

ANÁLISE DO EFEITO DO GRAU DE DEFORMAÇÃO PRÉVIA E DO TRATAMENTO TÉRMICO NO ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO DO AÇO DIN CK75¹

Paulo Victor Maida de Donato²
Luis Fernando Maffei Martins³
Júlio César Dutra⁴

Resumo

Em um aço com estrutura de ferrita supersaturada pode-se obter, por um tratamento térmico conhecido por envelhecimento ou endurecimento por precipitação, nucleação e crescimento de partículas de segunda fase, que dificultam a movimentação de discordâncias. O presente trabalho tem por objetivo analisar a influência das variáveis do tratamento de envelhecimento, assim como da deformação previamente aplicada ao material, no endurecimento do aço DIN CK75. Para isto, amostras com quatro graus de deformação distintos foram aquecidas em seis temperaturas por intervalos de tempo variados, acompanhados de resfriamento rápido, obtendo-se por meio de ensaios de dureza curvas de endurecimento por precipitação. A deformação previamente aplicada ao material, assim como as variáveis do tratamento térmico, tais como temperatura e tempo, exercem uma influência direta sobre os resultados finais do material endurecido por precipitação, por interferirem no tamanho, distribuição e quantidade total de precipitados. Com o aumento do grau de deformação prévio e da temperatura de tratamento, ocorre mais facilmente a precipitação, e à medida que se aumenta o tempo em determinada temperatura, aumenta a dureza do material, até um valor máximo, ocorrendo uma queda na dureza em intervalos de tempos superiores.

Palavras-chave: Endurecimento por precipitação; Envelhecimento; DIN CK75.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF PREVIOUS THICKNESS REDUCTION AND HEAT TREATMENT ON PRECIPITATION HARDENING IN STEEL DIN CK75

Abstract

Nucleation and growth of second-phase particles in supersaturated ferrite structure in carbon steels may halt the movement of dislocations. This can be accomplished by a two-step heat treatment called solution treatment and aging. The present paper analyses the influence of both time and temperature of aging treatment and thickness reduction on the strengthening of a DIN CK75 steel. Samples with four distinct previous thickness reductions were heated in six different temperatures and time intervals, followed by water cooling. Hardening curves were obtained from Rockwell hardness tests. It was found that both previous thickness reductions and heat treatment parameters (temperature and time) influence directly on the strengthening of this steel. The higher the thickness reduction and temperature of aging treatment, the easier precipitation takes place and the sooner the highest strength is obtained. Overaging process was obtained in some combinations of time/temperature.

Key-words: Precipitation hardening; Aging; DIN CK75.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² Estagiário da Mangels Ind. e Com. Ltda., Divisão Aços e estudante de graduação do Curso de Engenharia Metalúrgica do Centro Universitário da FEI. e-mail: p.donato@mangels.com.br.

³ Mestre, Engenheiro Metalurgista - Supervisor de Pesquisa e Desenvolvimento da Mangels Ind. e Com. Ltda., Divisão Aços, SP. e-mail: l.martins@mangels.com.br.

⁴ Doutor, Engenheiro Metalurgista. Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais do Centro Universitário da FEI, SP. e-mail: jdutra@fei.edu.br.

1 INTRODUÇÃO

A dureza e a resistência de ligas metálicas podem ser aumentadas pela precipitação de partículas extremamente pequenas dispersas homoganeamente na matriz. O tratamento térmico que permite tal precipitação é denominado envelhecimento⁽¹⁾ ou endurecimento por precipitação.⁽²⁾ Este trabalho analisa a evolução de dureza de um aço DIN CK75, com quatro distintos graus de deformação, no tratamento de envelhecimento, em diferentes tempos e temperaturas.

O estado de partida para o tratamento de envelhecimento no aço ao carbono é uma estrutura de ferrita supersaturada, e inicia-se com a formação de cristais de cementita, que ocorre por nucleação. Após a nucleação, os precipitados de cementita crescem devido à difusão do carbono da ferrita circunvizinha a essas partículas, processo este denominado crescimento.

É possível que durante o crescimento de partículas já formadas haja formação de núcleos adicionais, ou seja, o fenômeno de nucleação pode continuar a ocorrer simultaneamente com o crescimento das partículas anteriormente nucleadas.

Existem dois modos básicos para que ocorra a nucleação dos precipitados. O primeiro é conhecido como nucleação heterogênea, no qual há uma maior facilidade da formação de uma partícula de segunda fase, tipicamente em defeitos cristalinos, tais como discordâncias, nós de discordâncias, contornos especiais, sub-contornos ou contornos de grão. O segundo, a nucleação homogênea, ocorre pela formação espontânea do núcleo, através de flutuações de composição de soluto fazendo com que átomos agrupem-se no reticulado da matriz e inicie o crescimento da partícula de segunda fase. Entretanto, este tipo de nucleação ocorre geralmente com considerável dificuldade, sendo mais comum a ocorrência de nucleação heterogênea.

A variação da energia livre do sistema que acompanha a formação do núcleo pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\Delta G = \Delta G_v + \Delta G_s + \Delta G_m$$

onde ΔG_v é a energia livre associada à formação de um certo volume de cementita. O segundo termo, ΔG_s , é a energia livre de superfície criada entre a cementita e a ferrita, que é sempre positiva. O último termo, ΔG_m , representa a energia de deformação que engloba tanto a energia de deformação da matriz (ferrita) como a do núcleo (cementita), sendo decorrente do fato de que o volume do núcleo de cementita não é necessariamente igual ao volume de ferrita anteriormente existente. O termo energia de deformação varia diretamente com o volume da partícula precipitada, o que também é válido para a variação de energia livre volumétrica, ΔG_v .⁽²⁾

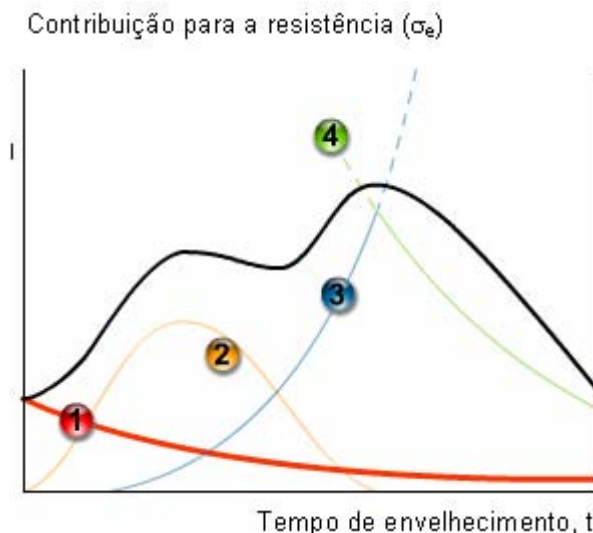
Em geral, a precipitação não começa logo no início do tratamento térmico, ela é detectável somente após um intervalo de tempo finito, conhecido por tempo de incubação; este representa o intervalo de tempo necessário para a formação de núcleos estáveis (e visíveis).

A temperatura que o material será tratado é o fator de maior influência na velocidade de precipitação; para temperaturas muito baixas, são necessários geralmente longos períodos de tempo para que a precipitação seja completa devido à velocidade de difusão ser muito baixa. Em temperaturas logo abaixo da linha solvus (temperaturas muito altas), a velocidade de precipitação também é muito pequena devido à pequena supersaturação da ferrita; assim, a nucleação é muito lenta e controlada pela velocidade com que os núcleos se formam. Em temperaturas médias, entre os dois extremos mencionados, a velocidade de precipitação pode atingir um máximo,

fazendo com que o tempo para término da precipitação seja pequeno. Nesse intervalo, a combinação de velocidades moderadas de difusão e de potencial termodinâmico para a nucleação torna mais rápida a precipitação.

Apesar de haver vários mecanismos de endurecimento,⁽²⁾ de um modo geral, pode-se dizer que um aumento de dureza ou na resistência dá-se por uma maior dificuldade de movimentação das discordâncias.⁽³⁾ Assim, quanto maior a quantidade de partículas e menor o seu tamanho, maior será a tensão necessária para a movimentação de discordâncias e, portanto, maior será a resistência ou endurecimento do material.

O endurecimento por precipitação conseguido em determinadas ligas metálicas pode ser explicado pela presença de vários mecanismos. A Figura 1, mostrada a seguir, apresenta de maneira esquemática a contribuição dos diversos mecanismos que podem estar presentes no tratamento de envelhecimento. Nota-se que no início do tratamento há um empobrecimento de soluto em solução sólida e, portanto, a contribuição do endurecimento por solução sólida é tanto menor quanto maior for a frequência de precipitação (coerente, semi-coerente ou incoerente). A curva 1, portanto, apresentará um decréscimo na sua contribuição.



Fonte: Adaptado de Marshall et al. (2006)

Figura 1. Curvas esquemáticas de contribuição de diversos mecanismos para o aumento na resistência de ligas metálicas submetidas ao tratamento de precipitação. Contribuição da (1) solução sólida; (2) coerência das fases; (3) tipo de interface; e (4) de dispersão de partículas.

A Curva 2, por sua vez, representa o endurecimento provocado pela presença de partículas de segunda fase coerentes, tipicamente zonas de Guinier-Preston. À medida que estas zonas crescem, a contribuição é cada vez mais positiva até atingir um máximo, que corresponde à distância média entre estas zonas ser aproximadamente similar ao raio limitante de curvatura das discordâncias. A curva 3, por sua vez, mostra a contribuição com relação ao tipo de interface. Nota-se que à medida que a quantidade e o tamanho dos precipitados coerentes aumentam, maior é o papel da interação do tipo química, fazendo com que as discordâncias tenham de cisalhar as partículas de segunda fase. A partir de um determinado tamanho, no entanto, não é mais possível a manutenção da coerência destas partículas, fazendo com que as discordâncias não sejam mais capazes de cisalhar as discordâncias.

Finalmente, a curva 4 mostra que quando novos precipitados incoerentes se formam, o endurecimento por dispersão torna-se o mecanismo dominante de aumento na resistência. Em tempos cada vez mais longos, estes precipitados tendem a crescer e, portanto, diminuem seu efeito no endurecimento. A composição de todas estas curvas pode ser vista de maneira contínua (porém, esquemática), mostrando o desenvolvimento da resistência da liga metálica durante o tratamento de envelhecimento.

Sabe-se que a perda de coerência do precipitado é um dos fatores que leva ao fenômeno de superenvelhecimento, que provoca diminuição na resistência à movimentação de discordâncias. Outro fator que provoca o superenvelhecimento é o crescimento contínuo dos precipitados. O superenvelhecimento é freqüentemente encontrado por meio de manutenção da liga metálica em intervalos de tempo demasiadamente longos na temperatura de tratamento (Figura 1, lado direito). O crescimento contínuo de precipitados pode ocorrer pelo mecanismo de maturação de Ostwald (Ostwald Ripening), no qual as partículas de segunda fase crescem às custas das menores que são dissolvidas e que, portanto, desaparecem⁽⁵⁾. Com isso, haverá um tamanho médio de partícula comparativamente maior e fração volumétrica conseqüentemente menor, com diminuição na resistência do material.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Utilizou-se para o desenvolvimento deste trabalho o aço DIN CK75, com composição química apresentada na Tabela 1, mostrada a seguir. Foram extraídas amostras na condição laminada a frio na Mangels, Divisão Aços, com três graus de deformação distintos (5, 32 e 73% de redução de espessura) e amostras deste mesmo material na condição laminada a quente, ou seja, 0% de deformação a frio.

Tabela 1. Composição química das amostras deste estudo.

%C	%Mn	%Si	%Al	%P	%S	%Cr
0,728	0,72	0,19	0,0042	0,017	0,004	0,26

Estas amostras foram colocadas em um forno tipo mufla previamente aquecido em temperaturas variadas e, assim, permaneciam dentro do forno por intervalos de tempo variados. As temperaturas utilizadas para o estudo foram 100, 200, 300, 350, 400 e 500°C e os intervalos de tempo foram 1; 1,5; 3; 6; 15; 45 minutos e 1; 2; 4 e 6 horas. Em seguida, as amostras foram retiradas do forno e resfriadas em água.

Finalmente, as amostras foram preparadas superficialmente para que ensaios de dureza Rockwell superficial 30N fossem realizados, com pré-carga de 3 kgf (29,42N) e carga total de 30 kgf (294,2 N) por causa da espessura reduzida das amostras. Estes ensaios foram realizados em um durômetro digital marca Wilson 600.

3 RESULTADOS

As Tabelas 2 (a, b, c e d) indicam os valores de dureza encontrados nos materiais sem deformação prévia e com 5, 32 e 73% de deformação, respectivamente, após o tratamento de envelhecimento. Os valores foram subseqüentemente plotados em curvas comparativas para os quatro graus de deformação em estudo em função da temperatura e tempo de tratamento, demonstradas na Figura 2.

Tabela 2. Valores das durezas, na escala 30N, dos materiais endurecidos por precipitação em variados tempos e temperaturas; (a) sem deformação; (b) com 5% de deformação; (c) com 32% de deformação; e (d) com 73% de deformação.

(a)

		sem deformação					
		Temperatura de tratamento (°C)					
		100	200	300	350	400	500
Tempo de tratamento	0	42,6	42,6	42,7	42,6	42,9	42,8
	1 min	-	-	42,0	42,6	43,4	43,0
	1,5 min	-	-	42,8	43,5	43,0	43,7
	3 min	-	42,6	41,9	42,4	43,2	43,5
	6 min	42,1	42,1	43,0	43,4	43,1	43,8
	15 min	42,3	42,3	43,7	43,1	43,6	43,1
	45 min	42,7	43,7	43,1	43,1	43,0	44,0
	1 hr	42,4	42,4	42,7	43,8	43,7	43,8
	2 hrs	42,0	44,0	43,1	42,8	43,1	42,8
	4 hrs	42,4	44,0	42,8	42,5	43,0	43,0
	6 hrs	42,6	43,2	42,9	42,7	43,6	44,1

(b)

		5% de deformação					
		Temperatura de tratamento (°C)					
		100	200	300	350	400	500
Tempo de tratamento	0	45,3	45,4	45,6	45,4	45,4	45,4
	1 min	-	-	46,4	46,0	45,9	47,6
	1,5 min	-	-	45,3	45,7	47,5	47,8
	3 min	-	44,9	46,0	47,1	48,3	48,7
	6 min	46,2	44,9	48,2	47,8	48,4	48,7
	15 min	44,6	46,3	48,1	48,1	48,4	48,6
	45 min	45,2	47,6	47,8	48,2	48,2	48,6
	1 hr	44,6	48,0	48,3	48,2	48,7	48,1
	2 hrs	45,4	48,0	48,6	48,0	48,3	47,8
	4 hrs	45,2	47,4	48,8	48,8	48,2	47,7
	6 hrs	46,1	48,7	48,9	48,4	47,8	47,7

(c)

		32% de deformação					
		Temperatura de tratamento (°C)					
		100	200	300	350	400	500
Tempo de tratamento	0	48,7	50,3	50,2	50,1	50,1	50,1
	1 min	-	-	51,3	51,9	51,8	53,9
	1,5 min	-	-	51,2	52,0	54,1	54,2
	3 min	-	50,4	53,3	54,0	54,0	53,2
	6 min	49,3	51,2	53,7	54,1	54,3	52,4
	15 min	48,5	51,5	53,7	54,6	54,3	51,6
	45 min	50,8	51,8	54,5	55,2	53,6	50,2
	1 hr	50,5	52,5	54,7	54,1	52,9	50,1
	2 hrs	49,9	52,5	54,4	54,0	52,8	47,4
	4 hrs	50,1	52,0	54,2	54,0	52,9	46,7
	6 hrs	50,8	52,8	53,7	53,8	52,8	46,1

(d)

		73% de deformação					
		Temperatura de tratamento (°C)					
		100	200	300	350	400	500
Tempo de tratamento	0	62,7	63,1	64,1	64,1	64,1	64,1
	1 min	-	-	67,8	67,8	67,7	68,2
	1,5 min	-	-	67,7	67,9	68,1	68,3
	3 min	-	63,1	69,1	68,0	68,0	67,3
	6 min	63,7	66,2	68,9	68,0	68,1	67,2
	15 min	64,1	66,6	69,4	68,6	68,5	65,8
	45 min	63,9	66,5	69,5	67,7	67,8	65,6
	1 hr	64,4	66,8	69,6	67,4	67,6	63,7
	2 hrs	65,0	66,8	69,4	67,3	67,0	62,7
	4 hrs	64,2	66,6	68,8	67,4	66,3	61,6
	6 hrs	65,0	66,9	68,7	67,8	66,1	61,5

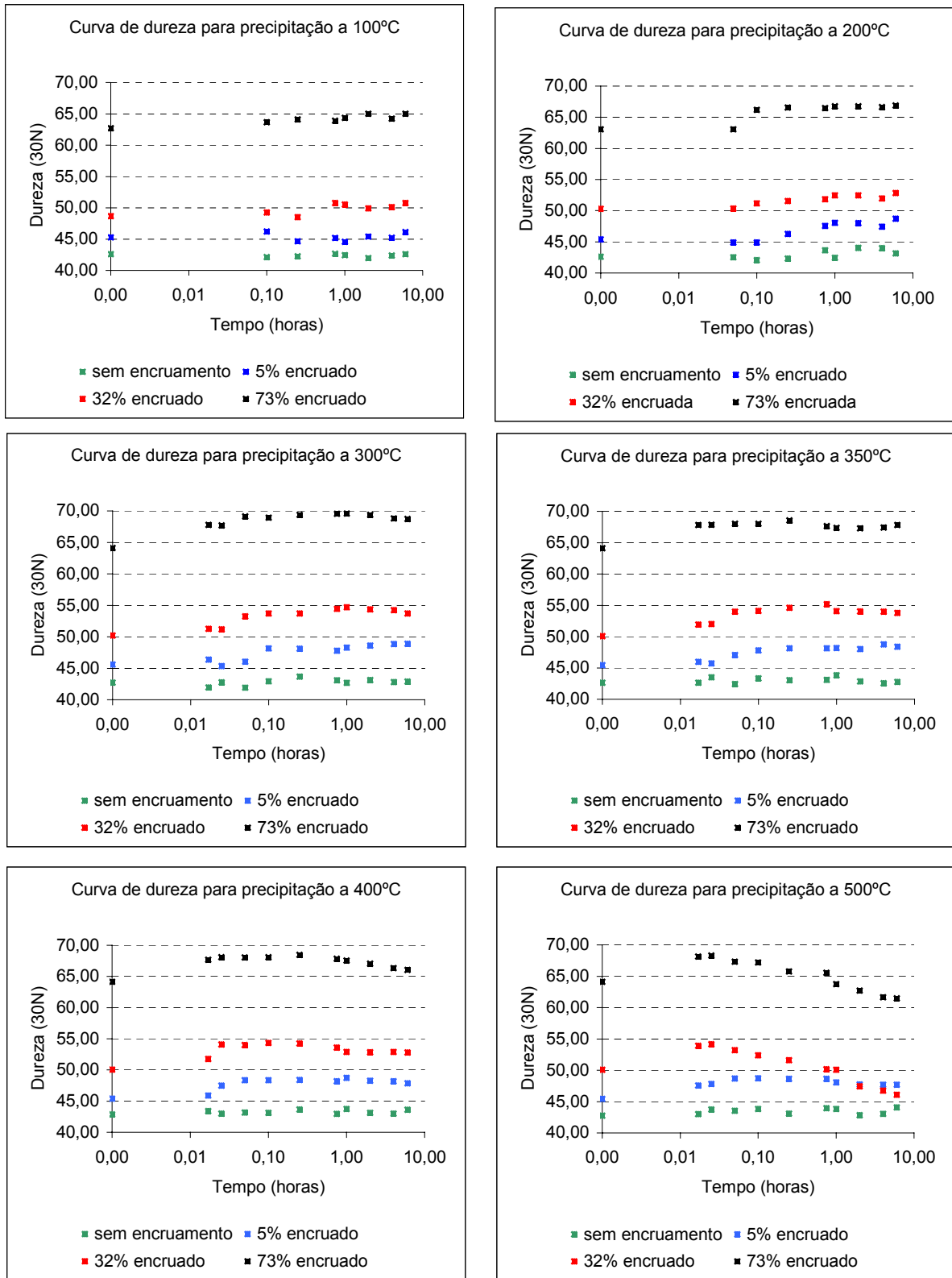


Figura 2. Curvas de dureza dos materiais em estudo (com 0, 5, 32 e 70% de grau de deformação) endurecidos por precipitação em diferentes tempos e temperaturas.

Foram plotados também gráficos da dureza em função do tempo e da temperatura de tratamento, para os materiais em estudo, em um mesmo plano de eixos para melhor visualização da influência destes dois parâmetros de processo. Estas curvas estão demonstradas na Figura 3.

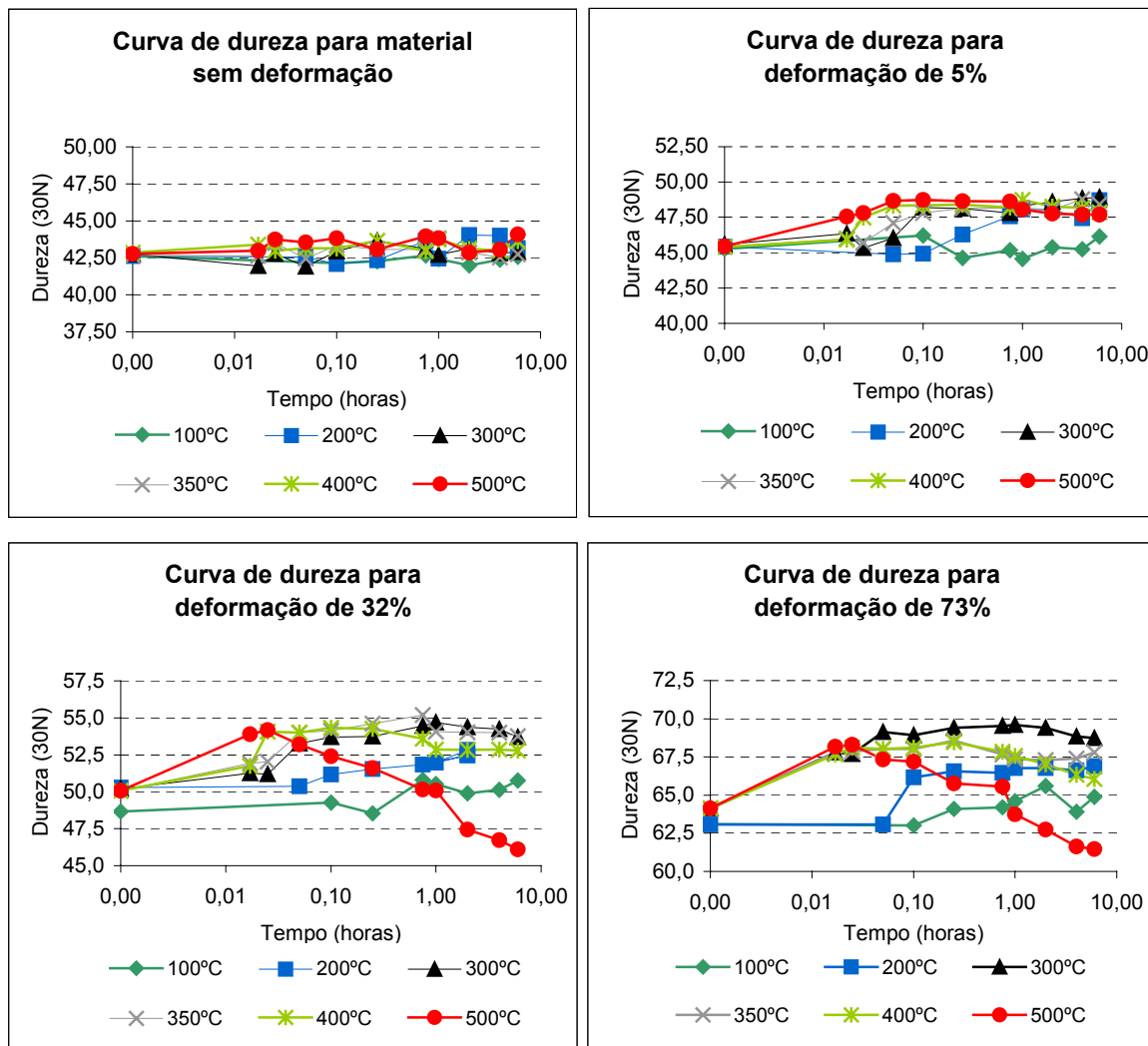


Figura 3. Curvas de dureza do material sem deformação e com 5%, 32% e 73% de deformação, endurecidos por precipitação.

4 DISCUSSÃO

Inicialmente observa-se que quanto menor a temperatura, maior é o tempo para início do endurecimento. Por sua vez, a dureza aumenta à medida que se aumenta o tempo de tratamento, até atingir um valor máximo, após o qual, continuado o tratamento, a dureza diminui (superenvelhecimento).

Com relação à deformação prévia exercida sobre o aço, a sua variação tende a modificar o comportamento do material endurecido por precipitação. Um exemplo pode ser observado no tratamento a 500°C realizado neste trabalho, no qual as amostras com 32 e 73% de grau de encruamento sofrem uma queda acentuada de sua dureza com o aumento do tempo de tratamento, fenômeno este conhecido como superenvelhecimento; já com uma deformação prévia de 5%, ou ainda sem deformação, com o aumento do tempo de tratamento, até um máximo de 6 horas, a dureza manteve-se estável, não sofrendo uma queda acentuada, como pode ser visto na Figura 2. Isto vem ao encontro do proposto pela teoria, já que a nucleação de precipitados ocorre, preferencialmente, em discordâncias, e haverá um acúmulo de discordâncias para maiores graus de deformação e, conseqüentemente, maior e mais rápido o endurecimento por precipitação nestes materiais.

No entanto, se comparados os graus de deformação de 32 e 73%, nota-se que não houve modificações apreciáveis nos resultados, acreditando-se que o motivo de tal resultado seja que a quantidade de discordâncias acumuladas com 32% de encruamento já seja o suficiente para a nucleação de precipitados de modo a atingir um endurecimento por precipitação total, lembrando que discordâncias são locais mais susceptíveis à nucleação de precipitados; então, com 73% de encruamento, mesmo havendo um maior acúmulo de discordâncias, estas não parecem interferir na precipitação.

Ao observar apenas os dois maiores valores de deformação, 32 e 73%, pode-se afirmar que para as temperaturas de 100 e 200°C, o endurecimento ocorre em tempos maiores que em temperaturas mais elevadas, por isto, notou-se que estas curvas não apresentam o valor máximo de sua dureza e, conseqüentemente, não mostram a queda no valor de dureza, no intervalo de tempo estudado.

Estas curvas demonstram também que quanto menor a temperatura, maior será a dureza máxima atingida pelo material. Isto ocorre porque, para baixas temperaturas, obtém-se precipitados mais finos e dispersos que dificultam muito mais a movimentação de discordâncias, aumentando a dureza e a resistência ⁽²⁾.

Tais informações não são observadas de maneira nítida para amostras com deformação prévia de 5% ou sem deformação. Isto sugere que a quantidade de discordâncias presentes nestas amostras não é suficiente para provocar um aumento na sua resistência nos intervalos de tempo e de temperatura estudados.

5 CONCLUSÕES

O conjunto de experimentos realizados e de amostras permite chegar às seguintes conclusões:

- Na medida em que se aumenta a temperatura, mais rápido ocorre o endurecimento por precipitação;
- Para uma determinada temperatura, a dureza do material aumenta com o tempo de tratamento, até atingir um valor máximo, e então passa a diminuir;
- Quanto maior a temperatura, menor os valores máximos de dureza;
- À medida que se aumenta o grau de deformação prévia no material, aumenta-se a facilidade do material endurecer por precipitação, até determinado ponto, a partir do qual o endurecimento por precipitação não dependerá significativamente do grau de deformação do material;
- Os graus de deformações previamente aplicadas nos materiais com graus de encruamento de 32 e 73% não provocaram diferenças apreciáveis nas curvas de dureza.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Mangels Ind. Com. Ltda., Divisão Aços e ao Centro Universitário da FEI, em especial ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, pelo apoio oferecido para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 DIETER, G.E. Mechanical Metallurgy. London, New York: McGraw-Hill, 1988. 751p.
- 2 REED-HILL, R.E. Physical Metallurgy Principles. 3 ed. Boston: PWS Publishing, 1994. 926p.
- 3 CALLISTER Jr., W.D. Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach. 2 ed. New York: John Wiley&Sons, Inc. 2005. 712p.
- 4 MARSHALL, G.; EVANS, P.; RICKS, R.; GREEN, A. Strengthening Processes. AluMatter. Dez. 2006. Disponível em: aluminium.matter.org.uk. Acesso em: 28 de janeiro de 2007.
- 5 PORTER, D.A.; EASTERLING, K.E. Phase Transformations in Metals and Alloys. New York: Van Nostrand Reinhold. 1981. 446p.