

COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS DE TÊMPERA (TRATAMENTO TÉRMICO) CONVENCIONAL E POR INDUÇÃO DE ROLAMENTOS DO AÇO DIN 100 Cr₆¹

Douglas Marquezin Felipe²
Antonio Augusto Couto³
Nelson Batista de Lima⁴

Resumo

A têmpera do aço-cromo visando à fabricação de rolamento é uma das etapas mais críticas do processo, pois o resfriamento pode ocasionar distorções dimensionais (ovalização) nas peças. Este trabalho comparou os rolamentos do aço DIN 100Cr₆ produzidos por dois processos de têmpera: convencional e por indução. Na comparação foram feitas análises dimensionais, caracterização microestrutural por microscopia óptica, análise da tensão residual e da austenita retida por difratometria de raios-X e medidas de dureza dos rolamentos. O processo de têmpera por indução e revenimento convencional provocou uma ovalização menor nos anéis de rolamento do que o processo convencional. Os valores obtidos de tensão residual não permitiram definir nenhuma relação com a ovalização do rolamento. Os resultados de microestrutura e dureza dos rolamentos temperados por indução sugerem que o processo pode ser aplicado na fabricação desse componente.

Palavras-chave: Aço-cromo; Têmpera total; Indução; Tensão residual.

STUDY BETWEEN CONVENTIONAL AND INDUCTION HEAT TREATMENT PROCESS FOR DIN 100 CR6 BEARING STEEL

Abstract

The quenching of the carbon-chromium steel is one of the most critical steps for the process during the outer ring bearing manufacture, because the cooling may cause dimensional distortions (out-of-roundness) on the parts. This essay comparing two quenching processes for bearings made by DIN 100Cr₆ steel: by conventional and induction. In the study were made dimensional analysis, optical microstructure characterization, residual stress analysis, retained austenite by x-ray diffraction and hardness measurement. The induction hardening and conventional tempering have decreased the out-of-roundness compared to the conventional hardening process. The residual stress values do not have relation with out-of-roundness on the parts. The microstructure and hardness results of bearings made by induction hardening showed the process can be applied in the bearing manufacturing process.

Key words: Carbon-chromium steel; Through Hardening; Induction; Residual stress.

¹ Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engº Industrial – Tratamento Térmico (SKF do Brasil Ltda).

³ Professor Doutor da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie e Pesquisador do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

⁴ Pesquisador Doutor do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

1 INTRODUÇÃO

Na indústria de rolamentos, utiliza-se como matéria prima o aço DIN 100 Cr₆ com composição química de cerca de 1% de carbono e 1,5% de cromo. Este material apresenta boa temperabilidade e na fabricação de rolamentos é submetido aos processos de forjaria, recozimento, usinagem, têmpera, revenimento e retífica.⁽¹⁾ O processo de têmpera consiste de operações de aquecimento e resfriamento controlado, que objetivam alterações nas propriedades físicas como dureza, resistência à abrasão, resistência mecânica entre outras.⁽²⁾ As condições de operação dos rolamentos exigem uma dureza elevada numa camada profunda do componente, estabilidade da microestrutura, boa resistência à fadiga, elevada tenacidade entre outras propriedades.

Durante a têmpera deve-se observar um rigoroso controle das taxas de aquecimento e resfriamento das peças, do tempo de permanência na temperatura de austenitização, do ambiente de aquecimento, visando obter as propriedades desejadas. Uma das partes mais críticas do tratamento térmico de têmpera é o resfriamento, pois a extração de calor da peça de maneira a promover as propriedades desejadas, pode induzir distorções não desejadas no componente. Independente do meio de resfriamento, o mecanismo de resfriamento ocorre em três estágios: fase vapor, fase ebulição e fase convecção, cada um com suas respectivas características.⁽³⁾

Atualmente, o processo de têmpera dos rolamentos da SKF do Brasil é executado em fornos contínuos convencionais e os meios de resfriamento são em banho de sal e óleo. Porém, este processo tem provocado distorções indesejadas, gerando uma quantidade de peças rejeitadas e elevando o custo do processo. Essas distorções podem estar relacionadas principalmente com a geometria da peça, as tensões residuais geradas nas várias etapas do processo, a posição da peça durante o aquecimento e no resfriamento e o tipo do meio de resfriamento.⁽³⁾ Em trabalho anterior,⁽⁴⁾ a distorção dos rolamentos foi avaliada em função do meio de resfriamento na têmpera. Notou-se que a têmpera em banho de sais fundidos induz a uma ovalização maior do que a têmpera em óleo devido à curva de resfriamento. O resfriamento no óleo provocou uma menor ovalização devido à sua significativamente menor velocidade de resfriamento do que no sal em temperaturas elevadas, responsável pelas distorções dos rolamentos.

Uma alternativa para a redução da distorção do componente gerada no tratamento térmico de têmpera convencional pode ser a aplicação de têmpera por indução. O processo de têmpera por indução utiliza dispositivos mecânicos ou processo de indução rotativo que promovem um aquecimento simétrico e uniforme da peça, diminuindo a variação da geometria final.⁽⁵⁾ Para o processo de tratamento térmico por indução, algumas condições devem ser consideradas, como a de tensão residual⁽⁵⁾ que impacta diretamente nas propriedades solicitadas a um rolamento em trabalho.

O processo de indução é executado em tempo muito curto e com alta eficiência, porque a energia é aplicada somente na parte onde o tratamento térmico é requerido. Isto promove alta produtividade, poucas distorções na geometria da peça, permite o uso de pequeno espaço físico para instalação de equipamentos e gera benefícios ambientais.⁽⁶⁾ Neste trabalho, os processos de tratamento térmico de têmpera convencional e por indução serão comparados levando-se em consideração a dureza e a análise dimensional dos rolamentos. A microestrutura dos rolamentos

temperados foi observada por microscopia óptica e a tensão residual medida por difratometria de raios-X.

2 MATERIAL E MÉTODOS

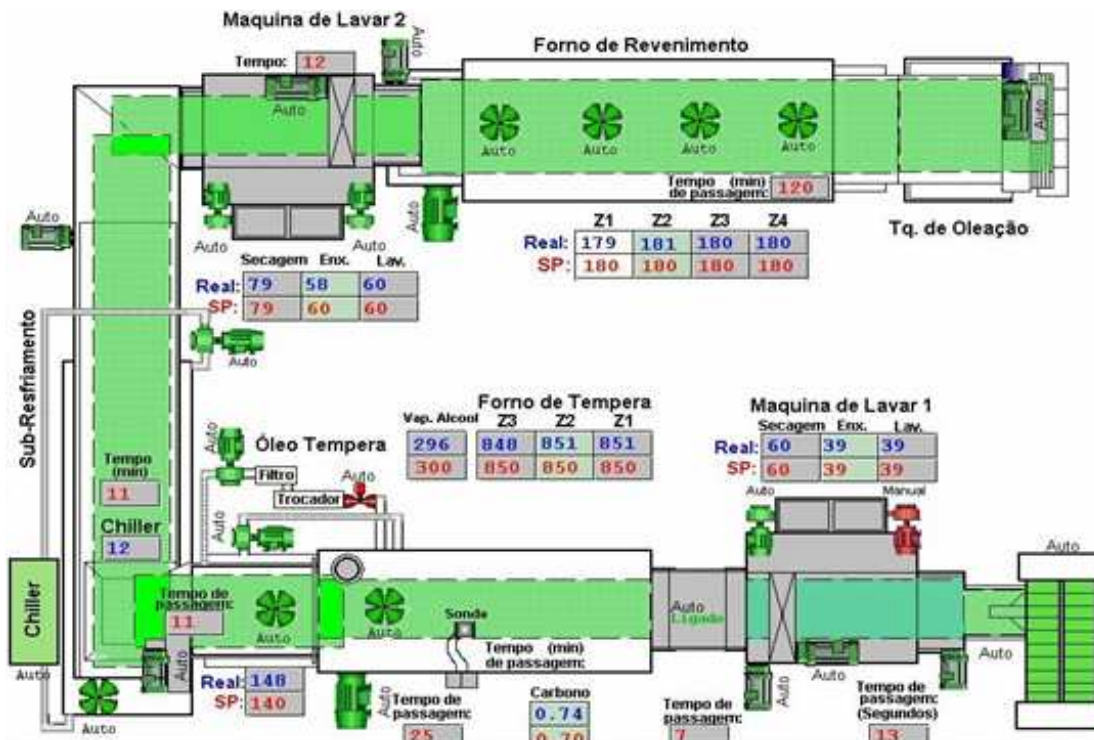
O aço utilizado na fabricação das capas de rolamentos é um aço-cromo (DIN 100Cr₆), contendo aproximadamente 1% de carbono e 1,5% de cromo, conforme composição nominal apresentada na tabela 1. O processo de manufatura das capas de rolamentos compreende vários estágios, desde a inspeção de recebimento da matéria prima até a expedição final.

Tabela 1: Composição química nominal do aço DIN 100 Cr₆.

ELEMENTO	C	Mn	P max	S max	Si	Cr
TEOR [%]	0,98 a 1,10	0,25 a 0,45	0,025	0,025	0,15 a 0,30	1,30 a 1,60

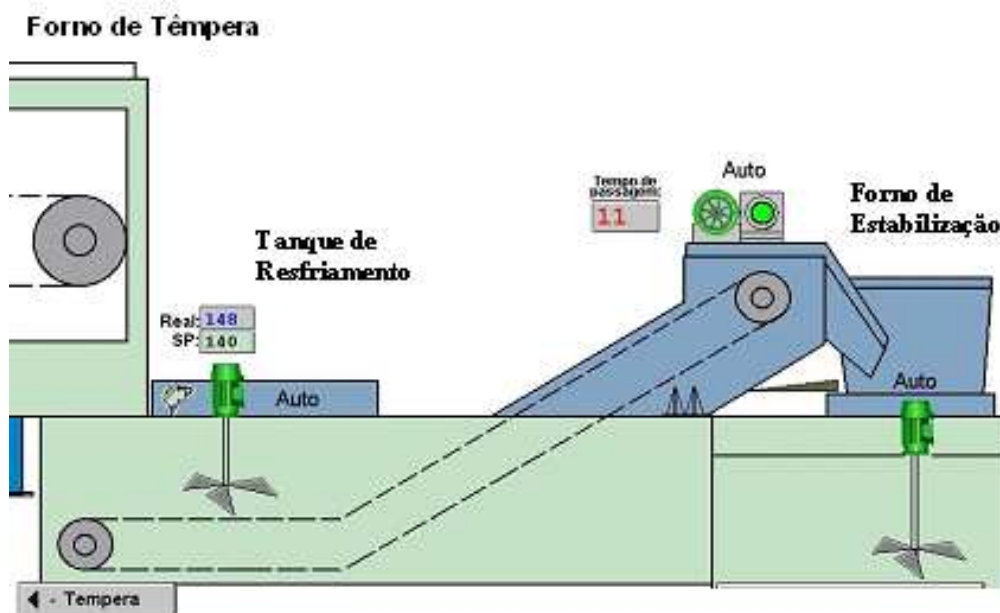
Fonte: Standards SKF do Brasil

O tratamento térmico convencional de têmpera e revenimento são feitos em fornos contínuos, com um sistema de alimentação automático com a finalidade de alimentar contínua e automaticamente, com uma taxa de produção de 400 kg/h, sendo esta a capacidade térmica do forno. Após a alimentação, todas as peças passam por um sistema de desengraxe por jatos de água, denominada máquina de lavar, que alimenta a calha vibratória que por sua vez tem a função de alimentar o forno de têmpera. O forno de têmpera constitui de uma esteira contínua em uma carcaça metálica revestida internamente por refratários, com três zonas de aquecimento por resistências sob atmosfera controlada e protetora com recirculação forçada de metanol, GLP e N₂. A próxima etapa é o resfriamento em tanque de banho de óleo, onde as peças caem por queda livre, ou seja, em posições aleatórias. A estabilização ocorre num tanque com água gelada. As duas últimas etapas do processo são uma máquina de lavar com a função de eliminar ou diminuir o arraste gerado no tanque de resfriamento e o forno de revenimento, constituído por uma esteira contínua com quatro zonas de aquecimento. Uma representação esquemática de todo o processo de têmpera e revenimento é apresentada na Figura 1. Um detalhe da etapa de têmpera é mostrado na Figura 2.



Fonte: SKF do Brasil

Figura 1. Vista em planta do forno contínuo do processo de têmpera convencional.

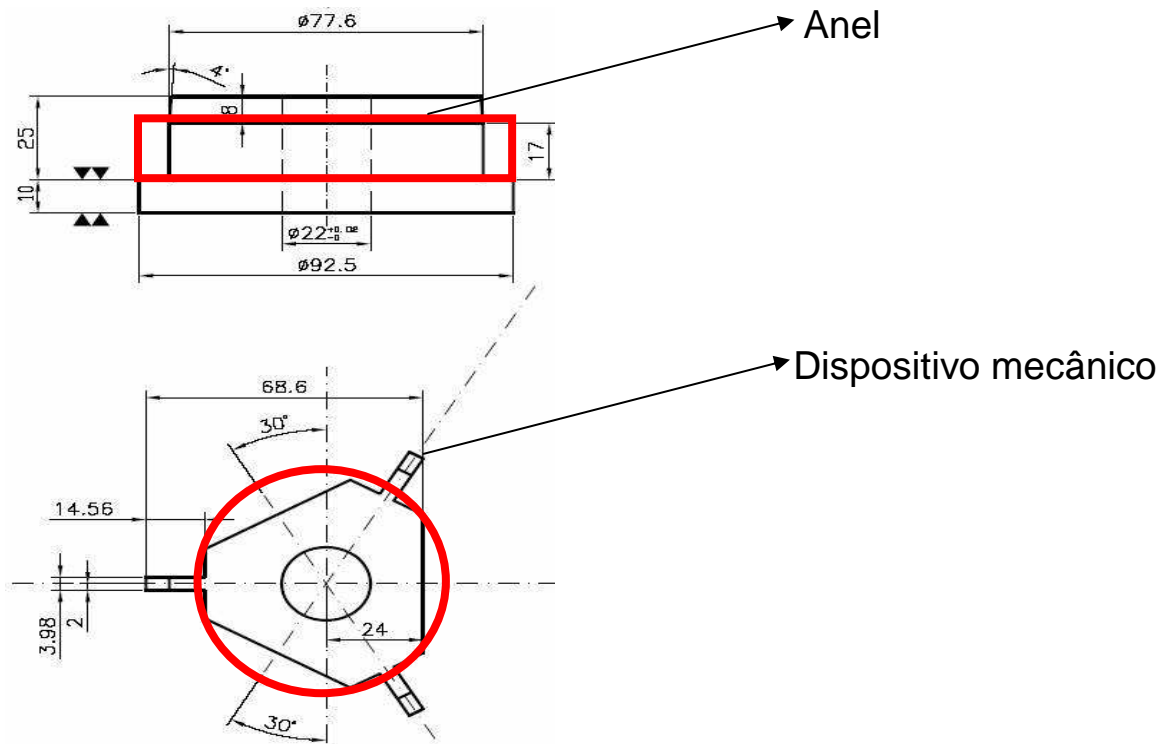


Fonte: SKF do Brasil

Figura 2. Tanque de resfriamento forno contínuo do processo de têmpera convencional.

O processo de têmpera por indução foi aplicado em laboratório, utilizando uma máquina de indução Uniscan com a frequência de 10 kHz e potência de 200 kW. O processo de austenitização foi aplicado sem atmosfera controlada. Todo o processo foi aplicado para o dispositivo desenvolvido para o anel interno do rolamento, também denominado “cone”, conforme apresentado na Figura 3. Após o aquecimento, o resfriamento foi executado em solução de polímero com um dispositivo especial para realizar a têmpera presa, com objetivo de controlar a deformação durante o resfriamento, conforme apresentado na Figura 4. O processo

de revenimento convencional também foi aplicado nas peças temperadas por indução.



Fonte: SKF do Brasil

Figura 3. Desenho esquemático do dispositivo para aquecimento por indução.

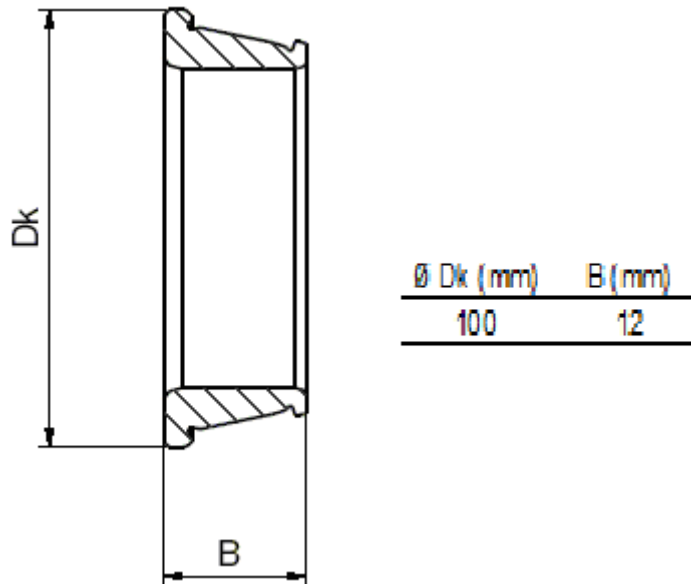


Fonte: SKF do Brasil

Figura 4. Foto do dispositivo para controle de deformação do processo de indução durante o resfriamento.

Os valores de dureza foram medidos conforme a norma ASTM E18 utilizando a escala de dureza em HRC. A análise dimensional foi determinada em 80

anéis internos conforme perfil apresentado da Figura 5, comparando-se a ovalização (diferença aritmética entre o diâmetro maior menor da mesma peça) para ambos os processos. Para análise estatística foi utilizado o software Minitab15. As microestruturas foram observadas por microscopia óptica. Os valores de austenita retida foram quantificados via difração de raios-X.



Fonte: SKF do Brasil

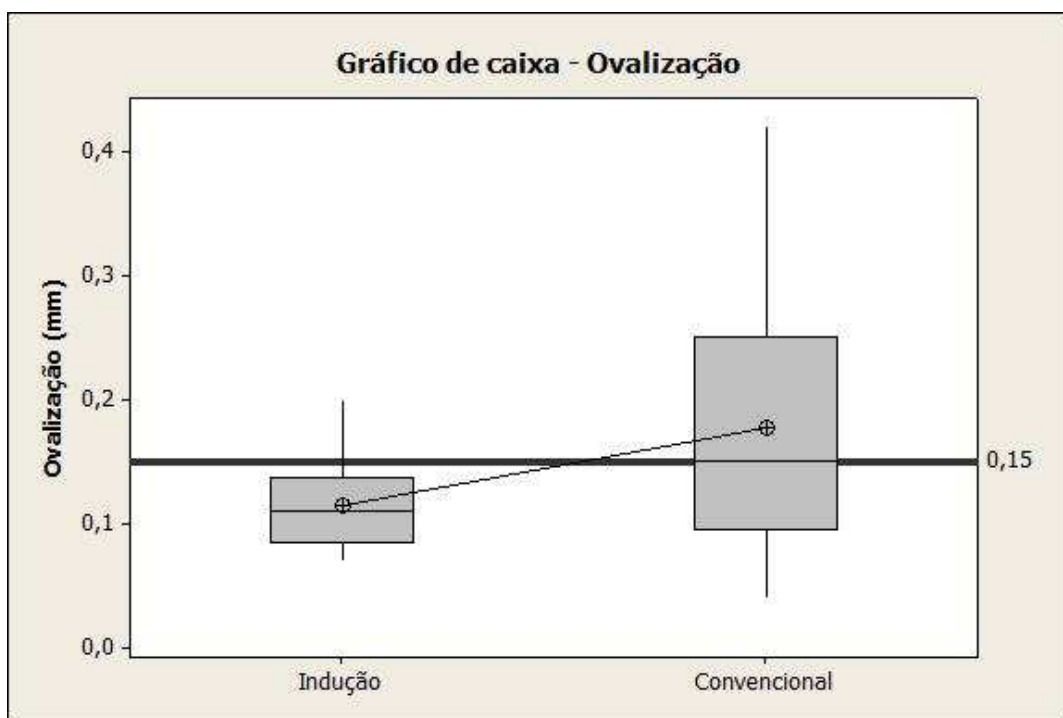
Figura 5. Dimensional do anel interno utilizado nos ensaios.

As medidas de tensão residual foram feitas num difratômetro de raios-X da marca Rigaku, modelo Dmax, utilizando a radiação α do cromo e medindo-se no plano (211). Um dispositivo apropriado para servir como porta-amostra foi desenvolvido para que o feixe de raios-X incidisse exatamente numa posição determinada da superfície externa do anel interno do rolamento. As medidas de tensão residual foram feitas da superfície para o núcleo. As medidas foram feitas depois dos tratamentos térmicos dos rolamentos (têmpera e revenimento). Para as medidas de tensão residual foram tratadas termicamente duas peças, sendo uma em cada processo: têmpera e revenimento convencional e têmpera por indução e revenimento convencional.

3 RESULTADOS

A velocidade de aquecimento por indução de alta frequência varia de 27°C/s a 227°C/s, atingindo a temperatura desejada 100 vezes mais rápida do que no forno convencional. O processo de têmpera por indução deste trabalho ocorreu com taxa de aquecimento de aproximadamente 950°C em 3 segundos, enquanto que o aquecimento na têmpera convencional atingiu a temperatura de 850°C em 25 minutos. Na Figura 6 são apresentados os resultados obtidos da análise dimensional de ovalização dos anéis internos dos rolamentos utilizando como referência o diâmetro Dk. No gráfico da Figura 6 é possível observar as médias e os desvios padrões da ovalização dos processos de têmpera convencional e por indução. Considerando o valor máximo de 0,15 mm de ovalização, 15% das peças temperadas por indução ficaram acima do limite esperado para deformação de

ovalização, enquanto que 40% das peças temperadas pelo processo convencional ficaram acima do valor desejado.



Fonte: SKF do Brasil

Figura 6. Valores de ovalização após os dois tratamentos térmicos de têmpera.



Fonte: SKF do Brasil

Figura 7. Microestrutura do rolamento temperado por indução.

Após a realização da análise dimensional, foram verificadas as microestruturas do núcleo das peças, resultantes dos dois processos de têmpera e mesmo revenimento, conforme apresentado nas Figuras 7 e 8. Em ambas as micrografias podem ser observadas uma microestrutura martensítica revenida. As peças temperadas pelos dois processos e revenidas não apresentaram indícios de decarbonetação. Em ambos os processos de têmpera os valores de dureza foram próximo: 61 HRC na peça temperada por indução e 62 HRC na temperada pelo processo convencional. A microestrutura da peça temperada por indução apresentou uma fração de 15,4% de austenita retida, enquanto a temperada por indução apresentou 7,8%. Os valores do perfil de tensão residual em função da profundidade a partir da superfície dos rolamentos temperados pelos dois processos são apresentados na Tabela 2 e na Figura 9.



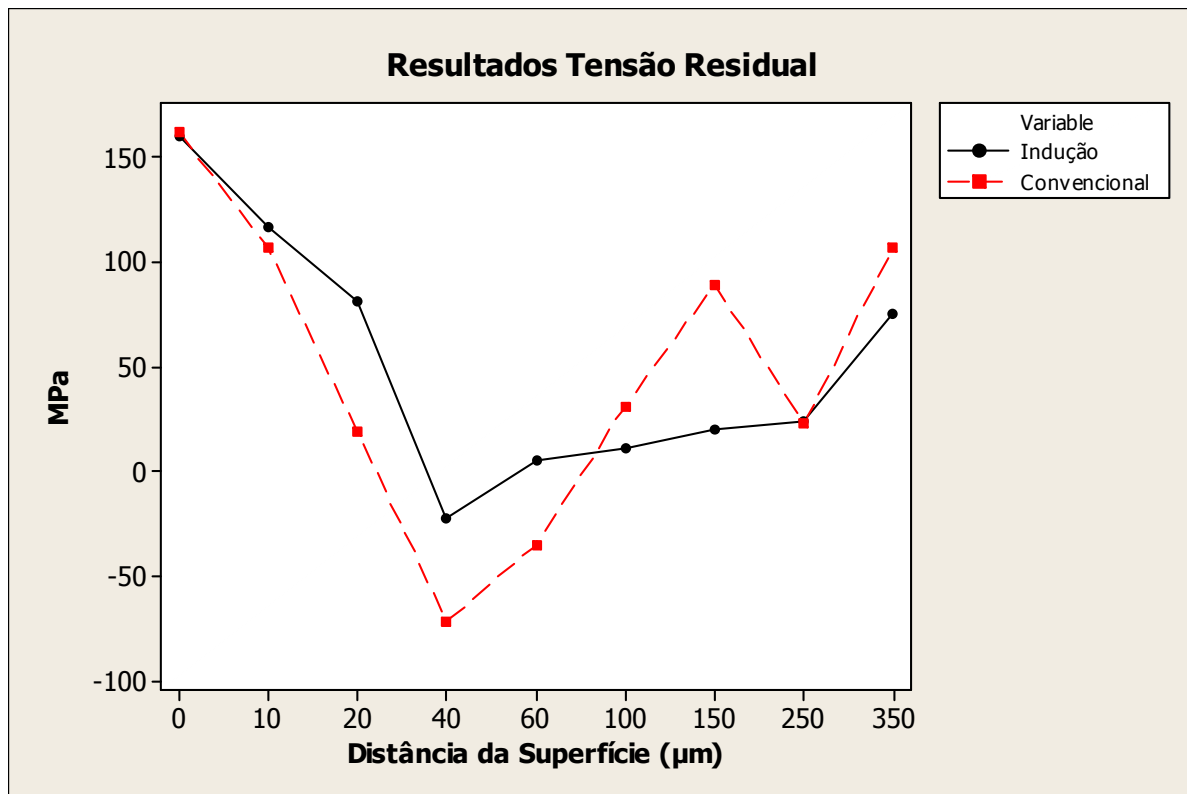
Fonte: SKF do Brasil

Figura 8. Microestrutura resultante do processo de têmpera convencional.

Tabela 2. Valores de tensão residual para os processos de indução e convencional.

Distância da superfície (µm)	Indução (MPa)	Convencional (MPa)
0	160	162
10	117	107
20	81	19
40	-23	-72
60	5	-35
100	11	31
150	20	89
250	24	23
350	75	107

Fonte: SKF do Brasil



Fonte: SKF do Brasil

Figura 9. Gráfico comparativo dos valores de tensão residual em função da profundidade dos rolamentos temperados por indução e convencional.

4 DISCUSSÃO

O processo de tratamento térmico por indução gera menores deformações que processos de tratamento térmicos convencionais ⁽⁶⁾. Em função disto, os resultados dimensionais encontrados mostram que o processo de tratamento térmico por indução gera deformação nos rolamentos em níveis bem abaixo do gerado pelo processo convencional. Este resultado já era esperado devido à falta de controle de posição da peça durante o resfriamento convencional gerando diferentes gradientes térmicos durante a transformação de fase. No processo por indução todas as peças foram aquecidas e resfriadas utilizando um dispositivo mecânico que garantiu a mesma posição, resultando em uma ovalização menor. As tensões que são geradas internamente podem ser de duas naturezas: tensões estruturais e tensões térmicas, sendo que estas últimas ocorrem devido ao fato das diferentes regiões das peças se resfriarem em velocidades diferentes. Quando essas tensões internas ultrapassam o limite de escoamento do aço ocorre sua deformação plástica e as peças apresentarão uma ovalização.

A velocidade de aquecimento por indução de alta frequência por ser muito maior do que a velocidade de aquecimento do forno convencional resulta numa microestrutura menos homogênea. Em função disto, o processo de têmpera por indução gera carbonetos pouco dissolvidos e uma fração maior de austenita retida se comparado com o processo convencional. Isto ocorre porque a velocidade de nucleação da austenita cresce mais rapidamente que a sua velocidade de crescimento linear. Em decorrência disto, acima das temperaturas de início (Ac1) e de fim (Ac3) da transformação em austenita, formam-se grãos austeníticos pequenos, com tamanhos médios variando de 2 µm a 7 µm. Devido à elevada

velocidade de aquecimento e à curta exposição à temperatura máxima, os átomos de carbono distribuem-se não uniformemente na estrutura da austenita.⁽⁵⁾

O perfil de tensão residual apresentado nas duas peças pode ser considerado o mesmo, principalmente porque o desvio padrão na medida de tensão residual por difração de raios-X pode atingir até ± 30 MPa. Portanto, a explicação para uma menor ovalização das peças tratadas no processo por indução parece estar relacionada ao dispositivo mecânico que garante um melhor posicionamento das peças durante o aquecimento e resfriamento. Outro fator fundamental para os mesmos valores de tensão residual foi a execução do revenimento convencional nas peças temperadas pelos dois processos.

5 CONCLUSÃO

A comparação dos anéis de rolamentos de aço cromo submetidos a têmpera convencional e por indução evidenciaram as seguintes conclusões:

- o processo de têmpera por indução e revenimento convencional provocou uma ovalização menor nos anéis de rolamento do que o processo convencional;
- os resultados de microestrutura e dureza dos rolamentos temperados por indução sugerem que o processo pode ser aplicado na fabricação desse componente;
- os valores obtidos de tensão residual não permitiram definir nenhuma relação com a ovalização do rolamento; e
- para continuação deste trabalho torna-se importante o desenvolvimento do processo de revenimento por indução e testes de bancada em rolamentos montados.

Agradecimentos

A SKF do Brasil por contribuir com as informações necessárias para a execução dos testes.

REFERÊNCIAS

- 1 SKF, *Catálogo geral de rolamentos*. 2ª ed. Brasil. 2001.
- 2 SPIM, JAIME ALVARES. *Tratamentos Térmicos e Temoquímicos*. 2ª ed. Brasil: ABM, 2003.
- 3 ASM HANDBOOK. *Heat Treatment*. V. 4. 2ª ed. USA: ASM International, 1998, p.1012
- 4 FELLIPE, Douglas Marquezin, Costa, F. R., Lombardi, R. L., LIMA, Nelson Batista de, COUTO, Antonio Augusto. Análise dimensional e medidas de tensão residual em capas de rolamento de um aço-cromo submetido a tratamentos térmicos de têmpera e revenimento: 17 Congresso Brasileiro de Ciência e Engenharia de Materiais - CBECiMat, 2006, Foz do Iguaçu.
- 5 Anais do 17 Congresso Brasileiro de Ciência e Engenharia de Materiais. , 2006. p.1 - 12.
- 6 AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM) *Induction Heat Treatment of Steel*, Ohio, 9 , p.5, 1986.
- 7 FERREIRA, C. R., ARAÚJO, F. G. S., OLIVEIRA, C. P., COTA, A. B. *Tratamento Térmico por Indução Eletromagnética em Tubos de Aço SAE 1045 para Produção de Hastes de Sondagem Geológica*. Metalurgia & Materiais, Ouro Preto, p. 23-26, 2004.
- 8 TOTTEN, G. E. *Steel Heat Treatment: Equipment and Process Design*. Taylor & Francis, 2007.