



Nome: Alexandre Anami Hubner de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Mei

Coorientador: Dr. Andrei Bavaresco Rezende, Fernanda de Melo Fernandes.

Efeito da adição de nióbio e molibdênio em aços com 0,7%C utilizados para a fabricação de rodas ferroviárias pela indústria nacional.

Resumo

No Brasil, a rede ferroviária possui a maior parte destinada ao transporte de cargas. A busca por materiais que exprimem melhores propriedades mecânicas para rodas ferroviárias tem sido foco de pesquisa nos últimos. Pesquisas recentes têm buscado reduzir o espaçamento interlamelar e o tamanho das colônias perlíticas por meio de microadição de elementos de liga formadores de carbonetos como nióbio, vanádio e titânio e combinação de rotas de tratamentos térmicos e termomecânicos. O objetivo deste trabalho é obter curvas ITT/CCT e analisar os efeitos da adição de nióbio e molibdênio na decomposição da austenita em aços com 0,7%C utilizados em rodas ferroviárias. O aço microligado será ensaiado por dilatométrica para levantamento das curvas ITT e CCT e analisados microestruturalmente por microscopia ótica. Verificou-se que a adição de molibdênio e nióbio atuou em aumentar a temperabilidade do aço nas taxas de resfriamento contínuo e atrasar o término da transformação da perlita e bainita nos patamares isotérmicos.

Introdução

A rede ferroviária do Brasil tem como prioridade o transporte de cargas, sendo assim esse modal precisa de uma melhoria constante. Com o contínuo aumento de cargas, as rodas sofrem um grande desgaste, por isso são necessários materiais com as melhores propriedades mecânicas possíveis.

Nas rodas ferroviárias de hoje, é comum a presença de perlita e de ferrita, já para o caso das rodas ferroviárias de trens de carga é majoritária a presença da perlita em relação a ferrita. Nessas rodas o teor de carbono gira em torno de 0,7%, o que torna o aço praticamente eutetóide (norma AAR, 2011). Novos estudos buscaram diminuir o espaçamento interlamelar da perlita e o tamanho das suas colônias pela adição de elementos de liga como o nióbio, vanádio e molibdênio e combinação de rotas de tratamentos térmicos e termomecânicos (Chattopadhyay, 2012).

O aço tem uma capacidade muito interessante que é a de formar diferentes estruturas (soluções sólidas) conforme variamos as suas temperaturas de resfriamento. Essas soluções sólidas são chamadas comumente de microestruturas e podem ocorrer de duas formas: a solução intersticial, que seria quando os átomos do soluto se alojam entre os átomos da matriz ou a solução substitucional, no qual os átomos do soluto substituem os do solvente na matriz, ou seja, se tornam parte dela. Além disso, para ocorrer solução substitucional, o tamanho atômico dos elementos deve ser próximo, (Silva, 2010).

A solução sólida substitucional promove aumento da resistência mecânica do aço, isso ocorre com a adição dos seguintes elementos: manganês, níquel, silício e molibdênio. Já no caso da solução intersticial, o aumento ocorre pela introdução de: carbono, nitrogênio, oxigênio, hidrogênio e boro, (Cunha, 2013; Chiaverini, 1986).

Assim, as caracterizações microestruturais e mecânicas dos novos aços desenvolvidos são necessárias para melhor correlação dos tratamentos térmicos com as microestruturas desejadas. Assim, por meio de simulações térmicas pode-se obter as curvas de transformações isotérmica (ITT) e contínua (CCT) para planejamento das rotas de tratamento térmico.

O objetivo deste trabalho é obter curvas ITT e CCT do aço microligado ao nióbio e molibdênio e definir as taxas ou temperaturas para se obter uma microestrutura majoritariamente perlítica ou bainítica.

Procedimentos experimentais



Foi utilizado um aço oriundo de roda classe D microligado (7MoNb), cuja composição química está apresentada na Tabela 1. As curvas de transformação isotérmica e contínuo foram obtidas por meio de ensaios de dilatométrica realizados no dilatômetro convencional, marca Dilatometer Type, modelo 805 A/D, disponível no Laboratório de Transformação de Fases da USP/SP.

Tabela 1 – Composição química do aço microligado utilizado (% massa)

C	Si	Mn	Cr	Cu+V	Mo+Nb
0.71	0.43	0.84	0.27	0.25	0.22

Os CPs utilizados na dilatométrica convencional tem o formato de barra cilíndrica com diâmetro de 4 mm e comprimento de 10 mm, com ambas as superfícies faceadas. O procedimento consistiu em austenitizar o material em 880°C por 5 min, seguido de duas etapas:

- Resfriamento brusco até a temperatura de transformação isotérmica (T1) de: 650, 450, 350 e 200°C. Manter nesta temperatura pelo tempo necessário para a transformação das fases e posterior resfriamento lento até a temperatura ambiente.
- Esfriamento contínuo em diferentes taxas (0,1; 0,4; 0,5; 0,7; 1; 3; 5; 10; 20; 30 e 50 °C/s) até a temperatura ambiente.

Depois essas amostras foram lixadas e polidas com a pasta de diamante nas granulometrias de 3 μ e 1 μ . Para a realização do ataque químico, foi usado o reagente LePera. Este reagente gera a cor bronze para a ferrita, a perlita fica preta, a bainita fica marrom escuro e a austenita fica branca, (Souza 2008). Os ataques químicos tiveram uma duração média de 30 segundos.

Resultados

Construção das curvas de transformação isotérmica (ITT-Isothermal Time Transformation)

Na curva de dilatométrica podemos ter uma noção de quanto tempo a microestrutura levou para se transformar de austenita para a microestrutura desejada. As curvas do aço 7MoNb com as respectivas temperaturas isotérmicas são apresentadas na Figura 1.

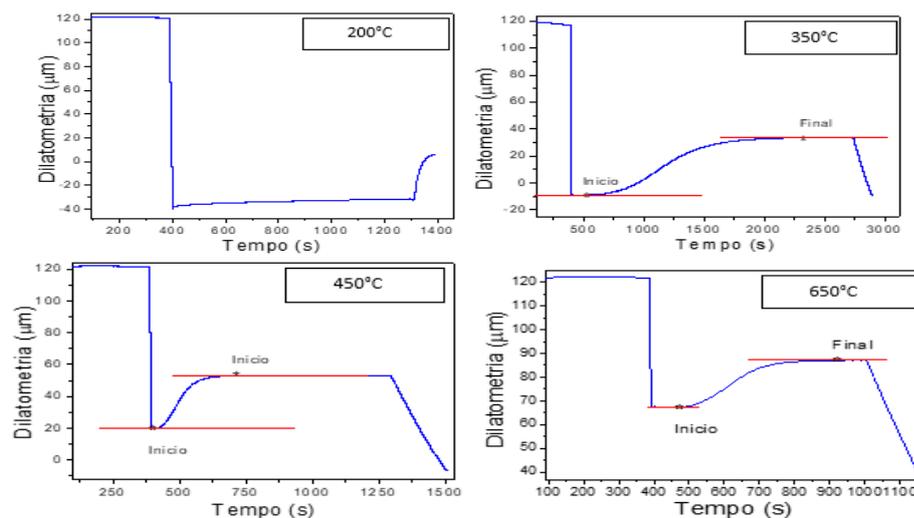


Figura 1: Curvas de dilatométrica do aço 7MoNb com as respectivas transformações isotérmicas.

Na Figura 2, vemos as microestruturas do aço referente aos patamares isotérmicos. Através das cores anteriormente citadas, podemos identificar quais são as microestruturas existentes. Na Figura 2a verifica-se a micrografia referente ao patamar em 200 °C. Nessa amostra observa-se a presença de inclusões numa microestrutura de bainita com martensita. Na Figura 2b verifica-se a micrografia referente ao patamar em 350 °C. A amostra apresenta uma predominância bainítica, devida a coloração marrom escura e a sua forma acicular



característica da microestrutura (Souza, 2008; Silva, 2010). Pela temperatura de patamar isotérmico, a microestrutura caracteriza-se por bainita inferior. Na Figura 2c verifica-se a micrografia referente ao patamar em 450 °C. A amostra apresenta uma predominância bainítica devida a coloração levemente marrom (Souza, 2008; Silva, 2010). Pela temperatura de patamar isotérmico, a microestrutura caracteriza-se por bainita superior, a qual apresenta uma coloração menos densa quando comparado com a temperatura de 350 °C. Na Figura 2d verifica-se a micrografia referente ao patamar em 650 °C. A microestrutura confirma a presença de perlita como esperado para esta temperatura de patamar isotérmico e caracterizado pelas partes pretas da micrografia (Sant'Anna, 2006).

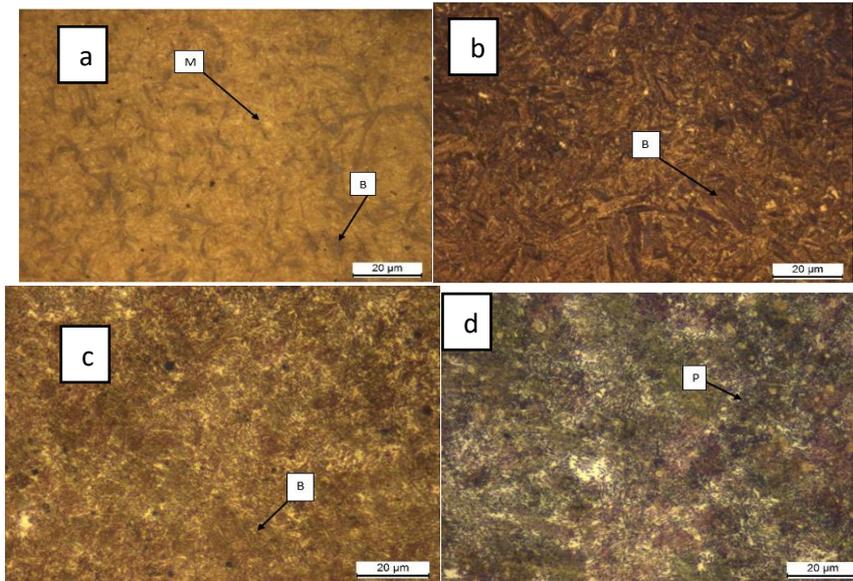


Figura 2 - Microestrutura do aço 7MoNb transformado isotermicamente: a) 200 °C; b) 350 °C; c) 450 °C; d) 650 °C MO. LePera. B (bainita), P (perlita) e M (martensita).

Na Figura 3 é apresentada a curva ITT do aço 7MoNb construída a partir dos gráficos de dilatometria (Figura 1) e os microconstituintes foram determinados por meio da análise microestrutural (Figura 2). Comparando as curvas ITT dos aços 7C (roda ferroviária classe C) e 7MoNb, nota-se que a adição de Nb+Mo aumentou a temperabilidade do aço, atrasando a formação de perlita e bainita, além de separar as curvas de formação das mesmas.

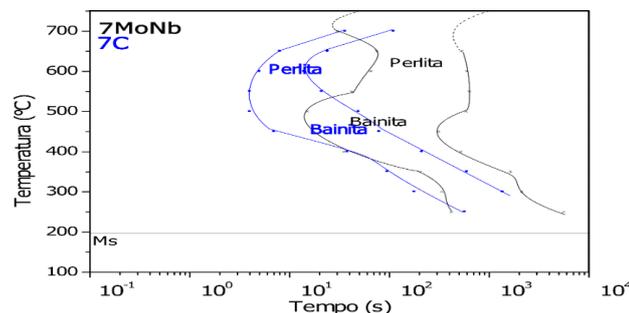


Figura 3 – Curvas ITT dos aços 7C (Rezende et al. 2020) e 7MoNb.

Construção das curvas de resfriamento contínuo (CCT – Continuous Cooling Transformation)

As curvas de dilatometria para resfriamento com taxa contínua do aço 7NbMo são apresentadas na Figura 4.

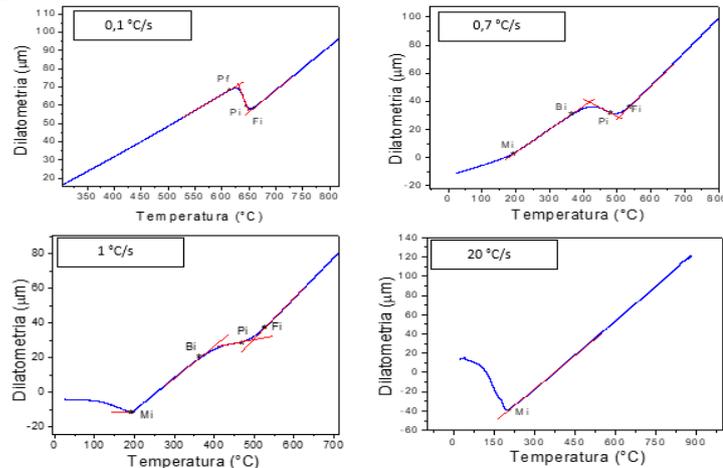


Figura 4 - Curvas de dilatométrica do aço 7NbMo com as respectivas taxas de resfriamento contínuo. Fi – início da ferrita, P – perlita, Pi – início da perlita, Pf – final da perlita, Bi – início da bainita, Mi – início da martensita.

Na Figura 5 verifica-se a micrografia referente às taxas de resfriamento contínuo. Para a taxa de resfriamento de 0,1 °C/s (Figura 5a), verifica-se que pela inclinação da curva na Figura 4 e pela coloração que nesta taxa a microestrutura é predominante perlítica e algumas regiões de ferrita. A micrografia do aço resfriado a 0,7 °C/s (Figura 5b), podemos identificar a bainita com a sua coloração marrom, a perlita e sua coloração preta e do agregado MA na cor branca (agregado entre martensita e austenita retida). Para a taxa de resfriamento de 1 °C/s (Figura 5c) verifica-se a maior quantidade de MA (martensita e austenita) que a microestrutura de 0,7 °C/s. Verifica-se na micrografia referente à taxa de resfriamento de 20 °C/s que a matriz é composta por martensita e austenita (MA), com ausência de componentes difusionais, (Souza, 2008).

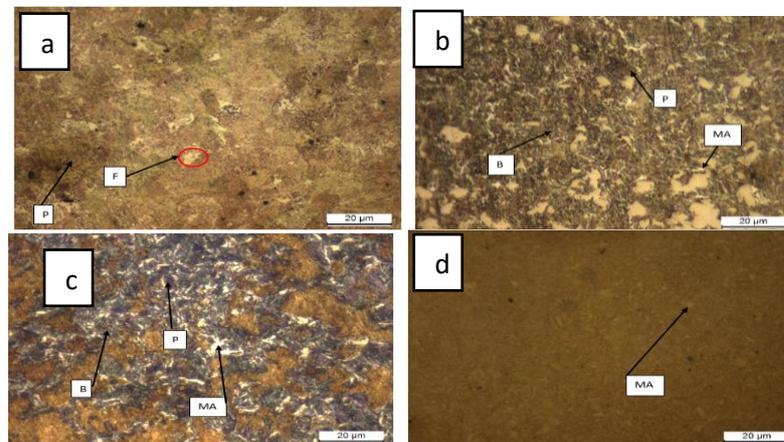


Figura 5 - Microestrutura do aço 7MoNb a partir do resfriamento contínuo nas taxas de: a) 0,5 °C/s; 0,7 °C/s; 1 °C/s e 20 °C/s. F (ferrita), B (bainita), MA (martensita com austenita).

Por último foi traçada a curva CCT do aço 7NbMo e comparada com o aço 7C (Figura 6). Nessa comparação foi visto que, a adição de nióbio e de molibdênio causou um aumento de temperabilidade e impactando a redução da temperatura de início de formação de componentes difusionais.

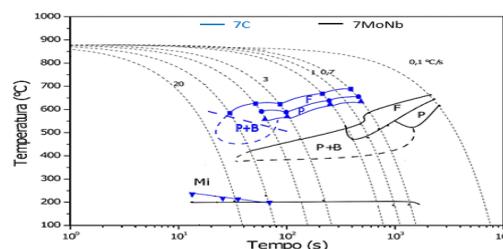


Figura 6 - Curvas CCT aços 7MoNb e 7C (Fonseca, 2015).



Conclusão

As curvas de temperatura, tempo e transformação foram eficientes para se determinar a região de formação da bainita e perlita. Para se obter uma microestrutura bainítica pode-se realizar o tratamento térmico com patamar isotérmico em 350 °C, enquanto para a perlita em 650 °C. A adição de nióbio e molibdênio aumentou a temperabilidade do aço, aumentando o tempo de formação da perlita e bainita nos patamares isotérmicos e deslocando as curvas de transformação em taxas contínuas para a direita.

Agradecimentos

Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – CNPq/PIBITI, Faculdade de Engenharia Mecânica.

Referências

CHATTOPADHYAY, C.; SANGAL, S.; MONDAL, K.; GARG, A. Improved wear resistance of medium carbon microalloyed bainitic steels. *Wear*, v. 289, p. 168-179, 2012.

CHIAVERINI, V., *Tecnologia Mecânica: Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas*, 2ª ed., São Paulo, McGraw Hill, v.1, 1986, 206 p.

CUNHA, A.P.A. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Tese de Doutorado, 2013.p.15

FONSECA, S. T., Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Tese de Doutorado, 2015. P.1-52

REZENDE, A.B.; FERNANDES, F.M.; FONSECA, S.T.; FARINA, P.F.S.; GOLDENSTEIN, H.; MEI, PAULO ROBERTO. Effect of Alloy Elements in Time Temperature Transformation Diagrams of Railway Wheels. *DEFECT AND DIFFUSION FORUM*, v. 400, p. 11-20, 2020.

SANT'ANNA, P. C., Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Tese de doutorado, 2006 P.84-85.

SILVA, A. L. V. C., *Aços e Ligas Especiais*, 3ª Edição 2010. p.1-81

SOUZA, G. A., Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Tese de Mestrado, 2008.p1-112