

DETERMINAÇÃO DAS TEMPERATURAS CRÍTICAS: T_{NR} , A_{R3} E A_{R1} ATRAVÉS DE ENSAIOS COM MÚLTIPLAS DEFORMAÇÕES EM RESFRIAMENTO CONTÍNUO POR TORÇÃO A QUENTE DE UM AÇO MICROLIGADO AO NIÓBIO¹

Helder Keitaro Ambo²

José Brunoro³

Mario Roberto Bellini Tasca⁴

Marcelo Lucas Pereira Machado⁵

Resumo

Para estudar os fenômenos metalúrgicos e microestruturais que ocorrem durante o processo de conformação a quente dos aços devemos conhecer bem as Temperaturas Críticas: T_{nr} (Temperatura de Não Recristalização), A_{R3} (início da transformação austenita-ferrita) e A_{R1} (fim da transformação austenita-ferrita), onde acontecem importantes alterações microestruturais e as transformações de fases. O conhecimento destas temperaturas críticas é de fundamental importância para o estudo dos parâmetros de processamento como: temperatura, taxa de deformação, deformação, taxa de resfriamento e tempo entre passes, com o objetivo de obter uma melhoria das propriedades mecânicas do material. Um método capaz de simular as condições reais dos processos termomecânicos da laminação é o ensaio de torção a quente, que possui uma boa eficiência e um baixo custo. Neste estudo foram utilizadas amostras, de um aço estrutural microligado ao nióbio, submetidas a testes termomecânicos na máquina de torção a quente do IFES. Foram realizados ensaios com múltiplas deformações em resfriamento contínuo. Através destes ensaios foram obtidas as curvas tensão x deformação e as tensões médias de escoamento (TEM) em cada temperatura de teste e assim foi possível encontrar as temperaturas críticas.

Palavras-chave: Torção a quente; Laminação; Temperaturas críticas.

Abstract

To study the metallurgical and microstructural phenomena that occur during the hot forming of steels we know well the Critical Temperatures: T_{nr} (Not recrystallization temperature), A_{R3} (beginning of the austenite-ferrite transformation) and A_{R1} (end of austenite-ferrite transformation), which hosts important microstructural changes and phases transformations. Knowing these criticals temperatures is of fundamental importance for the study of processing parameters such as temperature, strain rate, deformation, cooling rate and time inter passes, in order to obtain an improvement of the mechanical properties of the material. A method to simulate the actual conditions of thermomechanical processes rolling is the hot torsion test, which has a good efficiency and low cost. This study used specimens from a niobium microalloyed structural steel, subjected to thermomechanical testing machine hot torsion of IFES. Tests were performed with multiple deformations in continuous cooling. Through testing trials were obtained flow curves and flow mean stresses (TEM) at each test temperature and so it was possible to find the critical temperatures.

Key words: Hot torsion; Rolling mill; Critical temperatures.

¹ Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Aluno de iniciação científica. IFES. Vitória, ES, Brasil.

³ Aluno de mestrado. Professor. IFES. Vitória, ES, Brasil.

⁴ Aluno de mestrado. IFES. Vitória, ES, Brasil.

⁵ Dr. Professor. IFES. Vitória, ES, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os principais processos industriais de conformação a quente são a laminação, a extrusão e o forjamento. Esses processos podem ser caracterizados através das variáveis relevantes à simulação por torção a quente, tais como: a temperatura, a deformação, a taxa de deformação e o tempo entre deformações (passes).⁽¹⁾

A laminação é um processo de trabalho mecânico a quente, sendo uma etapa de extrema importância, pois é através dela que se obtêm as diversas formas dos produtos em aço para uso comercial (chapas, perfis, barras).⁽²⁾

O aço microligado ao nióbio é uma liga metálica largamente utilizada para construção de estruturas e equipamento devido as suas excelentes propriedades mecânicas. Em geral define-se, metalurgicamente, o aço microligado como sendo uma liga de ferro contendo baixo percentual em massa de carbono e também baixo percentual dos demais elementos de liga. Além do ferro e dos elementos de liga, esse aço contém sempre alguma quantidade de manganês, enxofre e fósforo, podendo apresentar ainda pequena quantidade de silício, alumínio e cobre.⁽³⁾

O processo de conformação a quente consiste, inicialmente, em aquecer o material até a temperatura de encharque para a austenitização, realizar deformações programadas nas etapas de desbaste e de acabamento e em seguida promover o resfriamento controlado do material. A etapa de acabamento, durante o processo de tiras a quente, na laminação de aços é realizada com curtos tempos de espera entre passes. Sendo o intervalo entre passes pequeno, a recristalização estática não se completa, podendo ter o acúmulo de deformação de um passe para o outro e, consequentemente, o processo passa a ser controlado pela recristalização dinâmica ou metadinâmica, quando os últimos passes são efetuados no campo austenítico e/ou pela recuperação dinâmica no campo ferrítico.^(4,5)

Uma técnica experimental capaz de reproduzir estas condições de processamento e que permite investigar os mecanismos que estão operando é o ensaio de torção a quente, através das curvas de escoamento plástico e do acompanhamento microestrutural. Com ensaios de torção a quente pode-se realizar sequências de passes impondo parâmetros de processamento tais como a temperatura de reaquecimento, a taxa de resfriamento, a quantidade de deformação, a taxa de deformação e o tempo de espera entre passes.⁽⁶⁾

Os ensaios de torção funcionam da seguinte forma: O eixo da máquina é dividido em duas partes, um eixo torçor e um eixo fixo contendo uma célula de carga. O eixo fixo tem o movimento de translação, sobre barramento, para permitir a colocação e a retirada do corpo de prova. O controle, bem como o sistema de aquisição de dados, é feito através de uma interface com um computador.

Podemos dividir a laminação controlada basicamente em quatro regiões:^(4,7,8)

- Região 1 – ocorre a altas temperaturas - acima da T_{nr} . Nesta etapa a austenita que está sendo deformada é recristalizada promovendo um refinamento dos grãos;
- Região 2 – ocorre em temperaturas intermediárias – abaixo da T_{nr} e acima da Ar_3 - onde a deformação da austenita é realizada sem que ocorra a recristalização. Assim, o material apresenta um encruamento residual, multiplicando assim o número de sítios disponíveis para nucleação posterior da ferrita.
- Região 3 – ocorre abaixo da Ar_3 e acima da Ar_1 , onde existem as duas fases: austenita e ferrita. Com o aparecimento da ferrita, inicialmente, há um amaciamento do material, sendo possível detectar a temperatura Ar_3 no

ensaio de torção a quente. Durante o processo de deformação, a ferrita sofre um encruamento que ocasiona o aumento da resistência do material. Já a austenita ao sofrer encruamento aumenta ainda mais o número de sítios disponíveis para nucleação da ferrita. Desta forma, a ferrita produzida possui um grão ainda mais fino que o produzido na região 2;⁽⁸⁾

- Região 4 – ocorre abaixo da Ar1, onde não há mais austenita e inicia-se a formação da cementita. Com o aparecimento da cementita há um aumento da tensão de escoamento do material, sendo possível detectar a temperatura Ar1 no ensaio de torção a quente.

O conhecimento prévio destas temperaturas críticas será muito útil para se fazer uma laminação controlada. O valor da T_{nr} e Ar3 pode ser calculado de uma maneira bem simples como função da composição química dos aços,⁽⁹⁾ como pode ser visto nas Equações 1 e 2, respectivamente, a seguir:

$$T_{nr} = 887 + 464C + (6445Nb - 644(Nb)^{1/2}) + (732V - 230(V)^{1/2}) + 890Ti + 363Al - 357Si \quad (1)$$

$$Ar3 = 910 - 310.C - 80.Mn - 20Cu - 15.Cr - 55.Ni - 80.Mo + 035.(t - 8)^{4,5} \quad (2)$$

Sendo que o t é a espessura da placa laminada em mm, considerando t entre 8 e 30 mm. Em relação aos elementos de liga, são pela ordem de eficácia na redução de Ar3: C, Mn, Mo e Ni.⁽⁴⁾

Nos ensaios de múltipla deformação em resfriamento contínuo é possível determinar as temperaturas críticas de processamento, como a temperatura de não recristalização (T_{nr}) e as temperaturas de início e fim de transformação da austenita (Ar3 e Ar1 respectivamente).

Assim podemos analisar os fenômenos metalúrgicos e as variações dessas temperaturas que ocorrem nos materiais em função dos parâmetros de processamento.^(4,7)

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Material Utilizado

Foi utilizado um aço comercial, microligado ao nióbio, cuja composição química está apresentada na Tabela I seguinte. A análise química foi realizada utilizando um espectrômetro *Oxford Instruments*, modelo *Foundry-Master Pro* do laboratório de redução do IFES.

Tabela 1. Composição química do aço microligado ao nióbio

Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Nb	Ti	Co	P	S
98,3	0,1	0,1	0,3	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	24	07	82	28		44	35	26	79	24	11	17	12

2.2 Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova de torção foram usinados a partir de uma barra quadrada de 32 x 32mm, tendo como o diâmetro útil de 5 mm e o comprimento útil de 20 mm (Figura1). O dimensionamento dos corpos de prova, diâmetro e comprimento útil, foram otimizados para atender à capacidade de máximo torque do equipamento de torção e, assim, obter maiores taxas de deformação.

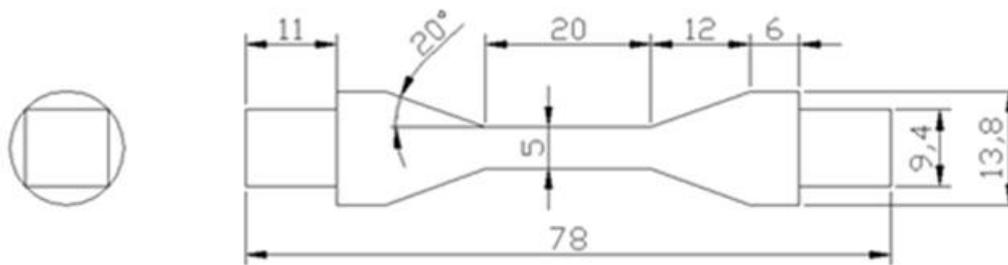


Figura 1. Desenho esquemático do corpo de prova.

2.3 Ensaios com Múltiplas Deformações em Resfriamento Contínuo

Com esse tipo de ensaio é possível determinar as temperaturas críticas de processamento, tais como a temperatura de não recristalização (T_{nr}) e as temperaturas de início e fim de transformação da austenita (Ar_3 e Ar_1).

Assim podemos analisar os fenômenos metalúrgicos e as variações dessas temperaturas que ocorrem nos materiais em função dos parâmetros de processamento.

Nesse ensaio, o corpo de prova será aquecido até a temperatura de encharque de 1.230°C , mantendo-se nesta temperatura por um tempo de 3 minutos. Em seguida o corpo de prova será resfriado, continuamente, a uma taxa de 1°C/s e sofrerá deformação constante de 0,2, com taxa de deformação de $0,2\text{s}^{-1}$ e com as temperaturas variando de 1.170°C até 600°C , em intervalos de 30°C . Estão previstas 20 deformações consecutivas, mantendo-se o mesmo tempo de espera entre as deformações. A Figura 2 mostra esquematicamente a realização desse ensaio.⁽⁷⁾

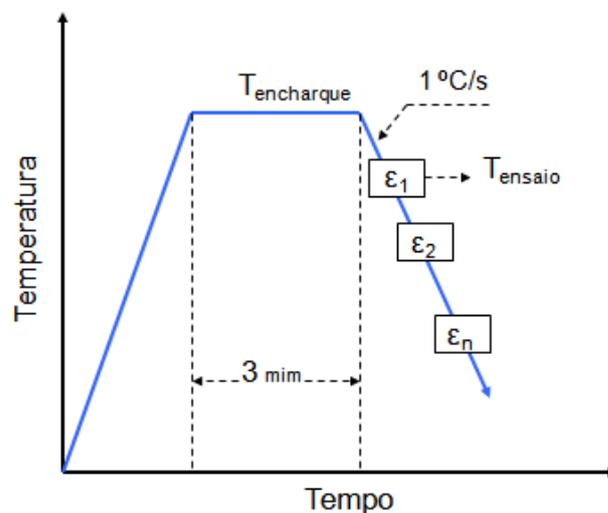


Figura 2. Representação esquemática de uma sequência de deformações controladas ($\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$) em resfriamento, realizada com ensaios de torção a quente.

3 RESULTADOS E DISCURSÃO

As temperaturas críticas de processamento, tais como a temperatura de não recristalização (T_{nr}) e as temperaturas de início e fim de transformação da austenita-ferrita (Ar_3 e Ar_1) foram obtidas e apresentaram resultados semelhantes e compatíveis com a literatura.

A Figura 3 apresenta o resultado das curvas tensão equivalente versus deformação equivalente obtidas no ensaio. Nas primeiras curvas notamos que o início da tensão de escoamento varia pouco entre as temperaturas de 1.170°C e 990°C. Com o decréscimo da temperatura a partir de 990°C, notamos que as curvas apresentam um aumento mais acentuado no início da tensão de escoamento, por causa da transformação da austenita em ferrita. A partir de 810°C onde se inicia o surgimento da ferrita, ocorre uma redução no início da tensão de escoamento, pois a ferrita é mais macia que a austenita. Por fim, a partir da temperatura de 720°C toda a austenita já se transformou em ferrita e então só temos encruamento e isto faz com que o início da tensão de escoamento tenha um aumento acentuado.

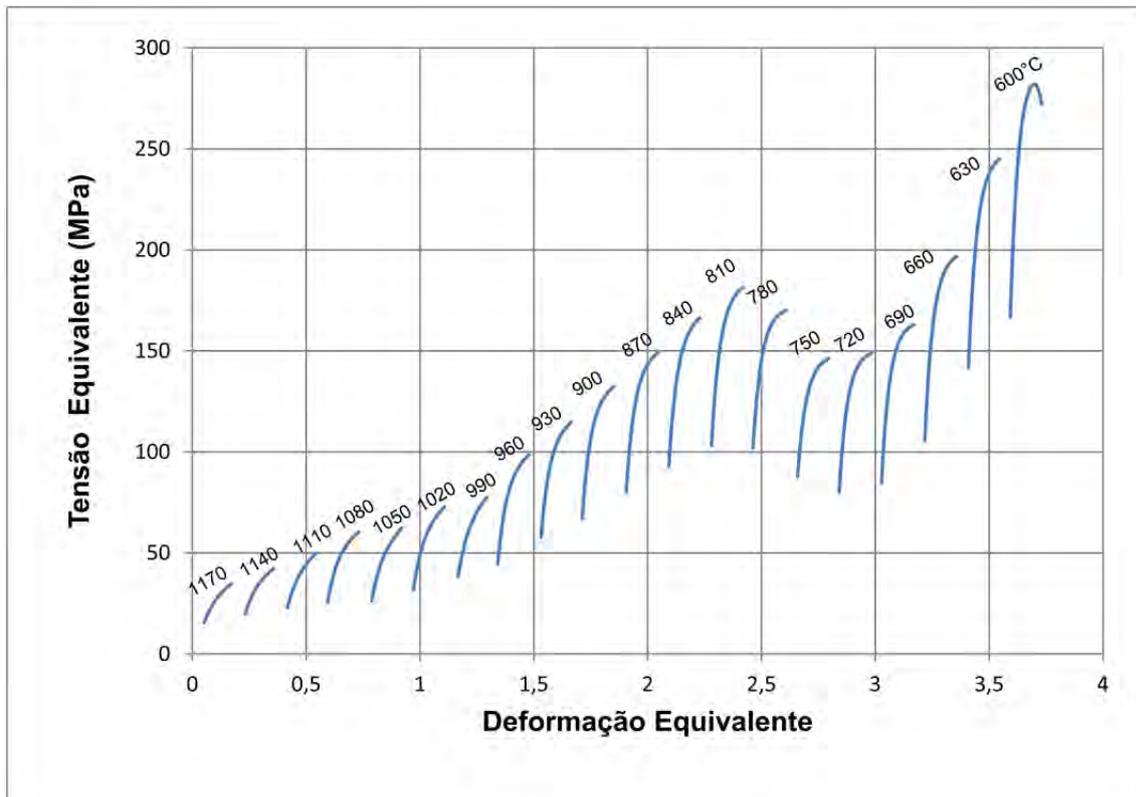


Figura 3. Curvas tensão equivalente versus deformação equivalente geradas através do ensaio com múltiplas deformações, com taxa de deformação de 0,2s-1, deformação de 0,2 e temperaturas variando entre 1.170°C a 600°C.

Na Figura 4 está representado o gráfico da tensão média de escoamento versus $1000 \times 1/T$, através da análise das curvas desta figura é possível determinar mais precisamente os valores da T_{nr} , Ar_3 e Ar_1 .

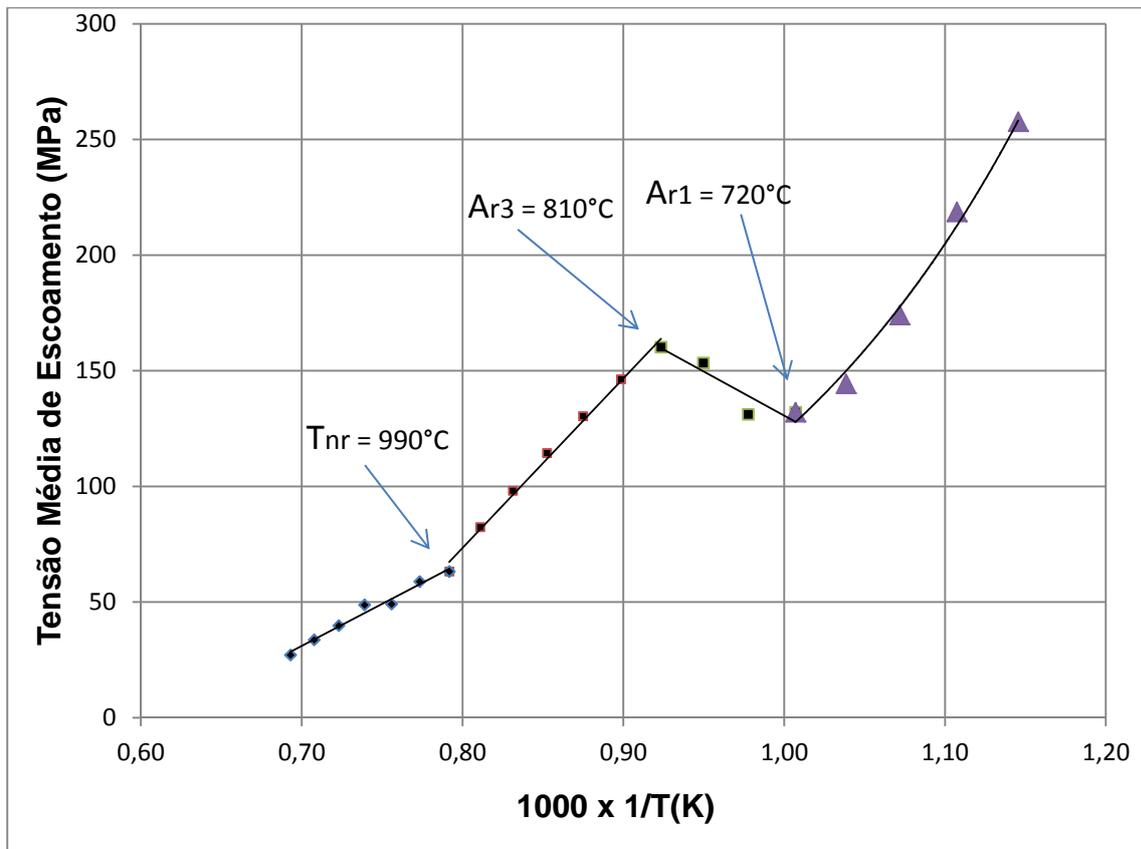


Figura 4. Gráfico da tensão média de escoamento versus $1000 \times 1/T$, mostrando as regiões de T_{nr}, Ar₃ e Ar₁.

Podemos observar na Figura 4

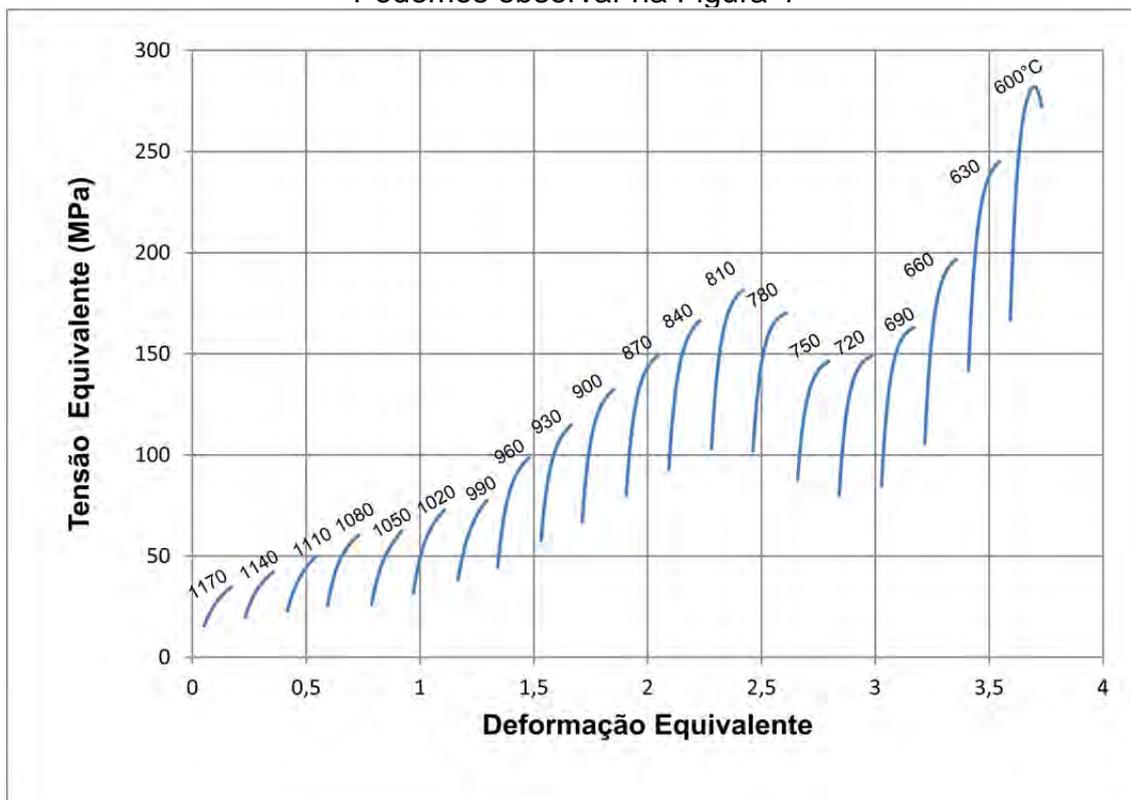


Figura 3. Curvas tensão equivalente versus deformação equivalente geradas através do ensaio com múltiplas deformações, com taxa de deformação de 0,2s⁻¹, deformação de 0,2 e temperaturas variando entre 1.170°C a 600°C.

que há uma variação da tensão equivalente em relação à mudança de temperatura na qual é aplicada a deformação. Nota-se que a tensão aumenta à medida que a temperatura diminui, evidenciando a região austenítica e que a partir de temperaturas menores do que 990°C (sétimo passe) há um aumento mais acentuado da tensão. Isto caracteriza uma mudança de região de recristalização para região de encruamento, ou seja, a temperatura de não recristalização T_{nr} . Na segunda parte da curva, que corresponde à deformação abaixo da temperatura de não recristalização, está ocorrendo encruamento, ou seja, um acúmulo de deformação com o prosseguimento do ensaio, e assim, a tensão média equivalente aumenta mais acentuadamente com o decréscimo da temperatura até 810°C, onde temos a Ar_3 que é o início da região intercrítica, onde se inicia a transformação da austenita em ferrita. Em seguida, com a diminuição da temperatura, a queda da tensão evidencia o aparecimento da ferrita a partir de 810°C e vai até a temperatura de fim da transformação da austenita em ferrita, na temperatura Ar_1 de 720°C. A partir deste ponto (Ar_1) a TEM aumenta acentuadamente, devido ao alto grau de encruamento.

Os dados obtidos através dos ensaios de torção a quente podem ser comparados com os valores obtidos através das Equações 1 e 2 e podem ser vistos na tabela 2.

Tabela 2. Temperaturas críticas obtidas no ensaio versus calculadas pelas equações encontradas na literatura

	T_{nr} (°C)	Ar_3 (°C)	Ar_1 (°C)
Ensaio	990	810	720
Calculado	982	809	-

Observa-se que a variação entre os valores obtidos pelo ensaio e o valor calculado utilizando as equações 1 e 2 são aproximadamente 0,8% para T_{nr} e 0,1% para Ar₃. O cálculo para a Ar₁ não foi feito, pois não temos equações disponíveis na literatura.

4 CONCLUSÕES

- Os valores obtidos nos ensaios, para as Temperaturas Críticas, estão muito próximos aos valores calculados através dos modelos matemáticos.
- As retas de tendências (Figura 4), traçadas sobre a curva tensão x deformação mostra com nitidez a mudança de comportamento, da tensão x deformação, de cada uma das 4 regiões separadas pelas Temperaturas Críticas: T_{nr}, Ar₃ e Ar₁. Onde:
 - região 1: aclave suave da curva – indicativo da existência de recristalização;
 - região 2: aclave elevado – indicando pouca recristalização e mais recuperação;
 - região 3: declive acentuado – indicando um amaciamento pelo surgimento da ferrita, que é uma fase com menores tensão média de escoamento – TEM; e
 - região 4: aclave acentuado – indicando a ocorrência de encruamento.

REFERÊNCIAS

- 1 BARBOSA, R. **Simulação de processos industriais a partir do ensaio de torção a quente**, Minas Gerais, Brasil, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 1989.
- 2 REGONE, W. **Simulação da laminação a quente de um aço livre de intersticiais (if) através de ensaios de torção**, São Paulo, FAPESP, 2001.
- 3 FERRAZ, H. **Aço na construção civil**, São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2005.
- 4 PADILHA, A. F.; SICILIANO JR, F. **Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura**. 3^o. ed. São Paulo: ABM, 2005.
- 5 JONAS, J. J. Recovery, **Recrystallization and Precipitation under Hot working Conditions**, Nancy; France, v. 3, p. 917-1002, 1976.
- 6 SICILIANO JR, F. **Mathematical Modeling of the hot Strip Rolling of Nb Microalloyed Steels**. Tese de Doutorado. McGill University. Montreal, p. 165. 1999.
- 7 BARBOSA, R. A. N. M.; BORATTO, F. J. M.; SANTOS, D. B. **Fundamentos da laminação controlada**. Belo Horizonte: UFMG, 1989.
- 8 SICILIANO, F., JONAS, J.J. Mathematical modeling of hot strip rolling of microalloyed Nb, multiply-alloyed Cr-Mo, and plain C-Mn steels. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 31A, p. 511-530, 2000
- 9 MACCAGNO, T.M., JONAS, J.J. AND HODGSON, P.D.. Spreadsheet modeling of grain size evolution during rod rolling. **ISIJ International**, n. 36(6), p. 720-728, 1996..