

ANÁLISE DIMENSIONAL E MEDIDAS DE TENSÃO RESIDUAL EM CAPAS DE ROLAMENTO DE UM AÇO-CROMO SUBMETIDO A TRATAMENTOS TÉRMICOS DE TÊMPERA E REVENIMENTO

D. M. Felipe¹; F. R. Costa¹; R. L. Lombardi¹; N. B. Lima²; A. A. Couto^{2,3}
Endereço: Av. Silvestre José de Oliveira nº 48, Jundiaí, SP, CEP: 13218-690
e-mail: douglas.felippe@skf.com

(1) SKF do Brasil Ltda; (2) Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN);
(3) Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM)

RESUMO

A têmpera do aço-cromo visando à fabricação de capas de rolamento é uma das etapas mais críticas do processo, pois o resfriamento pode ocasionar distorções dimensionais (ovalização) nas peças. Este trabalho tem como objetivo estudar as alterações dimensionais em capas de rolamentos após o processo de tratamento térmico de têmpera e revenimento, comparando os resultados obtidos após a utilização dos meios de resfriamento em banho de sais fundidos e óleo. Medidas de dureza e de tensão residual por difratometria de raios-X foram executadas em todas as etapas do processo de fabricação. Os resultados indicaram que o resfriamento em banho de sais fundidos apresentou uma maior distorção das capas de rolamento. A princípio, os resultados das medidas de distorções da capa de rolamento, devido aos diferentes meios de resfriamento na têmpera, não parecem estar relacionados com a tensão residual gerada no material.

Palavras-chave: aço-cromo, rolamento, tensão residual, têmpera.

INTRODUÇÃO

Os aços utilizados na fabricação de anéis e corpos rolantes de um rolamento devem ser endurecíveis e ter alta resistência à fadiga e ao desgaste. A estabilidade estrutural e dimensional dos componentes deve ser satisfatória devido ao fato desses elementos estarem sujeitos a ações de vibração, choque, desalinhamento e detritos. Na fabricação de rolamentos, utiliza-se como matéria prima o aço DIN 100

Cr6, contendo em sua composição química cerca de 1% de carbono e 1,5% de cromo. Este aço, na forma de barras, é forjado, recozido, usinado, tratado termicamente e retificado para fabricação das capas de rolamentos ⁽¹⁾. A boa temperabilidade deste material resulta em propriedades desejáveis, tais como: alta resistência à fadiga e ao desgaste.

Durante o tratamento térmico deste aço, deve-se manter um rigoroso controle das taxas de aquecimento e resfriamento das peças, do tempo de permanência em temperatura constante e do ambiente de aquecimento, objetivando os melhores resultados nas propriedades finais ⁽²⁾. Uma das partes mais críticas do tratamento térmico de têmpera e revenimento é o resfriamento, pois a extração de calor das peças pode resultar em deformações e variações dimensionais indesejadas. 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⁾. Além disto, o meio de resfriamento durante o processo de tratamento térmico também determina efetivamente a estrutura e, em conseqüência, as propriedades finais do aço.

Os meios de resfriamento usuais são: ambiente do forno, ar e meios líquidos. O resfriamento mais brando é, evidentemente, o realizado no próprio interior do forno e se torna mais severo ao ar ou para um meio líquido, onde uma agitação no banho dá origem a resfriamentos mais drásticos ainda. Para a escolha do meio de resfriamento é necessário conciliar dois aspectos: resfriar adequadamente o material para a obtenção da estrutura e das propriedades desejadas e, ao mesmo tempo, evitar ao máximo deformações e distorções da peça ⁽⁴⁾. Atualmente, no processo de tratamento térmico da SKF do Brasil, são utilizados os meios de resfriamento em banho de sal (AS-140) e óleo (Microtemp 178). Porém, estes meios de resfriamento podem gerar deformações indesejadas nas capas de rolamento, resultando em peças rejeitadas.

Neste trabalho foram estudadas as alterações dimensionais em capas de rolamentos, “taper roller bearing” (TRB), que tem sua aplicação voltada principalmente para caixas de câmbios de automóveis. Este componente apresenta geometria não favorável para deformação, podendo ocasionar a rejeição de peças e, conseqüentemente, acarretando um ônus para o processo. Na SKF do Brasil, todas as capas de rolamentos TRB, durante todas as etapas do processo de tratamento térmico, são executadas em fornos contínuos. O único diferencial no processo é o

meio de resfriamento na têmpera, que pode ser em banho de sais fundidos ou em óleo.

O objetivo deste trabalho é identificar, durante o processo de tratamento térmico, as possíveis causas das alterações dimensionais e das deformações ocorridas nas capas de rolamento durante o resfriamento nos meios: banho de sais fundidos e óleo. Na caracterização das peças serão utilizadas análises dimensionais das capas de rolamento e difratometria de raios-X para determinação da tensão residual.

MATERIAIS 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 apresentado 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. Durante o processo de manufatura de rolamentos da SKF do Brasil, os processos de tratamento térmico podem ser divididos em três etapas: recozimento (esferoidização), têmpera e revenimento. O tratamento térmico de esferoidização não tem efeito significativo nas possíveis deformações e distorções nas capas de rolamento, pois são executados antes da usinagem das peças, para melhorar sua usinabilidade.

Tabela 1: Composição química do aço DIN 100Cr₆.

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

Os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento são feitos em um equipamento de 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 de metanol, GLP e N₂, com recirculação forçada. A próxima etapa é o tanque de resfriamento, onde as peças caem por queda livre, ou seja, em posições aleatórias. O próximo estágio, 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 seguido do 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.

Os meios de resfriamento utilizados na têmpera foram o sal AS-140, fornecido pela Brasimet e o óleo Microtemp 178, fornecido pela Microquímica. Os parâmetros dos processos de têmpera e revenimento foram praticamente os mesmos para os dois meios. A única diferença foi a temperatura de resfriamento que no sal é 180 °C enquanto que no óleo é 140 °C. O meio, sal ou óleo, têm variações em suas curvas e velocidades de resfriamento, conforme apresentado na tabela 3 e na figura 3. Utilizou-se na tabela 3 a temperatura de referência de 300 °C por ser próxima ao início da transformação martensítica.

Tabela 3: Tempo e velocidade de resfriamento a 300 °C, para os meios de resfriamento de Sal e Óleo.

Meio de Resfriamento	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Velocidade de Resfriamento (°C/s)
Sal-AS140	300	46,2	2,6
Óleo-Microtemp 178	300	31,4	4,2

A análise dimensional das capas de rolamento foi executada com o objetivo de identificar os níveis de deformação ocorridos durante todo o processo. Toda a análise dimensional das peças foi feita em dois pontos do diâmetro da capa de rolamento, conforme indicado pelas setas na figura 4. Desta maneira, pode-se determinar, em duas posições, a ovalização e o diâmetro médio de cada peça dimensionada. A distorção crítica das capas de rolamento está relacionada com a ovalização, determinada pela diferença, Ø Máximo – Ø Mínimo. A ovalização pode fazer com que peças sejam rejeitadas ou com que quantidades de sobremetal tenham de ser adicionadas, acarretando gastos com retífica.

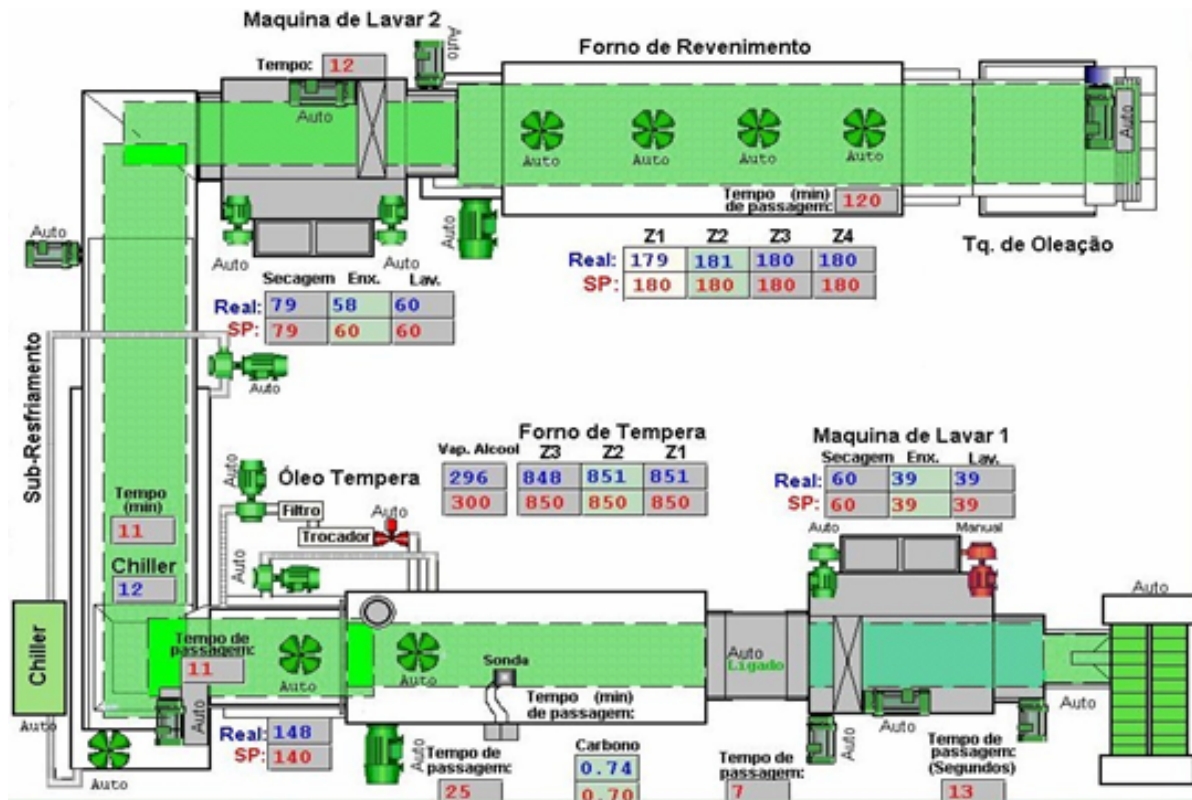


Figura 1: Representação esquemática da planta de um forno contínuo de tratamento térmico de têmpera e revenimento.

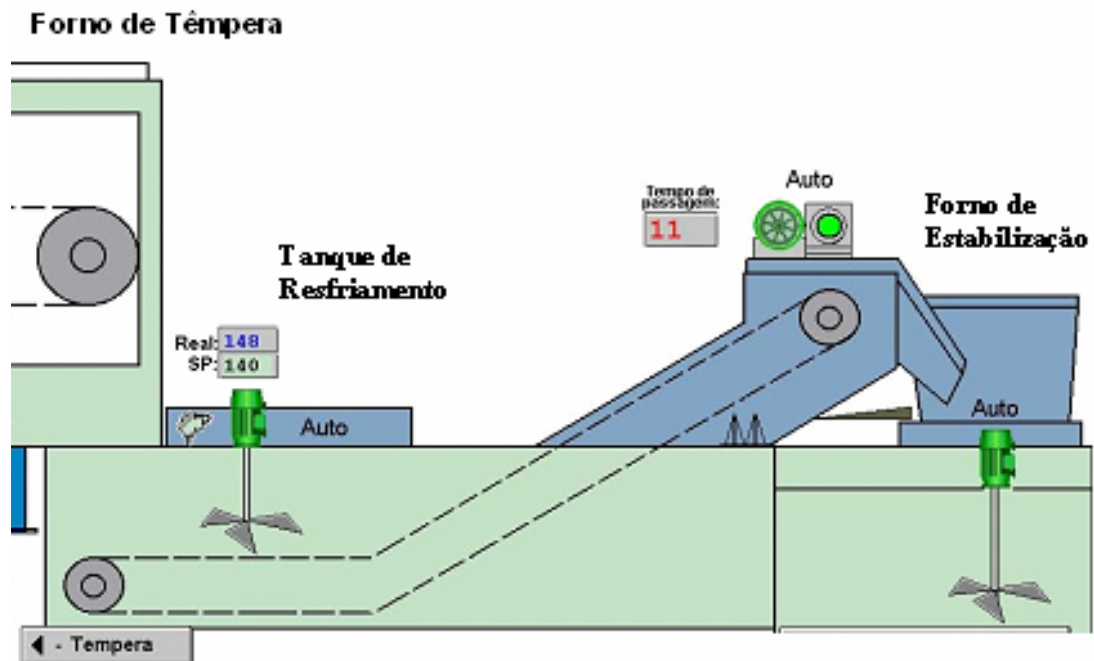


Figura 2: Representação esquemática de um detalhe da vista lateral do forno contínuo, mostrando a etapa do processo de resfriamento na têmpera.

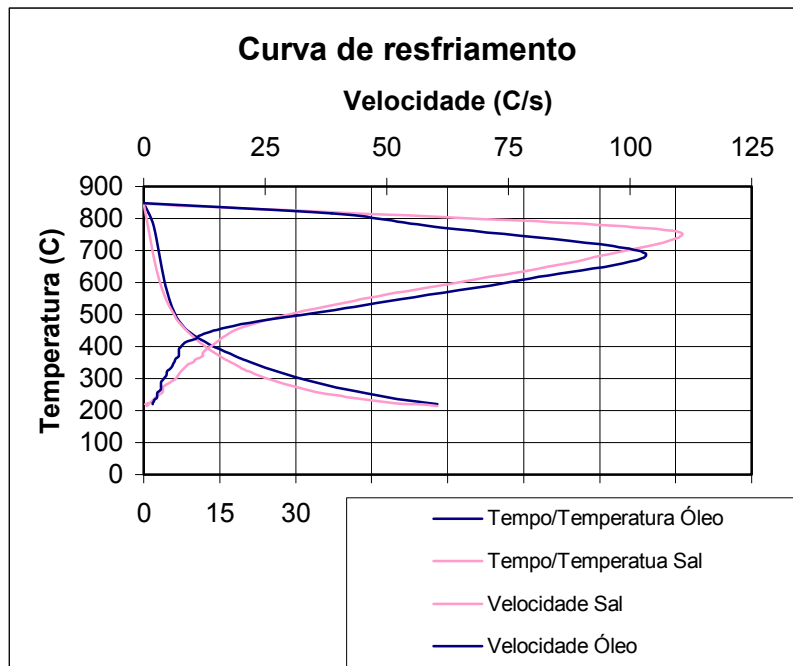


Figura 3: Curva e velocidade de resfriamento do sal-AS-140 e óleo Microtemp 178.

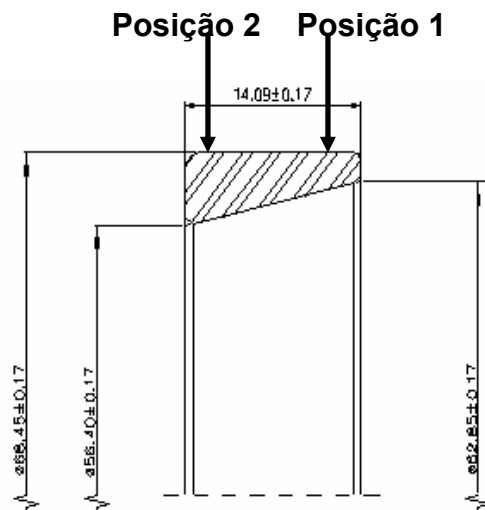


Figura 4: Desenho da capa de rolamento indicando as posições de medição.

Com o objetivo de avaliar qual etapa do processo de tratamento térmico é mais crítica na ovalização das capas de rolamento, foram executadas medidas em cada estágio do processo de tratamento térmico das peças, seguindo-se de uma análise estatística utilizando o software Minitab. As análises dimensionais ao final de cada etapa do processo foram realizadas em 20 anéis. Além disto, foram feitas também medições em 50 anéis ao final do processo de tratamento térmico, para cada meio de resfriamento utilizado, sal e óleo, visando determinar qual meio provoca maior ovalização das peças.

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 das capas dos rolamentos. As medidas de tensão residual foram feitas em dois pontos da superfície externa das capas de rolamento deslocados de 90°. As medidas foram feitas antes e depois do processo de tratamento térmico. Para as medidas foram tratadas duas peças dispostas em posições diferentes na esteira do forno contínuo de tratamento térmico. Este procedimento foi feito tanto para o resfriamento em sal como para o resfriamento no óleo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas figuras 5 a 8 são apresentados os gráficos obtidos da análise dimensional (ovalização) das capas de rolamento em cada etapa do processo, nas posições 1 e 2, nos dois meios de resfriamento utilizados: sal e óleo. Nota-se nestes gráficos que independente do meio de resfriamento, a têmpera provoca a ovalização mais significativa, que acaba sendo mantida nas etapas de estabilização e revenimento. Este resultado já era totalmente esperado, uma vez que na têmpera ocorrem gradientes de temperatura e conseqüentemente contrações não-uniformes na peça acompanhada de mudança de fase. A têmpera gera estados de tensões de tração que tem como conseqüência uma maior ovalização.

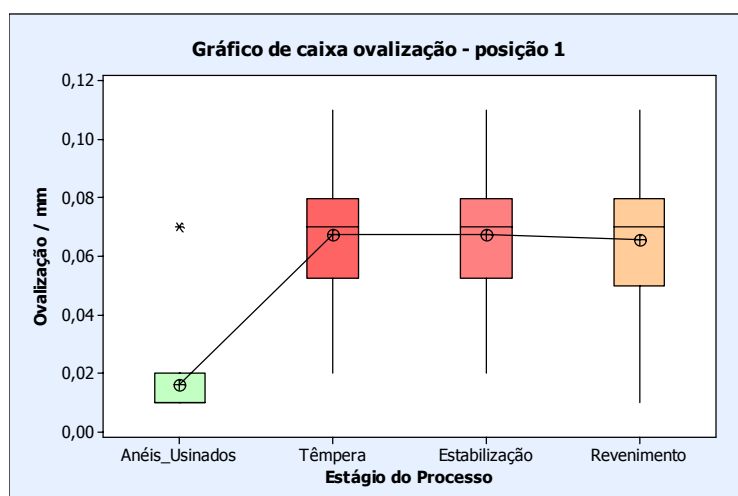


Figura 5: Valores de ovalização em cada estágio do processo de tratamento térmico em meio de resfriamento de têmpera em óleo medido na posição 1.

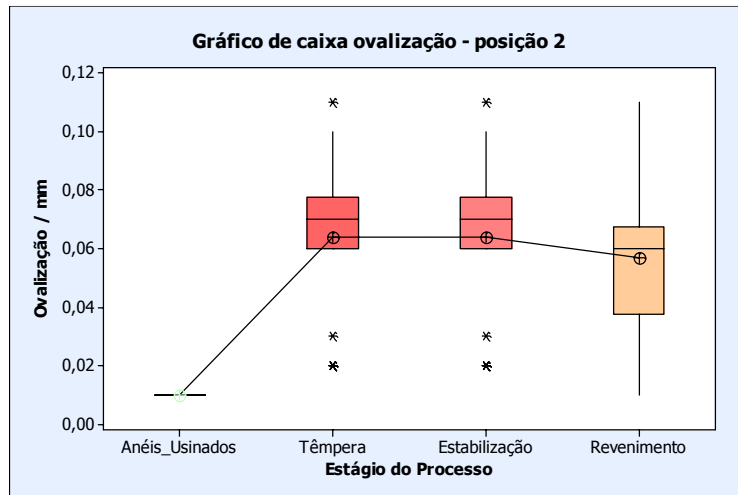


Figura 6: Valores de ovalização em cada estágio do processo de tratamento térmico em meio de resfriamento de têmpera em óleo medido na posição 2.

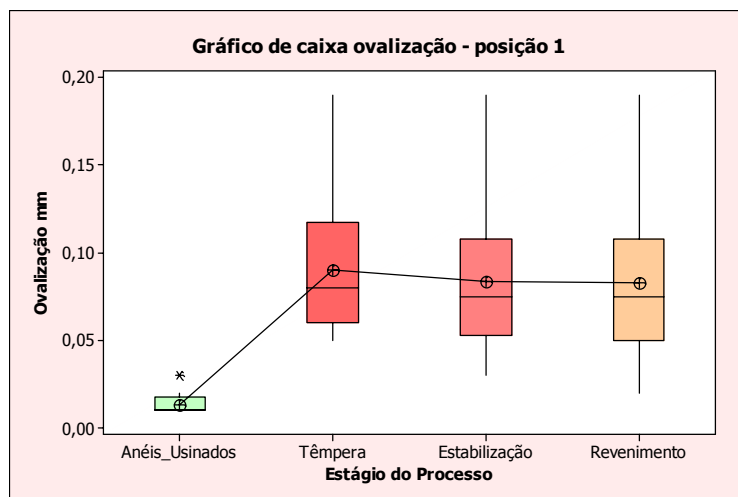


Figura 7: Valores de ovalização em cada estágio do processo de tratamento térmico em meio de resfriamento de têmpera em sal medido na posição 1.

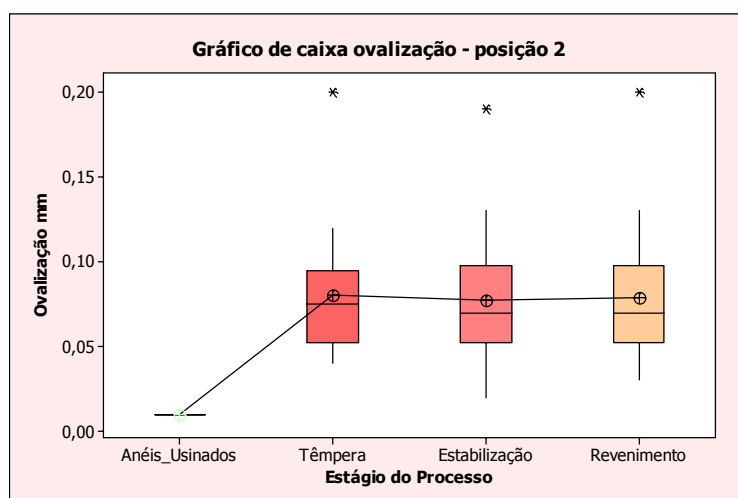


Figura 8: Valores de ovalização em cada estágio do processo de tratamento térmico em meio de resfriamento de têmpera em sal medido na posição 2.

As tensões que são geradas internamente podem ser de duas naturezas: tensões estruturais e tensões térmicas, sendo que estas últimas ocorrem ao fato das diferentes seções 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 essas deformações não desejadas (ovalização). Uma outra constatação desses resultados dimensionais é a ovalização sistematicamente mais significativa na posição 1 do que na posição 2. Vale ressaltar da figura 4 que na posição 1 a capa de rolamento apresenta uma menor espessura do que na posição 2, sugerindo que para espessuras menores a ovalização torna-se mais crítica.

Após a verificação de qual o estágio do processo tem maior ovalização, as capas de rolamento foram avaliadas com relação aos meios de resfriamento, sal e óleo, na têmpera. Os resultados de ovalização obtidos nas posições de medida 1 e 2 são apresentados nas figuras 9 e 10. Nota-se nas figuras 9 e 10 uma maior ovalização na posição 1 de espessura menor do que na posição 2, como já havia sido observado em todos os outros estágios do processo de tratamento térmico. Uma outra constatação na análise desses gráficos é que o resfriamento no sal provocou uma maior ovalização do que o resfriamento no óleo.

Na análise dos parâmetros do processo e das velocidades de resfriamento a 300 °C (próximo da transformação martensítica) dos dois meios utilizados (tabelas 2 e 3) verifica-se que as diferenças entre o sal e o óleo são as temperaturas de resfriamento, 180 °C para o sal e 140 °C para o óleo, e as velocidades de resfriamento, 2,6 °C/s para o sal e 4,2 °C/s para o óleo. Apesar dos valores de temperatura de resfriamento e velocidade de resfriamento a 300 °C parecerem mais favoráveis a uma menor ovalização no resfriamento no sal, não foi isto o observado. O que parece ser favorável ao resfriamento no óleo é sua significativamente menor velocidade de resfriamento do que no sal em temperaturas elevadas, como pode ser observado no gráfico da figura 3, sugerindo que o resfriamento nestas temperaturas possa estar acarretando uma maior ovalização nas peças resfriadas no sal.

Os resultados de tensão residual das peças com e sem tratamento térmico, resfriadas em sal e em óleo, em duas posições da superfície externa das capas de rolamento, deslocadas uma da outra de 90°, são apresentadas na tabela 4. Primeiramente, vale ressaltar que todas as peças, com ou sem tratamento térmico, apresentam tensão residual de tração. Uma segunda observação geral é que após

os tratamentos térmicos, independente do meio de resfriamento, a tensão residual aumentou consideravelmente. Nota-se também que as peças antes do tratamento térmico (usinadas) apresentam valores heterogêneos de tensão residual em função da não uniformidade da usinagem. Porém, o tratamento térmico em temperaturas elevadas eliminou estas diferenças de tensão residual devido a usinagem. Isto pode ser constatado pela excelente reprodutibilidade dos valores de tensão residual das peças após tratamento térmico.

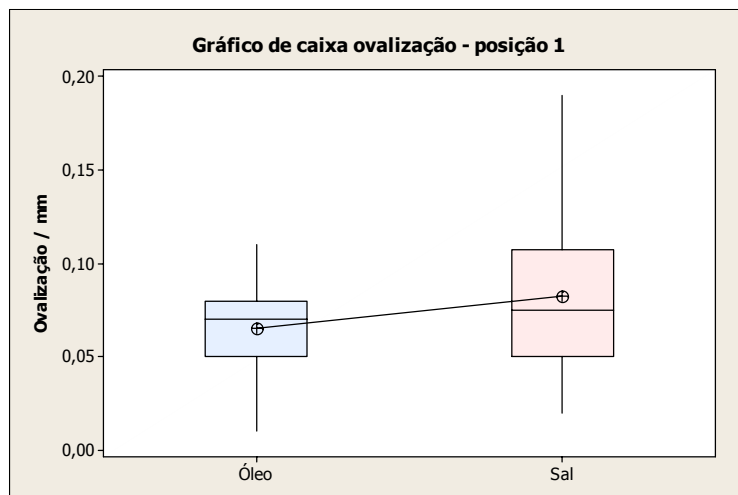


Figura 9: Resultados de ovalização das capas de rolamento na posição 1 de medição, comparando efeito do meio de resfriamento na têmpera, sal e óleo.

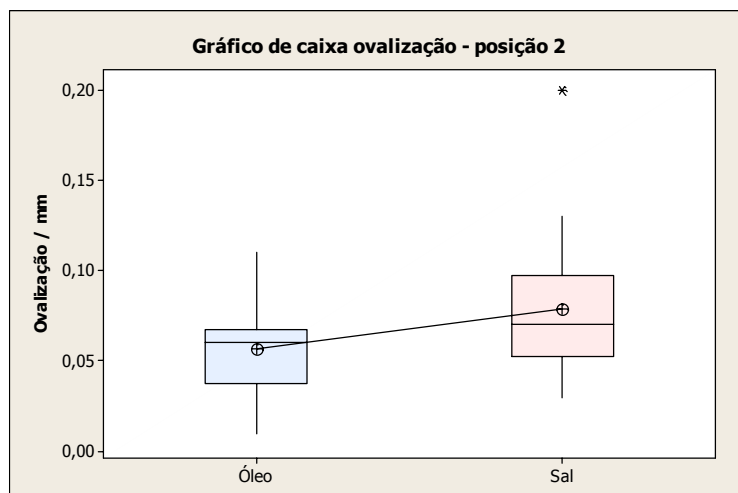


Figura 10: Resultados de ovalização das capas de rolamento na posição 2 de medição, comparando efeito do meio de resfriamento na têmpera, sal e óleo.

O valor médio de tensão residual das peças após o processo de tratamento térmico com resfriamento em sal é de 285 MPa e em óleo é de 252 MPa. Apesar da tensão residual nas peças resfriadas em sal estarem levemente superiores, não

seria prudente correlacionar esta tensão residual superior com uma maior ovalização, principalmente porque o erro na medida de tensão residual por difração de raios-X pode atingir até ± 30 MPa. Portanto, a explicação para a maior ovalização das peças resfriadas no sal do que no óleo não parece estar simplesmente relacionada somente ao meio de resfriamento, mas sim a um conjunto de fatores relacionados a todo o processo de tratamento térmico. Como o processo de tratamento térmico em forno contínuo automatizado foi particularmente concebido para atingir alta produtividade, modificações no processo buscando diminuir a ovalização não são triviais e requer estudos mais detalhados para identificar realmente a causa, antes que qualquer ação seja tomada.

Tabela 4: Valores de tensão residual medido por difração de raios-X nas capas de rolamento antes e após o processo de tratamento térmico.

Resfriamento na Têmpera	Peça	Condição	Tensão Residual em A [MPa]	Tensão Residual a 90° de A [MPa]
Sal-AS140	2	Antes do $t^{o}t^o$	99,0	179,5
		Após o $t^{o}t^o$	300,5	289,0
	3	Antes do $t^{o}t^o$	190,5	209,5
		Após o $t^{o}t^o$	275,0	279,0
Óleo-Microtemp 178	5	Antes do $t^{o}t^o$	154,0	161,0
		Após o $t^{o}t^o$	249,5	232,0
	8	Antes do $t^{o}t^o$	88,0	90,5
		Após o $t^{o}t^o$	247,0	280,0

CONCLUSÕES

A análise dimensional e as medidas de tensão residual por difração de raios-X das capas de rolamento de um aço cromo submetido a tratamentos térmicos de têmpera e revenimento evidenciaram as seguintes conclusões:

- O resfriamento em sal na têmpera provocou uma ovalização maior nas capas de rolamento do que o resfriamento em óleo.
- Independente do meio de resfriamento, a ovalização é mais acentuada na região da capa de rolamento de espessura menor e é originada na etapa de têmpera da peça.
- A tensão residual das peças após o processo de tratamento térmico aumentou

consideravelmente em relação às peças usinadas, independente do meio de resfriamento.

- Os valores obtidos de tensão residual não permitem definir nenhuma relação com o meio de resfriamento e conseqüentemente com a ovalização das peças.

REFERÊNCIAS

1. SKF, Catálogo geral, 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, 1995, p. 1012.
4. Chiaverini, Vicente. Aços e Ferros Fundidos. 7ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002, p. 500.

DIMENSIONAL ANALYSIS AND MEASURES OF RESIDUAL STRESS AT OUTER RING BEARING OF THE CARBON-CHROMIUM SUBMITTED TO HEAT TREATMENTS OF QUENCHING AND TEMPERING

ABSTRACT

The quenching of the carbon-chromium steel is one of the most critical steps of the process during the outer ring bearing manufacture, because the cooling may cause dimensional distortions (ovalization) on the parts. The aim of this essay is to study the dimensional changes at outer ring bearing after the thermal treatments quenching and tempering, comparing the results taken after the cooling process of molten salt bath and oil. Measures of hardness and residual stress using X-ray diffraction were made in all manufacture process steps. The results of the cooling in molten salt bath showed higher dimensional distortions at the outer ring bearing. At first, the measure distortions results from the outer ring bearing due to different cooling processes of the quenching do not seem to be related to the residual stress generated in the material.

Key-words: carbon-chromium steel, outer ring bearing, residual stress, quenching.