

ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS EM BOLAS DE MOAGEM FORJADAS DE AÇO ALTO CARBONO LIGADO AO CROMO E MOLIBDÊNIO¹

Sérgio Ricardo Bastos de Mello²

Maria da Penha Cindra Fonseca³

Joel Regueira Teodósio⁴

Tetyana Gurova⁵

Sérgio Souto Maior Tavares⁶

Resumo

Durante a fabricação das bolas de moagem por forjamento e subseqüentes tratamentos térmicos são geradas tensões residuais que se forem trativas na superfície poderão contribuir, e freqüentemente são a maior causa de fratura por fadiga e trincas de têmpera. Neste trabalho, foram analisadas as tensões residuais geradas pelo processamento das bolas de moagem de aço alto carbono ligado ao cromo e molibdênio, para aplicação em diferentes processos de moagem de minério e cimento. Foram feitas medições, tanto das tensões residuais superficiais quanto em profundidade, após diferentes condições de tratamento térmico a fim de verificar o perfil das tensões desenvolvidas ao longo do raio da amostra. As tensões foram medidas por tensometria de difração de raios-X pela técnica de dupla exposição, empregando um equipamento portátil.

Palavras-chave: Tensões residuais; Corpos moedores; Tratamentos térmicos.

RESIDUAL STRESSES ANALYSIS IN FORGED GRINDING BALLS OF A CHROMIUM AND MOLIBDENIUM ALLOYED HIGH CARBON STEEL

Abstract

In manufacture process of grinding balls by forging and subsequent heats treatments residual stresses are generated. If residual stresses are tensile in the surface will be able to contribute, and frequently are the biggest cause of breaking for fatigue and quenching cracks. In this work, the residual stresses generated by the grindings bodies manufacture of high carbon steel alloyed with chromium and molybdenum has been analyzed. Residual and profile measurements are carried out after different heat treatment in order to verify the profile of the stresses developed in depth of the ray of the specimen. Residual stresses were measured using X-ray diffraction techniques by the double exposure method.

Key words: Residual stresses; Grinding balls; X-ray diffraction tensometry.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense - PGMEC.

³ Professora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense - PGMEC..

⁴ Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais da COPPE/UFRJ.

⁵ Professora Visitante do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais da COPPE/UFRJ

⁶ Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense - PGMEC.

1 INTRODUÇÃO

A martensita é geralmente a microestrutura obtida na têmpera do aço, cuja característica dependerá do teor de carbono. As propriedades finais podem ser alcançadas pela combinação da composição química com o tratamento térmico adequado. A fim de obter a dureza máxima pela transformação martensítica para um dado teor de carbono, é essencial que todo o carbono esteja presente na austenita e que a taxa de resfriamento deve ser alta o bastante para evitar o nariz da curva *tempo-temperatura-transformação* (TTT) do aço que está sendo temperado. O tratamento de revenido diminui a resistência, a dureza e a resistência ao desgaste, mas compensa simultaneamente aliviando as tensões residuais, restaurando a ductilidade e a tenacidade e permitindo a transformação da austenita retida. A têmpera seguida de revenido é o único processo convencional de tratamento térmico apropriado para melhorar o limite de resistência do aço e conseguir a dureza total até uma profundidade mínima desejada.⁽¹⁾

As tensões residuais podem ser definidas como aquelas tensões que permanecem em um material ou em um componente após a fabricação na ausência de forças externas ou de gradientes térmicos. Sob circunstâncias de temperatura uniforme e sem carregamento externo, as tensões residuais são auto-equilibradas. Tais tensões serão produzidas sempre que algumas regiões de um material forem deformadas de forma heterogênea elástica ou plasticamente.⁽²⁾

As tensões residuais existem em praticamente todas as peças rígidas, metálicas ou não. Elas são o produto da história metalúrgica e mecânica de cada ponto do componente e do componente como um todo durante seu processamento.⁽³⁾ As tensões residuais são geradas durante a maioria dos processos de fabricação que envolvam operações de conformação, tratamento térmico, usinagem ou processos que transformam a forma ou mudam as propriedades de um material.⁽⁴⁾ As tensões residuais de tração na superfície do material são, geralmente, indesejáveis, uma vez que podem contribuir, e são, freqüentemente, a causa de falhas por fadiga.⁽²⁾

Durante o tratamento térmico dos aços são criadas tensões que resultam da conjugação das variações volumétricas provenientes não só dos gradientes térmicos, mas também das transformações de fase. Assim, o estado de tensões final será um somatório das tensões de origem puramente térmica com as de origem estrutural. Esta análise permite estabelecer a melhor opção de tratamento térmico, capaz de produzir tensões compressivas na superfície do material e propiciar um melhor desempenho em serviço.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A composição química do aço estudado é dada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do aço dos corpos moedores (% de peso).

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

Foram analisadas sete amostras de 75 mm de diâmetro com diferentes condições de tratamento térmico: têmpera direta; têmpera direta com revenido a 400°C; normalizada com têmpera convencional e normalizada com têmpera convencional acrescida de revenido a 400°C.

Em quatro amostras na condição temperada e/ou revenida foram feitas medições das tensões residuais em profundidade em um ponto, até atingir 1 mm (Figura 1a). Em outras três amostras as tensões residuais superficiais foram medidas em seis pontos, conforme mostra a Figura 1b.

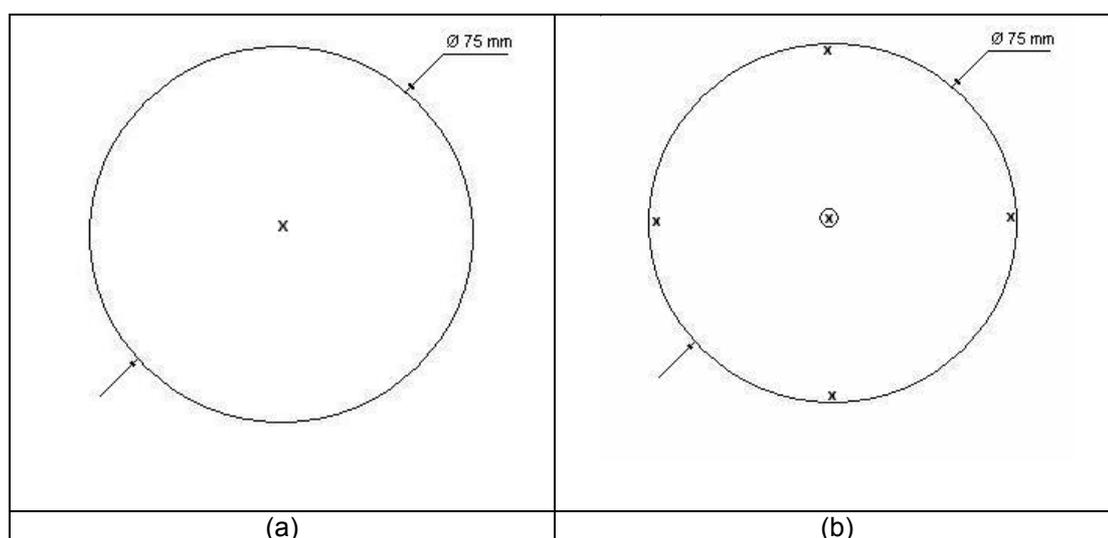


Figura 1. Desenho esquemático das bolas de moagem estudadas com os pontos, onde as tensões residuais foram medidas, marcados em x: a) Amostras tratadas por têmpera seguida ou não de revenimento. b) Amostras tratadas por têmpera direta e em seguida revenidas.

A Tabela 2 mostra os parâmetros de temperatura e tempo usados no tratamento térmico das sete amostras citadas acima. Para as amostras B1, B2 e B3 as tensões residuais foram medidas após a têmpera direta das mesmas, que em seguida foram revenidas e, então, as medições das tensões residuais superficiais foram efetuadas novamente.

Tabela 2. Parâmetros dos tratamentos térmicos.

| Amostra | Parâmetros do Tratamento Térmico | | |
|---------|------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|
| | Temperatura da têmpera direta (°C) | Temperatura da Têmpera convencional (°C) | Temperatura e tempo de revenimento (°C/h) |
| A1 | 900 | | |
| A3 | 900 | | 400/1 |
| A7 | | 820 | |
| A9 | | 820 | 400/1 |
| B1 | 900 | | 400/1 |
| B2 | 900 | | 400/1 |
| B3 | 900 | | 400/1 |

Nas amostras “A” os perfis de tensões residuais foram medidos em profundidade em somente um ponto e nas amostras “B” as tensões residuais superficiais foram medidas em seis pontos pela técnica de difração de raios-X.

As medições das tensões residuais nas bolas de moagem foram feitas usando a técnica de dupla exposição por meio de equipamento portátil, conforme Figura 2 onde: 1 – unidade de controle da fonte; 2 – tubo de raios-X com dois anodos de cromo; 3 – colimador com cassete; 4 – suporte magnético; 5 – amostra.

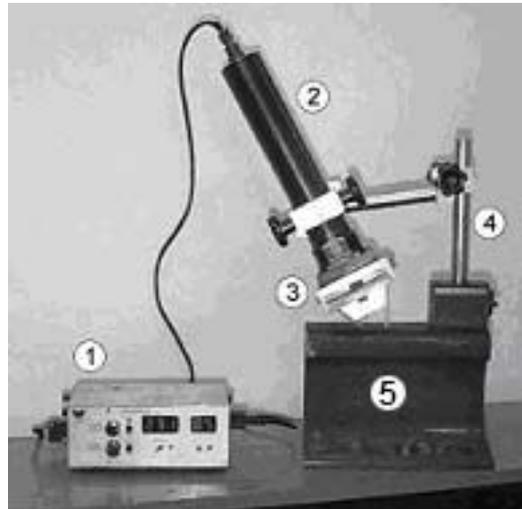


Figura 2. Equipamento portátil de difração de raios-X.

O tubo utiliza dois anodos de cromo ($\lambda_{CrK\alpha}=2,89092\text{\AA}$) produzindo feixes de radiação monocromática. A profundidade de penetração no Fe é, aproximadamente, de $11\ \mu\text{m}$. Os dois feixes incidentes são difratados pelos planos cristalográficos $\{211\}$ do ferro. A tensão e a corrente de trabalho da fonte de raios-X são de 25kV e 1,5mA, respectivamente. O tempo de exposição foi de cerca de 10 minutos. Calibrou-se o equipamento com material isento de tensão residual. Para as medidas feitas em profundidade, foi feito um polimento eletrolítico para remoção das camadas, sem alteração do campo de tensões residuais presente nas amostras.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As propriedades mecânicas em termos de dureza superficial, tensão de escoamento, resistência à tração e porcentagem de alongamento à temperatura ambiente estão apresentadas na Tabela 2. Assim, pode-se evidenciar que neste caso para o aço alto carbono a dureza superficial, tensão de escoamento, resistência à tração e porcentagem de alongamento estão em conformidade com os requisitos de propriedade. A dureza alcançada nas condições de temperada estão na faixa de 60 a 64 HRC e no caso de temperada e revenida encontram-se na faixa de 56 a 60 HRC. A microestrutura do aço revela as fases martensítica e austenita retida mostradas nas Figuras 3-4.

Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço estudado.

| Dureza (HB) | Tensão de Escoamento (MPa) | Resistência à Tração (MPa) | Alongamento (%) |
|-------------|----------------------------|----------------------------|-----------------|
| 380 | 736 | 1248 | 5% em 200mm |

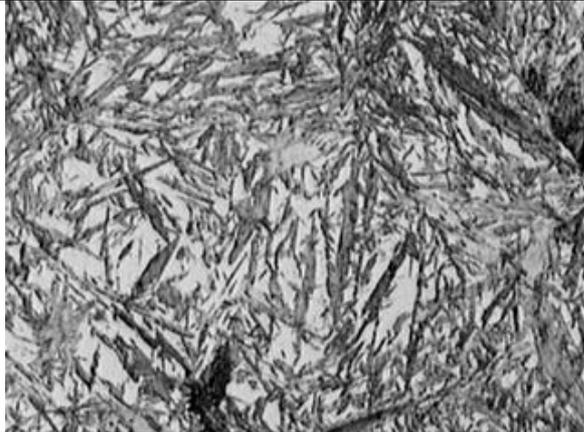


Figura 3. Amostra A1 Martensita e Austenita retida.



Figura 4. Amostra A3 Martensita revenida.

Os perfis de tensões residuais resultantes de têmpera direta e convencional foram medidas e calculadas, como mostram as Figuras 5-8.

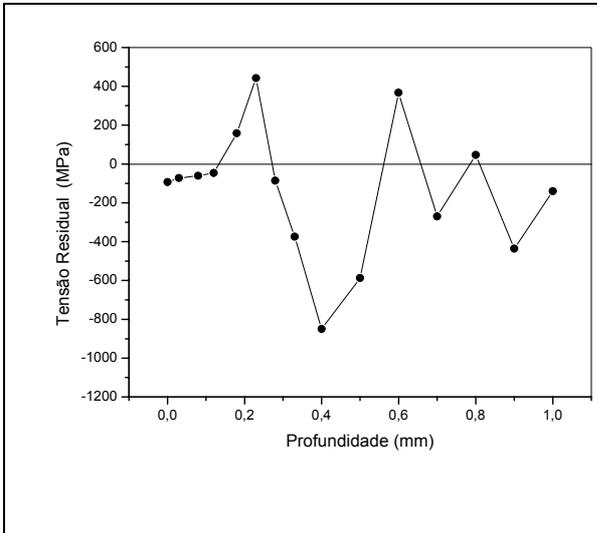


Figura 5. Amostra A1 Tensão residual X Profundidade.

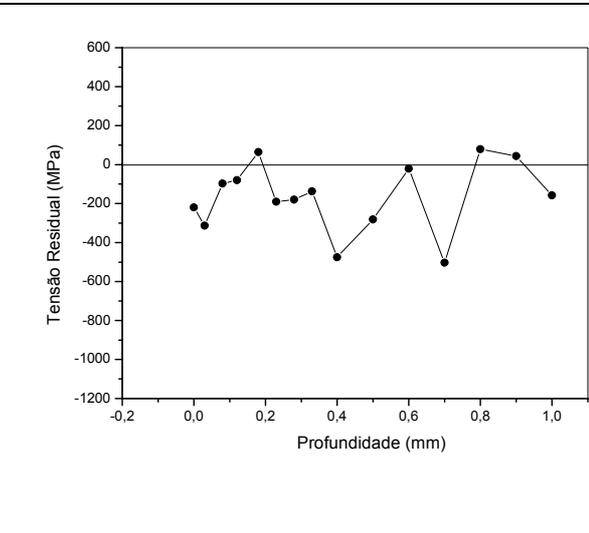


Figura 6. Amostra A3 Tensão residual X Profundidade.

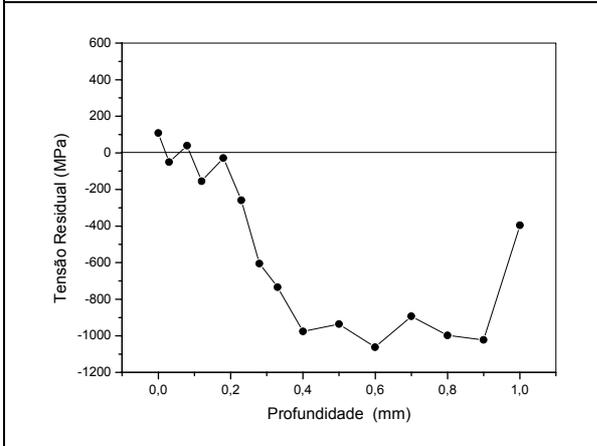


Figura 7. Amostra A7 Tensão residual X Profundidade.

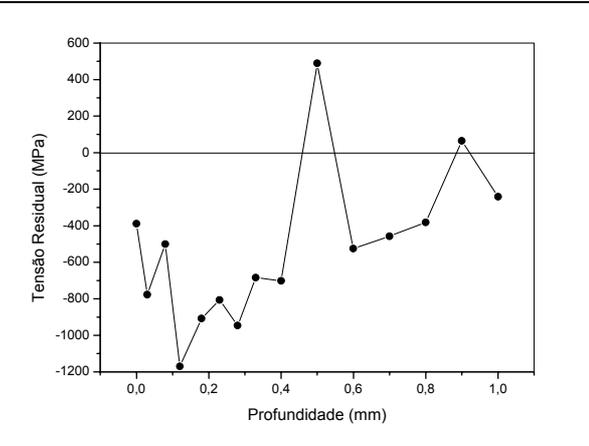


Figura 8. Amostra A9 Tensão residual X Profundidade.

Para ambas as situações, têmpera direta e convencional, as bolas de moagem temperadas e revenidas (A3 e A9) apresentaram melhores resultados em relação às bolas de moagem somente temperadas (A1 e A7), em termos de tensão residual superficial. De igual forma, os diagramas evidenciam que as bolas de moagem submetidas a têmpera direta (A1 e A3) apresentaram melhores resultados de tensões residuais superficiais em relação as amostras tratadas por processo convencional (A7 e A9).

O efeito do revenimento é, significativamente, mais intenso no caso das amostras tratadas pelo processo de têmpera convencional.

As condições de tratamento térmico da bola de moagem A7, ou seja, têmpera convencional, nas condições indicadas na Tabela 2, desenvolvem tensões residuais superficiais trativas, tornando o produto inadequado para sua aplicação.

As tensões residuais são compressivas para as amostras submetidas a têmpera direta (A3) e têmpera convencional seguida de revenimento (A9). As amostras temperadas e revenidas foram as que apresentaram maior profundidade sob tensões residuais compressivas ou, ligeiramente, trativas (até aproximadamente 10% do limite de escoamento do aço alto carbono ligado ao cromo e ao molibdênio), sendo de 0,4mm e 1mm para as amostras A9 e A3, respectivamente.

A amplitude das tensões residuais no perfil até 1,0mm de profundidade é menor no caso da amostra A3, têmpera direta seguida de revenimento.

As Figuras 9-11 mostram os resultados das medições de tensões residuais superficiais em seis pontos para as três bolas temperadas diretamente da temperatura de forjamento e em seguida revenidas.

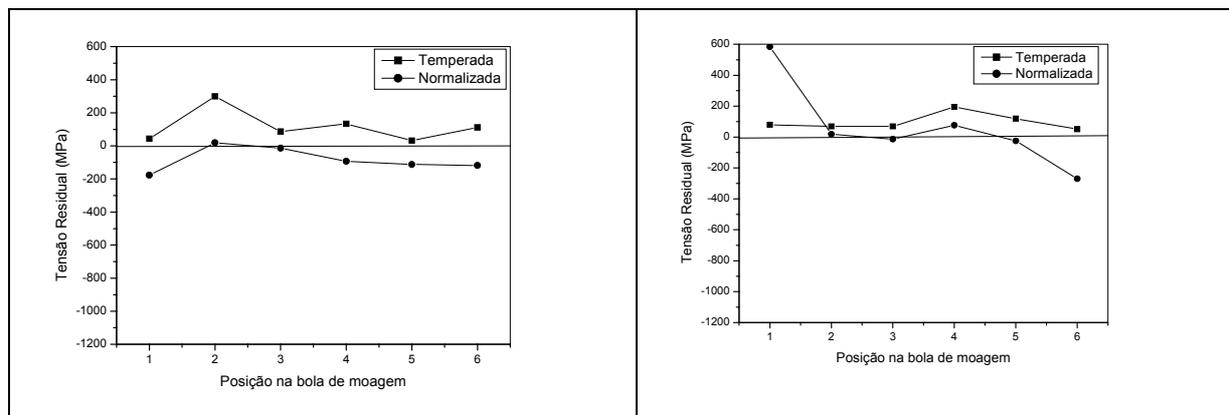


Figura 9. Amostra B1 Tensão residual X Posição. **Figura 10. Amostra B2 Tensão residual X Posição.**

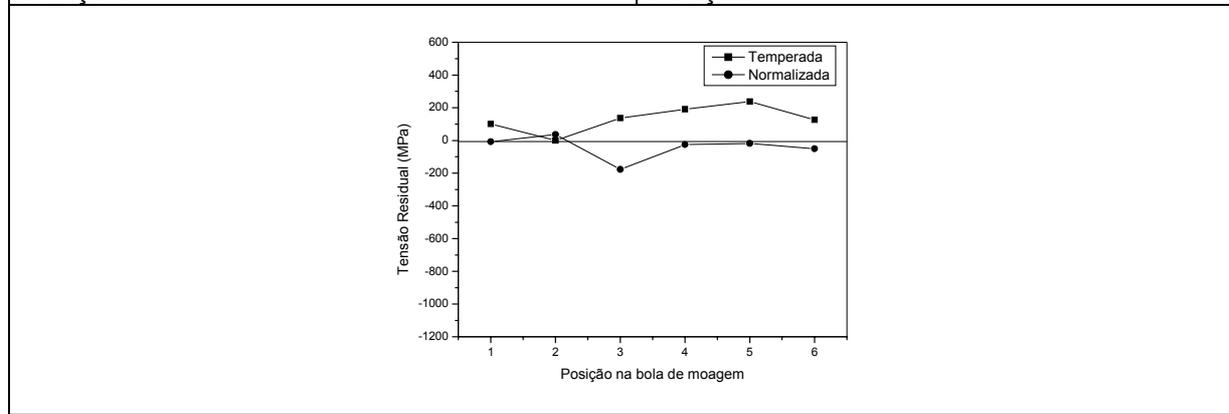


Figura 11. Amostra B3 Tensão residual X Posição.

A análise das amostras B1, B2 e B3 indicam que as tensões residuais superficiais das amostras no estado de temperadas diretamente da temperatura de forjamento variam aleatoriamente de -150 a 350 Mpa, conforme Figura 12, e que as tensões residuais superficiais das amostras na condição de têmpera direta seguida de revenimento variam aleatoriamente na faixa de -300 a 100 Mpa, ou seja, compressivas ou, ligeiramente, trativas, como mostrado na Figura 14.

As Figuras 12 e 14 evidenciam a consistência estatística das medições efetuadas. A Figura 13 indicou um ponto fora da curva, devido, provavelmente, a um erro de medição, que uma vez excluído resultou no histograma da Figura 14.

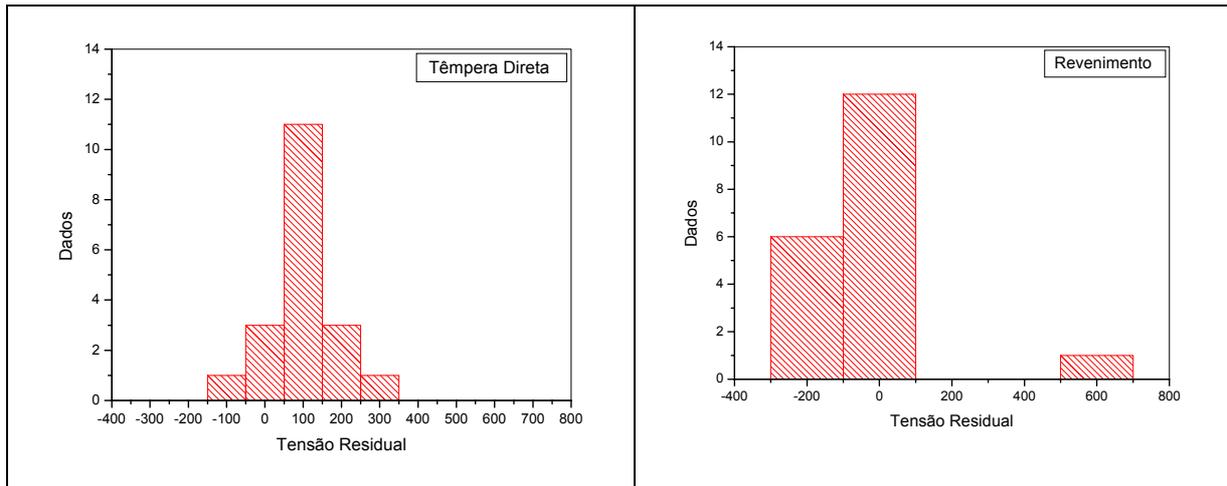


Figura 12. Distribuição estatística Condição da Amostra A1 Tensão residual X Posição.

Figura 13. Distribuição estatística Condição da Amostra A3 Tensão residual X Posição.

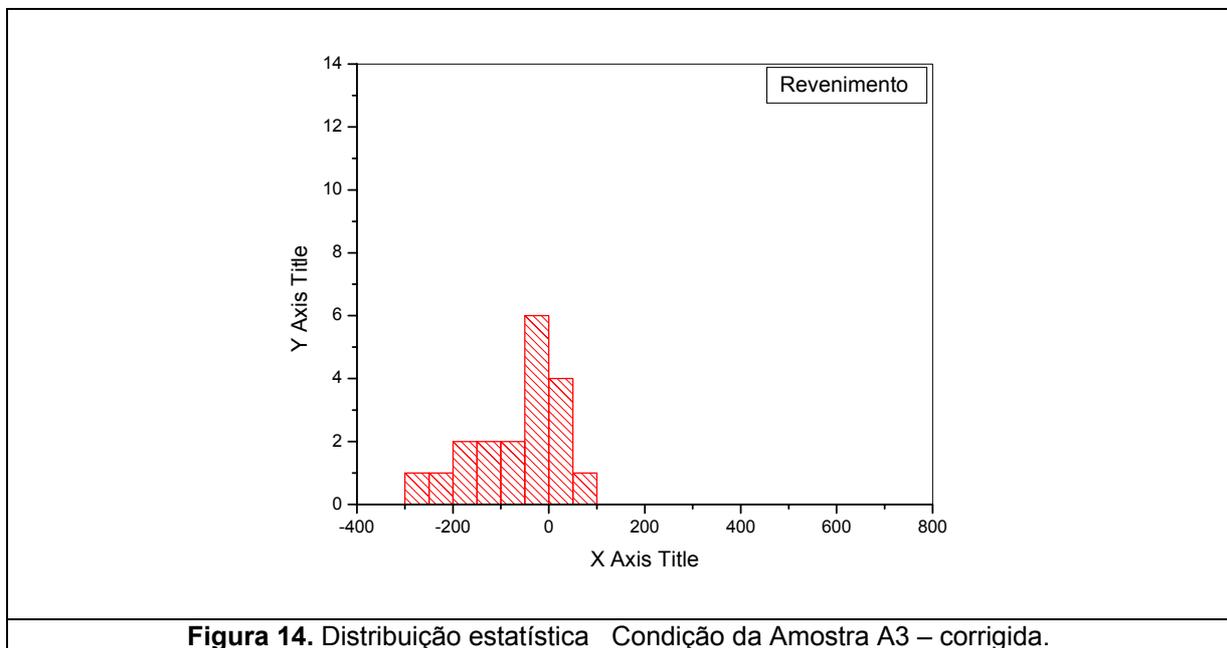


Figura 14. Distribuição estatística Condição da Amostra A3 – corrigida.

4 CONCLUSÕES

As tensões residuais superficiais e em profundidade em bolas de moagem de aço alto carbono ligado ao cromo e molibdênio, temperadas e revenidas, foram medidas usando equipamento portátil de radiação $\text{Cr-K}_{\alpha}=2,89092\text{\AA}$.

As amostras submetidas a têmpera convencional apresentaram tensões residuais superficiais trativas, que são contra indicadas para a aplicação do produto, e amplitude de seus valores muito alto para as bolas de moagem A7 e A9, respectivamente.

Por outro lado, as amostras provenientes do processo de têmpera direta apresentaram tensões puramente compressivas até a profundidade de 0,12mm. Sendo que a amostra temperada e revenida, ou seja, A3 apresentou até a profundidade de 1mm tensões residuais compressivas ou, ligeiramente, trativas (inferiores a 10% do limite de escoamento do aço alto carbono ligado ao cromo e ao molibdênio). Portanto, a têmpera direta seguida de revenimento, conforme os parâmetros indicados na Tabela 2, apresenta-se como a melhor opção de tratamento térmico, capaz de produzir tensões compressivas na superfície do material e propiciar seu melhor desempenho em serviço.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Eng^a. Viviane Florido Terra, pela medição das tensões nas amostras.

REFERÊNCIAS

- 1 Bhakat A.K., Mishra A.K., Mishra N.S., Jha S. “Metallurgical life cycle assessment through prediction of wear for agricultural grade steel” *Wear* 257 pp.338–346, 2004
- 2 Macherauch, E. and Kloos, K. H. *Origin, Measurements and Evaluation of Residual Stress in Science and Technology*. Ed. By E. Macherauch, V. Hauk, DGM Verlag, 1987.
- 3 Lu, J., Bouhelier, C., Lieurade, H.P. et al. Study of Welding Residual Stress Using the Step-by-Step Hole Drilling and X-ray Diffraction Method. *Welding in the World*, v. 33, n. 2, pp. 16- 26, 1994.
- 4 Kandil, F A, Lord ,J. D., Fry, A. T. and Grant, P. V., , “Measurement of Residual Stress in Components: A Review of Residual Stress Measurement Methods - A Guide to Technique Selection”, NPL, Report MATC(A)04, Project CPM4.5, UK.
- 5 Jang, D.Y., Watkins, T.R., Kozaczek, K.J., Hubbard, CR., Cavin, O.B., 1996, “Surface Residual Stresses in Machined Austenitic Stainless Steel”, *Wear* 194, pp. 168-173, 2001.
- 6 Sprauel J.M., (1994), Effect of the Material Structure on the X-ray Stress Evaluation Method. *World Scientific, Proceedings of the XVIth Conference on Applied Crystallography, Cieszyn, Poland*, p. 75-95.
- 7 Coppini N.L. e Costa D.D., “Combinação de têmpera e de aços”, *Revista MM*, 1995.
- 8 Rotondaro, R.G. e Vieira, R.R., “Mecanismo de Desgaste Abrasivo que ocorrem nos Principais Sistemas de Cominuição de Minerais”, *Revista MM*, 1998.