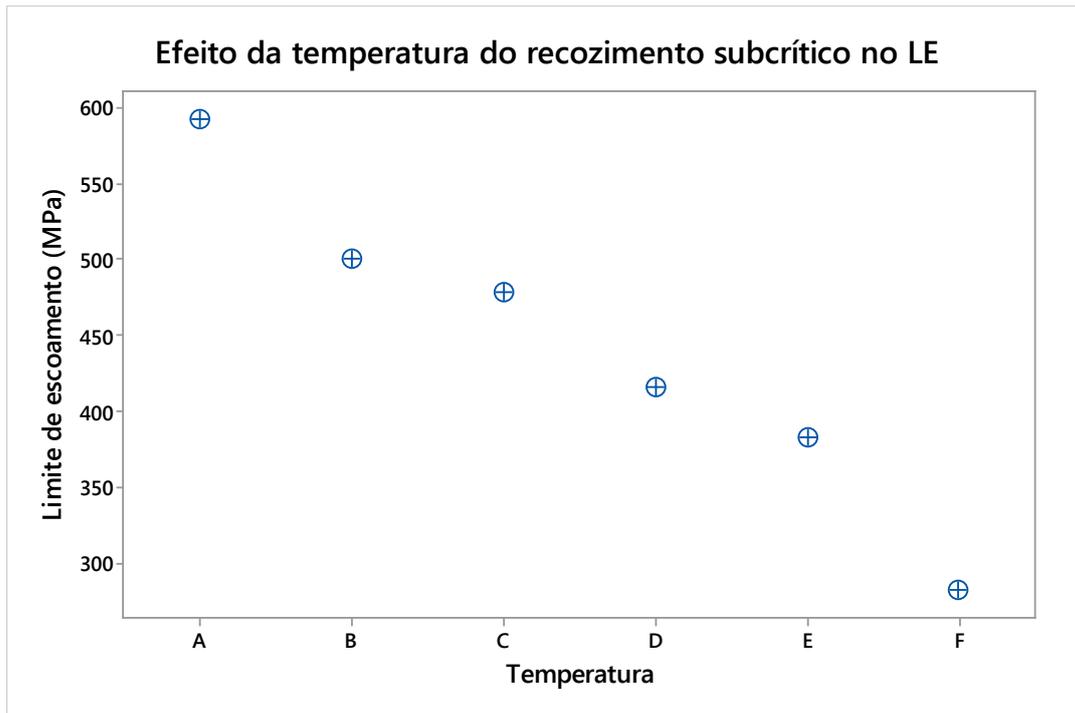
3.3 RECOZIMENTO SUBCRÍTICO

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos após o recozimento subcrítico das amostras que não passaram pelo tratamento térmico de normalização.

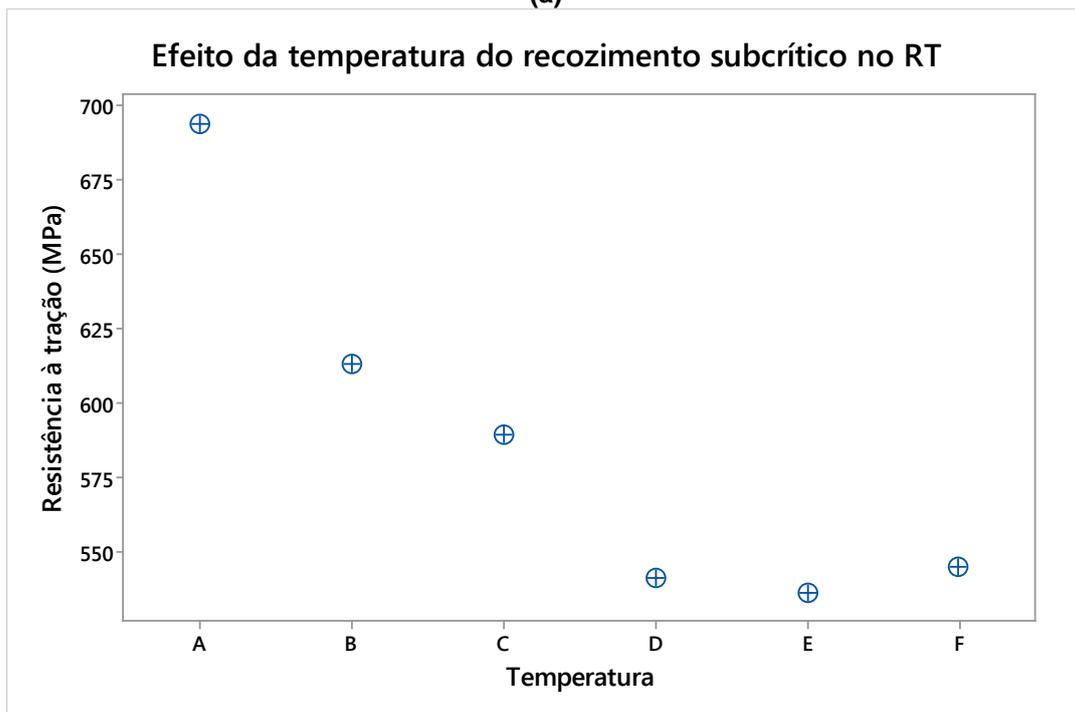
Tabela 4 - Resultados obtidos no ensaio de tração longitudinal – Rota 3.

Resultado Ensaio de Tração Longitudinal				
Amostra	LE (MPa)	RT (MPa)	AL (%)	Temperatura de recozimento
R1	592	694	19	A
R2	500	613	21	B
R3	478	589	21	C
R4	415	541	25	D
R5	383	536	25	E
R6	282	545	24	F

A Figura 4 corresponde ao gráfico com a média dos resultados de limite de escoamento versus a temperatura utilizada no tratamento térmico de recozimento subcrítico.



(a)



(b)

Figura 4 – Análise da média de resultados de limite de escoamento versus temperatura de recozimento subcrítico.

4 DISCUSSÃO

4.1 NORMALIZAÇÃO

Com base nas amostras somente normalizadas (N), observa-se que, ao contrário da resistência à tração, o maior limite de escoamento não está vinculado à maior taxa de resfriamento. As amostras N1, com taxa de resfriamento lento, apresentaram

resultados de limite de escoamento superiores aos das amostras N2 e N3, as quais foram resfriadas com taxas superiores. Este fenômeno não era esperado, visto que uma maior taxa de resfriamento proporciona um maior refino do grão e, conseqüentemente, aumento nas propriedades mecânicas do material. Em contrapartida, a menor taxa de resfriamento, termodinamicamente, possibilitou a formação de Carbonetos de Vanádio, contribuindo para o aumento do limite de escoamento.

De acordo com o mecanismo de Orowan-Ashby [4], é necessário um aumento na tensão de deformação para vencer o bloqueio da movimentação das deslocções gerado pela presença dos precipitados. Conseqüentemente, o limite de escoamento torna-se superior. Este aumento pode ser calculado pela Equação 1, em que $\Delta\sigma$ representa o ganho do LE, em MPa, f a fração volumétrica e d o diâmetro médio das partículas, em μm .

$$\Delta\sigma = 10,8 \frac{\sqrt{f}}{d} \ln(1630d) \quad (1)$$

Levando em consideração a relação inversamente proporcional entre o diâmetro das partículas (d) e o aumento da tensão ($\Delta\sigma$) da Equação 1, afirma-se que o aumento do limite de escoamento provocado pela precipitação possui maior influência da fração volumétrica do que do tamanho das partículas.

Observou-se ainda que as amostras N2 e N3, resfriadas com maiores taxas de resfriamento, obtiveram maiores valores de resistência à tração vinculadas aos menores valores de limite de escoamento. Supõe-se que nas amostras N2 e N3 houve menor formação de precipitados e, conseqüentemente, maior solubilização dos elementos na matriz ferrítica. Considerando que o elemento solubilizado não impede efetivamente a movimentação das deslocções, o escoamento é atingido com maior facilidade quando comparado ao material precipitado (N1). Porém, como há consolidação da matriz pela presença dos elementos em solução, a estricção se torna mais difícil, aumentando a resistência à tração. Assim, o Vanádio em solução sólida aumenta o coeficiente de encruamento do material, já que o menor limite de escoamento vinculado ao aumento da resistência à tração representa um intervalo grande de tensão possível de deformação plástica.

4.2 NORMALIZAÇÃO + RECOZIMENTO SUBCRÍTICO

As amostras que foram submetidas ao tratamento térmico de recozimento subcrítico após a normalização apresentaram uma tendência inversa ao observado nas amostras somente normalizadas. Houve um aumento do limite de escoamento, sendo que o maior limite de escoamento está vinculado à maior taxa de resfriamento. Já para os resultados de resistência à tração, houve uma diminuição em relação aos resultados obtidos após a normalização. Entretanto, após o recozimento subcrítico não foram encontradas diferenças significativas entre as taxas de resfriamento.

O tratamento térmico de recozimento subcrítico gerou um aumento no limite de escoamento de 34 MPa, 114 MPa e 105 MPa para as amostras NR1, NR2 e NR3, respectivamente. De modo a auxiliar no entendimento deste efeito, utilizou-se o

Software Thermo-Calc para traçar o diagrama de fases versus temperatura, conforme apresentado na Figura 5.

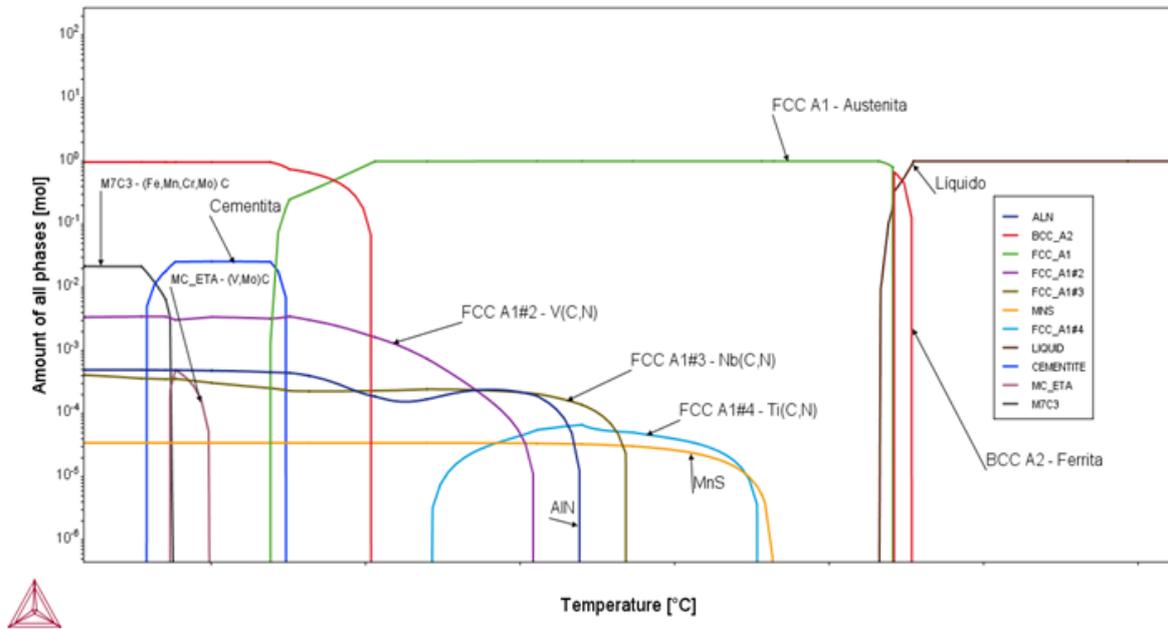


Figura 5 – Diagrama de fases do aço microligado ao Vanádio.

Com base na Figura 5, nota-se a formação de Carbonetos de Vanádio e Molibdênio, o que justifica o aumento do limite de escoamento das amostras.

O aumento do limite de escoamento nas amostras NR1 foi significativamente inferior ao observado nas amostras NR2 e NR3. Neste caso, conclui-se que como parte do Vanádio foi destinado à precipitação nas amostras N1 (amostras somente normalizadas), um menor teor deste elemento ficou solubilizado na matriz sem que esta ficasse supersaturada, resultando na formação de uma menor fração de precipitados no duplo tratamento térmico.

4.3 RECOZIMENTO SUBCRÍTICO

Comparando com as amostras normalizadas, as amostras submetidas apenas ao recozimento subcrítico (R) apresentaram valores de limite de escoamento superiores até a temperatura C.

Com base no diagrama de fase apresentado na Figura 5, nas faixas de temperatura utilizadas para o recozimento não há formação de nenhum precipitado. Assim, o aumento do limite de escoamento está vinculado, principalmente, ao encruamento do material gerado no processamento à frio anterior.

O limite de escoamento das amostras R5 e R6 foram inferiores ao verificado nas peças somente normalizadas. Como essas amostras foram tratadas em maiores temperaturas, pode-se afirmar que a baixa resistência mecânica está associada ao fato de que nesta faixa de temperatura não houve precipitação somada ao acentuado alívio de tensões das peças [5].

5 CONCLUSÃO

Este artigo teve como foco a análise das propriedades mecânicas a partir de três rotas distintas de tratamento térmico, sendo elas: normalização, normalização seguida do recozimento subcrítico e somente o recozimento subcrítico.

O maior limite de escoamento das amostras somente normalizadas foi obtido a partir da menor taxa de resfriamento. Este fato foi associado à precipitação ter sido termodinamicamente possibilitada pelo resfriamento lento.

Para todas as peças que após a normalização seguiram com o tratamento térmico de recozimento subcrítico houve aumento de limite de escoamento, sendo este mais eficaz nas amostras que foram resfriadas com maior taxa após a normalização. Já para os resultados de resistência à tração, houve uma diminuição em relação aos resultados obtidos após a normalização. Entretanto, não foram encontradas diferenças significativas entre as taxas de resfriamento.

No caso das amostras somente recozidas, o aumento de limite de escoamento só foi identificado até a temperatura C, porém, estes resultados foram associados ao encruamento gerado no processamento à frio anterior. Além disso, este aumento do limite de escoamento está vinculado à perda de alongamento percentual.

Diante dos resultados, conclui-se que a melhor rota de tratamento térmico, considerando o ganho de propriedades mecânicas, corresponde à normalização seguida do recozimento subcrítico, visto que este proporcionou melhores resultados de limite de escoamento associado a bons resultados de resistência à tração e alongamento.

REFERÊNCIAS

- 1 R. Kusiak, R. Kawalla, S. Waengler. Advanced high strength steels for automotive industry. Archives of civil and mechanical engineering. 2008; Volume (8): 103-117.
- 2 Costa M. Evolução microestrutural durante o forjamento a quente de tubos de aço microligados ao Vanádio [dissertação de mestrado]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2013.
- 3 Zajac S. Precipitation and grain refinement in Vanadium – containing steels. International Symposium. 2001: 1-20.
- 4 Gladman T. The physical metallurgy of microalloyed steels. Londres: The Institute of Materials; 1997.
- 5 Krauss G. Steels: Processing, structure, and performance. Second edition. Ohio: ASM International; 2015.