

# DESENVOLVIMENTO DE ROLAMENTOS COM SUPER RESISTÊNCIA AO DESGASTE, APLICADOS EM MÁQUINAS DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO - NSK SWR <sup>1</sup>

*Fábio Henrique Rissari Bissa* <sup>2</sup>

## **Resumo**

Aplicações onde os rolamentos autocompensadores de rolos esféricos são submetidos a grandes cargas radiais e baixa rotação, como por exemplo nas máquinas de lingotamento contínuo, podem apresentar formas características de falha como a quebra de borda a partir do desgaste prematuro ao longo da linha de rolagem verdadeira formada pelo coroamento das pistas de rolagem com os roletes esféricos, inerente a este tipo de rolamento na condição de trabalho argumentada. Para estas aplicações a NSK desenvolveu um aço com propriedades de maior tenacidade e tratamentos de superfície para o endurecimento da superficial da mesma. Desta maneira, garantindo uma maior capacidade para se absorver energia das cargas de trabalho e uma resistência ao desgaste superior aos rolamentos convencionais. Esta tecnologia é chamada de SWR (Super Wear Resistance – Super Resistência ao Desgaste) será apresentada neste artigo.

**Palavras-chave:** Lingotamento contínuo; Resistência ao desgaste; Tenacidade; Fadiga; Quebra de borda.

## **DEVELOPMENT OF BEARINGS WITH SUPER WEAR RESISTANCE APPLIED IN CONTINUOUS CASTING MACHINES – NSK SWR**

### **Abstract**

Applications where the spherical roller bearings are submitted to high radial load and low rotation, like continuous casting machine, can be present characteristics of failure as fracture of edge from premature wear on the real line of rolling originated between the rollers and the raceway, inherent for this application. For this application, the NSK developed one kind of steel with more toughness and superficial treatment of hardness. Thus, ensuring more capacity of energy absorb from the work loads and a better wear resistance than the conventional bearings. This technology is called SWR and will be presented in this paper.

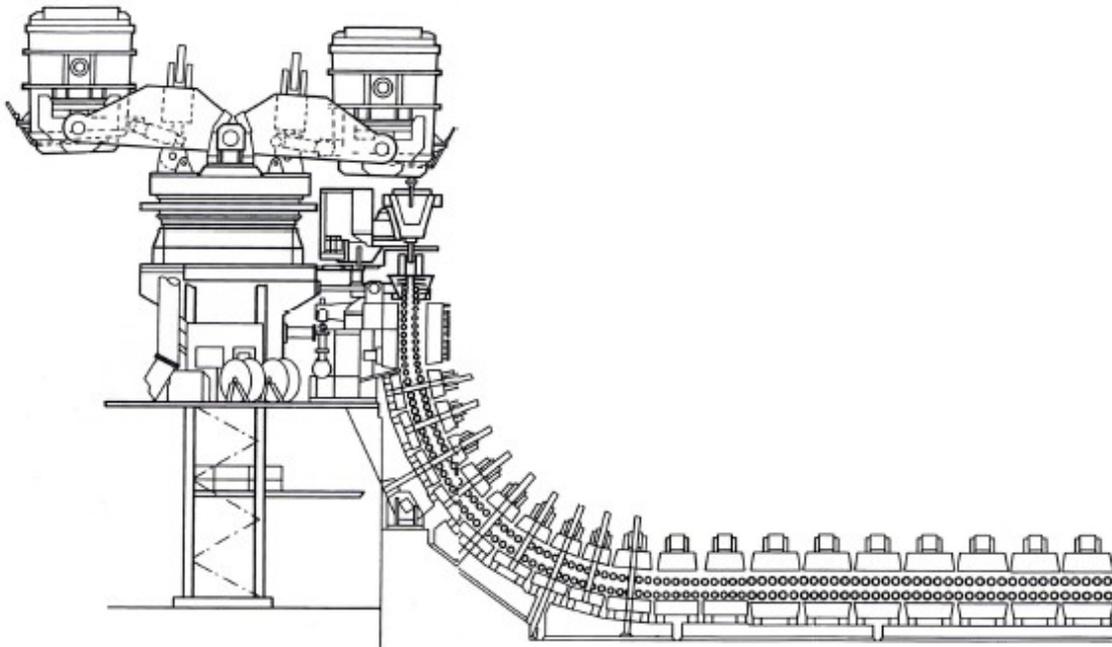
**Key words:** Continuous casting; Wear resistance; Toughness; Fatigue; Fracture of edge.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 40º Seminário de Aciaria – Internacional, 24 a 27 de maio de 2009, São Paulo, SP, Brasil.*

<sup>2</sup> *M.Sc.(NSK Brasil Ltda).*

## 1 INTRODUÇÃO

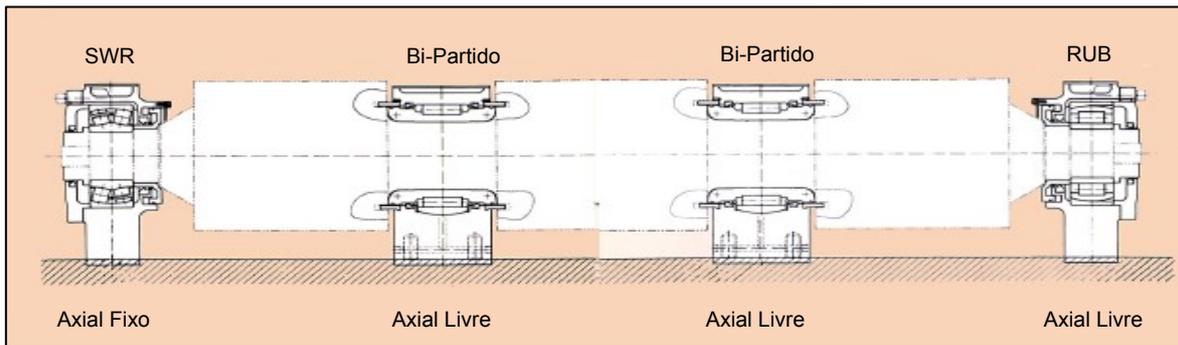
O lingotamento contínuo é o processo no qual o aço é vazado continuamente em um molde de cobre refrigerado a água para posteriormente ser solidificado em produtos semi-acabados, tais como: tarugo, perfis e placas. Neste equipamento o produto semi-acabado é forçado a passar entre rolos guias superiores e inferiores, divididos em blocos, denominados segmentos de laminação. Na Figura 1, observamos que a passagem do semi-acabado é orientada por uma parte curva enquanto que o perfil adquire a forma dimensional e solidifica.



**Figura 1** – Esquemática do processo de lingotamento contínuo mostrando os rolos guias desde os segmentos iniciais, os segmentos curvos e segmentos retos.<sup>(1)</sup>

À medida que o aço líquido é vazado pela panela da aciaria para o interior do molde, no início do lingotamento, este começa a se solidificar com o resfriamento externo e a criar uma casca solidificada enquanto que o núcleo ainda permanece em estado semi-sólido no início do processo. No início do lingotamento contínuo podemos afirmar que os esforços aplicados nos rolamentos dos rolos guias são menores que os esforços aplicados a medida que o semi-acabado solidifica por completo. Em geral a parte mais crítica em termos de esforços em rolamentos, está ao final da curvatura da máquina de lingotamento contínuo, onde o semi-acabado está totalmente solidificado e o mesmo começa a ser desdoblado pelos rolos de guia ou segmento.

A Figura 2 mostra um arranjo típico de rolamentos para um rolo longo utilizado no lingotamento contínuo de placas de aço, bastante utilizados nas siderúrgicas do Japão. Verificamos a utilização de rolamentos autocompensadores de rolos esféricos tipo SWR no lado fixo e no lado de liberdade axial são aplicados os rolamentos bi-partidos e um rolamento especial de rolos cilíndricos com anel alinhante denominado NSK-RUB.



**Figura 2** – A arranjo típico de rolamentos para um rolo longo aplicado no lingotamento contínuo de placas.<sup>(1)</sup>

O ajuste de variáveis de processo, tais como, velocidade de resfriamento da placa, velocidade de passagem da mesma e redução da seção influenciam diretamente na vida dos rolamentos. Medida que a placa vai se solidificando, os mancais de rolamentos passam a trabalhar sob condições de carga pesada e com o agravante de que a expansão e contração da massa de vapor formada pelo resfriamento da placa, bem como a água de resfriamento, podem contaminar o lubrificante dos rolamentos.

Em geral, nos processos de lingotamento contínuo são utilizadas graxas lubrificantes de consistência 1 / 2 e sistemas de lubrificação centralizada. O óleo básicos da graxa para esta aplicação, normalmente possui viscosidade de 460 cSt @ 40°C e incorpora aditivos de extrema pressão e desgaste de modo a se garantir maior resistência aos contaminantes e formar uma película lubrificante adequada ente os rolos. Cada vez mais o aumento da vida a fadiga do aço rolamento passa a ter um papel fundamental no processo de lingotamento contínuo, levando-se em conta de que novos materiais para a superfície dos rolos guia evoluem cada vem mais no sentido de aumento da capacidade produtiva das siderúrgicas brasileiras a cada ano. As condições de trabalho sob alta carga radial a baixa rotação influenciam diretamente na vida a fadiga dos rolamentos e demais mecanismos de falha associados aos mesmos.

As melhorias dos rolos de segmentos, o aumento da capacidade produtiva, a possibilidade de contaminação por umidade e sólidos e oxidação da superfície (carepas), o envelhecimento do equipamento e utilização de lubrificantes inadequados, agarramento por blackout, são uma série de fatores que contribuem na redução da vida a fadiga dos rolamentos. A experiência de campo comprova que após a remoção a frio de semi-acabados após um evento de agarramento de placa, aumenta significativamente a incidência de fadiga e fratura de borda dos rolamentos. Estes inconvenientes estão associados a altas cargas radial aplicadas nos rolamentos. A medição destes esforços é bastante difícil e a mesma pode ser estimada por células de carga e softwares de elementos finitos. Também podemos observar que os rolamentos internos são os que possuem maior incidência de falha por fadiga e fratura prematura. A equação simplificada  $L_n = (C/P)^{10/3}$  [h] definida pela ISO 281 determina que a vida nominal para os rolamentos autocompenadores de rolos esféricos possui dependência com a relação de capacidade de carga do rolamento e carga de trabalho. Quanto maior a carga de trabalho aplicada, menor será a vida nominal esperada.

Onde: “C” é a capacidade de carga dinâmica do aço rolamento e “P” é a carga de trabalho aplicada. Para rolamentos aplicados em rolos de lingotamento contínuo,

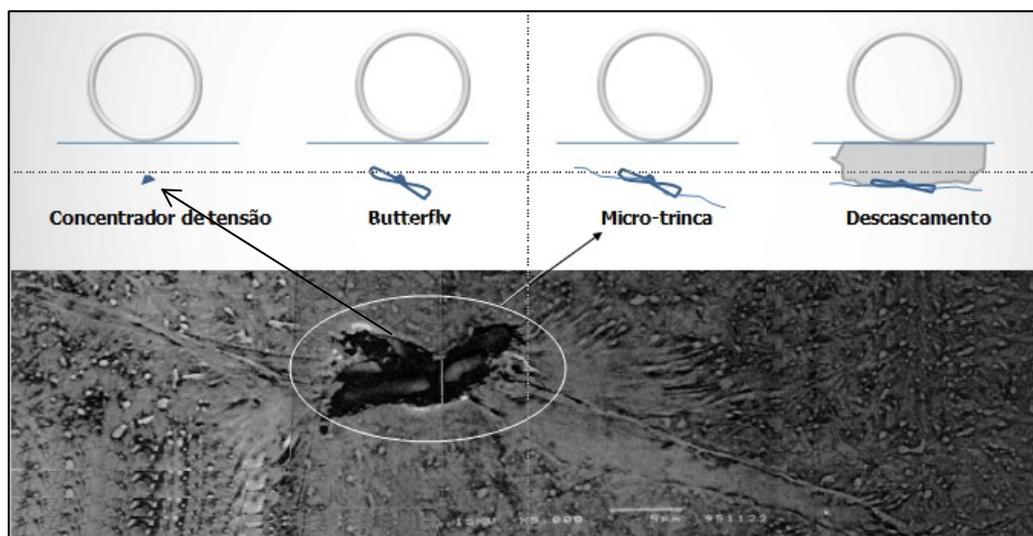
o valor de “P” é bastante elevado, influenciando diretamente na vida dos rolamentos. Existem situações em que a carga radial é tão elevada, que os rolamentos são aplicados sem o canal e furos de lubrificação no anel de maneira a não deformar diferentemente o alojamento com tolerância de caixa G7.<sup>(1)</sup>

## 1.1 Mecanismos de Origem da Fadiga

A vida de um rolamento está diretamente relacionada com as condições de montagem, lubrificação, projeto e aplicação (carepas). Considerando condições ideais de montagem e projeto, podemos classificar os mecanismos de fadiga de duas maneiras, os de natureza superficial e os de natureza subsuperficial e ambos serão detalhados a seguir.

### 1.1.1 Fadiga do tipo subsuperficial

Quando tratamos da vida a fadiga do aço rolamento numa condição de trabalho considerada livre de contaminação externa, verificamos que a resistência a fadiga do aço está diretamente dependente da qualidade do material empregado e que as propriedades mecânicas do mesmo são melhoradas quando associadas a tratamentos térmicos e de superfície específicos. Falhas na distribuição e controle de tamanho de contaminantes inerentes ao processo fabricação dos aços rolamentos, podem gerar concentradores internos de tensão que agem como pontos facilitadores para a nucleação e propagação de micro trincas e trincas internas, principalmente, se estes pontos concentradores de tensão estiverem na região de máxima tensão de cisalhamento, resultantes dos contatos entre elementos rolantes e pistas de rolagem.<sup>(2)</sup>



**Figura 3** – Inclusão não metálica no interior do aço rolamento como agente acelerador para fadiga subsuperficial.<sup>(1)</sup>

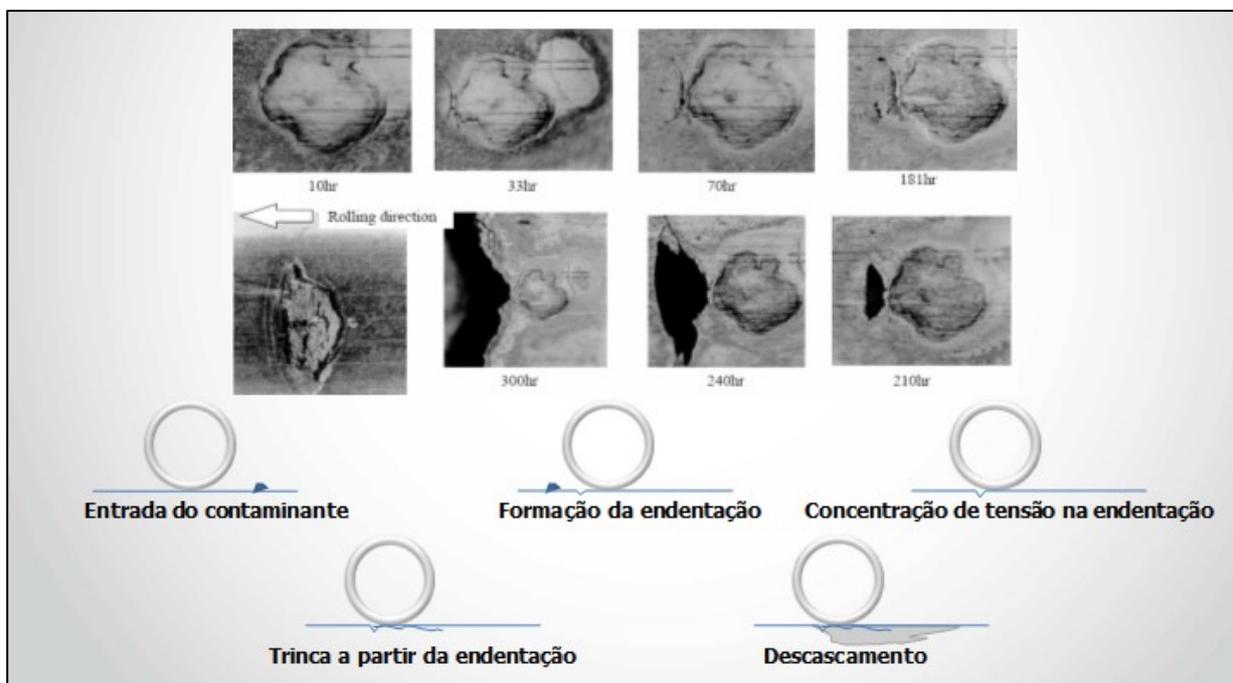
Para se evitar o princípio da fadiga subsuperficial relacionada com a fabricação, muitos esforços são aplicados na melhoria do processo de fabricação dos aços rolamentos.<sup>(1)</sup>

### 1.1.2 Fadiga do tipo superficial

A fadiga de natureza superficial pode ser analisada de outras duas maneiras de acordo com as condições de trabalho, tais como: lubrificação limpa e contaminada.

No caso de uma lubrificação limpa, a formação da película lubrificante em condições de altas cargas radiais sob baixa rotação é dependente da escolha correta especificação dos lubrificantes, sobretudo, cuidados essenciais devem ser tomados com a escolha de lubrificantes de maior viscosidade do óleo básico, presença de aditivos anti-desgaste, extrema pressão e quantidade correta de aplicação inicial e reposição segundo um plano de lubrificação bem definido. Considerando um plano de lubrificação bem definido e a condição de lubrificação livre de contaminação externa, mais uma vez, a vida a fadiga do aço rolamento fica dependente a qualidade de fabricação do mesmo.

Para uma condição de lubrificação contaminada e considerando um aço rolamento de qualidade superior, a presença de contaminantes externos tais como, partículas sólidas e ou umidade, pode prejudicar a lubrificação com a quebra da película lubrificante e gerar impressões na superfície de rolagem. Estes pontos, por sua vez, são concentradores de tensão preferenciais que diminuem a vida a fadiga do aço rolamento. Nos casos em que o bloqueio da contaminação externa é muito difícil ou até mesmo de alto custo, a melhoria da resistência a fadiga de natureza superficial pode ser conseguida com a utilização de aços associados a tratamentos térmicos e superficiais. O tratamento térmico tem por finalidade na estabilização da austenita retida a temperatura ambiente, garantido melhores propriedades de tenacidade, ou seja, a profundidade da impressão quando gerada tende a ser menor e com isto, redução da concentração de tensão ao redor da mesma e aumentando da resistência a fadiga.

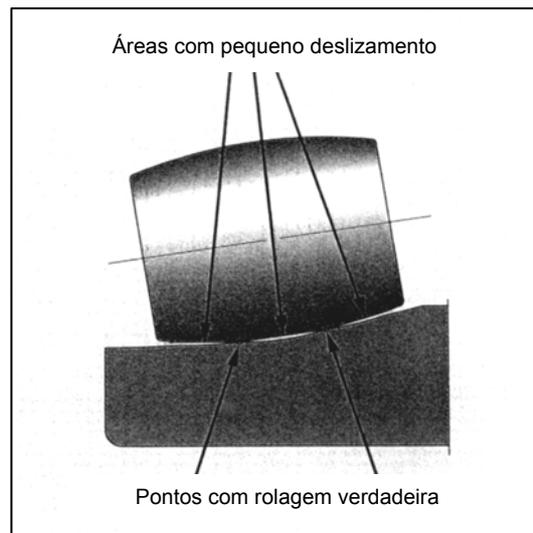


**Figura 4** – Mecanismo de fadiga de natureza superficial a partir de um concentrador de tensão resultante de uma impressão de contaminante externo de maior dureza que o aço rolamento.<sup>(1)</sup>

Como a tecnologia de tratamento térmico aplicada para a obtenção da estabilização da austenita retida a temperatura ambiente tende a diminuir ligeiramente a dureza do aço rolamento, a associação da mesma a um tratamento superficial de endurecimento é fundamental de maneira a se garantir a resistência ao desgaste nas superfícies de rolagem.<sup>(1)</sup>

### 1.1.3 Mecanismos de falha em rolamentos para lingotamento contínuo (superficial)

Os rolamentos autocompensadores de rolos esféricos aplicados em rolos de segmento nas máquinas de lingotamento contínuo, ou seja, em condições de alta carga radial sob baixa rotação, estão sujeitos a um mecanismo diferenciado de falha a partir do avanço da fadiga do aço nas linhas de rolagem verdadeira que culmina na quebra de borda dos rolamentos.<sup>(3)</sup> As linhas de rolagem verdadeiras são pontos em que a rolagem pura é observada devido ao coroamento dos roletes esféricos com as pistas de rolagem, melhor observadas na pista de rolagem do anel externo, uma vez que, a condição de trabalho implica em carga estática no anel externo e carga rotativa no anel interno. A Figura 5 abaixo demonstra de forma esquemática a tangência de um rolete esférico na pista de rolagem do anel externo, onde podemos observar dois pontos de contato indicados pelas setas e a definição de regiões preferenciais para deslizamento.<sup>(4)</sup>

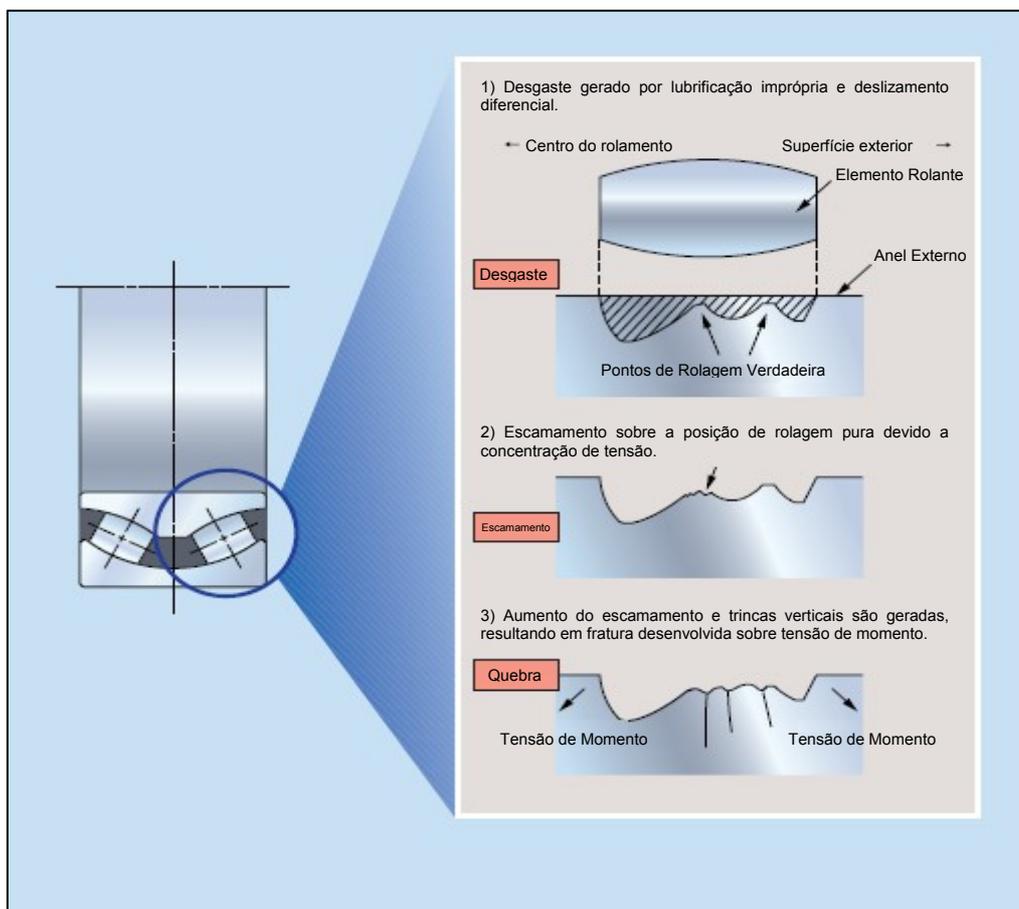


**Figura 5** – Definição das áreas de pequeno deslizamento entre os pontos com rolagem verdadeira.<sup>(1)</sup>

Em anexo, mostramos o aspecto visual de 2 rolamentos 24024CE4C3S11 aplicados em lingotamento contínuo. Observamos nos rolamentos (Peças 1 ~ 2) uma zona de carga bem definida e também uma linha de desgaste formada nos pontos de rolagem verdadeira, inerente ao contato dos rolos esféricos com a pista de rolagem do anel externo. A análise visual procurou colocar as Peças 1 ~ 2 em ordem evolutiva da fadiga do aço rolamento a partir das linhas de desgaste preferenciais que foram geradas pelos pontos de rolagem verdadeira. Na peça 2 a fadiga observada atingiu maior proporção a ponto de fragilizar a borda do rolamento e ocasionar a quebra da mesma em função da carga de momento que surge na pista de rolagem do anel externo em condições de operação com alta carga ( $P > 13\%C$ ) e baixa rotação. A Figura 6 exemplifica uma seqüência de desgaste em rolamentos que trabalham submetidos a altas cargas de trabalho e baixa rotação.

Podemos observar que os pontos de rolagem verdadeira são os pontos que recebem a maior transferência de carga entre os rolos esféricos e pista de rolagem do anel externo.

Uma ruptura de filme lubrificante neste contato, devido à sobrecarga e possíveis contaminações, podem acarretar na quebra da película e desgaste de rolagem que acelera o processo de escamamento (fadiga) a partir destes pontos. Entre as faixas de rolagem verdadeira, a maior carga transferida a uma área de deslizamento, favorece o desgaste que evolui para uma fadiga nesta região. Com o avanço da fadiga do aço, principalmente nos pontos de rolagem verdadeira e entre as linhas de rolagem, propicia-se uma quebra de borda devido à carga de momento que é função do coroamento do rolete esférico com a pista de rolagem do anel externo. Esta carga tende a abrir as trincas iniciais de escamamento que surgem nos pontos de rolagem verdadeira. Uma lubrificação deficiente dos rolamentos aplicados no lingotamento contínuo e uma especificação incorreta do lubrificante em seus requisitos mínimos argumentados anteriormente, cargas radial elevada sob baixa rotação, contaminação do lubrificante, podem favorecer rapidamente ao surgimento de desgaste ao longo das linhas de rolagem verdadeiras e acelerar o processo de fadiga nesta área com evolução para quebra de borda.



**Figura 6** – Mecanismo de desgaste devido ao deslizamento diferencial.<sup>(1)</sup>

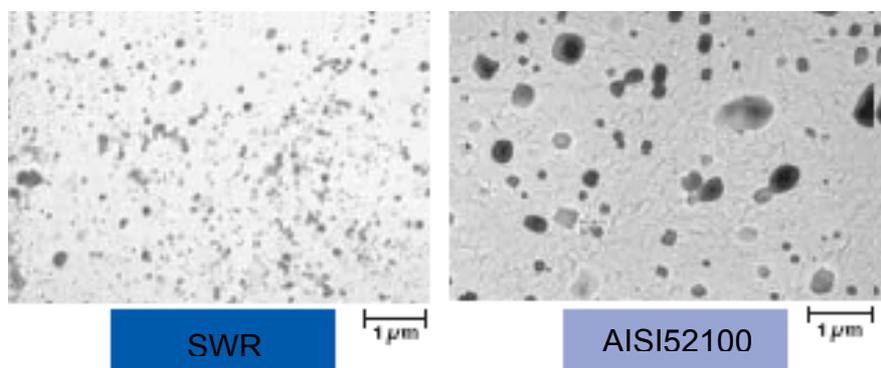
O mecanismo de falha exemplificado pela Figura 6 é necessário para se justificar os aspectos visuais encontrados em rolamentos aplicados em máquinas de lingotamento contínuo. O perfil de deslizamento irregular justifica a tendência a

empeno de gaiola e a necessidade de anel guia entre os rolos, para o caso e rolamentos autocompensadores de rolos esféricos.<sup>(1)</sup>

## 2 DESENVOLVIMENTO DO SWR

O desgaste preferencial ao longo das linhas de rolagem verdadeira é mais evidenciado nos rolamentos autocompensadores de rolos esféricos nas condições de alta carga e baixa rotação, este mecanismo é inerente para este tipo de rolamento. Desta maneira a NSK desenvolveu os rolamentos com super resistência ao desgaste mediante a precipitação de uma fina e dura camada de carbonitretos obtida a partir tratamentos de superfície por carbonitreção. Esta característica de dureza superficial é associada à tecnologia TF (aços com maior tenacidade), desenvolvido pela NSK e que agrega em maior resistência a fratura comparada com os aços convencionais AISI 52100.

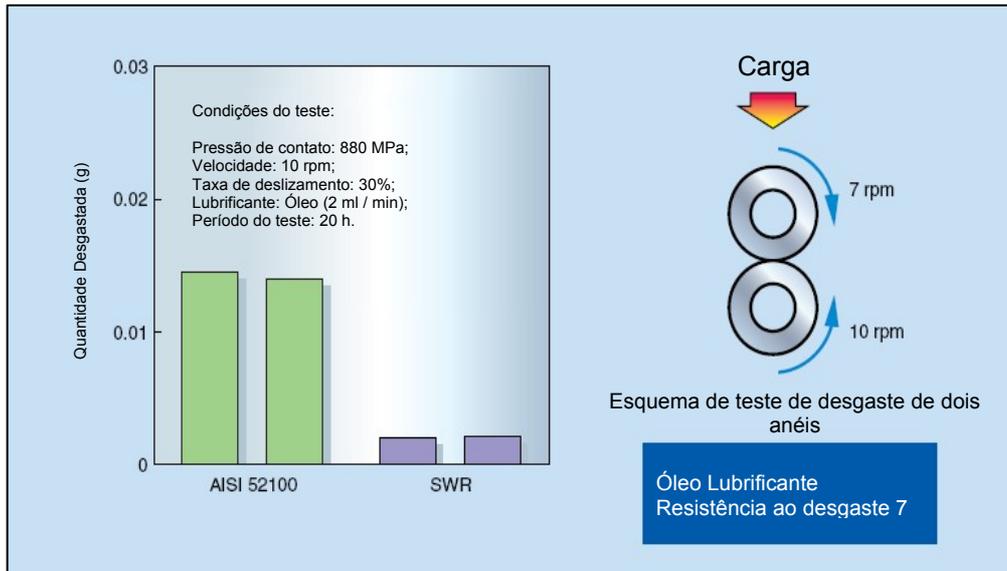
O domínio na obtenção e distribuição da austenita retida na temperatura ambiente, agrega propriedades únicas a este tipo de rolamento, como a de possuir maior vida a fadiga sob condições de lubrificação contaminada. Conforme demonstramos no mecanismo de falha superficial, a profundidade de uma possível impressão na pista de rolagem é atenuada com a melhor resposta de tenacidade do aço rolamento, garantindo assim, menor concentração de tensão e obviamente maior resistência a fadiga do aço rolamento. A Figura 7 a seguir, mostra duas microestruturas obtidas através de microscopia eletrônica de transmissão, podemos observar uma melhor uniformidade na distribuição e tamanhos dos carbonetos.



**Figura 7** – Micro estrutura comparativas dos aços rolamentos SWR e AISI52100.<sup>(1)</sup>

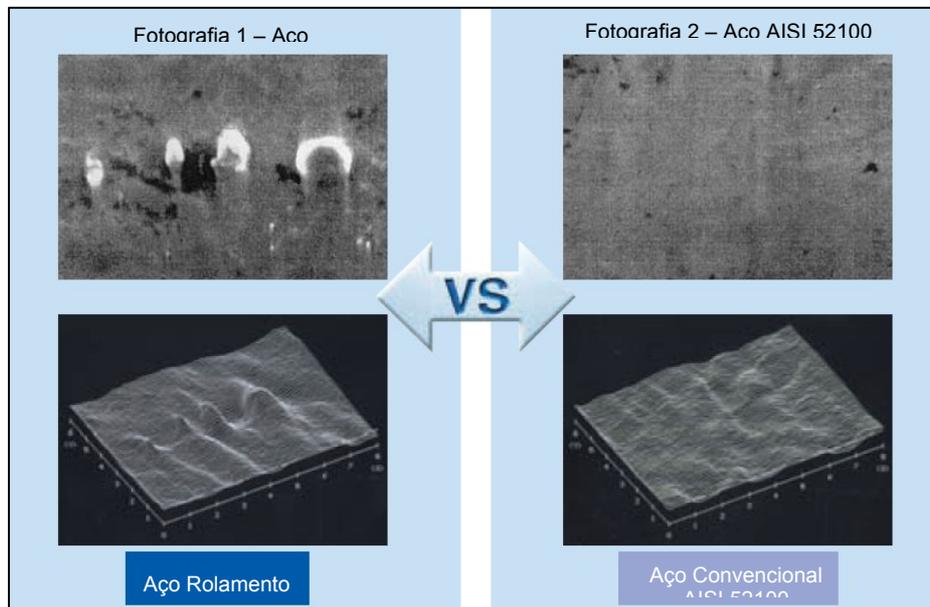
A camada carbonitretada agrega nos rolamentos SWR tensões compressivas que atuam positivamente no bloqueio de micro-trincas subsuperficiais em estágio inicial de nucleação, retardando a evolução das mesmas e aumentando a resistência a fadiga do aço rolamento.

Para a avaliação da resistência ao desgaste, a Figura 8 mostra os resultados de resistência ao desgaste entre dois anéis de teste. O aço rolamento SWR apresentou 7 vezes mais resistência ao desgaste que o aço rolamento convencional.



**Figura 8** – Resultados de teste de desgaste de dois anéis.<sup>(1)</sup>

Na Figura 9, observamos a micrografia de duas superfícies desgastadas observadas pelo microscópio eletrônico de varredura, abaixo a imagem 3D de cada superfície desgastada. Precipitação de carbonitreto foi mantida sobre a superfície do aço rolamento SWR como mostrado na superfície. Contudo, toda a superfície do aço AISI 52100 foi desgastada. Estas observações demonstram que o aço rolamento SWR possui resistência ao desgaste superior devido a alta dureza dos carbonitreto.



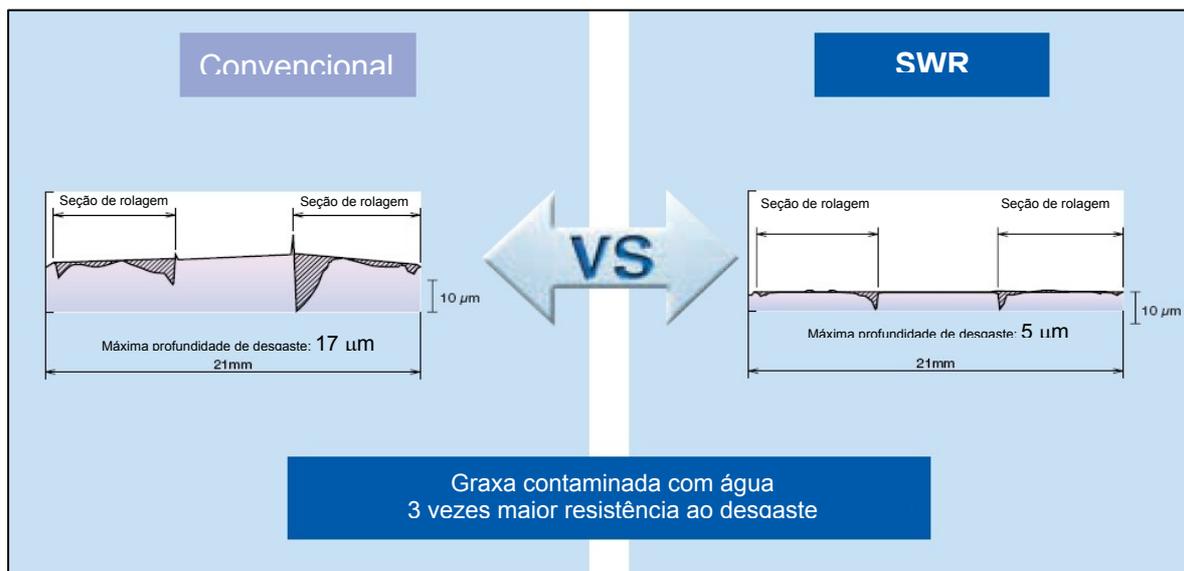
**Figura 8** – Micrografia de duas superfícies desgastadas observadas pelo microscópio eletrônico de varredura.<sup>(1)</sup>

A superfície endurecida do aço rolamento SWR oferece um núcleo com maior tenacidade que aço convencional AISI52100, teste mostraram que a tenacidade a fratura do aço rolamento SWR é 5 vezes que o aço convencional e mais resistente ao desenvolvimento de trincas e fratura.<sup>(1)</sup>

### 3 RESULTADOS COM A APLICAÇÃO DO SRW

Para estudo da tecnologia SWR foi desenvolvido um protótipo de cilindro laminador utilizado para simular as condições de trabalho em um equipamento de lingotamento contínuo. Para o teste foram utilizados os rolamentos autocompensadores de rolos esféricos 22210CD fabricados com aço convencional AISI52100 e com a tecnologia SWR, ambos operando na condição de ultra baixa velocidade e de carga radial pesada. Para a realização deste ensaio também foi utilizado lubrificante contaminado com água e após o ensaio uma seção transversal do anel interno foi cortada de modo a se obter o perfil do desgaste. O rolamento convencional foi ensaiado com um conteúdo de 2% de água na graxa, enquanto que o rolamento com a tecnologia SWR foi ensaiado com um conteúdo de 12% de água. Apesar da condição de trabalho mais desfavorável para o rolamento SWR, a profundidade do desgaste observada no rolamento convencional foi superior em três vezes que o desgaste observado no rolamento SWR.

Somado a excelente resistência ao desgaste, o rolamento SWR também possui melhor resistência a fadiga superficial devido ao tratamento térmico e de superfície que resultam em um núcleo de anéis com maior tenacidade e resistência a fratura que é gerada pelo desenvolvimento de trincas a partir da zona fadigada.



**Figura 9** – Perfil da seção transversal da pista de rolagem do anel externo após o teste (região de máximo carregamento). Condição do teste: Carga: 25kN; Velocidade: 4 rpm; Tempo de teste: 336 h.<sup>(1)</sup>

### 4 CONCLUSÃO

A utilização de rolamentos com a tecnologia “SWR” (Super Resistente ao Desgaste) que incorporam tratamento de carbonitretação para endurecimento superficial com maior tenacidade do núcleo, propiciado pela estabilização de austenita retida em temperatura ambiente, possuem características benéficas para o aumento da resistência à fadiga comparativamente ao aço padrão AISI 52100 e a sua aplicação vai de encontro com as características de alta carga radial e baixíssima rotação encontrada no processo de lingotamento contínuo.

## **Agradecimentos**

Agradeço a NSK Brasil Ltda que colaboraram com as informações da pesquisa, auxílio técnico e financiamento da mesma.

## **REFERÊNCIAS**

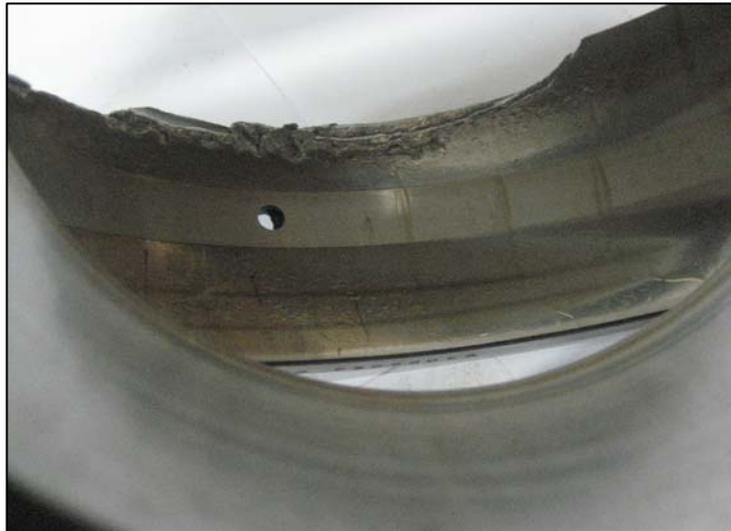
- 1 T- NSK. Catálogo SWR™ Bearing, revisado nº SEM-060701 2007, Fujisawa, Japão, 2006.
- 2 ALBERBACH, B.L.; LOU, B.; PEARSON, P. K.; FAIRCHILD, R. E.; BAMBERGER, E.N. Fatigue crack propagation in carburized high alloy bearings steels. *Metallurgical Transactions A*, v. 16, n. 7, p. 1253-5, 1985.
- 3 CLARK, J.C. Fracture tough bearing for high stress applications. AIAA-85-1138 AIAA/SAE/ASME/ASEE JOINT PROPULSION CONFERENCE, 21., 1985. PEARSON, P.K. Fracture and fatigue of high hardness bearing steels under low tensile stresses. Milwaukee: International Off-Highway and Exposition, 1990. (SAE Technical Paper, 901628).
- 4 CZYZWSKI, t. Influence of a tension stress field introduced in the elastohydrodynamic contact zone on rolling contact fatigue. *Wear*, v. 34, p. 201-14, 1975.

## ANEXO

### Peça 1 e 2 – 24024CE4C3S11 MLC aplicados em segmento 5/6:



Peça 1 – Zona de carga bem definida e fadiga em estágio avançado e concentrada entre as linhas de rolagem verdadeira.



Fotografia 5 – Fratura de borda resultante da fadiga severa na pista de rolagem do anel externo.

**Comentários:** Rolamento apresenta o mecanismo de desgaste nos pontos de rolagem verdadeira e entre as linhas devido a maior carga e possibilidade de deslizamento em estágio inicial.