

AVALIAÇÃO DA RESITÊNCIA A CORROSÃO E MECÂNICA EM BARRAS NERVURADAS DE AÇO MICROLIGADO AO VANÁDIO COM DIFERENTES TAXAS DE RESFRIAMENTO*

Hana Livia Frota Coelho¹

Rodrigo Alves Ramos²

Walney Silva Araújo³

Resumo

Durante a laminação a quente a superfície de aço é exposta ao ar e água, sendo esta última utilizada para controlar a temperatura dos rolos e/ou a taxa de refrigeração do aço. Esta exposição leva à formação de uma camada de óxido na superfície das barras, que pode facilitar ou dificultar a corrosão, servindo como uma barreira ou como um caminho para íons presentes na atmosfera e, além disso, causar modificações nas propriedades mecânicas. O objetivo do presente estudo é avaliar o efeito do processo de resfriamento após laminação a quente sobre o desempenho de vergalhões de aço microligado frente a propriedades mecânicas e a formação da camada de óxidos. Os vergalhões produzidos com diferentes métodos de resfriamento tiveram análise de microestrutura, tração, microdureza, dobramento, espessura da carepa formada, análise de corrosão e foram expostos à atmosfera. O progresso da corrosão foi avaliado pela observação visual do produto de corrosão formado sobre a superfície das barras. A morfologia da camada de óxido após o processo de laminação foi estudada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As amostras que tiveram uma taxa de resfriamento maior, 63%P e 100%P, tiveram também um aumento nas propriedades mecânicas. A amostra 100%P foi a que obteve melhor comportamento frente ao ensaio de corrosão. Além disso, verificou-se que a camada de óxido inicial nas barras de aço, que são relacionados com o processo de fabricação, possuíam aderência diferente ao vergalhão, sendo a melhor condição observada nas amostras 63%P e 100%P.

Palavras-chave: Vergalhão; Tratamento térmico; Camada de óxido.

EVALUATION OF CORROSION AND MECHANICAL RESISTANCE IN VANADIUM MICROALLOYED STEEL BARS WITH DIFFERENT COOLING RATES

Abstract

During hot rolling the steel surface is exposed to air and water, the latter is used to control the temperature of the rollers and/or the cooling rate of the steel. This exposure leads to the formation of a layer of oxide on the surface of the bars, this exposure leads to the formation of a layer of oxide on the surface of the bars, which may facilitate or prevent the corrosion, this may act as a barrier or as a pathway for ions present in the atmosphere and, in addition, cause modifications in the mechanical properties. The presente work is based on the evaluation of the effect of the cooling process after hot rolling in the mechanical properties and the formation of the oxide layer in microalloyed steel rebars. The rebars had the following investigations: microstructure analysis, tensile test, microhardness test, folding test, thickness measurement of the oxides scale formed, corrosion analysis and exposure to the atmosphere. The progress of corrosion was evaluated by visual observation of the corrosion product formed on the surface of the bars. The morphology of the oxide layer after the hot rolling was studied by scanning electron microscopy (SEM). The samples with a higher cooling rate, 63% P and 100% P, also had an increase in the mechanical properties. The sample 100% P was the one that obtained the best behavior in the corrosion test. In addition, it was verified that the initial oxide layer in the steel bars, which are associated to the manufacturing process, had different adherence to the rebar, the samples 63%P and 100%P had the best condition.

Keywords: Rebar; Heat treatment; Oxide layer.

* Contribuição técnica ao 72º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 17º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 06 de outubro de 2017, São Paulo, SP, Brasil.

- ¹ *Graduanda em engenharia metalúrgica, Departamento de Engenharia metalúrgica e de materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil.*
- ² *Engenheiro Metalúrgico, Bacharel, Mestrando, Departamento de Engenharia metalúrgica e de materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil.*
- ³ *Engenheiro Químico, Doutor, Professor, Departamento de Engenharia metalúrgica e de materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

A utilização de concreto armado é realizada há muitos anos na indústria da construção civil e é de extrema importância para garantir a resistência mecânica das estruturas. O uso do vergalhão que garante boa resistência à tração e boa ductilidade e do concreto que garante excelente resistência à compressão é responsável pelo desenvolvimento das grandes construções e soluções de engenharia na indústria da construção civil.

A produção de vergalhões é realizada em sua grande maioria pelo processo de laminação à quente. Suas propriedades mecânicas são garantidas ou pela composição química ou por processos de tratamento térmico ou endurecimento por deformação.

Quando as propriedades mecânicas são atingidas por composição química o método de endurecimento é realizado basicamente por precipitação e refinamento de grão. Quando as propriedades mecânicas são atingidas por tratamento térmico, as barras sofrem um tratamento de têmpera e subsequente revenimento, que gera, primeiramente, a mudança de fase com a têmpera e diminuição das tensões internas com o revenimento.

O processo de tratamento térmico, presumivelmente, leva à formação de uma fina camada protetora sobre as barras de aço. Esta camada superficial é uniformemente espalhada por todo o comprimento das barras de aço e é bem aderente à superfície, ao contrário da camada de óxido solta que é formada em vergalhões refrigerados ao ar (1).

A degradação dos vergalhões, ou barras de reforço como podem ser também chamados, devido à corrosão é de grande preocupação com a durabilidade das estruturas e implicam em perdas econômicas graves (2). Esta camada formada durante a fabricação das barras pode facilitar ou dificultar a corrosão, servindo como uma barreira ou como um caminho para íons presentes na atmosfera. Durante a laminação a quente a superfície de aço é exposta ao ar e água, sendo esta última utilizada para controlar a temperatura dos rolos e/ou a taxa de refrigeração do aço. Esta exposição leva à formação de uma camada de óxido na superfície das barras. Dependendo do método de produção, o filme de superfície de óxido apresenta composição, espessura e aderência ao substrato de metal diferente. No caso de aços termomecânicamente reforçados (comumente conhecidos como os sistemas comerciais Thermex, Tempcore e QTB), o rápido resfriamento com água e o ciclo subsequente de auto-revenimento da barra, contribui à formação de um material de proteção fino e bem aderente sobre a superfície, que é útil para melhorar resistência a corrosão das barras de aço (1). Os óxidos de ferro atuam como uma camada protetora retardando a corrosão adicional do processo (3).

No aço carbono, a escala terciária formada a altas temperaturas geralmente consiste em três fases de óxido de ferro, a wüstita interna (FeO), a magnetita (Fe_3O_4) e a camada externa hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$). A espessura destas três fases será diferente com as alterações das condições de oxidação, composições de aço e acabamento superficial.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Após o último passe processo de laminação quente o vergalhão já apresenta sua forma final com temperatura média de 840°C . Na zona final são utilizadas 3 condições, estas são descritas abaixo:

a) Resfriamento ao ar: após o último passe de laminação, os vergalhões seguiram para o leito, onde sofreram o resfriamento ao ar até a temperatura ambiente;

b) Resfriamento com água (Pressão de 63%): após o último passe de laminação, os vergalhões passaram por um resfriamento que utiliza uma tubulação com água sobre pressão que tem a capacidade de reduzir a temperatura do vergalhão após a saída da laminação a quente. A pressão da água que foi utilizada nessa condição representa, aproximadamente, 63% da capacidade do equipamento instalado;

c) Resfriamento com água (Pressão de 100%): A pressão que foi utilizada nessa condição representa, aproximadamente, 100% da capacidade do equipamento instalado;

Tabela 1. Descrição das amostras

Tratamento térmico realizado	Descrição da amostra
Resfriamento ao ar	RA
Com 63% da Pressão de água	63%P
Com 100% da Pressão de água	100%P

Fonte: Autor.

2.1 Caracterização Microestrutural

Para a revelação da microestrutura foi realizado ataque na superfície polida com reagente Nital 2%. Para a revelação da camada de óxido foi realizado ataque na superfície polida com ácido clorídrico diluído em álcool com concentração de 1%. A aquisição de imagens das microestruturas foi feita com auxílio de um microscópio óptico Zeiss acoplado a uma câmera digital e um sistema de aquisição de imagens por computador. As macroestruturas foram obtidas com auxílio de um estereoscópio Zeiss acoplado a uma câmera digital e um sistema de aquisição de imagens por computador.

2.2 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram conduzidos à temperatura ambiente em uma máquina de ensaios com capacidade de aplicação de carga de 100000 kgf. Amostras foram retiradas de vergalhões após o processo de laminação à quente e resfriamento. Os testes foram realizados em todas as três condições de tratamento, sendo ensaiados quatro corpos de prova para cada condição.

2.3 Dobramento

Os ensaios de dobramento foram realizados em amostras de 1 m de vergalhão em uma máquina de dobramento elétrica. Aplicou-se dobramento no material com suas extremidades livres e se utilizou um pino de diâmetro igual a uma vez e meia o diâmetro nominal do vergalhão.

2.4 Microdureza

As microdurezas vickers foram medidas no microdurômetro Shimadzu do Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Federal do Ceará de

acordo com a norma ASTM E 384. Foi feito um perfil de microdureza nas amostras, com 16 endentações em cada, seguindo de uma extremidade a outra da secção transversal do vergalhão. A carga de endentação foi de 2,942 N, 0,3 HV, com 15 segundos de aplicação.

2.5 Ensaio acelerado de corrosão atmosférica

Foi realizado um ensaio de corrosão atmosférica a partir de uma adaptação da norma ISO 11474. O ensaio deste trabalho foi realizado com amostras de 10 cm dos vergalhões nas três condições de resfriamento, sendo utilizadas três amostras para cada condição. Foi construído um aparato com inclinação de 45° para serem colocadas as amostras e duas vezes por semana foi borrifada uma solução de 1% NaCl.

2.6 Ensaio eletroquímico

As amostras preparadas foram utilizadas em uma célula eletroquímica composta pelo eletrodo de trabalho (amostra), pelo eletrodo de referência de Ag/AgCl e pelo contra eletrodo de platina. A solução eletrolítica utilizada foi NaCl 1%*m/v*. Durante este procedimento foi obtida a curva de estabilização do E_{corr} de cada condição em função do tempo, em seguida o ensaio foi iniciado, ou seja, a aplicação de sobretensões em relação ao E_{corr} , neste caso no sentido anódico, com taxa de varredura de 1mV/s, varredura esta interrompida quando a corrente atingiu o valor de 1mA. Os ensaios de espectroscopia de impedância eletroquímica foram realizados com tempo de imersão no eletrólito de 1 hora. A faixa de frequências utilizadas foi de 40 KHz a 6MHz, com aquisição de 7 pontos por década de medição, aplicando-se tensão com amplitude de 10 mV. Para a realização dos ensaios eletroquímicos, foi utilizado o potenciostato da marca Metrohm®, modelo PGSTAT302N, acoplado ao computador dotado do software Nova® v.1.11 para registro dos dados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização Microestrutural e Macroestrutural

3.1.1 Caracterização microestrutural e macroestrutural do aço

A seguir são apresentadas microestruturas de seções longitudinais do vergalhão produzido com o aço ao carbono microligado ao vanádio após etapa de laminação.

A Figura 1(B e C) mostra a microestrutura longitudinal do vergalhão em microscópio óptico, com ampliações de 500x da área do centro e da borda. É possível visualizar que a estrutura é constituída por ferrita alotromórfica devido e sua localização a partir dos contornos de grão de perlita e a temperatura de início de formação ter sido em torno de 820°C, abaixo da linha Ac3 do diagrama CCT do aço microligado ao vanádio com composição similar a estudada neste trabalho (4).

A elevada solubilidade do vanádio na austenita colabora para que carbonetos e nitretos de vanádio se formem durante o resfriamento do produto, no momento da transformação da austenita para ferrita. Estes precipitados, ao agirem como barreiras físicas para o movimento de discordâncias e elevam as propriedades mecânicas do material, sendo este o mecanismo de endurecimento por precipitação.

O vanádio não retarda o processo de recuperação e recristalização da austenita em cada passe de laminação pela sua alta solubilidade, durante o processo produtivo do vergalhão e a precipitação do vanádio em carbonetos e nitretos durante a laminação favorece o refino de grão ferrítico.

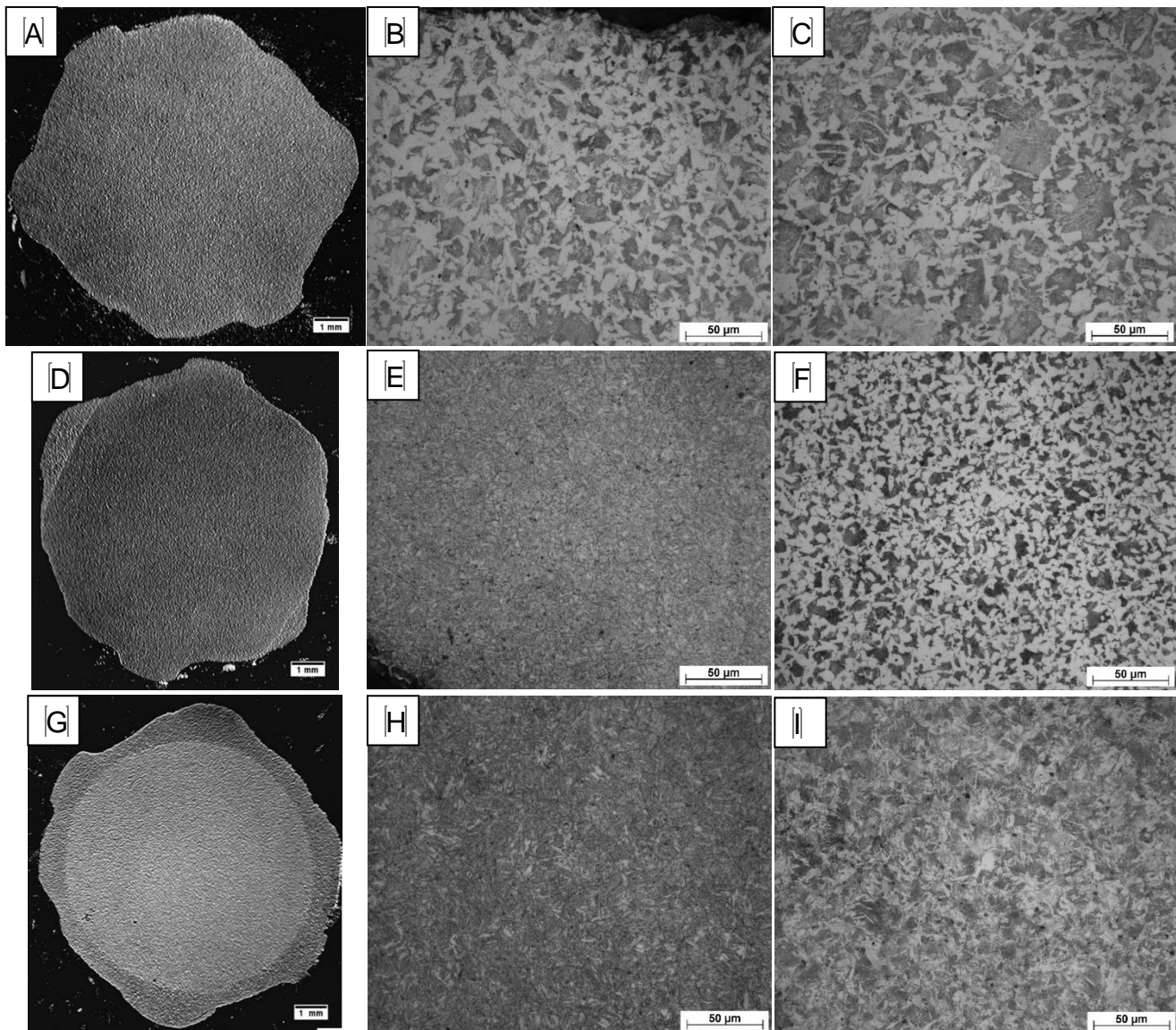


Figura 1. Microestrutura da seção longitudinal da amostra RA, A- Área da borda com aumento de 200x, B- Área da borda com aumento de 500x, D- Área do centro com aumento de 200x, E- Área do centro com aumento de 500x. C- Macroestrutura da seção longitudinal do aço com magnificação de 10x. Ataque: Nital 2%.

A Figura 1(D) ilustra a macrografia da seção transversal da amostra 63%P, onde é possível observar a formação de uma camada irregular tratada termicamente. Isto provavelmente foi causado pela pressão da água que foi utilizada durante o resfriamento, sendo insuficiente para gerar um resfriamento uniforme na camada superior da seção transversal do vergalhão. A microestrutura formada na região central da amostra 63%P, concluindo a partir de comparação com a literatura (5), é formada por ferrita poligonal, devido as características observadas na imagem e a temperatura de início de transformação de 660°C, e perlita altamente refinada. A região na borda afetada pelo tratamento térmico, segundo o diagrama CCT (4), é

constituída por bainita, pois é resfriada rapidamente a cerca de 460°C e depois resfriada até a temperatura ambiente ao ar.

A Figura 1(H e I) mostra as micrografias da secção lateral da amostra 100%P. A camada tratada termicamente é facilmente observada na macrografia representada na Figura 1 (G). Segundo o diagrama da Figura 2 e outras comparações com a literatura (5) é possível concluir que a camada tratada termicamente é composta majoritariamente por martensita e a parte central, que também foi afetada pelo tratamento térmico, é formada por bainita e ferrita.

3.1.2 Caracterização microestrutural da camada de óxido

Após o processo de laminação a quente as amostras foram analisadas por microscopia ótica e eletrônica para se obter um aumento maior devido a difícil visualização da camada de óxido. Como já indicado em diversos trabalhos (6,7,8) a espessura da camada de óxido aumenta com o aumento da temperatura de formação da camada, na Tabela 2 é possível observar o tamanho médio da carepa formada nas três diferentes condições de resfriamento.

Tabela 2. Espessura média da carepa formada após laminação a quente do vergalhão em todas as condições ensaiadas

Amostra	Espessura média da carepa (μm)
RA	24,4
63%P	16,4
100%P	12,7

Fonte: Autor.

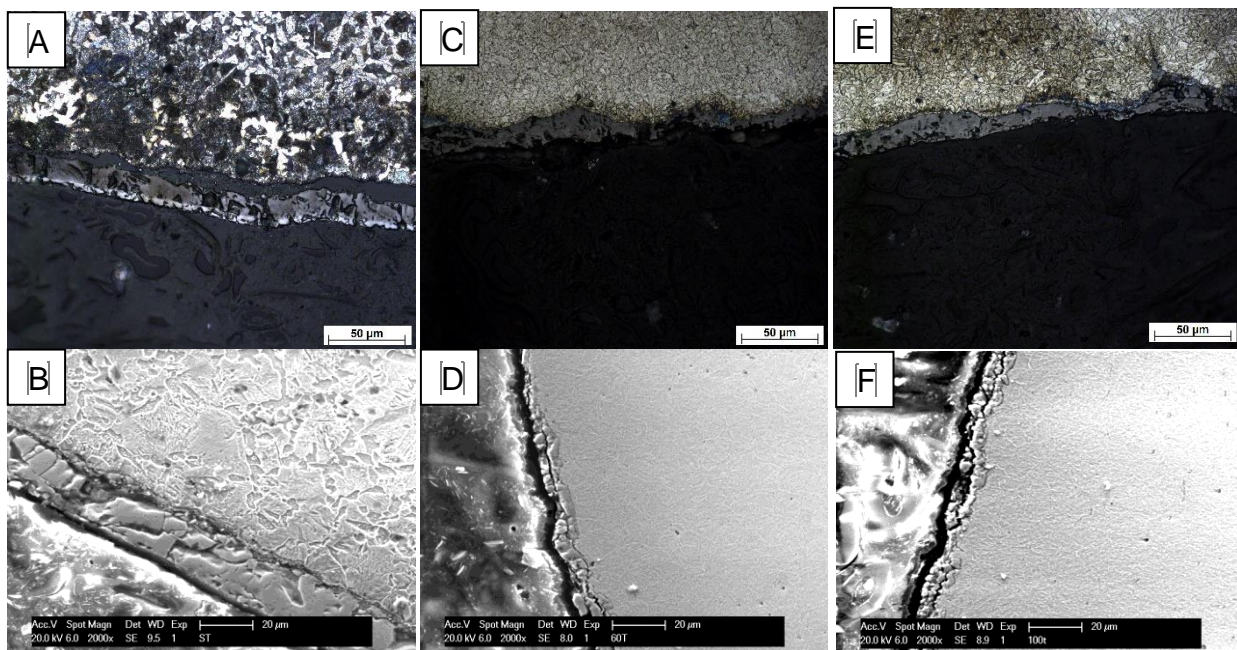


Figura 2. (A) Microscopia óptica da camada de óxido da Amostra RA com aumento de 500x e ataque com HCl 1%, (B) Microscopia eletrônica da camada de óxido da Amostra RA com aumento de 2000x; C - Microscopia óptica da camada de óxido da Amostra 63%P com aumento de 500x e ataque com HCl 1%, (D) Microscopia eletrônica da camada de óxido da Amostra 63%P com aumento de 2000x e ataque com HCl 1%, (E) Microscopia óptica da camada de óxido da Amostra 100%P com aumento de 500x e ataque com HCl 1%, (F) Microscopia eletrônica da camada de óxido da Amostra 100%T com aumento de 2000x e ataque com HCl 1%. Fonte: Autor.

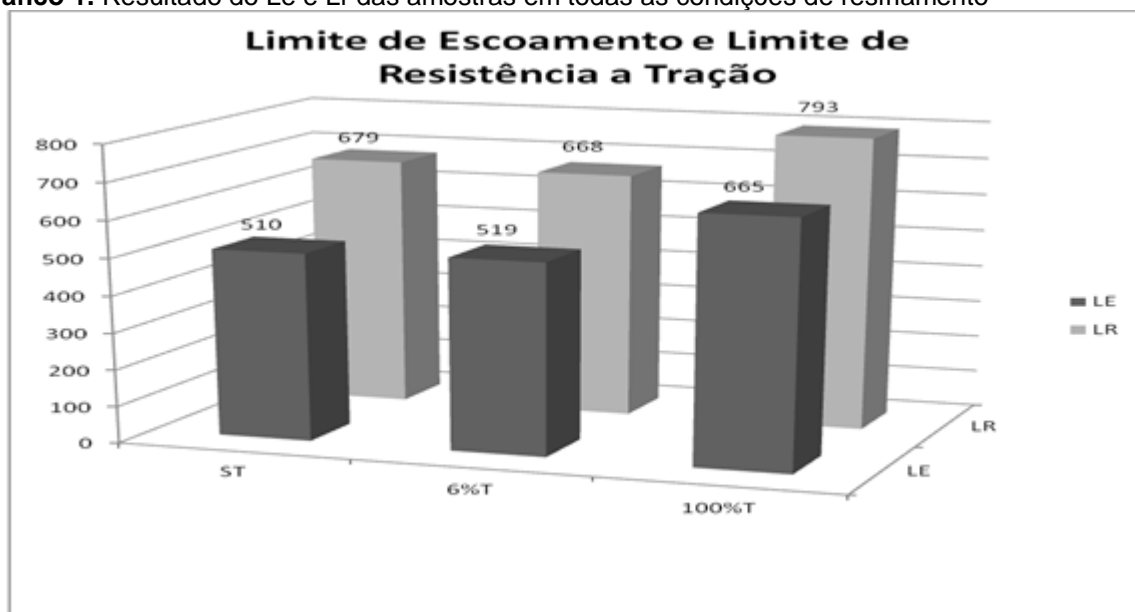
Devido a não uniformidade na secção lateral dos vergalhões houve certa dificuldade com a preparação das amostras para a análise da camada de óxido. Além de os óxidos sofrerem, facilmente, arrancamento durante o processo de preparação das amostras é interessante salientar que as amostras foram produzidas em uma planta industrial e o fato de passarem por esteiras até que as amostras pudessem ser recolhidas pode ter causado certos danos a camada a ser analisada.

3.2 Ensaio de tração

O limite de escoamento é a propriedade que determina a máxima resistência para que o material não deforme plasticamente em serviço. O vergalhão em uma estrutura de concreto deve possuir resistência adequada para suportar as cargas as quais será submetido.

O Gráfico 1 apresenta o valor médio de limite de escoamento (Le) e o limite de resistência a tração encontrado (Lr) para todas as condições ensaiadas.

Gráfico 1. Resultado do Le e Lr das amostras em todas as condições de resfriamento



Fonte: Autor.

É possível observar que o impacto que a maior taxa de resfriamento ao material fornece é o aumento do seu Le e Lr, decorrente de uma modificação de fase na estrutura.

3.3 Ensaio de dobramento

Figura 2. Amostras



* Contribuição técnica ao 72º Congresso Anual da ABM e ao 17º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia de Minas, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 04 de outubro de 2017.

al e ao 17º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia de Minas, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 04 de outubro de 2017.

dobradas, (A) Amostra RA, (B) Amostra 63%P, (C) Amostra 100%P. Fonte: Autor.

A Figura 2 apresenta o resultado dos ensaios de dobramento de 180° realizados em amostras do vergalhão produzido com aço microligado ao vanádio. Em todas as condições de resfriamento as amostras ensaiadas por dobramento, não apresentaram qualquer tipo de fissura, trinca ou quebra em sua superfície, na região tracionada quando observadas a olho nu.

O processo de tratamento térmico presumivelmente leva à formação de uma fina camada protetora sobre as barras de aço. Esta camada superficial é uniformemente espalhada por todo o comprimento das barras de aço e é bem aderente à superfície, ao contrário da camada de óxido solta que é formada em vergalhões refrigerados ao ar (9). O ensaio de dobramento também confirmou que os óxidos formados na amostra ST são menos aderentes (mais quebradiços) ao aço, como pode ser visto na Figura 3.

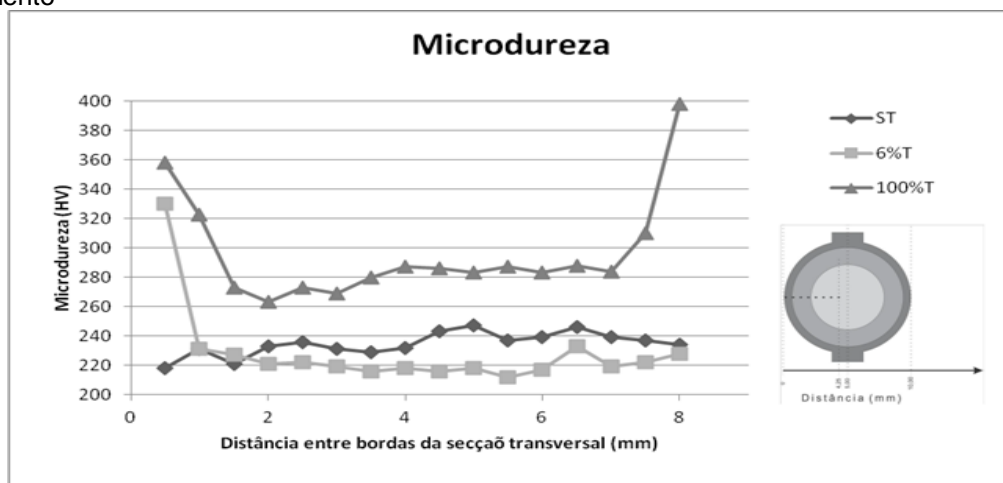


Figura 3. Amostras dobradas, (A) Amostra RA, (B) Amostra 63%P, (C) Amostra 100%P. Fonte: Autor.

3.4 Ensaio de microdureza

No Gráfico 2 são apresentadas as microdurezas Vickers encontradas no perfil da secção transversal nas amostras em cada uma das condições estudadas.

Gráfico 2. Perfil de microdureza na secção transversal das amostras nas três condições de resfriamento



Fonte: Autor.

É possível observar na amostra RA, que foi resfriada ao ar, que o perfil de microdureza se mostrou constante em toda a secção transversal, certamente devido à baixa taxa de resfriamento que levou a formação de uma microestrutura uniforme. Na condição de 63%P é possível observar na Figura 1 (D, E e F) que a microestrutura formada nesta condição de resfriamento não foi uniforme, gerando

regiões da borda com uma microestrutura diferente da central, o que explica a variação irregular de microdureza na amostra nesta condição. No caso da amostra 100%P é fácil observar na Figura 1 (G, H I) uma uniformidade da camada tratada termicamente e uma conseqüente variação da microdureza na borda do vergalhão. O perfil de microdureza das amostras confirma a formação de fases com uma dureza mais elevada na borda devido o tratamento térmico.

3.5 Ensaio acelerado de corrosão atmosférica

No ensaio as amostras foram expostas por 3 meses, com o objetivo de verificar quais das amostras ensaiadas tem mais susceptibilidade a corrosão atmosférica. O ensaio demonstrou que as amostras se comportavam, visualmente, de maneira semelhante para a solução de 1%NaCl. A figura 4 mostra o aspecto das amostras após o período de exposição.

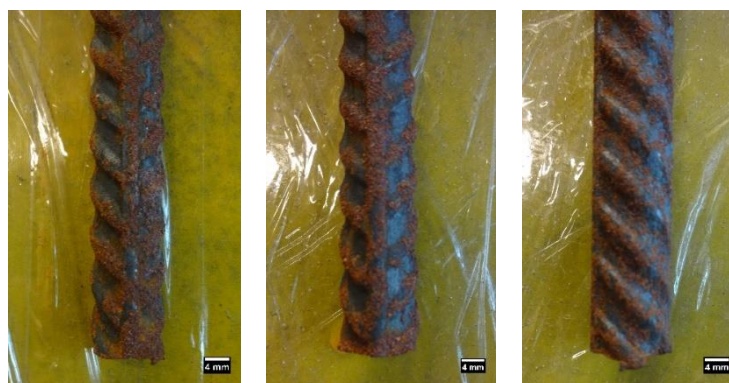


Figura 4. Amostras após ensaio de corrosão atmosférica, (A) Amostra RA, (B) Amostra 63%P, (C) Amostra 100%P. Fonte: Autor.

5.7 Ensaio eletrolítico

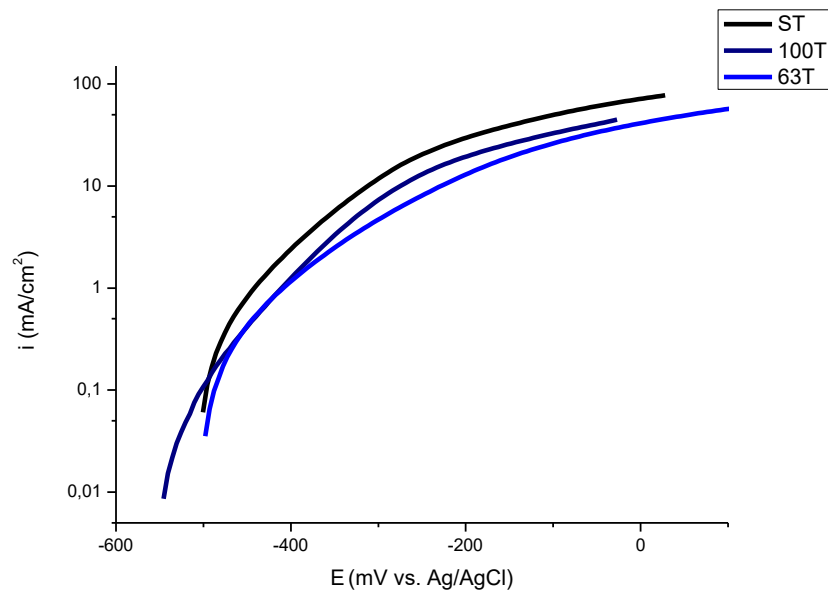
Todo o trecho anódico da curva de polarização representa a faixa de potencial na qual pode ocorrer a dissolução anódica (corrosão) do metal ou reações de interface metal / solução, podendo haver oxidação de compostos da solução utilizada. Na região anódica ativa a densidade de corrente cresce com o aumento de potencial,

a dissolução (corrosão) do metal. A curva de polarização comparativa de anódica entre as amostras obtidas pelos processos, apresentada no Gráfico 3, mostrou que o potencial de (E_{corr}) para as amostras que foram resfriadas com água foi menor e que não houve região característica de passivação em nenhum dos casos.



caracterizando a dissolução anódica do metal. A curva de polarização comparativa de anódica entre as amostras obtidas pelos processos, apresentada no Gráfico 3, mostrou que o potencial de (E_{corr}) para as amostras que foram resfriadas com água foi menor e que não houve região característica de passivação em nenhum dos casos.

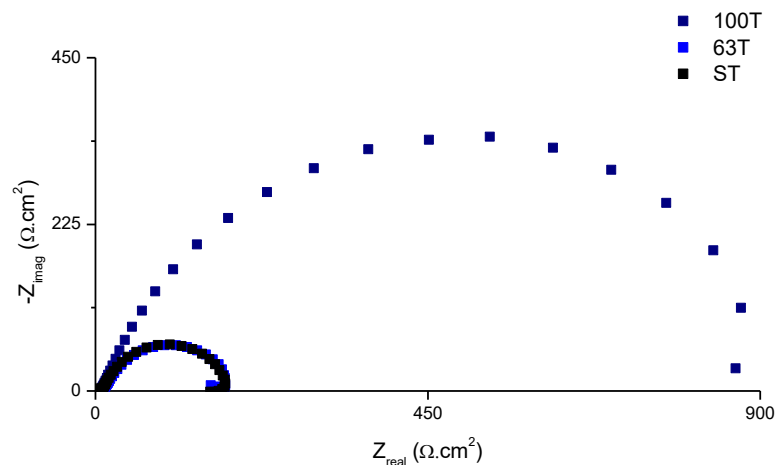
Gráfico 3. Curvas de polarização anódicas das amostras nas diferentes condições de resfriamento



Fonte: Autor.

Os resultados dos ensaios de espectroscopia de impedância eletroquímica estão descritos no Gráfico 4, que representam os diagramas de Nyquist, a amostra 100%P possui único semi-círculo capacitivo, o que significa que o processo corrosivo é controlado principalmente por transferência de carga (10).

Gráfico 4. Diagrama de Nyquist das amostras nas diferentes condições de resfriamento



Fonte: Autor

Comparando as amostras nas três diferentes condições de resfriamento observou-se que os diâmetros dos semi-círculos da amostra 100%P são maiores que das amostras nas outras condições, o que significa que a resistência à corrosão da amostra 100%P é maior do que das amostras 63%P e RA.

A borda do vergalhão foi o local da superfície onde foram realizados os ensaios de corrosão. A condição 100%P possui martensita na região da borda, a condição 63%P não possui microestrutura uniforme na borda não sendo possível confirmar qual microestrutura estava presente na superfície do ensaio, mas como se aproximou do resultado obtido na condição RA podemos supor que tem microestrutura semelhante, a amostra na condição RA é constituída por ferrita e perlita na borda.

Em (11) relata-se que a ferrita é menos nobre que a martensita, e que a taxa de dissolução anódica é maior para menores frações de ferrita (menor área anódica). Um dos motivos é que o aparecimento da ferrita força maiores quantidades de elementos de liga na martensita, tornando-a mais nobre. Isso aumenta o potencial entre a ferrita e a martensita ainda mais, aumentando a efeito galvânico e assim contribuindo para uma taxa de corrosão mais alta.

Os resultados de polarização linear não se aproximaram dos resultados obtidos por espectroscopia de impedância eletroquímica. Tal fato pode ser explicado por se tratar de técnicas diferentes. A polarização linear usa corrente contínua e não alternada e é um ensaio menos sensível que a impedância em diferenciar as resistências envolvidas no processo de corrosão.

4 CONCLUSÃO

- O tratamento térmico provocou uma transformação microestrutural nas amostras 63%P e 100%P.
- A variação microestrutural nas amostras 63%P e 100%P provocou um aumento nas propriedades mecânicas, que pode ser confirmado por ensaio de tração e microdureza.
- A camada de óxido formada após a laminação a quente é mais fina e mais aderente quando a taxa de resfriamento do material é maior.
- A transformação microestrutural causada após o tratamento térmico favoreceu o aumento da resistência a corrosão em meio salino do aço microligado ao vanádio.

REFERÊNCIAS

- 1 MASLEHUDDIN, M.; AL-ZHRANI, M.; AL-DULAIJAN, S.; ABDULQUDDUS, R. S.; AHSAN, S. N. Effect of steel manufacturing process and atmospheric corrosion on the corrosion-resistance of steel bars in concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2002, v.24, p. 151–8.
- 2 ALMUSALLAM, A. A. Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars. 2001, *Constr Build Mater*. v.15, p. 361–8.
- 3 SEI, J. O.; COOK, D. C.; TOWNSEND, H. E. Atmospheric corrosion of different steels in marine, rural and industrial environments. *Corrosion Science*. 1999, v.41, p. 1687–702.
- 4 Atlas of continuous cooling transformation diagrams for vanadium steels, vanitec, england, june 1985
- 5 D. Rasouli, Sh. Khameneh Asl*, A. Akbarzadeh, G.H. Daneshi Effect of cooling rate on the microstructure and mechanical properties of microalloyed forging steel; *journal of materials processing technology* (2 0 0 8) v.2 0 6. p. 92–98.

- 6 BIROSCA, S.; DINGLEY, D.; HIGGINSON, R. L. Microstructural and microtextural characterization of oxide scale on steel using electron backscatter diffraction. *Journal of Microscopy*. 2004, v. 213. p. 235-40.
- 7 BIROSCA, S.; WEST, G. D.; HIGGINSON, R. L. Microstructural investigation of the oxide scale on low carbon steel. IPTME: Institute of Polymer Technology and Materials Engineering, Loughborough University, Loughborough, Leicestershire LE11 3TU, UK. 2005. p. 24-26.
- 8 CHEN, Y. Y.; TZENG, H. J.; WEI, L. I.; WANG, L. H.; OUNG, J. C.; SHIH, H.C.; Corrosion resistance and mechanical properties of low-alloy steels under atmospheric conditions. *Corrosion Science*, 2005, v. 4, p. 1001–1021.
- 9 MASLEHUDDIN, M.; AL-ZAHRANI, M.; AL-DULAIJAN, S.; ABDULQUDDUS, R. S.; AHSAN, S. N. Effect of steel manufacturing process and atmospheric corrosion on the corrosion-resistance of steel bars in concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2002, v.24, p. 151–8.
- 10 Apostila Introdução a análise de sistemas eletroquímicos no domínio da frequência, Leonardo Morais da Silva, UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI, 3ªEd, 2013.
- 11 REMMERSWAAL, T. “The influence of microstructure on the corrosion behaviour of ferritic-martensitic steel”, 93 f. Thesis of Master Degree of Science, Delft University Of Technology, Delft, 2015.