

# ESTUDO COMPARATIVO DO ENCRUAMENTO E DA RECRISTALIZAÇÃO DOS AÇOS RÁPIDOS M2 E ABC III<sup>1</sup>

Fabio Stagettti<sup>2</sup>  
Antenor Ferreira Filho<sup>3</sup>  
Angelo Fernando Padilha<sup>4</sup>  
Clara Herrera Pulgarín<sup>5</sup>

## Resumo

Foram estudados dois aços rápidos, utilizados na confecção de serras fitas para corte de metais, que necessitam de alta resistência ao desgaste durante a sua utilização. Inicialmente, foi realizada a caracterização das amostras no estado como recebido, ou seja, "laminado a quente". Em seguida, foi realizado um estudo comparativo do encruamento e da recristalização de dois aços rápidos, M2 e ABC III. As temperaturas de transformação determinadas para os aços estudados são muito próximas às mencionados na literatura. No estado "laminado a quente", os carbonetos encontrados nos dois aços são compostos principalmente por vanádio e tungstênio e são provavelmente dos tipos MC e M<sub>6</sub>C, respectivamente. Tanto a morfologia quanto a distribuição dos carbonetos são diferentes nos dois aços. Apesar desta diferença de microestrutura, as curvas de endurecimento por deformação a frio são similares. Por outro lado, as curvas de recozimento isotérmico dos aços são diferentes, principalmente em temperaturas mais elevadas.

**Palavras-chave:** Aços rápidos; Carbonetos; Deformação a frio; Recristalização.

## COMPARATIVE STUDY OF WORK HARDENING AND RECRYSTALLIZATION OF HIGH SPEED STEELS M2 AND ABC III

### Abstract

Two high speed steels had been studied, used in the manufacturing of band saw for metal cutting, which need high wear resistance to the consumption during its use. Initially, the characterization of the samples as received "hot rolled". After that, comparative research was done on the work hardening and the recrystallization of two high speed steels, M2 and ABC III. The determined transformation temperatures for studied steel are very close to the ones mentioned in the literature. In the "hot rolling" state, the carbides found in two steels were composites mainly for vanadium and tungsten and are probably of MC and M<sub>6</sub>C types, respectively. The morphology as well as the distribution of the carbides is different in the two steels. In spite of this microstructure difference, the hardening curves for cold deformation are similar. On the other hand, the isothermal annealing curves of steel are different, mainly in higher temperatures.

**Key words:** High speed steels; Carbides; Cold deformation; Recrystallization.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 45º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 21 a 24 de outubro de 2008, Ipojuca - Porto de Galinhas - PE*

<sup>2</sup> *Engenheiro Metalurgista, mestrando em Engenharia Metalúrgica pela EPUSP, Supervisor de Qualidade da Brasmetal Waelzholz S.A.*

<sup>3</sup> *Engenheiro Metalurgista e de Produção, M.Sc.e Doutor em Metalurgia, Diretor Industrial da Brasmetal Waelzholz S.A.*

<sup>4</sup> *Prof.Dr. Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EPUSP.*

<sup>5</sup> *Dra. em Metalurgia, Pesquisadora do Departamento de Conformação e Microestrutura, Max Planck Institute, Düsseldorf, Alemanha.*

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços rápidos são assim denominados, pois possuem a característica de manter durezas elevadas (1.000 HV ou 65-75 HRC) durante o corte de materiais em altas velocidades<sup>(1)</sup> e são utilizados como matéria prima para a confecção de ferramentas de corte, tais como fresas, brocas, ferramentas de torneamento e também serras, que necessitam de alta resistência ao desgaste. Além de apresentar dureza elevada após tratamento térmico, eles têm também a capacidade de mantê-las quando expostos em temperaturas altas, de até 600°C. Por exemplo, apresentam 48 HRC em temperaturas por volta de 590°C.<sup>(2)</sup>

A microestrutura destes materiais é composta por carbonetos primários, cuja principal função é fornecer proteção contra o desgaste abrasivo e uma matriz de martensita revenida reforçada por carbonetos finamente dispersos que precipitam no revenimento, produzindo um endurecimento secundário. O objetivo deste endurecimento secundário é reter os carbonetos primários, mesmo sob elevadas temperaturas e tensões cisalhantes criadas na interface entre a aresta de corte das ferramentas e o material que está sendo trabalhado na usinagem.

Em geral, os aços rápidos são classificados pela AISI (American Iron Steel Institute),<sup>(3)</sup> que classifica 25 aços subdividindo-os em 2 grupos de aços rápidos: aços rápidos ao molibdênio ou molibdênio-tungstênio (grupo M) e os aços rápidos ao tungstênio (grupo T). Os aços rápidos ao tungstênio (grupo T) contêm tungstênio, cromo, vanádio, cobalto e carbono como principais elementos de liga. Os aços rápidos ao molibdênio (grupo M) contêm molibdênio, tungstênio, cromo, vanádio, cobalto e carbono como elementos de liga.

Aços semi-rápidos, contendo menor quantidade de elementos de liga em comparação aos aços rápidos convencionais, têm hoje o seu emprego bastante difundido em determinadas aplicações devido a sua relação custo/desempenho favorável<sup>(3)</sup>.

A produção dos aços-rápidos, como a dos demais aços, envolve fusão, fundição, deformação plástica a quente e a frio e tratamentos térmicos.

A microestrutura bruta de fundição dos aços rápidos é constituída de dendritas de austenita e de uma rede de carbonetos primários interdendríticos<sup>(4)</sup>. Para otimizar a microestrutura, as propriedades e o desempenho do material, os lingotes devem ser trabalhados mecanicamente para possibilitar a quebra da rede de carbonetos. Como resultado, o material trabalhado e recozido apresenta carbonetos (primários e secundários) dispersos numa matriz ferrítica.

Vários tipos de carbonetos, tais como MC, M<sub>6</sub>C, M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> e M<sub>2</sub>C, podem ocorrer na microestrutura dos aços rápidos. Os carbonetos do tipo MC (M=Zr; Ti; Nb e principalmente V) têm estrutura cristalina CFC e são os mais estáveis e aparecem com carbonetos primários.<sup>(5)</sup> No entanto, os carbonetos primários mais comuns apresentam fórmula geral M<sub>6</sub>C, sendo M principalmente ferro, tungstênio e molibdênio, mas sendo capaz de dissolver também cromo e vanádio em pequena quantidade, como substituto do ferro. Também apresentam estrutura cristalina CFC<sup>(2, 4, 5)</sup>. O carboneto do tipo M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> é geralmente um carboneto de cromo, mas também pode dissolver ferro, tungstênio ou molibdênio.<sup>(6)</sup> Os carbonetos do tipo M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> apresentam estrutura HC, são mais raros e ocorrem quando a composição química do aço apresenta alta relação C/Cr. Os carbonetos do tipo M<sub>2</sub>C (M sendo molibdênio e tungstênio) têm estrutura HC, são menos estáveis e ocorrem mais como carbonetos secundários. Todavia, os carbonetos secundários são mais frequentemente do tipo M<sub>6</sub>C. Roberts<sup>(7)</sup> estudou a microestrutura de um aço rápido

M2 no estado recozido e observou a morfologia de alguns desses tipos de carbonetos.

Os aços rápidos para confecção de serras fitas são obtidos basicamente pelo processo de fundição com posterior conformação plástica, geralmente realizada por laminação a frio e recozimentos posteriores.

Durante a laminação a frio dos aços ocorre acentuado endurecimento por deformação ou encruamento, a dureza aumenta e a ductilidade diminui, dificultando a continuação da deformação. Os aços rápidos apresentam um encruamento ou endurecimento por deformação muito alto devido à alta quantidade de carbonetos, que dificultam a mobilidade das discordâncias.

Após a deformação a frio, com o intuito de amolecer material encruado e aumentar a sua ductilidade é realizado um tratamento térmico de recozimento sub-crítico, abaixo da temperatura de transformação  $Ac_1$  no qual ocorre o fenômeno da recristalização. As temperaturas de transformação  $Ac_1$  e  $Ac_3$  para o aço-rápido M2 são, respectivamente,  $810^\circ\text{C}$  e  $850^\circ\text{C}$ .<sup>(1)</sup>

Neste trabalho são estudados dois aços rápidos, utilizados na confecção de serras fitas para corte de metais, que necessitam de alta resistência ao desgaste durante a sua utilização. Estudar o endurecimento por deformação a frio e a recristalização nesta classe de aços é relevante, pois eles freqüentemente são laminados a frio e recozidos na etapa final de processamento, antes da confecção da serra. A comparação entre o comportamento de um material tradicional (M2) e de um material mais recente (ABC III) pode revelar aspectos interessantes.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados neste trabalho são os aços rápidos denominados M2 e ABCIII, de procedência alemã, fornecidos na forma de chapas laminadas a quente, com 3,20 mm e 2,90 mm de espessura, respectivamente e com larguras de 267 mm. Os aços foram laminados em temperatura ambiente, com reduções de espessura variando entre 3,0% e 50,0%, em um laminador industrial. As amostras obtidas foram usadas para determinar as curvas de endurecimento por deformação. Posteriormente foram realizados tratamentos térmicos para a recuperação e recristalização das amostras com aproximadamente 25% de redução na espessura. As amostras foram submetidas a recozimentos com duração de 1 hora em temperaturas entre  $100^\circ\text{C}$  e  $750^\circ\text{C}$ . Este recozimento foi realizado em forno mufla de laboratório com aquecimento resistivo. A temperatura foi controlada dentro de um intervalo de  $\pm 10^\circ\text{C}$  e o resfriamento foi em água.

Também foram determinadas curvas de recozimento isotérmico, onde as amostras foram recozidas em temperaturas de  $600^\circ\text{C}$ ,  $650^\circ\text{C}$ ,  $700^\circ\text{C}$  e  $750^\circ\text{C}$ , por períodos de 15 min, 30 min, 60 min, 120 min, 240 min e 480 minutos, para cada uma das temperaturas.

Foram realizados ensaios de dilatométrica com o objetivo de se determinar as temperaturas de transformações dos dois aços em estudo. A partir das tiras laminadas a quente, foram usinados vários corpos-de-prova de formato cilíndrico com 2 mm de diâmetro e 12 mm de comprimento. Cada amostra foi aquecida a partir da temperatura ambiente até  $1.050^\circ\text{C}$ , permanecendo-se nesta temperatura por 1 minuto e em seguida resfriada ao ar. Foi utilizada taxa de aquecimento de  $1^\circ\text{C/s}$  para cada tipo de aço.

A caracterização microestrutura foi realizada com auxílio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com análise por dispersão de energia (EDS).

O ensaio de tração foi utilizado na caracterização dos materiais no estado “como recebido”. Este ensaio possibilita a obtenção de várias propriedades mecânicas do material, como: limite de escoamento, limite de resistência, módulo de elasticidade, alongamento total até a fratura e coeficiente de encruamento.

A dureza Vickers foi utilizada na caracterização dos materiais no estado como recebido, na determinação das curvas de endurecimento por deformação e na avaliação das amostras após recozimento. A carga utilizada foi de 10 kg, onde foram realizadas 10 medições em cada corpo de prova e, como resultado, foi considerado a média das medições.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

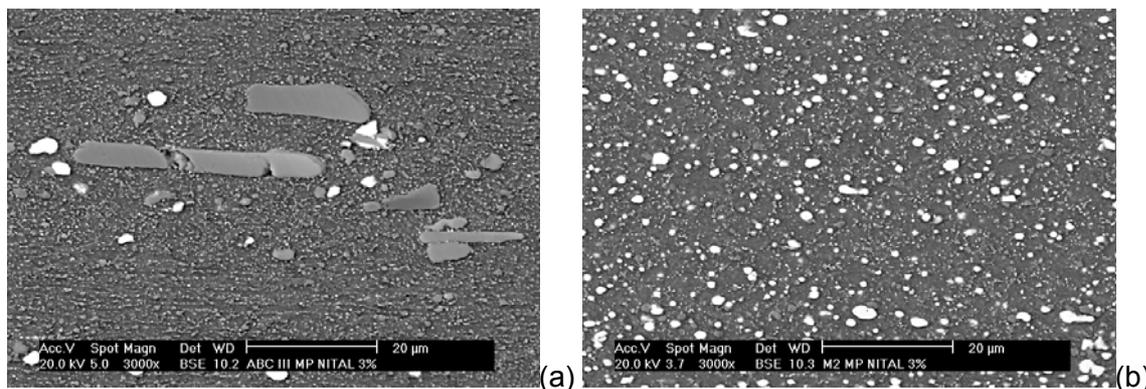
Os dois aços foram fornecidos na forma de bobinas laminadas a quente. Em seguida, são apresentados resultados da caracterização inicial dos dois aços. A Tabela 1 apresenta a composição química encontrada nos aços estudados:

**Tabela 1** – Composições químicas dos aços rápidos (% em massa).

	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	V	W
<b>M2</b>	0,904	0,356	0,026	0,001	0,294	4,310	4,500	1,780	6,170
<b>ABC III</b>	0,950	0,473	0,022	0,002	0,319	4,090	2,720	2,280	2,810

Nota-se que as principais diferenças de composição química entre as duas amostras estão nos elementos molibdênio (Mo), vanádio (V) e tungstênio (W), onde o aço M2 apresenta maiores teores de Mo e W, enquanto que o aço ABC III possui maior quantidade de V.

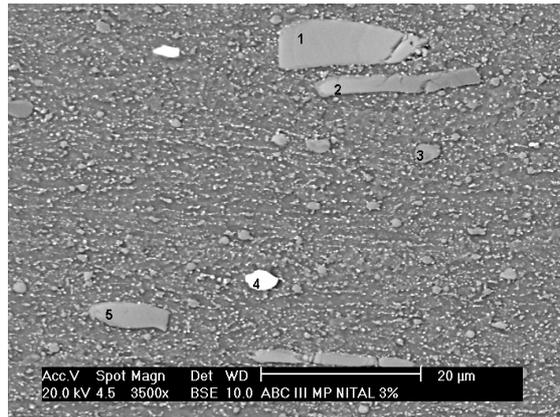
A Figura 1 apresenta as micrografias das amostras no estado “laminado a quente”, obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) onde, para cada um dos aumentos utilizados, também foi utilizada a técnica de elétrons retro-espalhados (BSE), sempre na mesma região de análise.



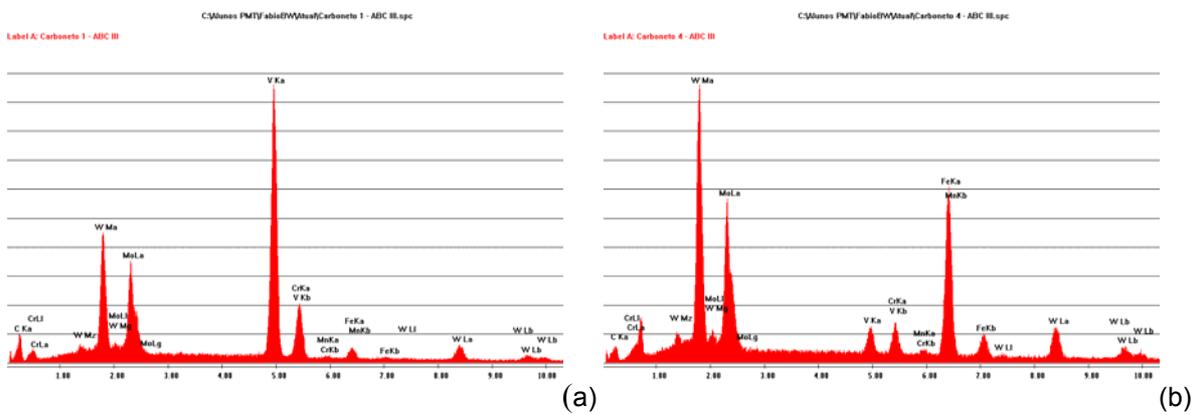
**Figura 1** – Microestrutura da amostra do aço ABC III (a) e M2 (b) obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando elétrons retro-espalhados, após ataque com Nital 3%. Aumento 3.000 x.

Observa-se, via microscopia eletrônica de varredura, uma dispersão de carbonetos mais homogênea na matriz do aço M2. Em contrapartida, notam-se carbonetos maiores e distribuídos de forma heterogênea no aço ABC III.

A Figura 2 enumera os carbonetos da amostra do aço rápido ABC III que foram identificados, em uma micrografia obtida pela técnica de elétrons retro-espalhados, cujas análises por EDS são apresentadas na Figura 3.



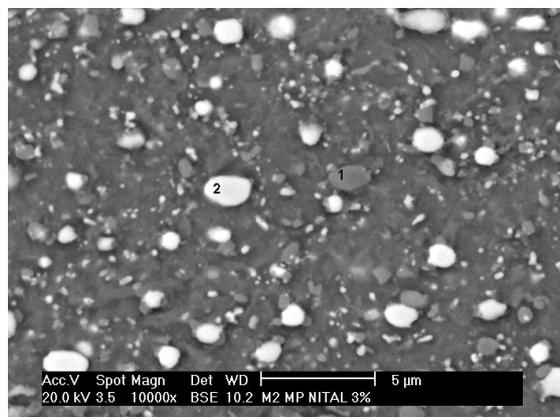
**Figura 2** – Identificação dos carbonetos do aço ABC III, utilizando elétrons retro-espalhados após ataque com Nital 3%. Aumento 3.500 x.



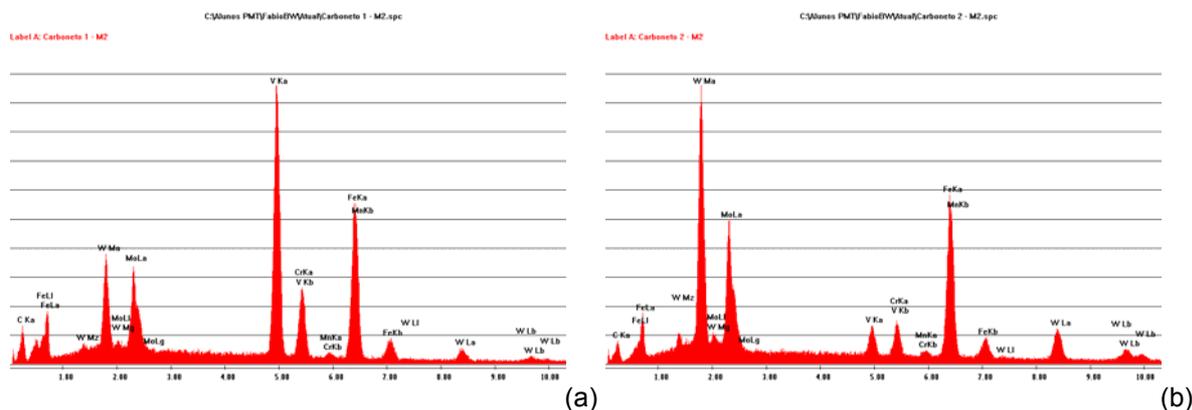
**Figura 3** – Espectro de energia dispersiva dos carbonetos 1, 2, 3 e 5 (a) e do carboneto 4 (b)

A análise dos espectros de energia dispersiva realizada na amostra do aço ABC III no estado “laminado a quente” mostra que os carbonetos identificados como carbonetos “1”, “2”, “3” e “5” (Figura 2) são constituídos principalmente por vanádio (Figura 3a), provavelmente do tipo MC. O carboneto identificado como carboneto “4” apresenta principalmente tungstênio (Figura 3b), possivelmente do tipo  $M_6C$ .

A Figura 4 enumera os carbonetos da amostra do aço M2 que foram identificados, onde também foi utilizada uma micrografia obtida pela técnica de elétrons retro-espalhados, cujos espectros de EDS são apresentados na Figura 5.



**Figura 4** – Identificação dos carbonetos do aço M2, utilizando elétrons retro-espalhados após ataque com Nital 3%. Aumento 10.000 x.



**Figura 5** – Espectro de energia dispersiva do carboneto 1 (a) e do carboneto 2 (b)

A análise dos espectros de energia dispersiva realizada na amostra do aço M2 no estado “laminado a quente” mostra que o carboneto identificado como carboneto “1” é constituído principalmente por vanádio (Figura 5a), muito provavelmente do tipo MC. O carboneto identificado como carboneto “2” apresenta principalmente tungstênio (Figura 5b), possivelmente do tipo  $M_6C$ .

A Tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas dos aços rápidos no estado “laminado a quente”, onde nota-se grande similaridade nos resultados encontrados para os dois aços.

**Tabela 2** – Propriedades mecânicas dos aços rápidos

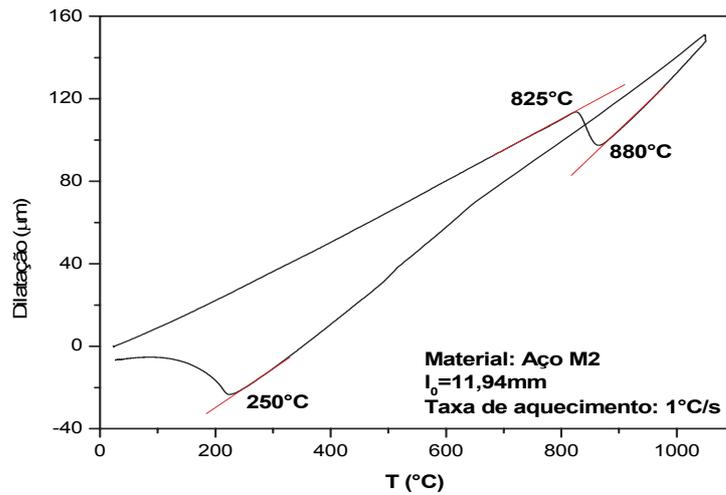
	<b>Dureza Vickers (HV10)</b>	<b>Lim. Resist. (MPa)</b>	<b>Lim. Escoam. (MPa)</b>	<b>Along. % (A080)</b>
<b>M2</b>	249,8	781	398	14,6
<b>ABC III</b>	242,6	795	421	14,9

As principais temperaturas de transformação determinadas por meio de ensaios dilatométricos para os aços analisados são apresentadas na tabela 3 abaixo. A principal diferença está na temperatura Ms dos dois aços e se deve provavelmente ao maior teor de carbono do aço ABC III.

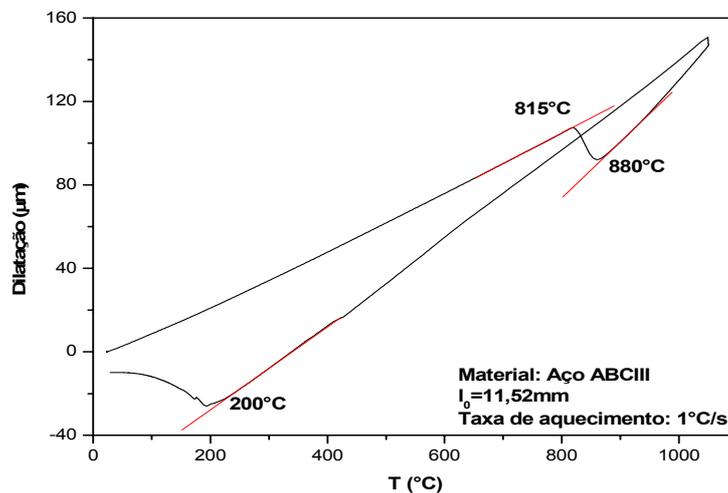
**Tabela 3** - Temperaturas  $Ac_1$ ,  $Ac_3$  e Ms medidas através dos ensaios dilatométricos, para os aços M2 e ABCIII.

<b>Material</b>	<b>Tx. Aq (°C/s)</b>	<b><math>Ac_1</math> (°C)</b>	<b><math>Ac_3</math> (°C)</b>	<b>Ms (°C)</b>
Aço M2	1	825	880	250
Aço ABCIII	1	815	880	200

As Figuras 6 e 7 apresentam as curvas de dilatação em função da temperatura, indicando as temperaturas de início e fim da transformação para  $\gamma$  no aquecimento e as temperaturas de início da transformação  $\gamma \rightarrow \alpha'$ , no resfriamento.

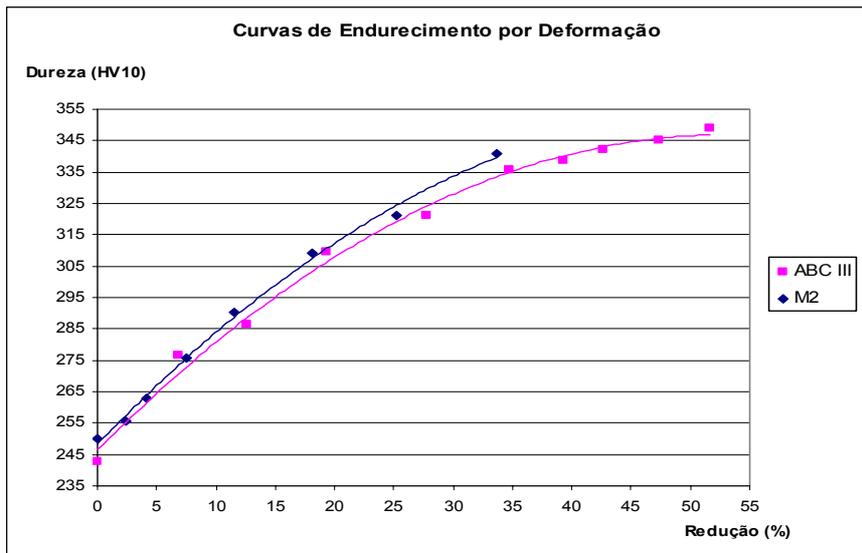


**Figura 6** – Curva de dilatação em função da temperatura no resfriamento para o aço M2 com aquecimento a  $1^\circ\text{C/s}$ .



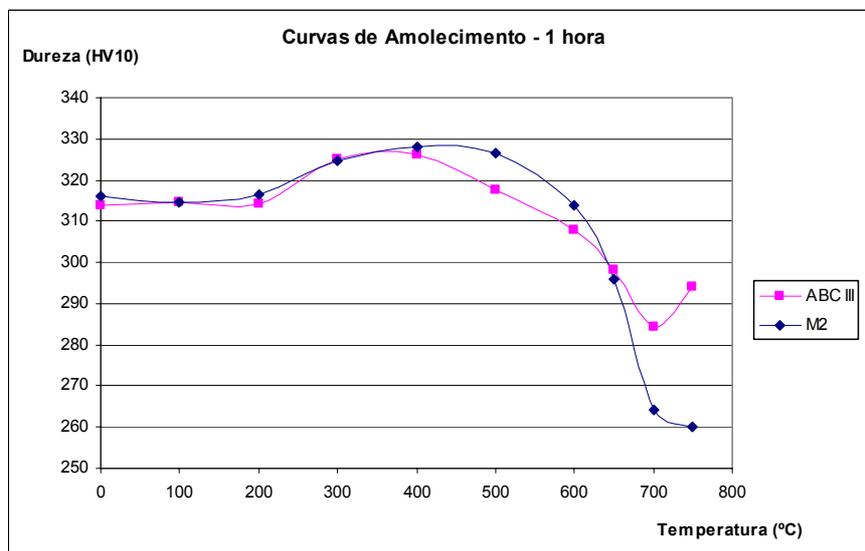
**Figura 7** – Curva de dilatação em função da temperatura no resfriamento para o aço ABCIII com aquecimento a  $1^\circ\text{C/s}$ .

O endurecimento por deformação foi estudado por meio de medidas de dureza na seção normal à direção de laminação. A Figura 8 apresenta as curvas de endurecimento por deformação dos dois aços rápidos. Pode-se notar que os dois aços apresentam curvas de endurecimento por deformação muito similares.



**Figura 8** – Curvas de endurecimento por deformação a frio dos aços ABC III e M2, dureza em função da % de redução em espessura.

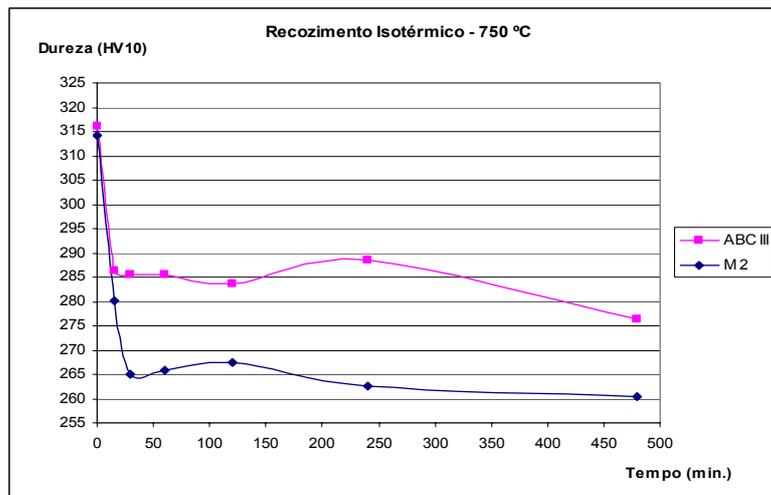
As amostras dos dois aços com redução de 25% foram submetidas a recozimentos com duração de 1 hora em temperaturas entre 100°C e 750°C. A figura 9 mostra as curvas de amolecimento das duas amostras, onde nota-se para o aço M2, um acréscimo na dureza após o recozimento entre 200°C e 500°C. Para o aço ABC III, o endurecimento ocorreu entre 200°C e 400°C, onde acima desta temperatura, nota-se um decréscimo de dureza. Provavelmente, o endurecimento nos dois aços foi causado por precipitação. Após 500°C verifica-se nos dois aços a redução gradativa da dureza.



**Figura 9** – Curvas de amolecimento dos aços ABC III e M2 em função da temperatura, após deformação a frio de 25 %.

As amostras com redução de 25% foram submetidas a recozimentos isotérmicos entre 600°C e 750°C, com duração de 15 min, 30 min, 60 min, 120 min, 240 min e 480 minutos para cada uma das temperaturas. A Figura 10 mostra os

valores de dureza obtidos em função do tempo de recozimento para a temperatura mais alta (750 °C).



**Figura 10** – Curvas de recozimento isotérmico a 750°C em função do tempo, dos aços ABC III e M2, após deformação a frio de 25 %.

Estudos mais detalhados serão realizados com o intuito de interpretar as curvas de recozimento isotérmico, onde serão realizadas as caracterizações microestruturais das amostras tratadas termicamente, em função da temperatura e tempo empregados.

#### 4 CONCLUSÕES

Os ensaios de dilatométrica revelaram que as temperaturas de transformação dos aços estudados são muito próximas às mencionados na literatura. As análises microestruturais dos aços ABC III e M2 no estado “laminado a quente” mostram que os carbonetos encontrados nas amostras são compostos principalmente por vanádio e tungstênio, provavelmente dos tipos MC e M<sub>6</sub>C respectivamente, conforme indicado pela literatura. Tanto a morfologia quanto a distribuição dos carbonetos são diferentes entre os dois aços. Apesar desta diferença de microestrutura, as curvas de endurecimento por deformação a frio são similares. Por outro lado, as curvas de recozimento isotérmico dos aços são diferentes, principalmente em temperaturas mais elevadas.

#### REFERÊNCIAS

- 1 Hoyle, G. **High Speed Steel**. Butterworth & Co., 1 ed., 1988
- 2 Jesus, E. R. B. **Ferramentas de usinagem em aço rápido AISI M2 obtido por conformação por “spray”**. 2004. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – São Paulo.
- 3 Gioielli, P.C. **Influência do nióbio no tamanho de grão de um aço rápido com matriz do aço M2**. 1995 - Dissertação (Mestrado) – EPUSP – São Paulo.
- 4 Magnabosco, R. **Relação entre estrutura e propriedades mecânicas de aços rápidos**. 2000 – Revista Pesquisa e Metalurgia FEI, nº 19.
- 5 Gill, J. P. **Tool Steel**. American Society for Metals, 1944
- 6 Wilson, R. **Metallurgy and heat treatment of tool steels**. McGraw-Hill, 1975.
- 7 Roberts, G. A. **Tool steels**. Metals Park : ASM, 3 ed., 1961