

Determinação experimental da temperatura ideal de laminação a quente para aço baixo carbono, microligado ao vanádio e manganês¹

Emerson Fernandes da Cunha²

Resumo

Este trabalho tem por objetivo avaliar o comportamento de um aço de baixo carbono, microligado ao vanádio e manganês, no que tange a sua resistência à deformação a quente, possibilitando a tomada de decisão, quanto a temperatura ideal para a laminação a quente, em bloco laminador específico. Em laboratório, para observar o comportamento desse aço (BC-Mn-V) na deformação a quente, utilizou-se a máquina de ensaio Gleeble 3500™, para a construção das curvas de tensão-deformação, alongamento e temperatura, em relação à tensão máxima e à redução de área. Os aços microligados aumentam sua resistência mecânica, por meio da formação de carbonetos, nitretos ou carbonitretos, em parte, dificultando o processo de conformação. Determinar o intervalo de temperatura, em que seja possível a laminação a quente e que esteja fora da formação desses precipitados, é buscar uma condição econômica para o processo industrial. Esse intervalo é definido experimentalmente neste trabalho.

Palavras-chave: Resistência a quente. Ductilidade. Aço microligado ao vanádio.

Abstract

This work aims to evaluate the behavior of a low carbon steel, microalloyed with manganese and vanadium, in terms of its resistance to hot strength deformation, enabling decision making about the ideal temperature for the hot rolling on specific wire rod mill-block. In the laboratory, for observing the behavior of this steel (BC-Mn-V) in hot deformation, it was used the Gleeble 3500™ testing machine for the construction of stress-strain curves, elongation and temperature, in relation to the maximum stress and the area reduction. The microalloyed steels increase their mechanical strength by forming carbides, nitrides or carbonitrides, partly impairing the forming process. Determine the temperature range, where it is possible to hot rolling and that is outside of the formation of these precipitates, is to seek an economic condition for the industrial process. This range is experimentally set in this work.

Keywords: Hot strength. Ductility. Vanadium microalloyed steel.

¹ Trabalho apresentado no I Seminário Regional de Siderurgia em 2009, Porto Alegre, RS, Brasil.

² Mestre em Siderurgia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre. Coordenador e professor na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS), Novo Hamburgo, RS, Brasil. E-mail: emerson-cunha@uergs.edu.br

1 Introdução

A simulação experimental é uma ferramenta que torna possível o desenvolvimento e o aprimoramento de métodos e dos processos industriais, requerendo menor interferência na rotina desses processos, o que converge para uma alternativa economicamente viável.

O aço, objeto desse estudo, foi denominado de BC-Mn-V e os nomes da empresa e do laboratório serão, propositalmente, suprimidos, protegendo a identidade dos mesmos.

O aço BC-Mn-V é usado na unidade industrial, em um laminador a quente (figura 1), para a fabricação de fio-máquina de bitola seis milímetros (6 mm), o qual é usado para a laminação a frio, obtendo como produto final o fio de aço para construção civil – classe CA60, bitola 4,20 mm. Esse aço possui adições de vanádio e manganês da ordem de 0,030% e 1,10%, respectivamente, para obtenção de boa resistência mecânica, sem perder significativamente a ductilidade. Como principal variável atuante sobre a resistência à deformação a quente de uma liga metálica, temos o efeito da temperatura, que influencia largamente a cinética dos processos de difusão e, por conseguinte, sobre a restauração do material, a qual afeta diretamente sua dureza.

Comparando os valores de resistência à deformação a quente, correspondentes ao ferro puro e ao aço, ambos no estado austenítico, verifica-se que, à medida que a temperatura diminui, a resistência do aço aumentará mais acentuadamente em relação ao ferro puro e, isso, dá-se em função dos efeitos da solução sólida.

O presente trabalho tem por objetivo, constatar os efeitos da solução sólida e indicar faixas de temperaturas de trabalho mais adequadas em relação à deformação a quente desse aço microligado ao vanádio.

2 Mecanismo de endurecimento por solução sólida

No processo de laminação a quente, pode haver o aparecimento de trincas, elas surgem,

quando a interferência da temperatura, somada a deformações impressas pelas forças de laminação, não conseguem ser acomodadas pela capacidade de deformação plástica do material. Isso pode acontecer pelo endurecimento da matriz, causado por elementos de liga, quando precipitados em forma de partículas, com pouca deformabilidade, e que, também podem ancorar os grãos ferríticos e/ou austeníticos, quando se tiver número e tamanho suficiente para isso.

Segundo Reed-Hill e Abbaschian (1994), a obtenção de incremento na resistência com boa ductilidade, dá-se pelo mecanismo de endurecimento por precipitação na interfase ($\gamma \rightarrow \alpha$), pois, nesse tipo de aço microligado, não se forma preferencialmente a cementita e, assim, elementos de liga presentes, mais propícios a ligar-se ao carbono e/ou nitrogênio, é que irão formar carbonetos, nitretos e/ou carbonitretos, tais como: V, Ti, Nb.

Para o aço microligado, um rápido resfriamento da região austenítica para a ferrítica, seguido de um período de envelhecimento isotérmico, irá propiciar a transformação da austenita para a ferrita isotermicamente, e é durante essa transformação que precipitam os carbonetos. Esses nucleiam nas fronteiras entre as fases alfa e gama e segue com crescimento dentro da fase ferrítica, como apresentado na figura 1.

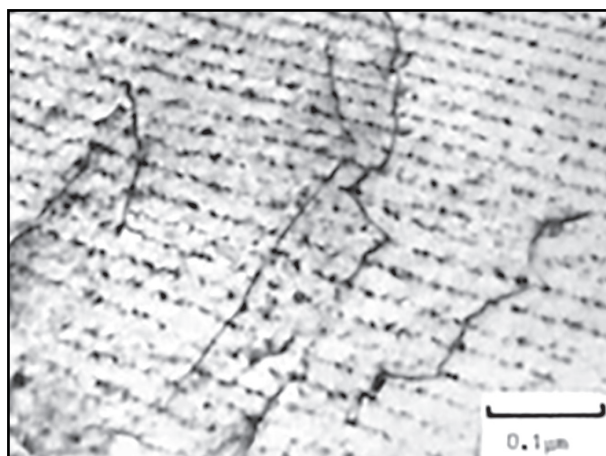


Figura 1 - Carboneto de vanádio precipitado, obtido com rápido resfriamento de uma liga Fe-0,75 %, V-0,15 % e C, de 1150 °C para 725 °C e então o corpo de prova mantido nesta temperatura por 5 minutos
Fonte: Reed-Hill; Abbaschian (1994).

Para entendermos melhor como se dá o endurecimento da matriz, o mecanismo de ancoramento do contorno de grão é mostrado na figura 2. Os contornos de grão em deslocamento

passam pelas partículas precipitadas, circundando-a com uma região tensionada em forma de um “anel”. Esse anel gerado adiciona resistência ao movimento da próxima discordância.

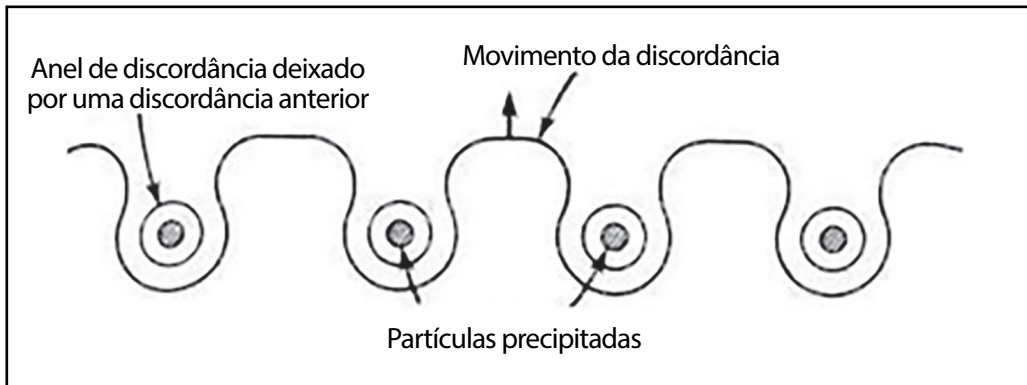


Figura 2 - Mecanismo de Orowan para o movimento de discordâncias, através de um cristal, contendo partículas precipitadas
Fonte: Reed-Hill; Abbaschian (1994).

No processo experimental, o ensaio de ductilidade a quente e susceptibilidade a trincas no processo de conformação a quente, permite-nos perceber a influência da composição química na deformabilidade a quente do aço em estudo.

Tem-se conhecimento acerca da influência do vanádio na resistência a deformação a quente, uma vez que seu efeito endurecedor no campo

austenítico é irrelevante, porém considerável na região intercrítica. O vanádio é principalmente conhecido pelo seu potencial de endurecimento por precipitação. Isso é devido, basicamente, à fração volumétrica e ao tamanho dos carbonitretos, figura 3, e também sua maior solubilidade na austenita, principalmente, na forma de carboneto, figura 4.

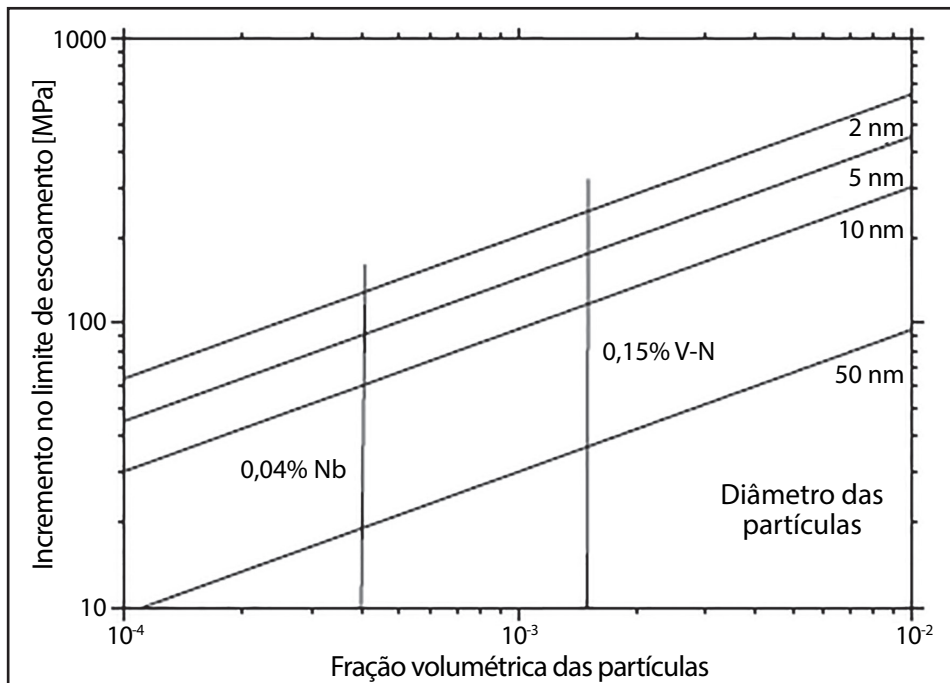


Figura 3 - Endurecimento por precipitação pelo modelo de Orowan-Ashby
Fonte: Gladman (1997).

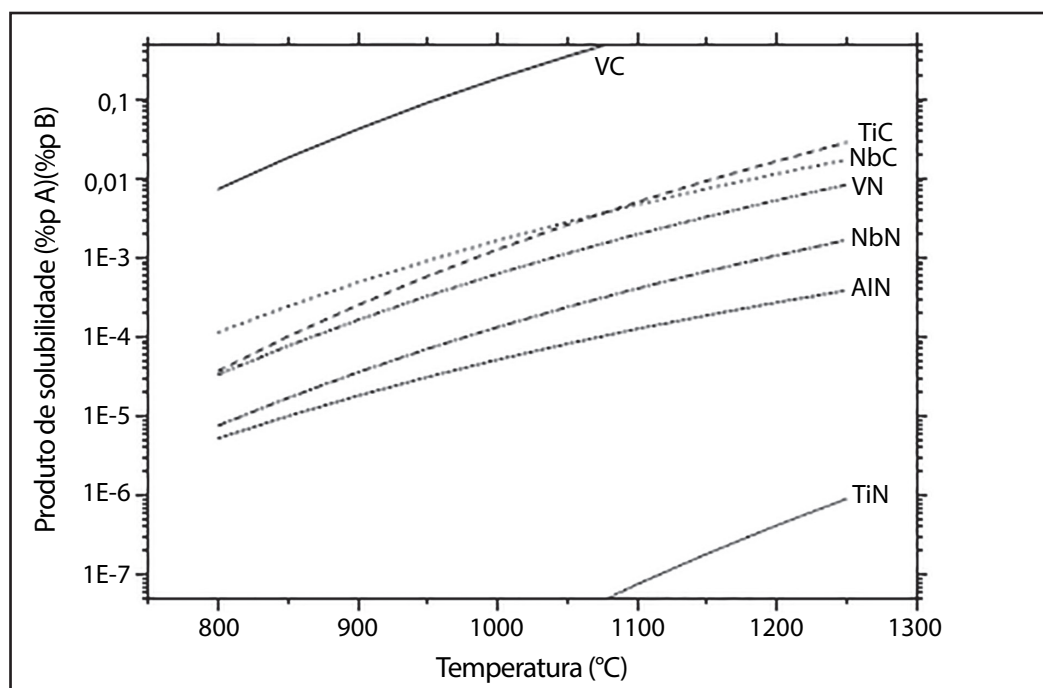


Figura 4 - Solubilidade de carbonetos e nitretos na austenita de aços microligados
Fonte: Narita (1975).

Por isso, é dada importância em conhecer as faixas de temperatura, onde pode estar sendo maximizada essa característica endurecedora do elemento de liga. Quando se deseja deformar a quente um aço, ele deve apresentar boa deformabilidade (baixa resistência a quente), logo, temperaturas, onde se terá maior resistência, devem ser, sempre que possível, evitadas.

Deve ser destacada a importância, ao se estudar os fenômenos metalúrgicos e microestruturais que ocorrem durante o processo de deformação a quente dos aços, das temperaturas críticas, pois acontecem alterações relevantes na microestrutura, além das transformações de fases. Com o conhecimento destas temperaturas é possível observar os parâmetros de processamento como: temperatura, taxa de deformação, deformação, taxa de resfriamento e tempo entre passes, com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas do material (AMBO *et al.*, 2013 *apud* SILVA, 2014, p. 20).

Para avaliar melhor o desempenho do aço, BC-Mn-V, em relação a sua resistência à deformação a quente, construiu-se, através do procedimento experimental, as curvas de redução de área, versus temperatura, tensão máxima, versus temperatura, tensão versus deformação

e alongamento, para a avaliação da ductilidade a quente, suscetibilidade a trincas e região de formação de carbonetos de vanádio (região intercrítica).

3 Metodologia

A tabela 1 mostra a composição química do aço BC-Mn-V. A amostra utilizada neste estudo tem origem nos despontes do trem médio do laminador, antes da entrada do bloco laminador (acabador), e foram seccionadas com uso de disco abrasivo.

A figura 5 mostra um esquema do fluxo do processo e situa o ponto de retirada das amostras.

Para a execução da simulação proposta, utilizou-se o módulo fixo e o de tração do simulador termomecânico Gleeble™ 3500, conforme indicado na figura 6.

Módulo fixo – módulo ao qual se acopla um dos outros dois módulos, de acordo com o ensaio a ser realizado. Abriga os atuadores hidráulicos, pneumáticos e elétricos, sendo controlado, a partir do painel de controle digital.

Tabela 1 - Composição química da amostra do aço estudado (% em massa)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0,11	0,15	0,89	0,023	0,020	0,07	0,05
Mo	V	Cu	Al	Ti	N	Fe
0,01	0,03	0,13	0,002	0,001	0,0094	Resto

Fonte: O autor (2009).

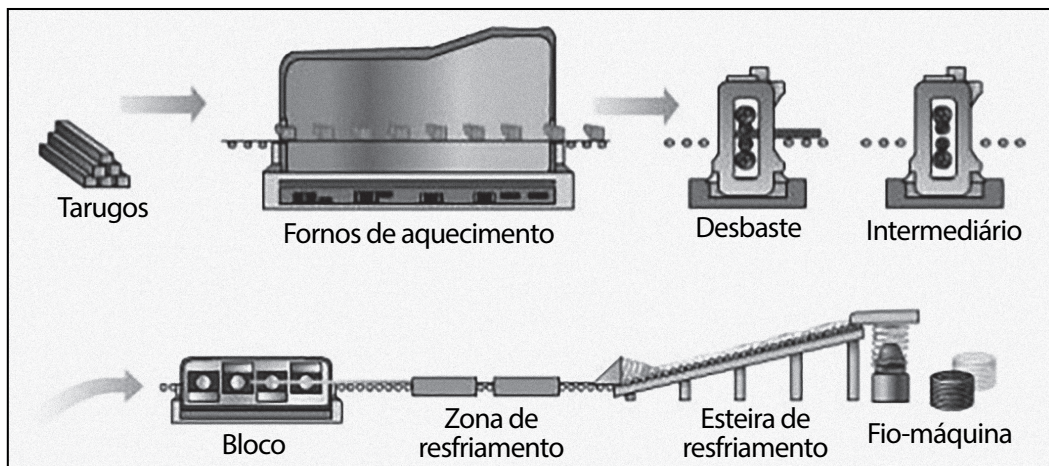


Figura 5 - Representação esquemática do laminador a quente com bloco acabador

Fonte: Rodrigues (2012).

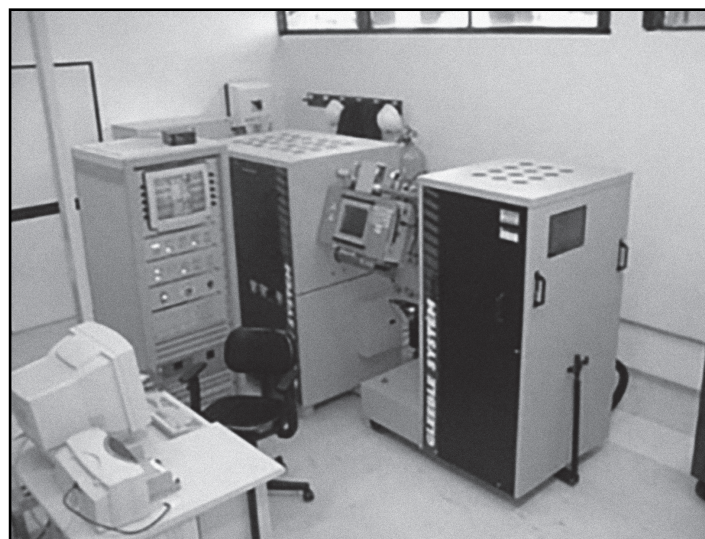


Figura 6 - Simulador termomecânico Gleeble 3500™

Fonte: O autor (2009).

Módulo de tração – módulo capaz de abrigar montagens e ferramentas voltadas para testes que envolvam esforço de tração ou tratamentos térmicos.

Quanto ao sistema de aquecimento das amostras, o simulador opera com a passagem de corrente elétrica, através do corpo de prova.

3.1 Ensaios

3.1.1 Determinação da ductilidade a quente.

O corpo de prova para o ensaio de tração a quente, mostrado na figura 7, para a determinação da ductilidade a quente, é retificado para obter melhor precisão dimensional, evitando

possíveis imperfeições na sua superfície, o que pode afetar o resultado do ensaio.

Durante o ensaio, o esforço de tração e o aquecimento ocorrem somente na região central do corpo de prova. Um termopar, para controle

da temperatura, é soldado na região central da amostra. O conjunto é posicionado na câmara de vácuo (figura 8) do simulador termomecânico. A montagem utilizada para ensaios de tração é apresentada na figura 7.

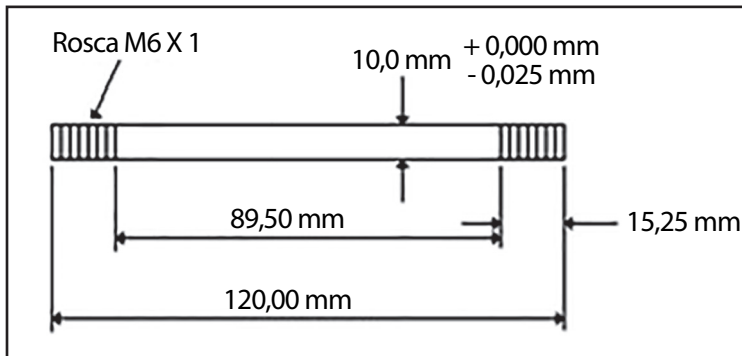


Figura 7 - Representação do corpo de prova utilizado no ensaio para determinação da ductilidade a quente
 Fonte: O autor (2009).

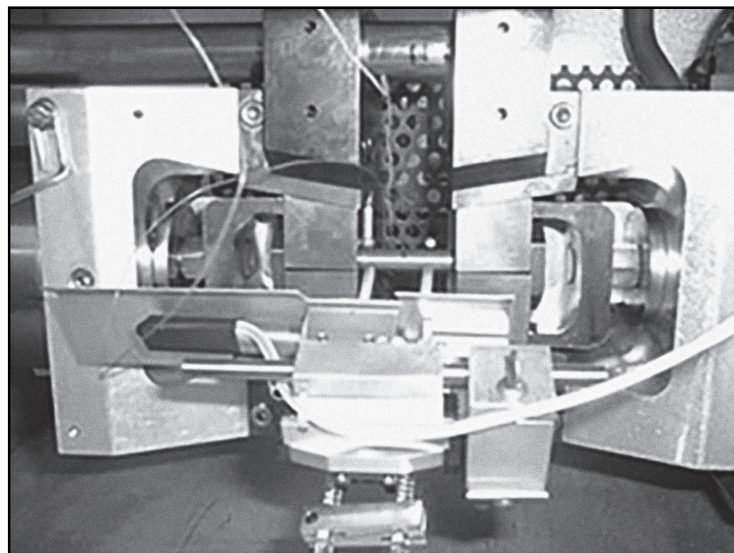


Figura 8 - Esquema da montagem dos dispositivos para o ensaio de tração
 Fonte: O autor (2009).

Para obtenção dos dados sobre deformação, é utilizado um transdutor de deslocamento, durante o ensaio de tração (LGage),

como mostra a figura 9. O sensor permite medidas precisas do deslocamento durante o ensaio.

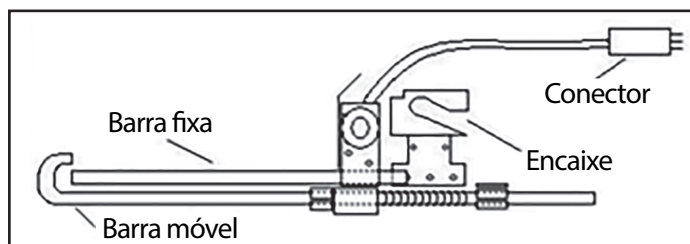


Figura 9 - Ilustração do sensor de deslocamento acoplado à amostra (LGage)
 Fonte: O autor (2009).

Para a realização dos testes, todas as amostras sofreram o mesmo ciclo, representado na figura 10, como segue: aquecimento da amostra até a temperatura objetivada para tração a quente, com taxa de $20\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$, permanência por 1 minuto na temperatura objetivada e, em seguida, tracionando-se o corpo de prova a uma taxa de deformação de $5,00\text{ mm s}^{-1}$ até o rompimento, seguido de resfriamento ao ar. Não foi possível simular a taxa de deformação que o bloco laminador imprime sobre o aço, pois essa é da ordem de aproximadamente 180 s^{-1} .

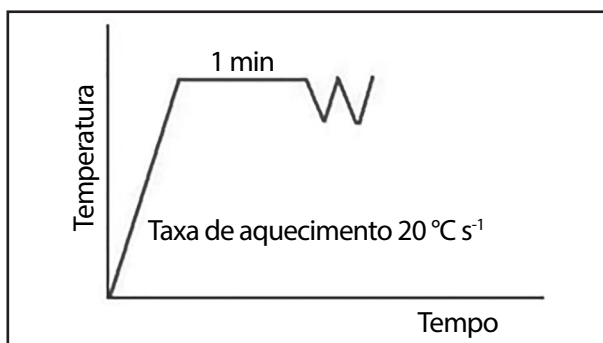


Figura 10 - Representação do ciclo realizado no teste
Fonte: O autor (2009).

A faixa de temperatura dos testes estava compreendida entre $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $1260\text{ }^{\circ}\text{C}$, com intervalos de temperatura de sessenta graus Celsius ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$), para temperaturas entre $990\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $1260\text{ }^{\circ}\text{C}$ e uma taxa de trinta graus Celsius ($30\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$), para temperaturas entre $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $990\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Para cada temperatura, realizou-se no mínimo dois testes. As fraturas foram analisadas em microscópio óptico e medidas com paquímetro digital com resolução de $0,01\text{ mm}$.

3.1.2 Ensaio SICO (*Strain-induced crack opening test*)

Esse ensaio submete o corpo de prova a uma compressão a quente, a uma dada taxa de deformação, com o objetivo de verificar o aparecimento de trincas ou fissuras. O corpo de prova, mostrado na figura 11, é como no ensaio de tração a quente, retificado para obter melhor precisão dimensional e evitar imperfeições na sua superfície, as quais podem causar desvios nos resultados.

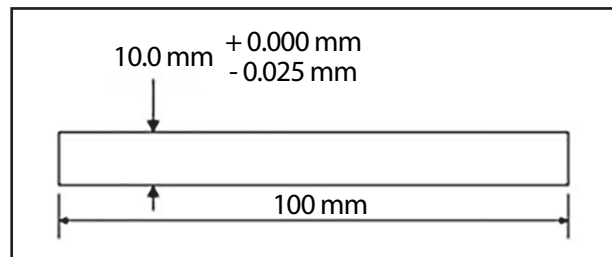


Figura 11 - Corpo de prova utilizado no ensaio (SICO)
Fonte: O autor (2009).

Um termopar, soldado na região central da amostra, informará a temperatura. O esforço e o aquecimento ocorrem somente na região central do corpo de prova. Para o ensaio, o conjunto é posicionado na câmara de vácuo do simulador termomecânico. A montagem utilizada para o ensaio é apresentada na figura 12.

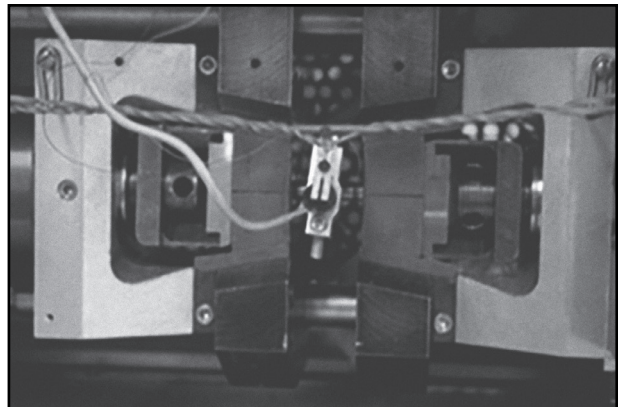


Figura 12 - Esquema da montagem para o SICO TEST
Fonte: O autor (2009).

Para obtenção dos dados de deformação, é utilizado um transdutor (CGAGE), mostrado na figura 13. O sensor proporciona medidas precisas de deslocamento do corpo de prova durante o ensaio.

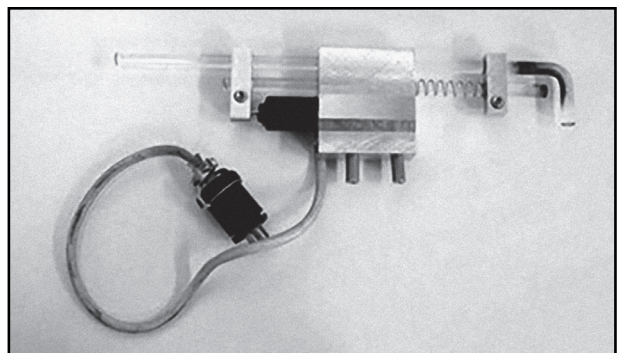


Figura 13 - Sensor de deslocamento da amostra (CGage)
Fonte: O autor (2009).

Nos testes, todas as amostras passaram pelo mesmo ciclo, representado na figura 10, como segue: aquecimento da amostra até a temperatura desejada para a compressão a quente, a uma taxa de vinte graus Celsius ($20\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$), permanência por 1 minuto na temperatura objetivada e, na sequência comprimida, a uma taxa de deformação de $5,0\text{ s}^{-1}$, até o fim da deformação, seguido de resfriamento ao ar.

Os ensaios foram realizados em três temperaturas a $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $870\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $940\text{ }^{\circ}\text{C}$, com taxa de deformação de $5,0\text{ s}^{-1}$ (limite do equipamento de testes). Para cada temperatura, realizou-se dois testes. Os corpos de prova, deformados por compressão (figura 14), foram analisados em microscópio óptico para análise em relação ao surgimento de trincas ou fissuras.

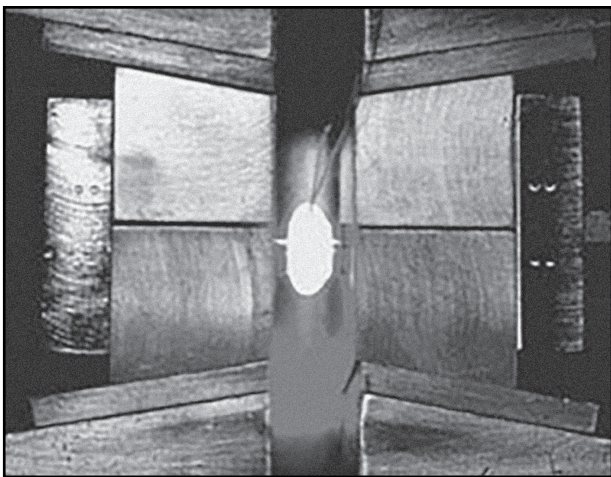


Figura 14 - Amostra deformada no momento do ensaio (SICO)
Fonte: O autor (2009).

3.1.3 Determinação da região intercrítica

Para que o comportamento do aço BC-Mn-V possa ser avaliado e as transformações de fase identificadas, um ensaio de dilatométrica foi realizado, tendo como referência as normas ASTM E 228-95 e ASTM E 831-93.

A representação do corpo de prova, utilizado no ensaio, é apresentada na figura 15, sendo também retificado.

A montagem, utilizada para a determinação de temperaturas relativas a transformação de fase, é apresentada na figura 16. Nessa

montagem, o esforço e o aquecimento são efetuados, somente na região central do corpo de prova. Um termopar, soldado na região central da amostra, é responsável pela medição da temperatura, e o conjunto é posicionado na câmara de vácuo. A representação do esquema de montagem do conjunto é apresentada na figura 16.

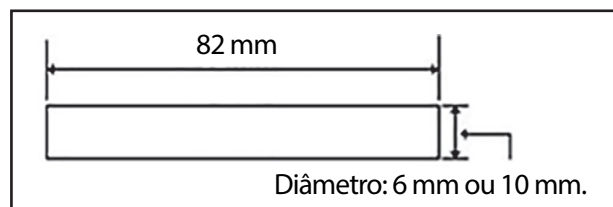


Figura 15 - Representação do corpo de prova utilizado no ensaio
Fonte: O autor (2009).

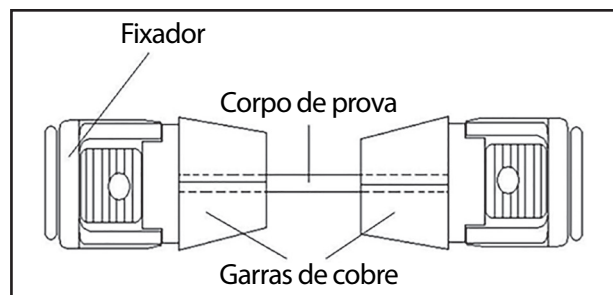


Figura 16 - Esquema da montagem para o ensaio de dilatométrica
Fonte: O autor (2009).

Um sensor é utilizado para medir a dilatação da amostra, durante o aquecimento e/ou resfriamento (dilatômetro), que é apresentado na figura 17, esse sensor permite medidas precisas da dilatação do material durante o ensaio.

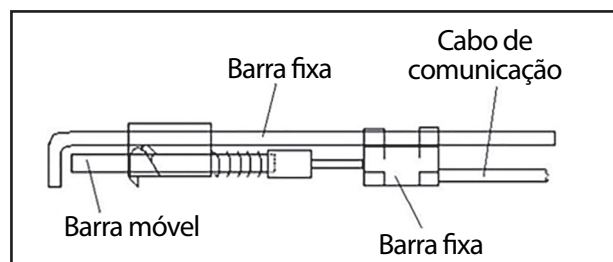


Figura 17 - Ilustração do dilatômetro
Fonte: O autor (2009).

Dilatômetro é um extensômetro para medir pequenas variações dimensionais, nesse caso, no diâmetro do material e que podem determinar o ponto, onde ocorrem as transformações de fases. O dilatômetro usado possui uma escala de $\pm 0,63\text{ mm}$.

Duas programações foram utilizadas para determinação das temperaturas:

- Determinação dos limites AC1 e AC3 - aquecimento da amostra até a temperatura de 580 °C em cinco minutos, em sequência, aquecimento até 980 °C com permanência nessa temperatura por um tempo igual a cinquenta minutos (50 min), seguido de resfriamento ao ar, ciclo representado pela figura 18.

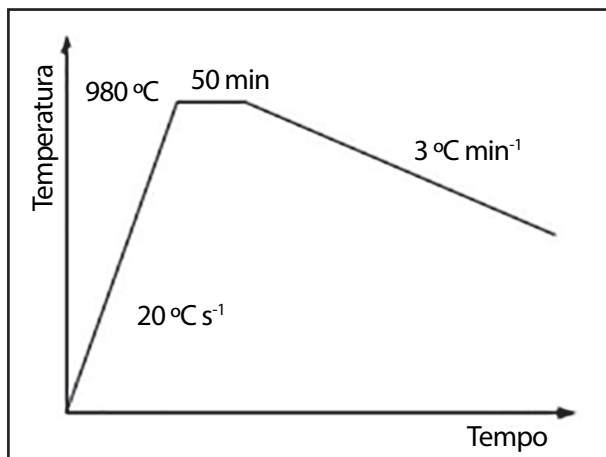


Figura 18 - Representação do ciclo realizado nos testes
Fonte: O autor (2009).

- Determinação das temperaturas, onde ocorrem as mudanças de fase - para determinação das temperaturas, o simulador Gleeble™ possui um software capaz de identificar as temperaturas, onde ocorrem as mudanças de fase. Podem-se determinar tais temperaturas de dois modos:

Método da derivada: O *software* calcula a segunda, derivada da curva de dilatação, *versus* temperatura e os pontos, onde ocorre inflexão na curva da derivada são os pontos, onde ocorrem as mudanças de fase. O gráfico é apresentado na figura 19.

Método da tangente: Marca-se um ponto na curva de dilatação em função da temperatura, próximo ao ponto, onde se supõe, esteja ocorrendo o início/fim da transformação de fase, o *software* criará uma reta tangente a esses pontos, a mudança de fase estará iniciando/terminando, quando a reta tangente coincidir com os valores do gráfico de dilatação em função da temperatura que é apresentado na figura 20.

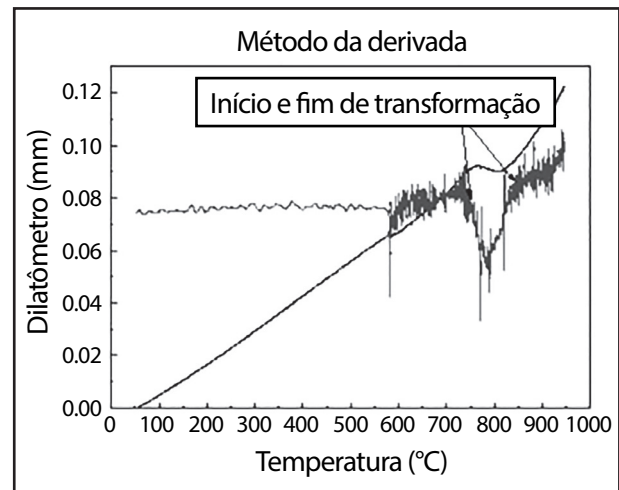


Figura 19 - Método da derivada para determinação de temperaturas de transformação
Fonte: O autor (2009).

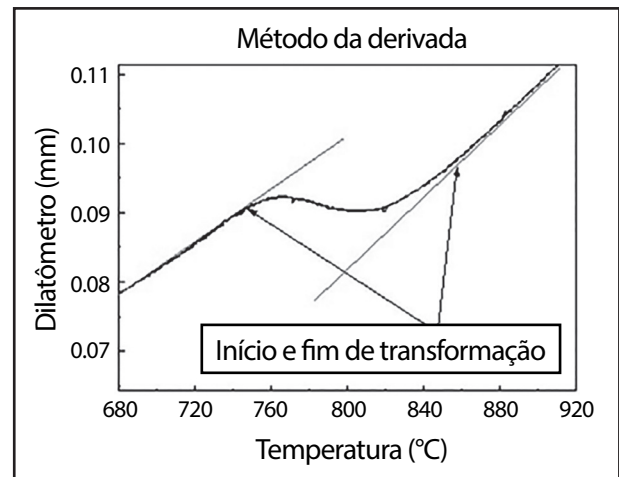


Figura 20 - Método da tangente para determinação de temperaturas de transformação
Fonte: O autor (2009).

4 Resultados e discussões

As curvas da tensão e da deformação a quente (determinação da ductilidade), em função da temperatura, figura 21, mostram o comportamento do aço submetido à tração a quente. Ao se observar no gráfico, as temperaturas de 830 °C e 890 °C, percebe-se que a resistência à tração é maior que a temperatura inferior, rompendo a relação linear, maior a temperatura, menor a resistência à tração (de 1200 °C a 930 °C). Isso sugere uma influência sobre a resistência à tração, aumentando-a, dada pela presença do vanádio no aço.

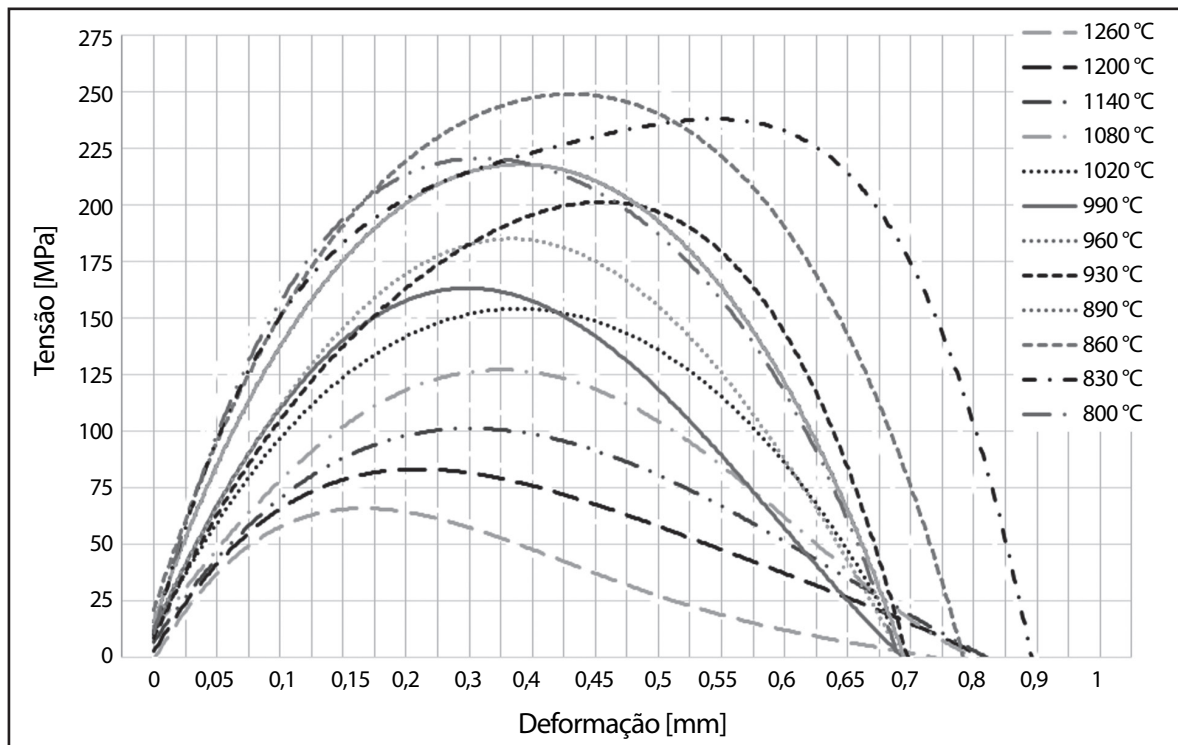


Figura 21 - Gráfico tensão e deformação a quente em função da temperatura
 Fonte: O autor (2009).

Nas figuras 22 e 23, são apresentadas as curvas de tensão máxima e redução de área em função da temperatura, pode-se observar, na

faixa de temperatura entre 850 °C e 900 °C, uma acentuada redução na taxa de redução de área, ao mesmo tempo que a tensão começa a cair.

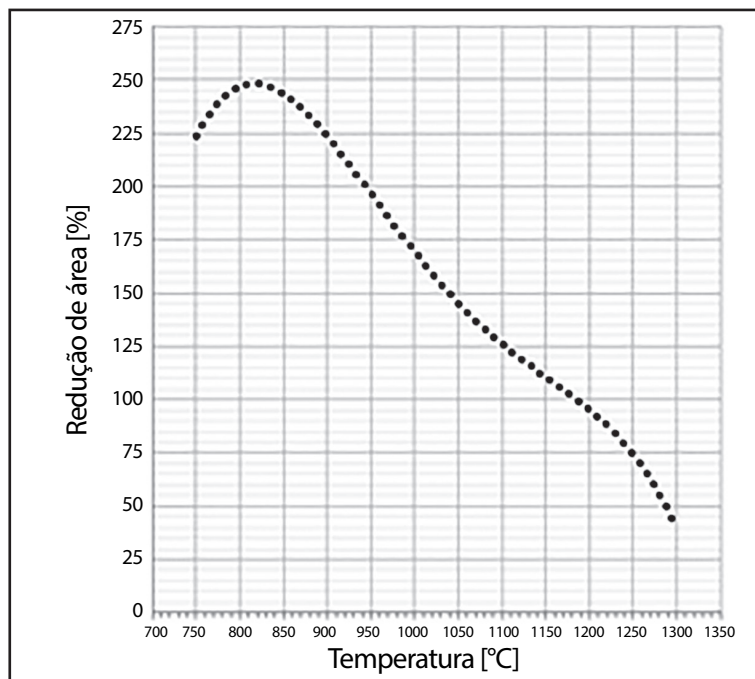


Figura 22 - Gráfico da tensão máxima em função da temperatura
 Fonte: O autor (2009).

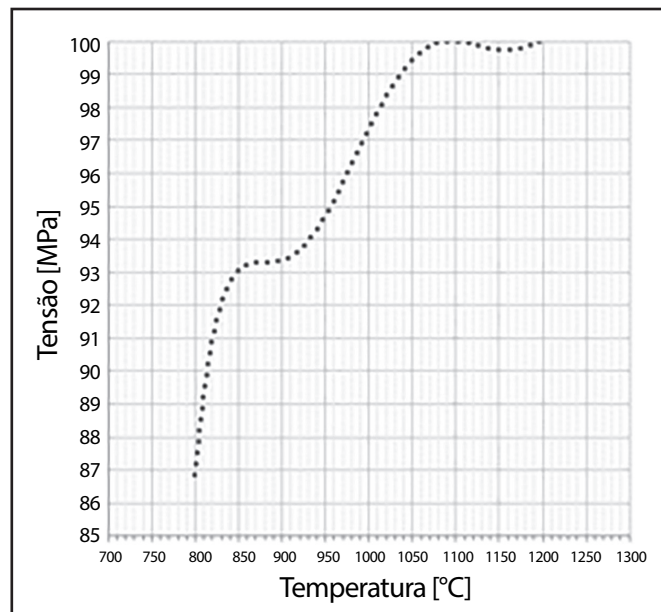


Figura 23 - Gráfico da redução de área em função da temperatura (ductilidade a quente)
 Fonte: O autor (2009).

Sobrepondo os gráficos das figuras 22 e 23, reafirma-se que, no entorno entre as temperaturas de 850 °C e 900 °C, há um aumento da resistência à tração e uma redução na ductilidade do material, indicado por um platô formado.

No gráfico do alongamento, em função da

temperatura (figura 24), para uma faixa de temperatura entre 850 °C e 950 °C. Essa faixa engloba a tensão máxima (figura 22) e a redução na ductilidade (figura 23), com uma taxa de deformação aplicada de 5 s^{-1} , verifica-se uma grande queda no alongamento.

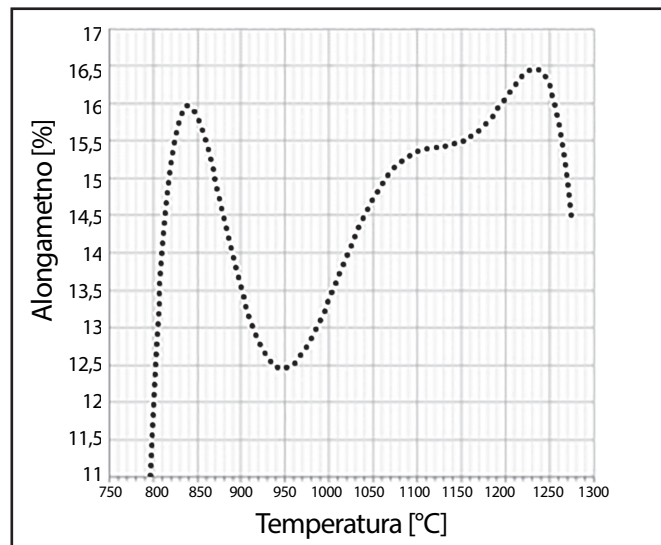


Figura 24 - Gráfico do alongamento em função da temperatura
 Fonte: O autor (2009).

Os resultados das avaliações dos corpos de prova, comprimidos em faixa de

temperatura entre 800 °C e 940 °C, são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Avaliação das amostras comprimidas a quente

Temperatura [°C]	BC-MN-V	
	Corpo de prova 1	Corpo de prova 2
800	Sem trincas	Sem trincas
870	Sem trincas	Sem trincas
940	Sem trincas	Sem trincas

Fonte: O autor (2009).

As temperaturas que determinam a região intercrítica para o aço em estudo são apresentadas na tabela 3, com base nos métodos das derivadas (figura 19) e das tangentes (figura 20).

Tabela 3 - Temperaturas determinadas para AC1 e AC3

Limites	BC-MN-V	
	Corpo de prova 1	Corpo de prova 2
AC1	728	731
AC3	903	908

Fonte: O autor (2009).

5 Conclusões

Analisando os gráficos da redução de área, tensão máxima e alongamento em função da temperatura, pode-se concluir que o aço BC-MN-V, possivelmente, apresenta uma formação de carbonetos de vanádio muito forte entre 800 °C a 900 °C, causando influência direta sobre o alongamento e a tensão máxima do material. Apesar do material ter apresentado boa ductilidade, observamos um *platô* no gráfico da figura 23, na faixa de temperatura entre 850 °C e 900 °C, significando uma redução no incremento da estricção da amostra, possivelmente em função da formação de tais precipitados.

Analisando o conjunto de informações, extraídas dos gráficos construídos, é possível indicar a faixa de temperatura economicamente viável para conformação do aço em estudo neste trabalho. Para o aço BC-MN-V, a faixa ótima de temperatura de laminação indicada está entre 990 °C e 1140 °C, pois é nessa faixa, onde consegue-se atingir boa deformabilidade com valores intermediários de resistência à deformação.

Quanto ao teste de suscetibilidade de trincas, o aço BC-MN-V não apresentou trincas nesse ensaio em nenhuma das temperaturas

usadas nas simulações com taxa máxima de deformação de 5 s⁻¹. No entanto, devemos considerar o fato de não se atingir no teste simulado, a taxa de deformação real do bloco laminador (que é de aproximadamente 180 s⁻¹). Deve-se considerar que, certamente, o material apresentará comportamento diferenciado, tendendo à frágil, com tamanha taxa de deformação, pois a tensão de escoamento tenderá a aumentar significativamente com a deformação imposta em tempo diminuto.

De acordo com Boratto *et al.* (1987), Calado (2012), Rosa (2011), Silva (2014), Souza (1982) e Souza *et al.* (2012), o ensaio de torção é o mais utilizado em simulações físicas de processamento a quente, pois permite bom controle da temperatura e da taxa de deformação, permitindo a reprodução das estruturas metalúrgicas como as produzidas na laminação. Permite a aplicação de deformações elevadas até a ruptura, além da possibilidade de aplicação de taxas de deformação relativamente altas, cobrindo todo o processo de laminação a quente, no que se refere à temperatura e à deformação. Tem-se, então, uma oportunidade de continuidade deste trabalho, por meio da simulação física com a aplicação de torção a quente.

Referências

- BORATTO, F. *et al.* Projeto de esquemas de laminação controlada através de ensaio de torção computadorizado. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO ABM, 1987, **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 1987.
- CALADO, W. R. **Ultra-refino de grão através de deformação plástica severa por ensaios de torção: simulação do processo ARB.** 2012. 259 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- GLADMAN, T. **The physical metallurgy of microalloyed steels.** London: The Institute of Materials, 1997. 363 p.
- NARITA, K. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan. **ISIJ International**, v. 15, 1975.
- REED-HILL, R. E.; ABBASCHIAN, R. **Physical metallurgy principles.** 3rd ed. Stamford: Cengage Learning, 1994. p. 515-535.
- RODRIGUES, R. A. **Comparativo entre o fio máquina produzido com aço SAE 1005 e SAE 1405 modificados para produção de arames recozidos.** 2012. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. p. 4-26.
- ROSA, L. B. **Estudo do comportamento termomecânico do aço API 5L microligado ao Nb-V-Ti por ensaios de torção a quente.** 2011. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Vitória, 2011.
- SILVA, N. N. **Simulação da laminação de aço microligado ao nióbio utilizando ensaios de torção.** 2014. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- SOUZA, R. A. *et al.* Avaliação da recristalização dinâmica do aço estrutural SAE 4140 através de ensaios de torção a quente. IN: WORKSHOP DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS DO PROPEMM-IFES, 2., 2012, Vitória. **Anais...** Vitória: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, 2012.
- SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos.** 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.

