

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO DE BOLAS FORJADAS EM AÇO ALTO CARBONO LIGADO AO Cr, Mo, Nb SUJEITAS À SEVERAS CONDIÇÕES DE IMPACTO¹

*Sérgio Ricardo Bastos de Mello²
Sérgio Souto Maior Tavares³
Juan Manuel Parda⁴*

Resumo

Neste trabalho as temperaturas de têmpera e revenido de esferas de aço alto carbono ligadas ao cromo, molibidênio e nióbio utilizadas em moinhos de bola para tratamento de minérios foi variada com o objetivo de se obter o melhor compromisso entre dureza e tenacidade. Bolas com boa tenacidade e dureza igual ou superior a 50 HRC foram obtidas nas amostras temperadas e revenidas a 400°C.

Palavras-chave: Têmpera e revenido; Bolas forjadas

¹Trabalho a ser apresentado no 60º Congresso Anual da ABM – Belo Horizonte – Julho/2005.

²Engenheiro Metalúrgico, Responsável pela Divisão de Corpos Moedores da Frojas Brasileiras

³Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PGMEC) da Universidade Federal Fluminense – UFF.

⁴Mestrando do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense – UFF.

INTRODUÇÃO

Os corpos moedores ou “bolas de moagem” são esferas de aço temperado para utilização em moinhos na indústria mineradora (tratamento de minérios) ou de cimento. A Forjas Brasileiras produz estas esferas em aço alto carbono (0,93%C-0,68%Cr-0,14%Mo) pelo processo de forjamento a quente seguido de têmpera direta e revenido.

Acompanhando a tendência geral do setor mineral, para as operações de moagem estão sendo desenvolvidos moinhos de bolas de diâmetros maiores, exigindo o desenvolvimento de bolas de moagem mais resistentes às severas condições de impacto.

O objetivo deste trabalho é determinar as condições de tratamento térmico do aço capazes de fornecer o melhor compromisso entre tenacidade ao impacto e dureza, visando a melhor performance dos corpos moedores. Além dos ensaios mecânicos de tenacidade e dureza, foram também realizadas análises da microestrutura por microscopia ótica e difração de raios-X.

MÉTODOS EXPERIMENTAIS

O aço analisado tem a composição química mostrada na Tabela 1. Foram analisadas amostras provenientes de esferas de 127 mm de diâmetro. Após o forjamento, as esferas foram temperadas diretamente, tendo-se selecionado 3 temperaturas de têmpera para estudo: 750 °C (série A), 880 °C (série B) e 810 °C (série C). Após o forjamento, as amostras resfriaram ao ar até atingirem a temperatura de têmpera. O meio de têmpera utilizado é a água com polímero, normalmente adotado na produção de corpos moedores na Forjas Brasileiras. Após a têmpera as esferas foram revenidas em diferentes temperaturas: 220 °C, 270 °C, 320 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C e 600 °C. Cada condição de têmpera e revenido foi repetida em duas esferas, totalizando 48 amostras. A Tabela 2 apresenta todas as condições testadas.

Após os tratamentos térmicos as esferas foram cortadas por eletro-erosão a fio de modo a se obter amostras para os ensaios de dureza e tenacidade ao impacto Charpy. Os corpos de prova foram preparados seguindo a norma ASTM E-23-94b [1] para confecção de corpos de prova padrão (10 x 10 x 55 mm). Para cada condição de tratamento térmico foram preparados 2 corpos de prova de impacto: um com e outro sem entalhe. Os entalhes em V foram também confeccionados por eletro-erosão a fio. Os ensaios de impacto foram realizados em um pêndulo Charpy-Izod com capacidade para 300J. Medidas de dureza Rockwell C foram realizadas nas posições: superfície, $\frac{3}{4}$ de raio, $\frac{1}{2}$ raio, $\frac{1}{4}$ raio e centro.

Tabela 1. Composição química do aço *maraging* estudado.

%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Cr	%Nb	%Mo
0,93	0,21	0,69	0,004	0,013	0,68	0,032	0,140

Tabela 2. Total de amostras produzidas.

Temperatura de revenido (°C)	Temperatura de têmpera (°C)					
	750		880		810	
220	A1	A2	B1	B2	C1	C2
270	A3	A4	B3	B4	C3	C4
320	A5	A6	B5	B6	C5	C6
400	A7	A8	B7	B8	C7	C8
450	A9	A10	B9	B10	C9	C10
500	A11	A12	B11	B12	C11	C12
550	A13	A14	B13	B14	C13	C14
600	A15	A16	B15	B16	C15	C16

As amostras para metalografia foram preparadas com reagente nital 2%. A observação metalográfica foi feita em microscópio ótico NEOPHOT 32. Ensaio de difração de raios-X foram realizados em um difratômetro PHILLIPS X'Pert com tubo de cobalto. A quantificação de fases (austenita e martensita) foi feita pelo método da comparação direta, seguindo a metodologia descrita por Cullity [2], considerando-se que as duas fases têm fatores de espalhamento atômico iguais.

RESULTADOS

Dureza e Tenacidade

A dureza e a tenacidade das esferas devem ser analisadas em conjunto. Essas propriedades são altamente desejáveis nos corpos moedores, pois uma alta dureza deve conduzir a uma maior resistência ao desgaste, e uma alta tenacidade deve impedir a fratura das esferas pelo impacto mútuo e com a carcaça do moinho. Entretanto, essas duas propriedades são, neste caso, antagônicas.

A Figura 1 mostra o comportamento da dureza em função da temperatura de revenido no centro das esferas temperadas a 750 °C, 880 °C e 810 °C.

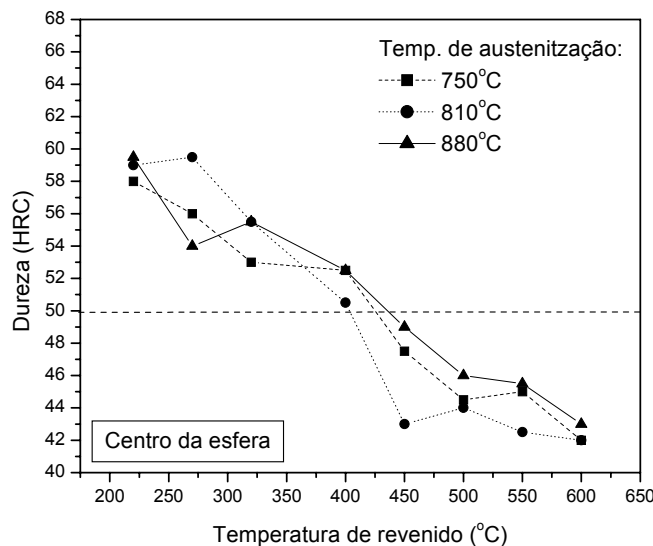


Figura 1. Dureza x temperatura de revenido no centro das esferas.

A variação da dureza do centro para a superfície da esfera nas amostras temperadas e revenidas a 200 °C, 400 °C e 550 °C para as temperaturas de têmpera 880 °C, 810 °C e 750 °C é apresentada nas Figuras 2, 3 e 4, para as séries A, B e C, respectivamente.

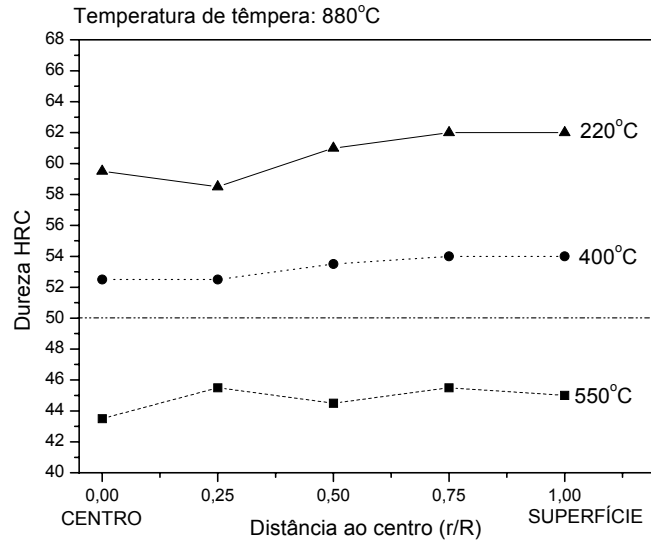


Figura 2. Perfil de dureza das amostras temperadas a 880°C – valores médios de dureza.

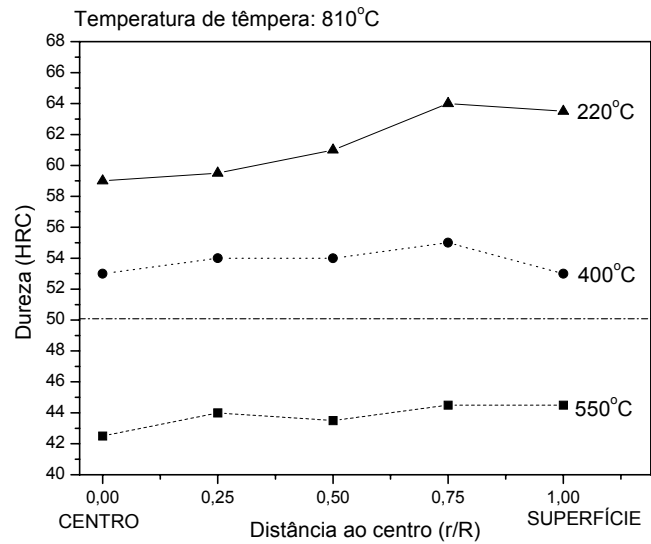


Figura 3. Perfil de dureza das amostras temperadas a 810°C – valores médios.

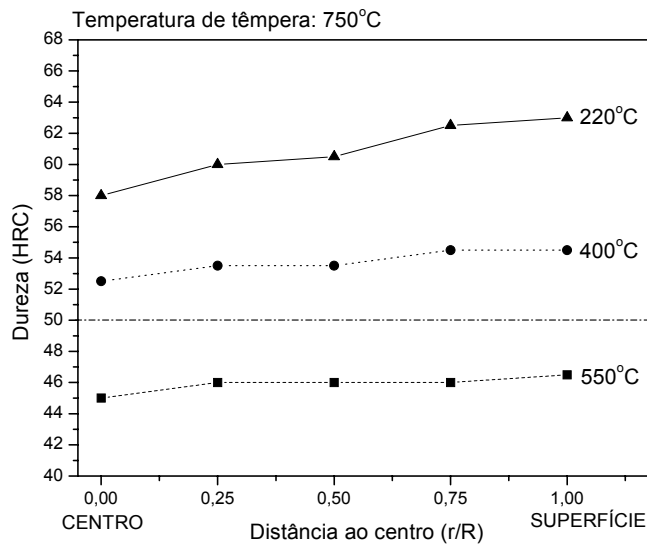


Figura 4. Perfil de dureza das amostras temperadas a 750°C – valores médios.

O revenido, conforme previsto, provoca a queda de dureza do material, sendo que valores superiores a 50 HRC podem ainda ser obtidos na superfície e no centro das amostras revenidas em temperaturas iguais ou inferiores a 400 °C. (ver Figuras 1 e 2). Este patamar de 50HRC é, de forma preliminar, considerado o mínimo necessário para se obter uma boa resistência ao desgaste nos corpos moedores.

Observa-se também que o aumento da temperatura de revenido diminui a diferença entre a dureza do centro e da superfície da esfera.

As Figuras 5 e 6 apresentam os resultados de tenacidade com e sem entalhe, respectivamente. O material apresentou pouca variação de energia absorvida no ensaio de impacto realizado em corpos de prova com entalhe. Por outro lado, as amostras não entalhadas apresentam importantes variações de tenacidade ao impacto com a temperatura de revenido, revelando-se as mais adequadas para os propósitos deste trabalho.

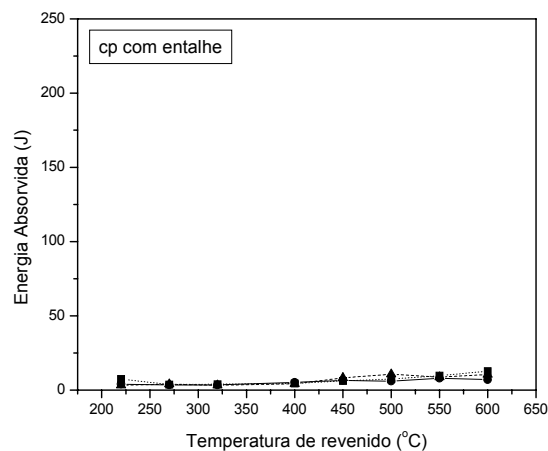


Figura 5. Energia absorvida versus temperatura de revenido nas amostras entalhadas.

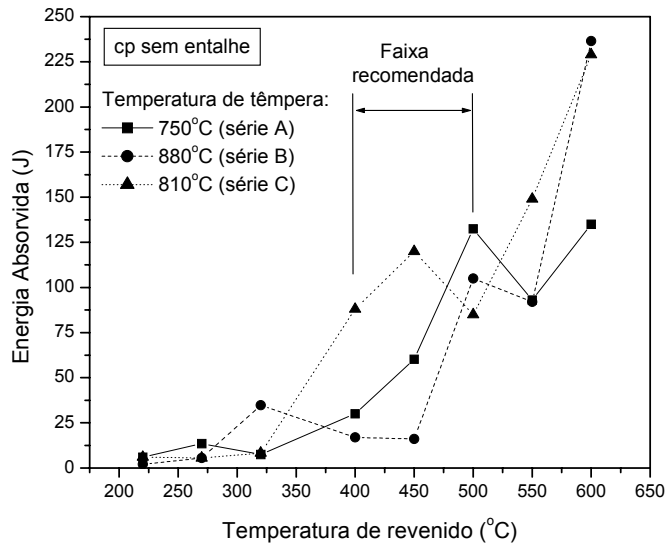


Figura 6. Energia absorvida *versus* temperatura de revenido nas amostras não entalhadas.

Considerando-se agora os resultados de tenacidade em corpos de prova sem entalhe:

O comportamento da tenacidade das amostras temperadas a partir de 880 °C (série B) parece revelar um processo de fragilidade do revenido nas temperaturas de 400 e 450 °C, ou seja, nestas temperaturas o material experimenta uma depressão nos valores de energia absorvida. Para as amostras desta série B, a temperatura de revenido recomendada seria de 500 °C. Entretanto, os valores de dureza nesta condição de revenido se situam na faixa de 44 a 46 HRC.

A queda de tenacidade observada nas temperaturas de revenido de 400 °C e 450 °C não é observada nas séries A (têmpera a 750 °C) e C (têmpera a 810 °C). Na série C o valor de tenacidade cresce continuamente entre 320 °C e 500 °C, mas encontra-se baixo ainda na amostra revenida a 400 °C (30HRC), passando a se tornar interessante com o revenido a 450 °C (60,3HRC), e muito interessante com o revenido a 500 °C. Os valores médios de dureza nestas três condições são 54,5 HRC (400 °C), 50,5 HRC (450 °C) e 46,5 HRC (500 °C)

A tenacidade da amostra temperada a 810°C apresenta-se já bastante elevada na condição de revenido a 400 °C (88,5HRC), mantendo-se alta nos revenidos a 450 °C (120HRC) e 500 °C (80HRC).

Análise da austenita retida por difração de raios-X e análise metalográfica

A Figura 7 mostra os difratogramas de raio-X das amostras da série B revenidas a 220 °C, 400 °C e 600 °C. As amostras revenidas a 220 °C apresentam elevada quantidade de austenita retida, a qual é bastante reduzida nos revenidos a 400 °C e a 600 °C. A Tabela 3 apresenta os resultados da quantificação da austenita retida por difração de raios-X.

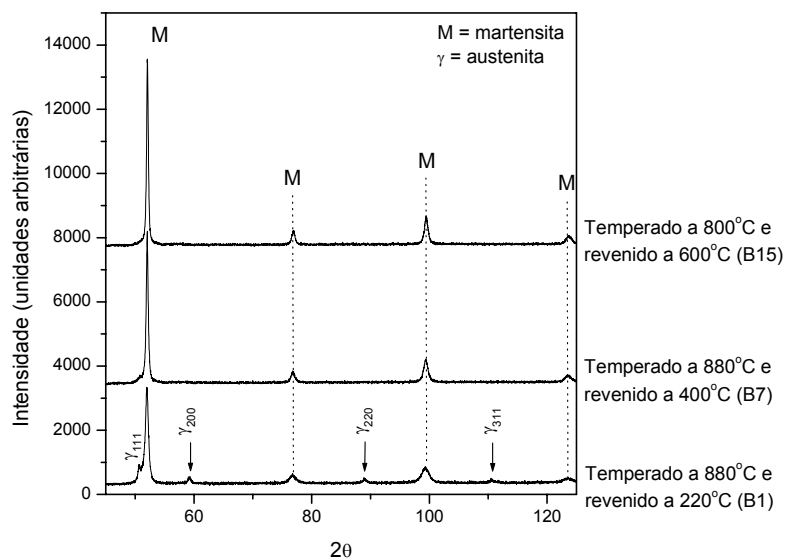


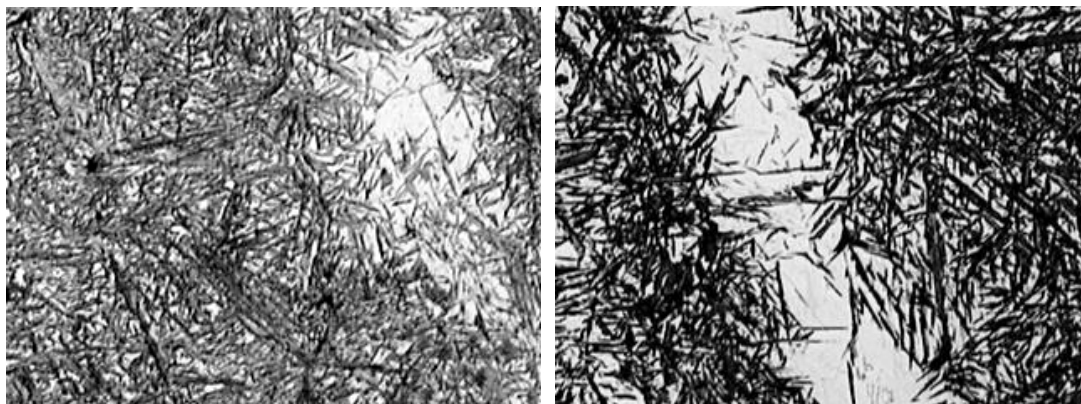
Figura 7. Difratogramas das amostras B1, B7 e B15.

Tabela 3. Valores de fração volumétrica de austenita retida.

	A	B	C
Revenido	DRX	DRX	DRX
220°C	15,60	16,70	38,41
400°C	0	0	0
600°C	0	0	3,91

A quantificação por difração de raios-X pode ser encarada como um método semi-quantitativo, pois não está levando em conta a textura do material. Entretanto, ela mostra que os revenidos a 400 °C e 600 °C praticamente eliminam a austenita residual do aço.

A Figura 8 mostra a microestrutura da amostra temperada a 880°C e revenida a 220°C. O revenido nesta temperatura praticamente não altera a microestrutura de têmpera, caracterizada por martensita em agulhas e austenita residual.



(a) (b)
Figura 8. Microestrutura da amostra B1 (220°C): (a) e (b) 310X.

Um fato curioso ocorre nas amostras revenidas em temperaturas de até 320 °C: elas apresentam trincas intergranulares, conforme mostrado na Figura 9.

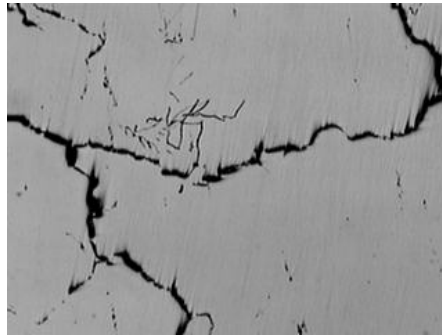


Figura 9. Trinca intergranular na amostra B3 (30X).

As Figuras 10, 11 e 12 apresentam as microestruturas das amostras C4, C5 e C7 que foram revenidas a 270 °C, 320 °C e 400 °C, respectivamente. A amostra C4 apresenta ainda regiões claras, provavelmente regiões austeníticas em fase de transformação. A amostra C5 já apresenta poucas regiões claras e uma estrutura de martensita revenida. Igualmente, a amostra C7 apresenta uma estrutura de martensita revenida, já isenta das microtrincas encontradas nas amostras C4 e C5.

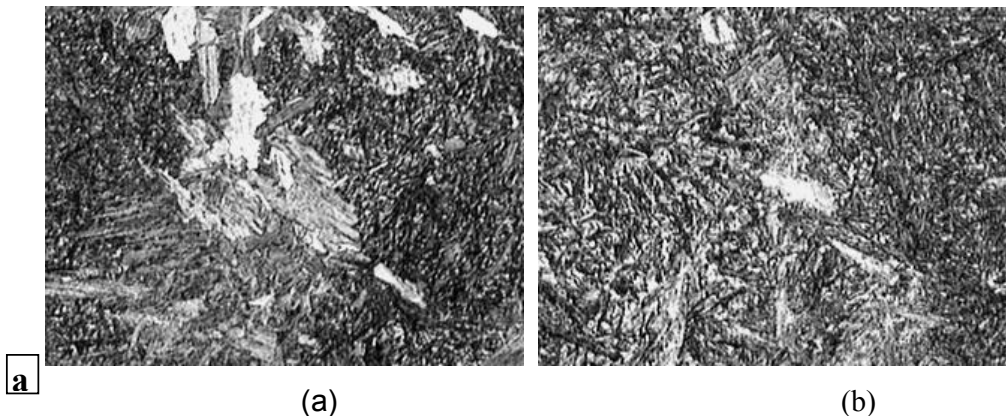


Figura 17. Microestrutura da amostra C4 (270 °C): (a) 280X e (b) 590X.

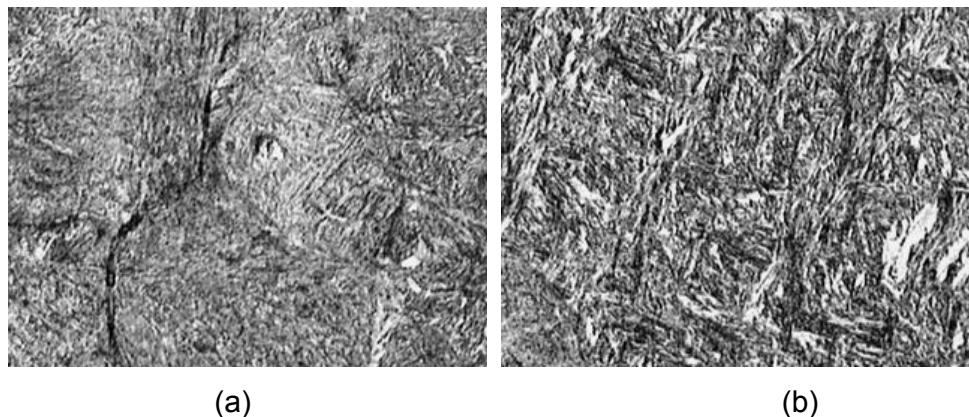
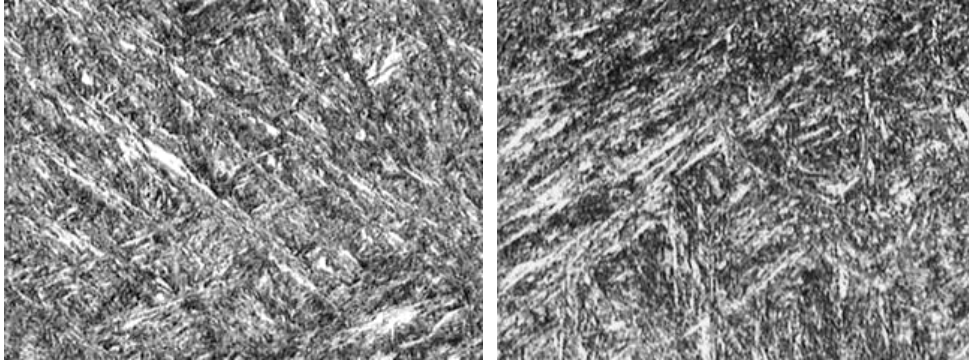


Figura 18. Microestrutura da amostra C5 (320 °C): (a) 280X (observe a microtrinca) ; (b) 590X.



(a) (b)
Figura 19. Microestrutura da amostra C7 (400 °C): (a) 590X e (b) 1120X.

CONCLUSÕES

Este trabalho é conclusivo nos seguintes pontos:

- A temperatura mínima de revenido para o aço estudado é 400°C. Temperaturas de revenido inferiores produzem valores muito baixos de tenacidade e fragilização intergranular no material.
- É possível obter valores de dureza iguais ou superiores a 50 HRC nas amostras do aço estudado revenidas a 400°C.
- O aumento da temperatura de revenido para 500°C provoca a queda da dureza para valores tão baixos quanto 44 HRC. Nesta condição, entretanto, a tenacidade atinge valores bastante elevados.
- Não foram detectadas grandes diferenças de dureza e tenacidade entre as amostras temperadas a 750°C, 810°C e 880°C.
- A princípio, a temperatura de revenido de 400°C pode ser adotada para o aço de composição similar ao tabela I, com base nos experimentos realizados. Entretanto, neste momento, esta parece ser uma condição próxima do limite mínimo de tenacidade. As temperaturas de revenido de 500°C e até 450°C fornecem uma “folga” maior no quesito tenacidade, em detrimento da dureza e resistência ao desgaste

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Annual Book of ASTM standards, designation E-23-94b, p.137, 1995.
- [2] B.D. Cullity. “Elements of X-Ray Diffraction”. Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts - USA, 1956.

OPTIMIZATION OF THE HEAT TREATMENT CONDITIONS OF FORGED BALLS MADE OF HIGH CARBON STEEL WITH Cr, Mo AND Nb ADDITIONS SUBJECTED TO SEVERE IMPACT LOADS¹

*Sérgio Ricardo Bastos de Mello²
Sérgio Souto Maior Tavares³
Juan Manuel Pardal⁴*

Abstract

In this paper the quenching and tempering temperatures of high carbon chromium, molybdenum and niobium alloyed steel balls used in the mining mills were varied to achieve the best hardness/toughness condition. High toughness balls with hardness equal or higher than 50 HRC were obtained in samples quenched and tempered at 400°C.

Key-words: Quenching and tempering; Steel balls.

¹Research work to be presented in the 60^o Congresso Anual da ABM – Belo Horizonte – Julho/2005.

²Metallurgical engineer responsible by the Forged steel balls production in the Forjas Brasileiras company.

³Professor of the Mechanical Engineering Department of the Universidade Federal Fluminense – UFF.

⁴D.Sc. Candidate of the Mechanical Engineering Department of the Universidade Federal Fluminense – UFF.