



Projeto

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

# **Avaliação do estado de limpeza na produção e montagem de rolamentos**

**Adérito Elias Fernandes**

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Joel Oliveira Correia Vasco, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Doutor Mário António Simões Correia, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, Setembro de 2015



# Resumo

---

Na indústria automóvel e não só, a importância do tema limpeza tem aumentado nas últimas décadas de forma exponencial, sendo cada vez mais objecto de estudo. A indústria de rolamentos não é excepção, os mais importantes parâmetros de qualidade de um rolamento refletem-se no seu tempo de vida e um destes parâmetros é a limpeza de rolamentos.

Este projecto foi desenvolvido na empresa Schaeffler Portugal, fabricante de rolamentos e consistiu no estudo da limpeza de rolamentos. Foram estudados os impactos da limpeza de rolamentos, assim como as tecnologias de lavagens utilizadas e os métodos de avaliação da limpeza.

No estudo de caso foram efetuados testes de limpeza de rolamentos ao longo de uma linha de montagem, de forma a caracterizar o comportamento da sujidade na montagem do rolamento assim como os factores que a influenciam. Com esta análise foi possível identificar os pontos mais críticos do processo e simular soluções de optimização do processo no que toca a limpeza. Com essa simulação foi possível avançar com alterações no processo que conduziram a uma melhoria substancial do estado de limpeza do rolamento em estudo.

*Palavras-chave: Rolamento, limpeza, partículas, lavagem.*



# Abstract

---

In the automotive industry and beyond the importance of the subject cleaning has increased exponentially in recent decades, being more and more subject of study. The bearings industry is no exception, the most important quality parameters of a bearing are reflected in their lifetime and one of these parameters is the bearings cleaning.

This project was developed in the company Schaeffler Portugal, a manufacturer of bearings and consisted in the study of bearings cleanliness. The impact of the bearings cleanliness, as well as used washing technologies and cleanliness evaluation methods were studied.

In the case study was performed cleanliness test of bearings along of assembly line in order to characterize the behavior of dirt into the bearing assembly as well as the factors that influencing it. This analysis was possible to identify the most critical points of the process and simulate process optimization solutions when it comes to cleaning. With this simulation it was possible to push through changes in the process that led to a substantial improvement of the bearing cleanliness condition under study.

Keywords: bearing, cleanliness, particles, washing.



# Índice de figuras

---

Figura 1 - Aumento da importância da limpeza de componentes na indústria automóvel (Gommel 2013).....	1
Figura 2 - Diferentes tipos de rolamentos (Brändlei e Eschmann 1999).....	3
Figura 3 - Rolamento radial de uma fila de esferas (Schaeffler Group 2008). ....	3
Figura 4 - Rolamento e os seus componentes (SKF 2004).....	4
Figura 5 - Gaiola metálica e de poliamida (FAG TI 2000). ....	5
Figura 6 - Rolamento com deflector de borracha e rolamento com deflector metálico (Schaeffler Group 2008). ....	5
Figura 7 - Redução do ruído com a geração C (Schaeffler Group 2008).....	6
Figura 8 - Etapas de produção de rolamentos. ....	7
Figura 9 – Exemplo de ferramentas de corte no torneamento de um anel interior (Minebea 2011). ....	8
Figura 10 – Exemplos de cotas verificadas no controlo a 100%. ....	9
Figura 11 - Gráfico das temperaturas e tempos do processo de têmpera e revenido.....	10
Figura 12 – Microestrutura martensítica de um aço 1.3505 (100Cr6) temperado e revenido (com ampliação de 1000X). ....	10
Figura 13 – À esquerda - Retificação das faces dos anéis interiores e exteriores (Radiac 2014). À direita - Retificação de diâmetros exteriores (Junker 2014). ....	11
Figura 14- Retificação do caminho de anéis interiores (esquerda) e exteriores (direita) (Minebea 2011).....	12
Figura 15 - Processo de super-acabamento do caminho de um anel exterior (direita) e de um anel interior (esquerda) (Minebea 2011). ....	12
Figura 16 - Fluxo genérico de montagem dos rolamentos. ....	13
Figura 17 - Sequência da montagem de esferas (Brändlei e Eschmann 1999).....	14
Figura 18 - Características que influenciam o ruído do rolamento (Schaeffler KG 2008)..	16
Figura 19 - Equipamento e método de medição da FAG (Zuleeg 2014). ....	17
Figura 20 - Exemplo de uma partícula metálica. ....	18
Figura 21 - Causas de falha em rolamentos (Schaeffler Group 2001).....	18
Figura 22 - Aplicação de óleo no rolamento durante a sua aplicação (Schaeffler KG 2009). ...	19
Figura 23 - Ilustração dos danos no caminho de um anel causados por uma partícula (Schaeffler KG 2009). ....	19
Figura 24 - Ilustração dos danos no caminho de um anel causados por uma partícula (SKF 2012). ....	20

Figura 25 - Indentações causadas por diferentes materiais (Schaeffler Group 2001).	20
Figura 26 - Gráfico da relação do tempo de vida de um rolamento com diferentes contaminantes (Schaeffler Group 2001).	21
Figura 27 - Danos causados por contaminações de partículas (Schaeffler Group 2001).	21
Figura 28 - Evolução do dano provocado por partículas (NSK Control 2011).	22
Figura 29 - Evolução do dano ao longo do tempo (Schaeffler Group 2001).	22
Figura 30 – Círculo de Sinner - Fatores que influenciam a performance da lavagem	23
Figura 31 - Gráfico comparativo da sujidade residual após a lavagem com diferentes técnicas (Kohli 2010).	24
Figura 32 - Exemplo de transdutores de ultrassons (Kohli 2010).	25
Figura 33 - Bolhas criadas e com crescimento em pressão negativa até colapsarem em compressão (Kanegsberg 2001).	25
Figura 34 – Implosão de uma bolha de ar (Kohli 2010).	26
Figura 35 - Três exemplos de bocais com diferentes objetivos (enxaguar, impacto e lavagem) (Cleaning Times 2009).	27
Figura 36 - Sequência e variantes do teste de limpeza (Quality management in automotive industry 2010).	28
Figura 37 - Cabine de lavagem (Hydac 2012).	29
Figura 38 - Equipamento de lavagem de ultrassons da marca VWR (VWR 2012).	29
Figura 39 - Comprimento máximo de uma partícula.	30
Figura 40 - Microscópio Leica Q-Clean.	30
Figura 41 – À esquerda -Banho de ultrassons VWR Ultrasonic Cleaner, À direita -Balança Mettler Toledo AB204S.	32
Figura 42 – À esquerda – equipamento de filtração Sartorius, À direita microscópio óptico Olympus BX51M.	32
Figura 43 - Lavagem da amostra de rolamentos em ultrassons (1 equipamento de ultrassons, 2 e 3 exposição das peças aos ultrassons).	33
Figura 44 – Filtração do líquido de lavagem após a lavagem em ultrassons (1 enxaguamento das peças após a lavagem, 2 equipamento de filtragem, 3 filtração, 4 filtro de partículas).	33
Figura 45 – Exemplo de balança e microscópio (1 – balança para determinar a gravimetria, 2 – microscópio para determinar o número de partículas do filtro).	34
Figura 46 – Sequência do reconhecimento da partícula pelo <i>software</i> .	34
Figura 47 - Planta e fluxo de produção da linha de montagem do rolamento 6202.	35
Figura 48 - Posicionamento e numeração das lavagens na linha 6202.	36

Figura 49 – À direita -Modelo de um bloco da lavagem em várias posições e com várias visões em corte. À esquerda - Vista em corte da passagem do líquido de lavagem pelo bloco de lavagem e rolamento. ....	37
Figura 50 - Locais de recolha de amostras na linha de montagem do 6202 (círculos com a letra R).....	40
Figura 51 - Massa de sujidade de anéis interiores e exteriores antes e depois da lavagem. ....	41
Figura 52 - Número de partículas de anéis exteriores e interiores antes e depois da lavagem. ....	41
Figura 53 - Massa de sujidade por 1000cm <sup>2</sup> de rolamentos ao longo da linha do 6202. ..	42
Figura 54 - Número de partículas por 1000cm <sup>2</sup> de rolamentos ao longo da linha do 6202. ....	42
Figura 55 - Varetas com gaiolas com e sem rebite. ....	44
Figura 56 - Massa de sujidade por 1000cm <sup>2</sup> de gaiolas com e sem rebite lavadas e no seu estado de fornecimento. ....	46
Figura 57 - Número de partículas por 1000cm <sup>2</sup> de gaiolas com e sem rebite lavadas e no seu estado de fornecimento. ....	46
Figura 58 - Massa de sujidade por 1000cm <sup>2</sup> de rolamentos cravados com gaiolas lavadas e no estado de fornecimento recolhidos após o módulo de cravação. ....	47
Figura 59 - Número de partículas por 1000cm <sup>2</sup> de rolamentos cravados com gaiolas lavadas e no estado de fornecimento recolhidos após o módulo de cravação. ....	47
Figura 60 - Massa de sujidade por 1000cm <sup>2</sup> de rolamentos cravados com gaiolas lavadas e no estado de fornecimento recolhidos após a 5ª lavagem. ....	48
Figura 61 - Número de partículas por 1000cm <sup>2</sup> de rolamentos cravados com gaiolas lavadas e no estado de fornecimento recolhidos após a 5ª lavagem. ....	48



# Índice de tabelas

---

Tabela 1 - Classificação de alguns tipos de ruído segundo as suas características (em termos de ruído transmitido pela coluna) (Momonó e Noda 1999) .....	17
---	----



# Lista de siglas

---

AE – Anel exterior;

AI – Anel interior;

HV – Dureza Vickers,

EDX – *Energy dispersive X-ray*;

Hz – Hertz;

Rpm – Rotações por minuto;



# Índice

---

<b>RESUMO .....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE SIGLAS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE.....</b>	<b>XV</b>
<b>1-INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2-ROLAMENTO – ESTADO DA TÉCNICA.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1-Tipos de rolamentos.....</b>	<b>3</b>
<b>2.2-Constituição do Rolamento.....</b>	<b>4</b>
2.2.1-Geração C.....	6
<b>2.3-Produção de rolamentos .....</b>	<b>7</b>
2.3.1-Torneamento .....	8
2.3.2-Controlo a 100% de anéis macios.....	9
2.3.3-Tratamento térmico dos anéis .....	10
2.3.4-Rectificação e Super-acabamento .....	11
2.3.5-Montagem dos componentes – Rolamento acabado .....	13
<b>2.4- Medição do ruído .....</b>	<b>16</b>
<b>2.5-Contaminação de partículas nos rolamentos.....</b>	<b>18</b>
<b>2.6-Tecnologia de lavagem .....</b>	<b>23</b>
2.6.1-Lavagem com ultrassons.....	24
2.6.2-Lavagem com bocais.....	27

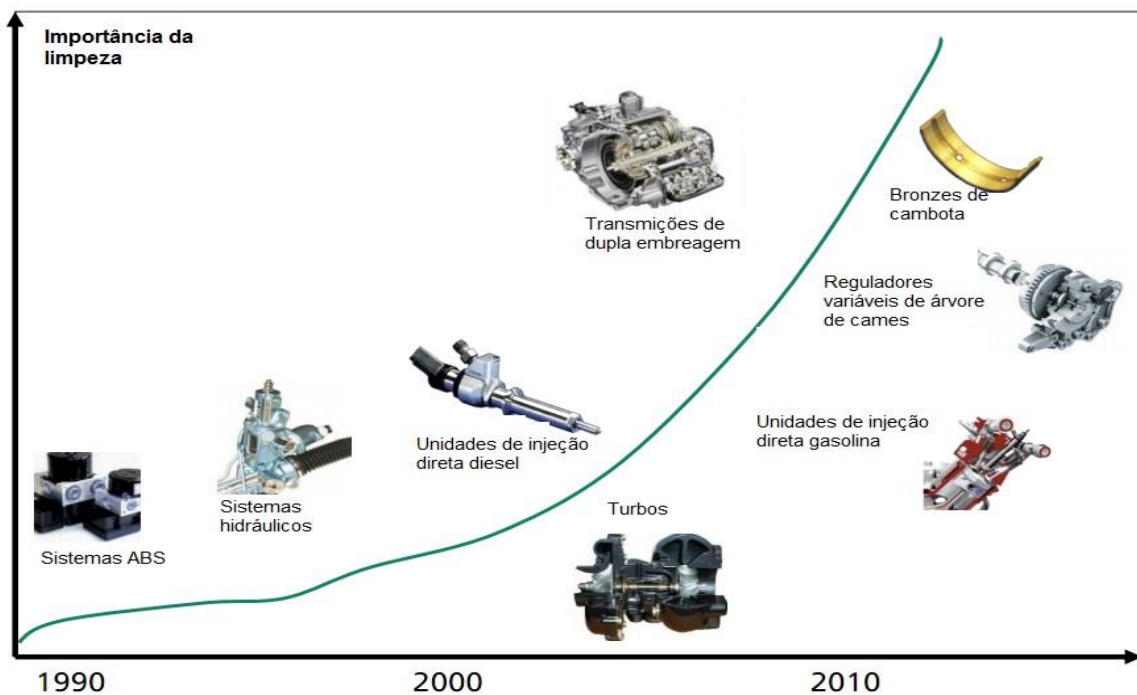
2.7-Controlo da sujidade – Testes de limpeza.....	28
<b>3-MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>31</b>
3.1 – Materiais.....	31
3.2- Método de avaliação da limpeza .....	32
3.3- Métodos de lavagem utilizados na montagem de rolamentos .....	35
<b>4- ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>39</b>
4.1- Avaliação do estado de limpeza ao longo da linha de montagem.....	39
4.2-Resultados de limpeza ao longo da linha de montagem.....	41
<b>5-DISCUSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>43</b>
5.1-Melhoria do processo.....	44
5.2-Resultados da melhoria.....	45
5.3-Discussão de resultados da melhoria .....	49
<b>6-CONCLUSÃO .....</b>	<b>51</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>57</b>

# 1-Introdução

---

A limpeza é um estado de um produto, de uma superfície, de um dispositivo, de gás, de líquido, etc., caracterizado pela ausência de partículas. Segundo o estudo de Gommel e colaboradores (Gommel 2013) a importância da limpeza, ou seja a não contaminação com partículas, na indústria tem-se tornado cada vez mais objeto de estudo. Nas indústrias: farmacêutica, alimentar, biotecnológica, equipamentos médicos, ótica, eletrónica, semicondutores, micro mecanismos, aeroespacial e automóvel é cada vez mais necessário melhorar o estado de limpeza dos produtos produzidos e do seu processo de fabrico.

No caso da indústria automóvel a importância da limpeza tem aumentado nas últimas décadas de forma exponencial (Figura 1) (Gommel 2013).



**Figura 1 - Aumento da importância da limpeza de componentes na indústria automóvel (Gommel 2013).**

O facto das contaminações de partículas (sujidade) reduzir de forma significativa os tempos de vida dos componentes resultam num aumento da procura da sua redução.

O órgão mecânico rolamento é um destes componentes e tendo em conta a importância da sua aplicação, são também desde há muitas décadas objeto de estudo no que toca ao impacto da sujidade no seu tempo de vida.

O presente trabalho foi desenvolvido da unidade industrial da Schaeffler Portugal S.A. e aborda o tema da limpeza de rolamentos no seu processo de fabrico, assim como potenciais melhorias.

Situada nas Caldas da Rainha a Schaeffler Portugal, S.A., é uma empresa que se dedica exclusivamente à produção de rolamentos de uma fila de esferas com diâmetros entre os 26 mm e os 62 mm de diâmetro exterior. É a única empresa do ramo a produzir em Portugal. Atualmente tem cerca de 400 colaboradores internos e mais de 50 colaboradores externos. As operações de produção desenvolvem-se em dois edifícios fabris com um total de 16080 m<sup>2</sup> de área coberta onde se desenvolvem processos diferenciados tecnologicamente.

No ano de 2014 esta empresa faturou 50 milhões de euros tendo produzido 70 milhões de rolamentos. A presença de elevados padrões de qualidade, preocupação ambiental assim como de segurança e saúde no trabalho são comprovados pelas certificações obtidas, designadamente ISO/TS16949, ISO9001, ISO14001, OHSAS 18001 e EMAS.

A produção de rolamentos da Schaeffler Portugal destina-se sobretudo ao setor automóvel e à indústria de eletrodomésticos e ferramentas. Alguns dos seus clientes são a B/S/H (Bosch Siemens Home Applications), a ThyssenKrupp, a Hilti, a Stihl, a Porsche, a Mercedes-Benz, etc.

## 2-Rolamento – Estado da técnica.

### 2.1-Tipos de rolamentos

---

Um rolamento é um elemento essencial na mecânica, é um dispositivo que permite o movimento rotativo controlado entre duas ou mais partes. Tem como objetivo eliminar a atrito e o atrito entre as superfícies do eixo e a chumaceira.

Existem vários tipos de rolamentos, tais como rolamentos radiais de uma fila de esferas, rolamentos de duas filas de esferas, rolamentos de rolos, rolamentos cónicos, rolamento de agulhas, rolamentos axiais, etc. Na Figura 2 podemos ver à direita um rolamento de rolos, ao centro rolamentos de duas filas de esferas, à direita rolamento de uma fila de esferas.



**Figura 2 - Diferentes tipos de rolamentos (Brändlei e Eschmann 1999).**

Na Schaeffler Portugal são produzidos apenas rolamentos radiais de uma fila de esferas (Figura 3). Este é o tipo de rolamento mais versátil, mais amplamente utilizado e de custo mais reduzido. Como o nome indica neste tipo de rolamento os elementos rolantes são esferas e têm apenas uma fila das mesmas.



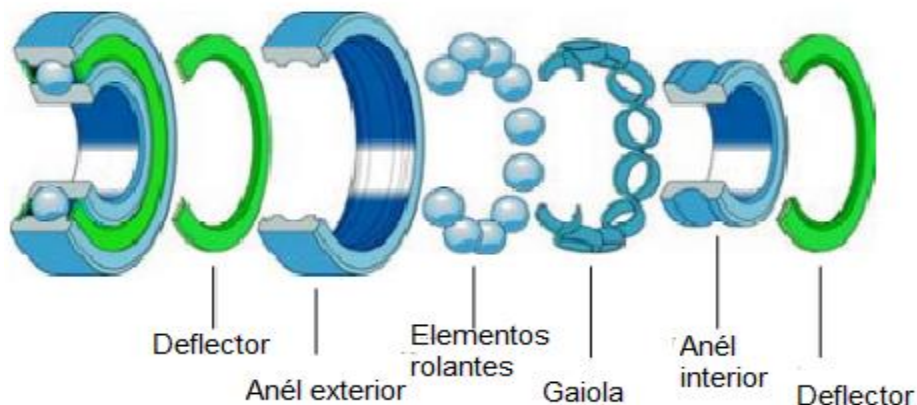
**Figura 3 - Rolamento radial de uma fila de esferas (Schaeffler Group 2008).**

Estes rolamentos suportam cargas radiais de intensidade média e simultaneamente leves cargas axiais sendo ainda recomendado para altas rotações. Este tipo de rolamento é o mais frequentemente utilizado em máquinas elétricas, tais como motores elétricos entre outros. Isto devido ao facto de serem silenciosos e permitirem altas rotações. Existem vários tipos diferentes de deflectores, gaiolas e massas o que permite, dependendo da aplicação, rolamentos sem manutenção e lubrificados para todo o tempo de vida.

## 2.2-Constituição do Rolamento.

---

Um rolamento radial de uma fila de esferas é tipicamente constituído por vários elementos: anel interior (AI), anel exterior (AE), gaiola, elementos rolantes e deflectores como podemos ver na Figura 4.



**Figura 4 - Rolamento e os seus componentes (SKF 2004).**

Os anéis são o suporte interior e exterior do rolamento, estes são produzidos em aço de rolamento, geralmente 1.3505 (100Cr6), este é um aço de alto carbono e baixa liga.

As gaiolas (Figura 5) são os componentes que seguram os elementos rolantes. Podem ser de chapa de aço de baixa liga ou de polímero dependendo da aplicação do rolamento. A sua função é guiar e manter uniformemente separadas os elementos rolantes do rolamento.



**Figura 5 - Gaiola metálica e de poliamida (FAG TI 2000).**

Os elementos rolantes são corpos esféricos, cilíndricos (rolos) ou agulhas que ao rodarem permitem a rotação dos anéis, para além de transmitir as cargas aplicadas de um anel ao outro. Estes normalmente são do mesmo aço dos anéis ou seja 1.3505 (100Cr6). Nos rolamentos radiais de uma fila de esferas tal como o nome indica os elementos rolantes são esferas.

Os deflectores (Figura 6) são os componentes que são cravados nos anéis e tampam a gaiola e esferas. Estes têm como principais funções evitar que a massa lubrificante não saia do rolamento e evitar que entrem resíduos para dentro do rolamento. Estes podem ser de chapa de aço de baixa liga ou de vários tipos de borracha dependendo da aplicação e tipo de massa usada (FAG TI 1999).



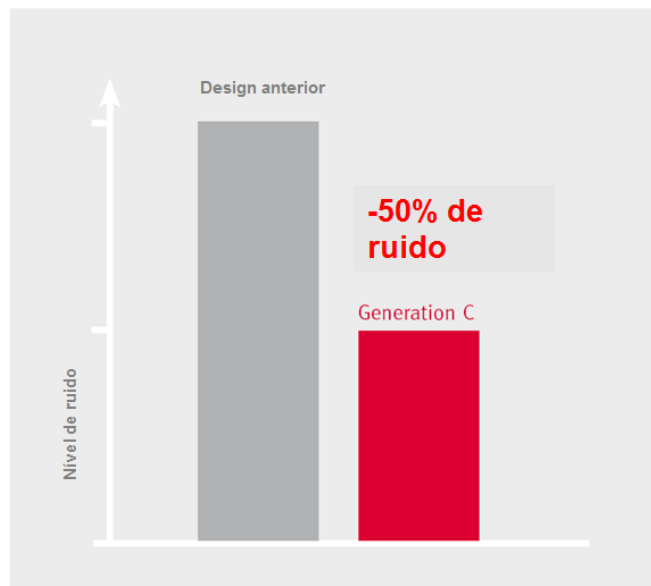
**Figura 6 - Rolamento com deflector de borracha e rolamento com deflector metálico (Schaeffler Group 2008).**

## 2.2.1-Geração C

---

A Schaeffler Portugal tem nos dias de hoje a sua produção dominada pelos rolamentos ditos da geração C. A geração C assenta num novo “design” de rolamentos radiais de uma fila de esferas com o objetivo de conseguir atingir melhores desempenhos em relação a anterior construção. As principais vantagens deste são: atingir maiores velocidades, redução de atrito em cerca de 35% relativamente aos convencionais, diminuição do ruído gerado em 50% (Figura 7), um maior tempo de vida, um menor custo final e assim permitir uma redução do consumo de energia (Schaeffler Group 2008).

No caso do ruído este foi atingido graças a melhorias na qualidade de superfície dos caminhos dos anéis, nova gaiola metálica de rebite, osculação melhorada, melhor qualidade das esferas e tolerâncias de produção mais apertadas (Schaeffler Group 2008).



**Figura 7 - Redução do ruído com a geração C (Schaeffler Group 2008).**

A redução do atrito foi conseguida graças a melhorias na qualidade de superfície dos caminhos dos anéis, nova gaiola de poliamida com baixa atrito, osculação otimizada e melhor qualidade das esferas. Na aplicação esta redução de atrito permite reduzir o consumo de energia, reduz a geração de calor, permite maiores velocidades e maior tempo de vida do rolamento (Schaeffler Group 2008).

## 2.3-Produção de rolamentos

---

A produção dos rolamentos segue uma série de etapas desde a entrada de tubo de aço para torneiar até a montagem do rolamento passando por todas as etapas de transformação dos anéis. No fluxograma abaixo (Figura 8) podemos ver todas as etapas da produção de rolamentos.



Figura 8 - Etapas de produção de rolamentos.

## 2.3.1-Torneamento

---

O processo de corte por arranque de uma peça que transforma os tubos de aço em anéis para rolamentos é o torneamento. Na operação de torneamento o movimento principal de corte rotativo é executado pela peça e o movimento de avanço é executado pela ferramenta de corte. Neste processo a peça gira em torno do eixo principal da máquina e a ferramenta desloca-se numa trajetória no mesmo plano do referido eixo. As ferramentas utilizadas no torneamento são maioritariamente simples, são compostas de uma parte cortante e de uma haste para fixação. Existem várias operações elementares executadas pelo torno que no seu conjunto permitem fazer os anéis interiores e exteriores do rolamento. Para isto são utilizadas diferentes ferramentas de corte como podemos ver na Figura 9.

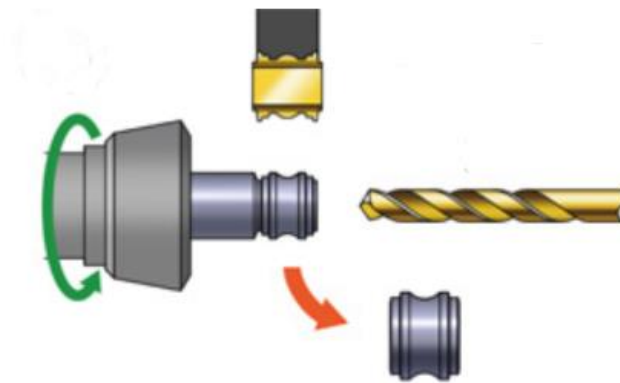
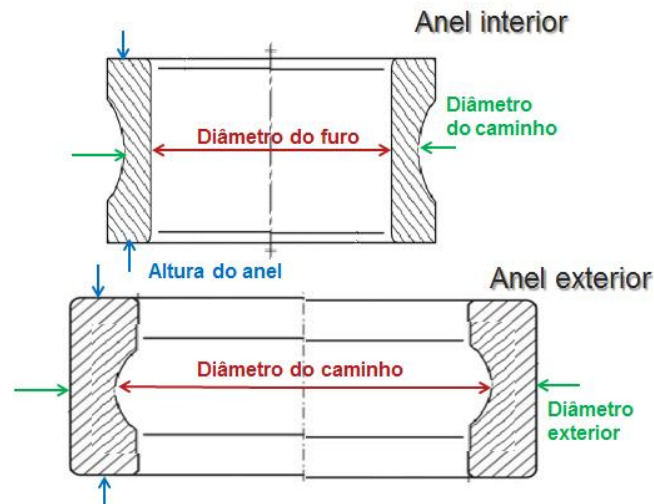


Figura 9 – Exemplo de ferramentas de corte no torneamento de um anel interior (Minebea 2011).

## 2.3.2-Controlo a 100% de anéis macios

---

Os anéis macios já torneados na Schaeffler Portugal são controlados a 100% nas suas características dimensionais de forma a evitar que se introduzam no processo anéis que não preencham as características de qualidade necessárias. No controlo a 100% pretende-se retirar de produção os anéis que não tenham dentro da tolerância as cotas dimensionais, como por exemplo diâmetro do caminho, diâmetro do furo, diâmetro exterior, altura do anel, etc (Figura 10). Este controlo é feito com equipamentos de medição automáticos específicos para o efeito, que são suportados por meios de medição tradicionais como sondas indutivas e relógios comparadores eletrónicos.



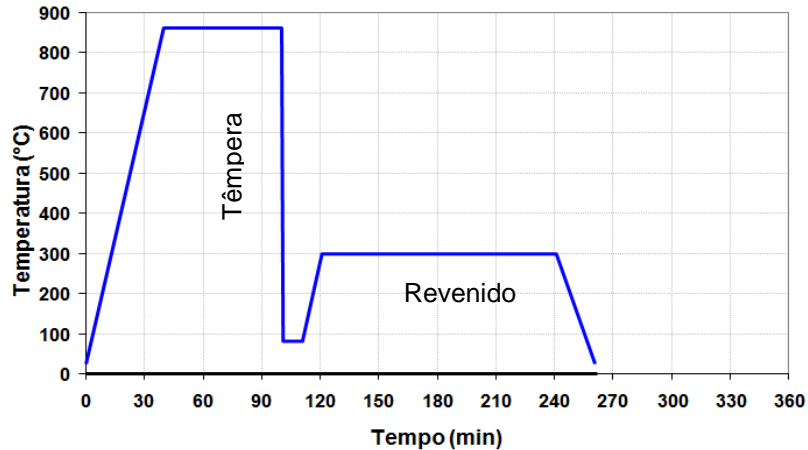
**Figura 10 – Exemplos de cotas verificadas no controlo a 100%.**

Esta etapa do processo é a única onde é feito um controlo dimensional a 100%. Após o tratamento térmico o controlo dimensional na retificação e montagem é feito por amostragem utilizando um sistema de controlo estatístico do processo.

### 2.3.3-Tratamento térmico dos anéis

---

Após o controlo dimensional, os anéis vão sofrer dois tratamentos térmicos - a têmpera seguida pelo revenido (Figura 11).



**Figura 11 - Gráfico das temperaturas e tempos do processo de têmpera e revenido.**

A têmpera é um tratamento térmico formado por um ciclo constituído por três fases: o aquecimento, austenitização e o arrefecimento. A operação consiste em depois de atingida a temperatura de austenitização a 850°C arrefecer o aço bruscamente num banho de óleo a 60°C de forma a modificar-lhe a estrutura de ferrítica para martensítica (Figura 12) conseguindo assim um incremento significativo das propriedades mecânicas. Com a têmpera os anéis que inicialmente têm cerca de 300 Vickers (HV) ficam com uma dureza de cerca de 800 (HV) aumenta também a resistência ao desgaste mas diminui a tenacidade ao choque e a ductibilidade.

A têmpera é seguida de revenido. O objectivo deste tratamento, é reduzir ou eliminar tensões internas, diminuir a fragilidade e conseqüentemente aumentar a plasticidade e a resistência ao choque. Consiste num aquecimento dos anéis a 120°C durante 2 horas onde se vai obter para além das características anteriormente enunciadas uma redução de dureza para valores entre 700 e 800 (HV).



**Figura 12 – Microestrutura martensítica de um aço 1.3505 (100Cr6) temperado e revenido (com ampliação de 1000X).**

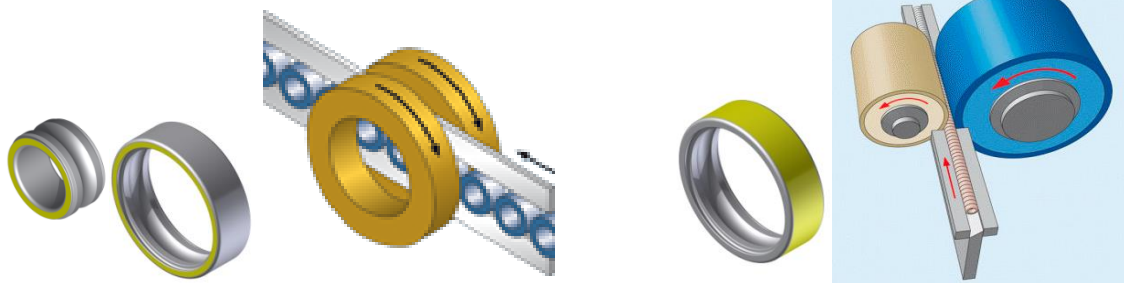
## 2.3.4-Rectificação e Super-acabamento

---

Após o tratamento térmico descrito os anéis encontram-se em fase de acabamento, tendo início na retificação de faces e diâmetros exteriores. A retificação é uma maquinação por abrasão que tem por objetivo corrigir as irregularidades de carácter geométrico originadas por outras operações de transformação do material realizadas anteriormente, neste caso torneamento e tratamento térmico (deformações), de forma a encontrarem-se dentro das tolerâncias estabelecidas.

A maquinação de peças metálicas por abrasão, consiste no desgaste ou desagregação do material em excesso com o auxílio de ferramentas abrasivas constituídas por um aglomerado de cristais cortantes, as mós de retificar. Cada um destes cristais atua como se fosse uma ferramenta única de corte, arrancando uma pequena aparta quando a sua face cortante se encosta favoravelmente na peça, enquanto gira a grande velocidade.

Na retificação de faces dos anéis (Figura 13), duas mós paralelas giram em sentidos opostos, circulando os anéis entre elas, este processo repete-se por várias passagens até atingirem a cota final.

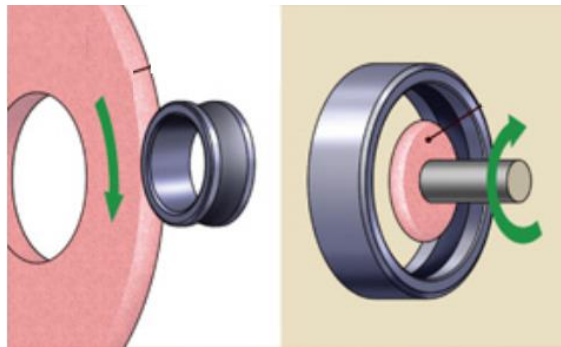


**Figura 13 – À esquerda - Retificação das faces dos anéis interiores e exteriores (Radiac 2014). À direita - Retificação de diâmetros exteriores (Junker 2014).**

Na retificação de diâmetros exteriores (Figura 13), temos duas mós na horizontal a rodar no mesmo sentido, uma é abrasiva e a outra serve para manter os anéis a rodar sempre à mesma velocidade. Ou seja, existe a mó de corte e a mó que trava o balanço dado pela mó de corte.

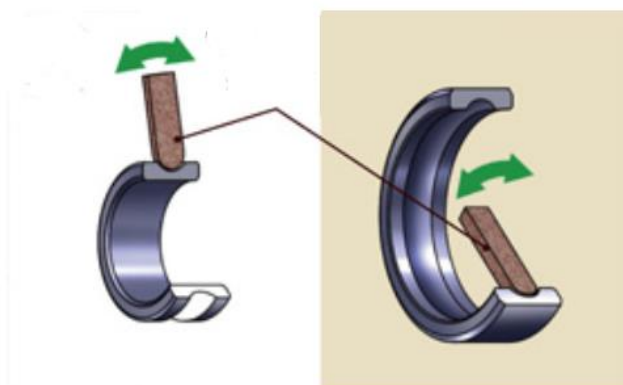
A qualidade obtida nas operações de retificação de faces e diâmetro exterior é essencial para a qualidade que se vai obter no processo de retificação dos caminhos e do furo, porque as superfícies aqui retificadas vão servir de referência e apoio para as operações seguintes.

No caso do anel interior necessitamos de retificar o furo e o caminho (local onde circulam as esferas), no furo a mó abrasiva tem a forma cilíndrica, na retificação do caminho a mó tem a configuração do raio da esfera (Figura 14). A retificação do anel exterior é idêntica á do anel interior, a mó é circular mas com dimensões menores para poder entrar no anel exterior como podemos ver na Figura 14.



**Figura 14- Retificação do caminho de anéis interiores (esquerda) e exteriores (direita) (Minebea 2011).**

O super-acabamento é um processo de alta precisão posterior a retificação e tem o objetivo de melhorar o estado superficial dos caminhos dos anéis interiores e exteriores. Este é um processo de corte por arranque de apara com abrasivo tal como a retificação. Mas em vez de mós usa pedras de polir, estas têm um aglomerante diferente das mós assim como os grãos cerâmicos também são diferentes e bastante mais finos. No super-acabamento os anéis são obrigados a girar enquanto a pedra vai, com um movimento oscilatório, desgastando a superfície do caminho como podemos ver na Figura 15 polindo-a. Este processo, tem por finalidade melhorar a precisão dimensional, reduzir a rugosidade superficial e corrigir a geometria da peça.



**Figura 15 - Processo de super-acabamento do caminho de um anel exterior (direita) e de um anel interior (esquerda) (Minebea 2011).**

## 2.3.5-Montagem dos componentes – Rolamento acabado

Esta etapa consiste precisamente na montagem de todos os componentes (anéis, esferas, gaiolas e deflectores) num único elemento, formando assim o rolamento. A sequência de montagem é a que descreve o fluxo de montagem que podemos ver abaixo no exemplo de “*layout*” de montagem de rolamentos Figura 16.

### Fluxo de montagem dos rolamentos

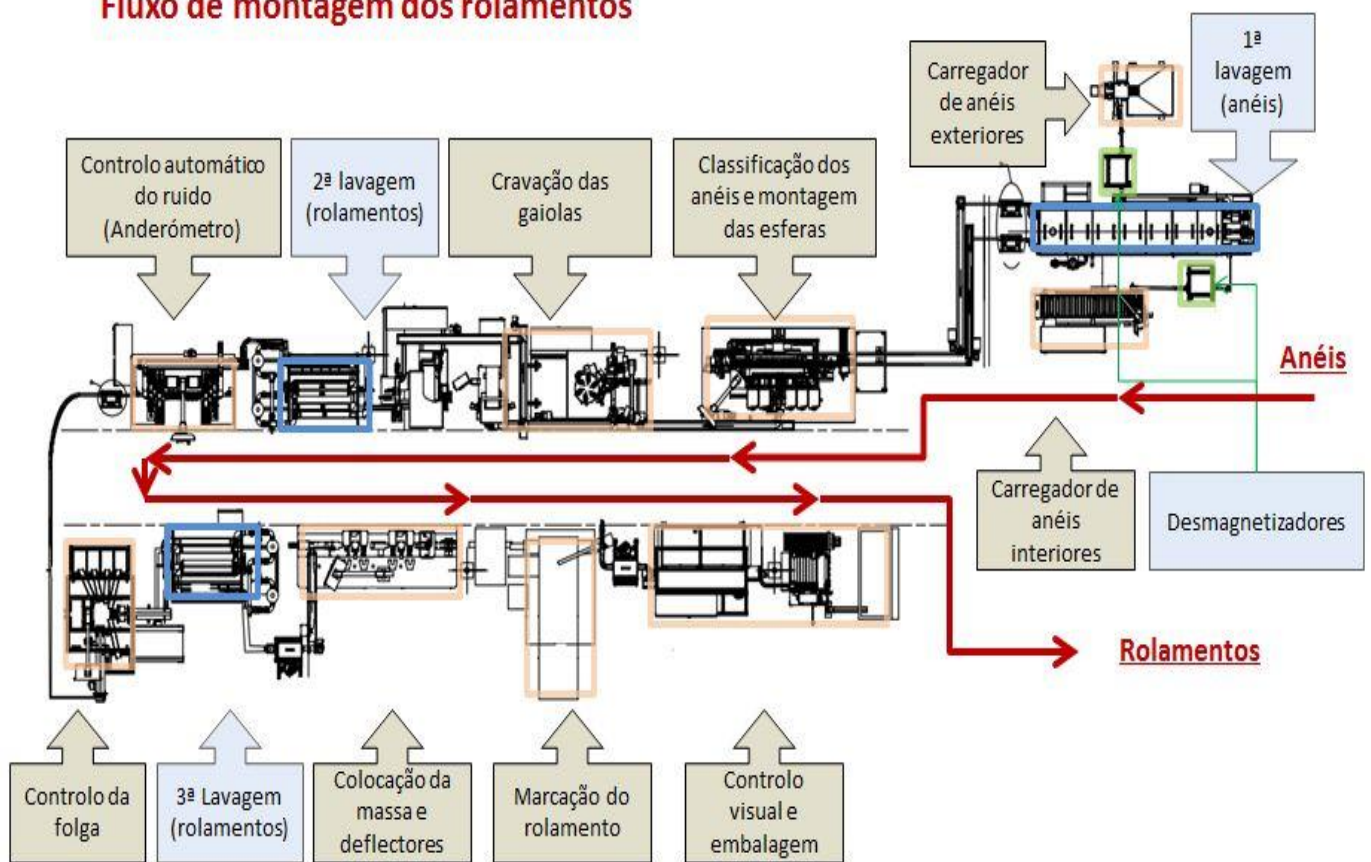


Figura 16 - Fluxo genérico de montagem dos rolamentos.

#### • Início da montagem:

O início da montagem dos rolamentos começa com o carregamento dos anéis interiores e exteriores para calhas de transporte. Estas vão transportar os anéis / rolamentos durante toda a montagem.

- **1ª Lavagem (anéis):**

Os anéis interiores e exteriores após entrarem nas calhas vão passar por um desmagnetizador e seguem para a lavagem de anéis. Esta lavagem vai remover óleo, sujeira e partículas dos processos anteriores (retificação e super-acabamento).

- **Classificação dos anéis e montagem de esferas:**

Esta etapa consiste em medir o diâmetro dos caminhos dos dois anéis para que ao serem montados com as esferas o rolamento fique com a folga final dentro da tolerância. Segue-se a montagem das esferas que consiste em montar as esferas nos dois anéis do rolamento. A Figura 17 apresenta o modo de instalação das esferas entre os anéis. Em primeiro lugar, o espaço livre criado pelo posicionamento excêntrico dos anéis é preenchido com esferas. Depois utilizando a elasticidade dos anéis, o anel interior, situado entre a primeira e a última esfera, é deslocado para uma posição concêntrica com o anel exterior. As esferas são então distribuídas uniformemente entre os anéis.

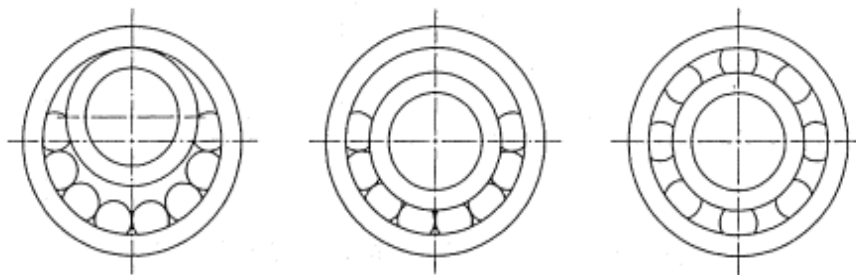


Figura 17 - Sequência da montagem de esferas (Brändlei e Eschmann 1999).

- **Cravação das gaiolas:**

Segue-se a cravação das gaiolas que consiste em montar as gaiolas nas esferas do rolamento de forma a separá-las e segurá-las. Esta montagem é efetuada num módulo de cravação constituído por uma prensa, onde se vão cravar as duas metades da gaiola.

- **2ª Lavagem (rolamentos):**

Após a cravação das gaiolas os rolamentos vão entrar numa lavagem de rolamentos. Aqui a lavagem vai remover partículas e sujeira dos processos anteriores.

- **Controlo do ruído (Anderómetro):**

Após a lavagem, os rolamentos vão para o módulo do controlo do ruído. Este módulo é constituído por um equipamento que vai medir automaticamente o ruído dos rolamentos detetando assim os seus defeitos. No ponto 2.4 iremos aprofundar esta análise.

- **Controlo da folga:**

Segue-se o módulo de controlo automático da folga. Este controlo automático vai medir a folga radial do rolamento de forma a verificar se esta característica está dentro da tolerância.

- **3ª Lavagem (rolamentos):**

Depois da folga o rolamento vai ser lavado uma última vez de forma a remover as partículas e sujidade que ainda se encontrem nos rolamentos.

- **Colocação da massa e cravação de deflectores:**

Após a última lavagem os rolamentos vão para o módulo de colocação de massa e cravação de deflectores. Este consiste em aplicar a massa lubrificante junto do caminho e sobre a gaiola. Posteriormente os deflectores são cravados nos rolamentos com uma prensa.

- **Marcação dos rolamentos, controlo visual e embalagem:**

Os rolamentos já com massa e deflectores vão passar por uma máquina de marcação a onde estes vão receber a inscrição da marca, do tipo de rolamento e da data de produção na face do anel exterior. Depois da marcação o rolamento sofre um último controlo, onde se vão procurar defeitos visuais. Após esta operação o rolamento é embalado ficando completo e pronto para o cliente.

## 2.4- Medição do ruído

---

Os rolamentos produzem vibrações enquanto giram. Teoricamente, as vibrações podem ser geradas nos rolamentos, mesmo quando o rolamento é fabricado com grande precisão e a sua geometria é perfeita. Por exemplo sob carga externa, a rotação de um elemento rolante induz ciclos periódicos de deformação elástica variável, o que resulta em ruído audível (Momono e Noda 1999).

Na prática, contudo, as vibrações resultantes da imprecisão na produção, manuseamento incorreto e desenho ou aplicação inapropriada geram a grande parte do ruído dos rolamentos (Figura 18).

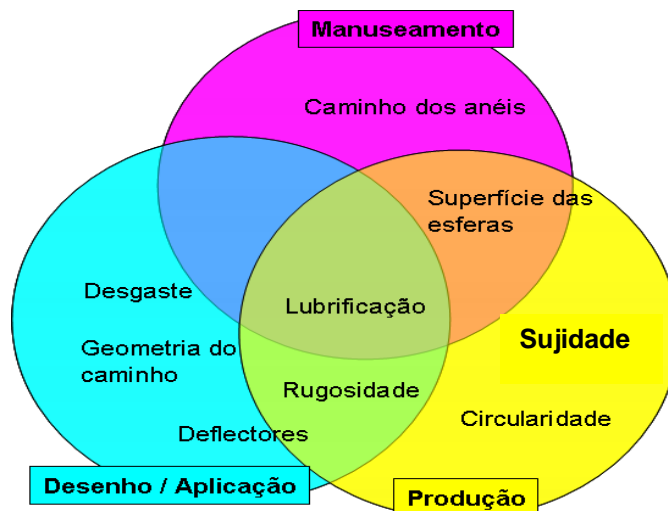
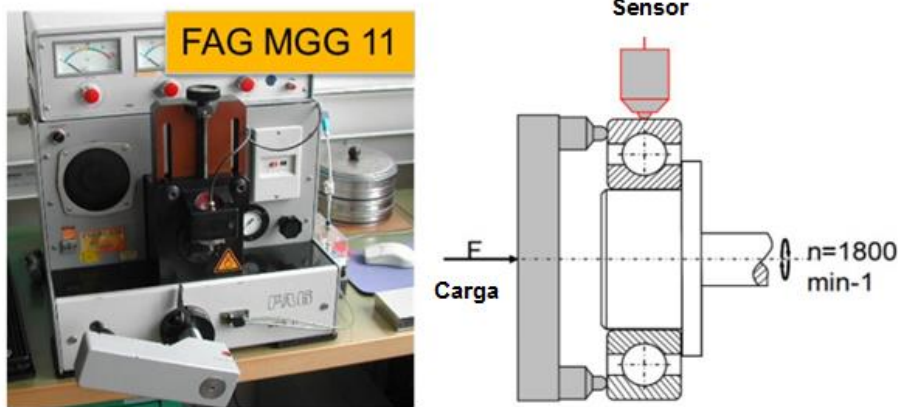


Figura 18 - Características que influenciam o ruído do rolamento (Schaeffler KG 2008).

O nível de ruído dos rolamentos aumenta principalmente com as imprecisões geométricas, particularmente desvios na circularidade ou rugosidade dos elementos de rolantes e caminhos dos anéis. Outros parâmetros adicionais que desempenham um papel no nível de ruído são: o “design” do rolamento, material da gaiola, a folgas entre os elementos rolantes e a gaiola e também muito importante a sujidade (Momono e Noda 1999).

O ruído é uma característica de qualidade e por isso é medido na produção de rolamentos. Este é quantificado sobre a forma de energia de oscilação e é medida por um sensor de velocidade que encosta no anel exterior, enquanto o anel interior roda, e envia o sinal da medição para a unidade eletrônica.



**Figura 19 - Equipamento e método de medição da FAG (Zuleeg 2014).**

É com base na medição da velocidade de oscilação que funciona o equipamento MGG11 da FAG (Figura 19). O equipamento mede a oscilação radial no anel exterior do rolamento enquanto o anel interior roda a uma velocidade de 1800rpm. A medição é feita por um sensor que envia o sinal da velocidade para uma unidade eletrónica. Esta unidade vai por um lado transformar o sinal em ruído audível para uma coluna de som e ao mesmo tempo filtra o sinal de acordo com três diferentes bandas de frequências. Com base nestas bandas de frequências a unidade eletrónica dá três resultados em  $\mu\text{m/s}$  (Miller 2000).

O nível de ruído nos rolamentos tem origens diferentes como foi referido anteriormente, no teste graças as características do ruído essas origens podem ser identificadas tal como podemos ver nos exemplos da tabela seguinte.

Tipo de ruído	Origem do ruído	Características
Estrutural	Ruído do caminho	Ruído contínuo, que todos os rolamentos geram
	Ruído da gaiola	Ruído regular dentro de um certo intervalo de tempo
Produção	Ruído de circularidade dos caminhos	Ruído contínuo (baixa frequência)
	Ruído de rugosidade dos caminhos	Ruído contínuo (alta frequência)
Outros	Ruído de sujidade	Ruído irregular
	Ruído da massa lubrificante	Ruído irregular

**Tabela 1 - Classificação de alguns tipos de ruído segundo as suas características (em termos de ruído transmitido pela coluna) (Momonos e Noda 1999).**

A entrada de partículas estranhas num rolamento, quer a partir de manuseamento inadequado, lavagens insuficientes durante a produção ou condições operacionais severas, resulta em ruído de contaminação (sujidade). Este é o resultado do contacto das partículas entre os elementos rolantes e as superfícies dos caminhos do rolamento. A magnitude do ruído de contaminação não é constante e a sua geração é irregular como vimos na tabela anterior o que o torna particularmente difícil de detetar.

## 2.5-Contaminação de partículas nos rolamentos

Como descrito a contaminação de partículas nos rolamentos provoca níveis elevados de ruído. Esta contaminação pode acontecer no manuseamento inadequado dos rolamentos, na montagem do rolamento no equipamento em condições pouco limpas, na escolha inadequada de deflectores para a aplicação do rolamento ou a contaminação pode ser ainda resultante de resíduos da produção do próprio rolamento. Na produção do rolamento, se este não for bem lavado podem ficar limalhas ou outras partículas do próprio processo dentro do rolamento (Figura 20).

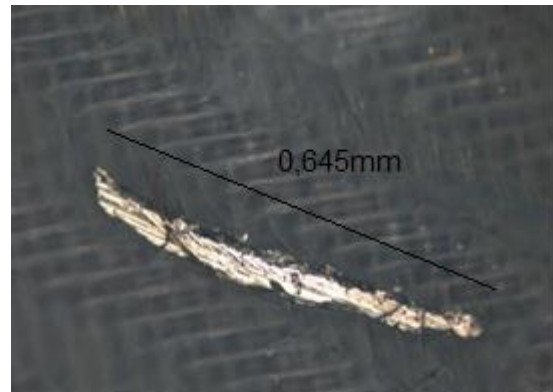


Figura 20 - Exemplo de uma partícula metálica.

Dentro das causas de falha prematura de um rolamento, como podemos ver na figura abaixo (Figura 21), a contaminação com partículas representa cerca de 20% de todas as falhas (Schaeffler Group 2001).

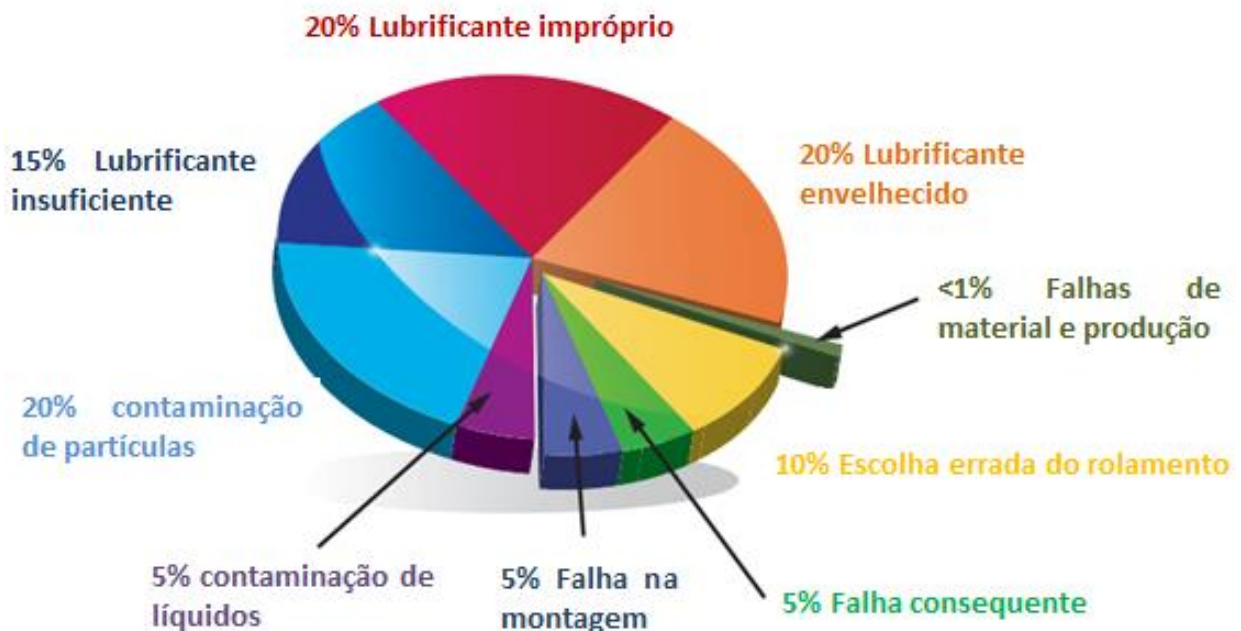


Figura 21 - Causas de falha em rolamentos (Schaeffler Group 2001).

Estas partículas, durante a aplicação do rolamento, devido às cargas a que este está sujeito (Figura 22) são forçadas a passar entre os caminhos e os elementos rolantes. Quando isto acontece sobre uma elevada pressão, provoca deformações plásticas e tensões internas nos caminhos e elementos rolantes, como podemos ver na Figura 23 e Figura 24.

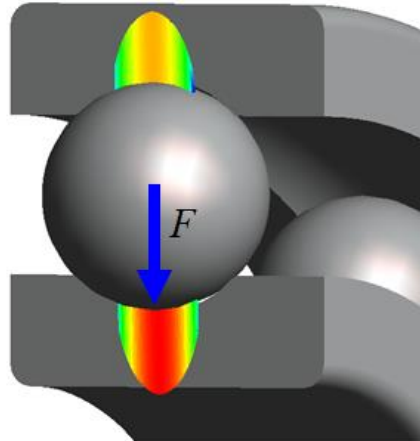


Figura 22 - Aplicação de no rolamento durante a sua aplicação (Schaeffler KG 2009).

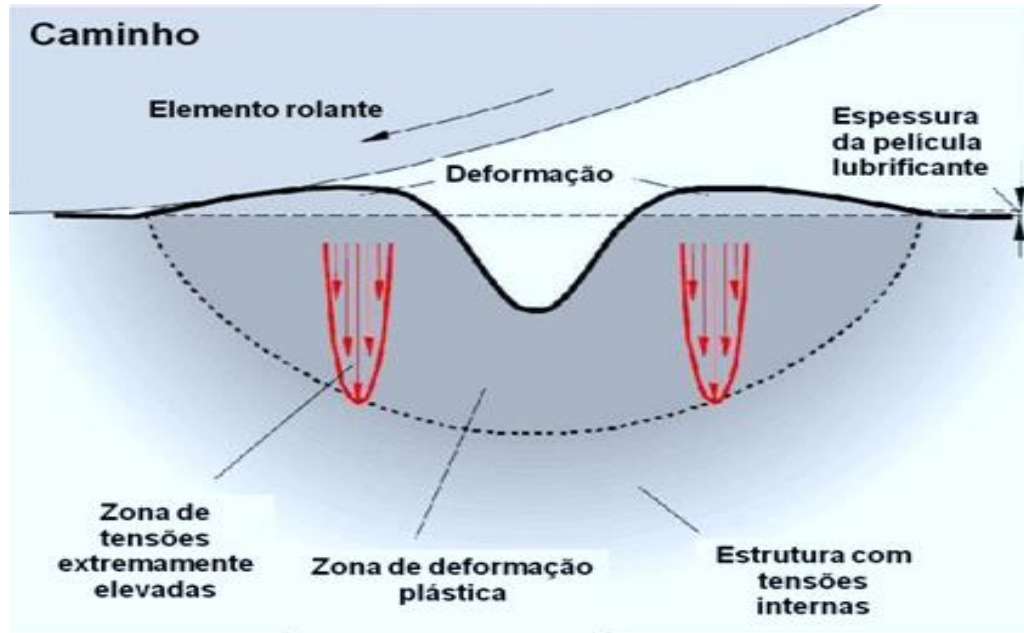
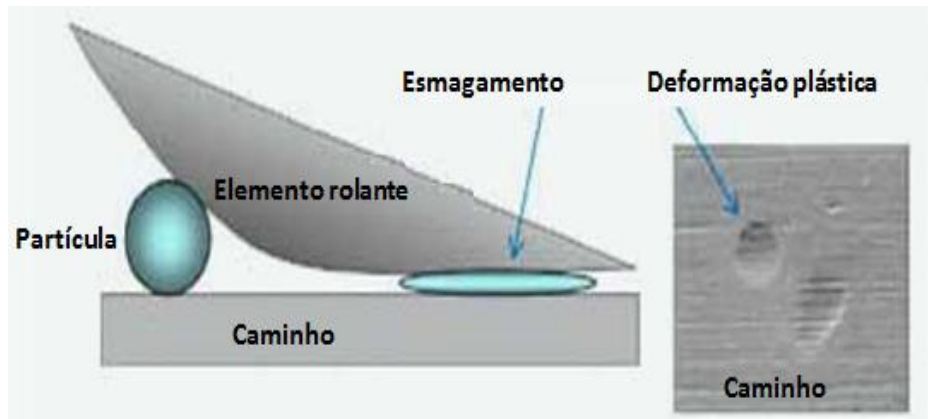
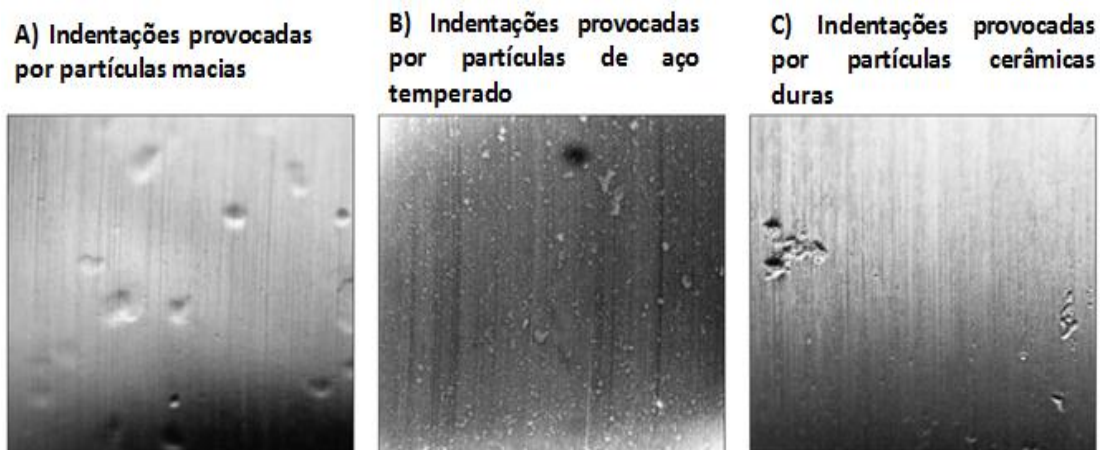


Figura 23 - Ilustração dos danos no caminho de um anel causados por uma partícula (Schaeffler KG 2009).



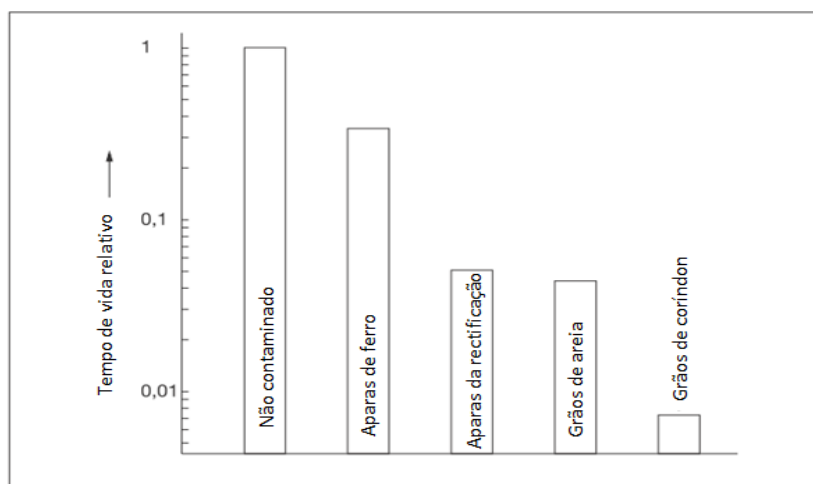
**Figura 24 - Ilustração dos danos no caminho de um anel causados por uma partícula (SKF 2012).**

Estas deformações plásticas nos caminhos ou elementos rolantes são as chamadas indentações, ou seja, mossas na superfície do material. Estas indentações como podemos observar na imagens Figura 25 tem aspecto diferente mediante o tipo de material da partícula que a causou (aço macio, de aço temperado e material cerâmico).



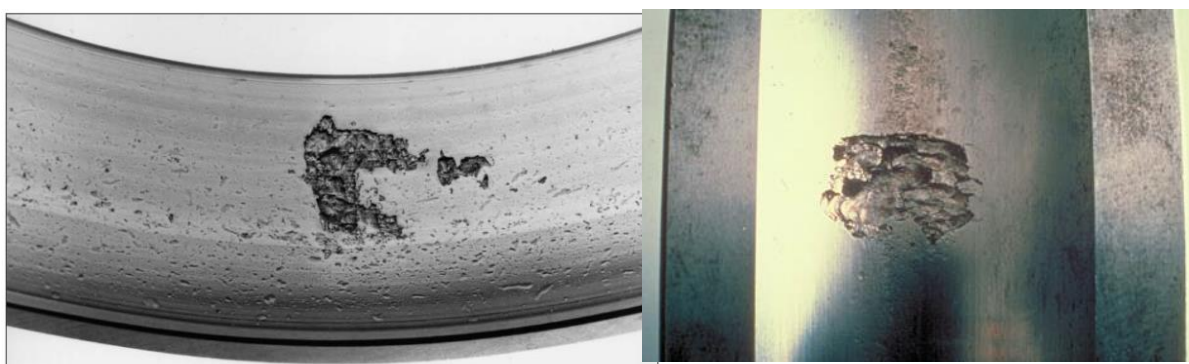
**Figura 25 - Indentações causadas por diferentes materiais (Schaeffler Group 2001).**

A nocividade dos danos causados por corpos estranhos (partículas), em casos reais de aplicação depende da sua dureza, tamanho e quantidade, bem como o tamanho do próprio rolamento. Os rolamentos mais pequenos com menores elementos rolantes são mais sensíveis às contaminações do que os de maiores dimensões. Na Figura 26 podemos observar a redução relativa do tempo de vida de um rolamento em relação a diferentes tipos de contaminantes, sendo que os mais duros reduzem mais a vida do rolamento.



**Figura 26 - Gráfico da relação do tempo de vida de um rolamento com diferentes contaminantes (Schaeffler Group 2001).**

Ao longo do tempo de aplicação do rolamento os danos causados pelas partículas vão progredindo até a inutilização total do rolamento como podemos ver nas duas imagens seguintes (Figura 27) de caminhos danificados por partículas.



**Figura 27 - Danos causados por contaminações de partículas (Schaeffler Group 2001).**

A evolução dos danos causados por partículas durante a operação do rolamento passa por diversas fases. Como podemos ver na Figura 28 em A a primeira fase do dano é a criação da própria indentação por ação da passagem da partícula entre o caminho e elemento rolante criando uma pressão muito elevada que causa essa deformação na superfície. Em B dá-se a evolução do dano de indentação para fenda por ação da carga e rotação contínua do elemento rolante durante a aplicação. Em C a fenda propaga-se por baixo da superfície do caminho do rolamento. E em D esta propagação da fenda pela superfície origina a descamação da superfície ou seja separa-se uma porção de material da superfície.

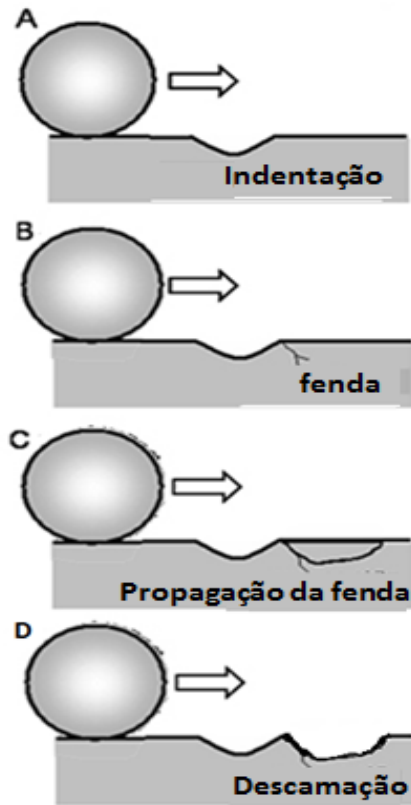


Figura 28 - Evolução do dano provocado por partículas (NSK Control 2011).

A partir do início da descamação da superfície este dano vai aumentando em forma de “V” no sentido da rotação do rolamento como podemos observar na Figura 29.

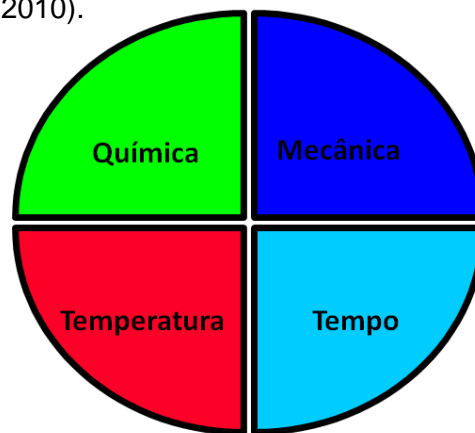


Figura 29 - Evolução do dano ao longo do tempo (Schaeffler Group 2001).

## 2.6-Tecnologia de lavagem

---

A lavagem é a única maneira de reduzir o impacto de contaminantes em diversas indústrias incluindo obviamente a indústria de rolamentos. O objetivo da lavagem é retirar a maior quantidade de sujeira e partículas possível para que as propriedades funcionais do componente fiquem dentro das especificações. De acordo com o círculo de Sinner, existem quatro fatores principais no processo de lavagem: ação química, de ação mecânica, temperatura e de tempo (Figura 30). Este círculo foi estudado em 1959 pelo Dr. Herbert Sinner do fabricante alemão de produtos químicos Henkel (Guild of Cleaners and Launderers 2014) (ECJ 2010).



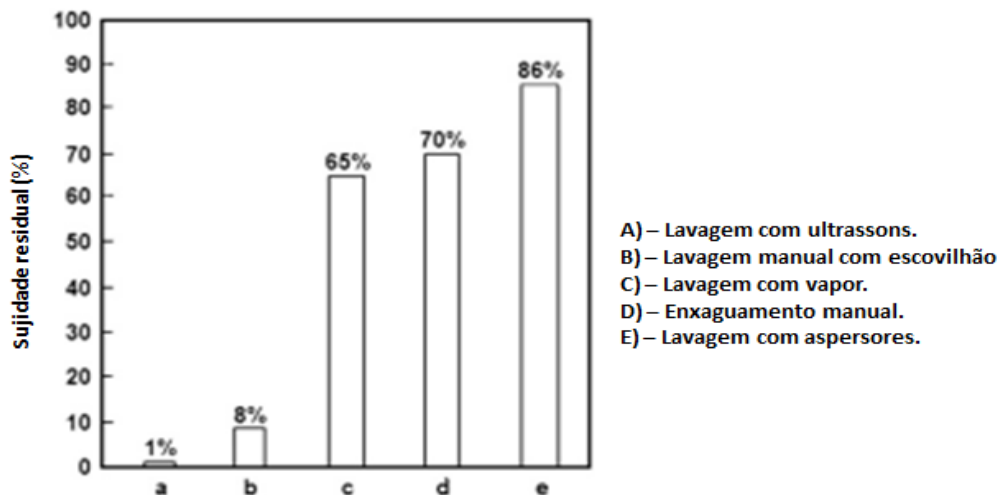
**Figura 30 – Círculo de Sinner - Fatores que influenciam a performance da lavagem (Guild of Cleaners and Launderers 2014).**

A temperatura numa lavagem depende sempre do material a ser lavado e do tipo de contaminante, sendo que de forma geral quanto mais elevada for a temperatura mais eficiente é a lavagem. O aumento da temperatura incrementa a reatividade do agente químico utilizado e por isso aumenta a eficiência da lavagem. O tempo é outro fator muito importante em qualquer lavagem. De forma geral em qualquer tipo de lavagem quanto mais prolongada seja a lavagem mais eficiente esta será. No caso dos agentes químicos de limpeza, estes dividem-se em dois grandes grupos os agentes de lavagem aquosos e os solventes orgânicos. Os solventes são os agentes de lavagem que não têm por base a água e nestes inserem-se os hidrocarbonetos, os álcoois, as acetonas, etc. Os agentes de lavagem aquosos são produtos químicos constituídos por vários tipos de químicos como a base alcalina, os agentes de superfície e os inibidores de corrosão. A ação mecânica efetuada durante a lavagem consiste na forma como se dá o contacto entre o agente de lavagem e a peça a ser lavada. Neste campo na indústria existem dois grandes tipos de ação, a aspersão ou lavagem com bocais e os ultrassons.

## 2.6.1-Lavagem com ultrassons

---

A lavagem com ultrassons é uma tecnologia de lavagem de elevado desempenho. A intenção é a de eliminar completamente todos os vestígios de contaminação incorporados em superfícies sólidas. Como podemos ver na Figura 31 a lavagem com ultrassons em relação aos mais tradicionais tipos de lavagens é a mais eficiente.



**Figura 31 - Gráfico comparativo da sujidade residual após a lavagem com diferentes técnicas (Kohli 2010).**

Esta lavagem envolve a utilização de ondas de som de alta frequência (acima do limite superior da audição humana, ou cerca de 18 kHz) criadas por transdutores para remover uma grande variedade de contaminantes a partir de peças imersas em meios líquidos. Estas ondas produzem elevadas forças sobre os contaminantes de substratos como metais, plásticos, vidro, borracha e cerâmica lavando-os. Esta ação tem a capacidade de penetrar em furos cegos, fendas e outros orifícios (Kohli 2010). Soluções aquosas ou outros solventes podem ser utilizados, dependendo do tipo de contaminação e da peça a lavar. A lavagem ultrassónica é poderosa o suficiente para remover os contaminantes resistentes e ainda suave o suficiente para não danificar o substrato. É uma aplicação típica na indústria de maquinaria de metais para remover limalhas e óleos de corte de operações de maquinaria, por exemplo antes das operações de revestimento de componentes para aplicações na indústria automóvel e aeroespacial.

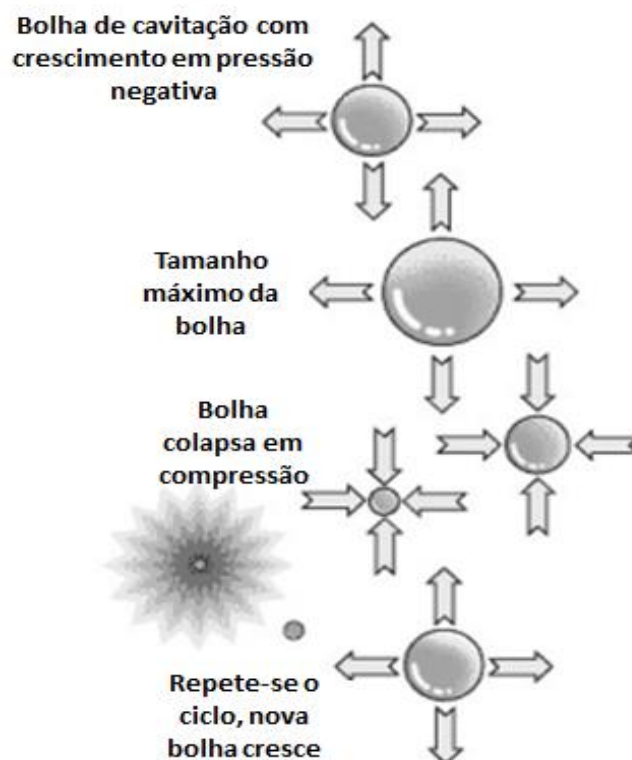
O princípio de funcionamento é simples. Os transdutores (Figura 32), que vibram na sua frequência de ressonância, devido a uma fonte eletrónica de alta frequência, induzem vibrações amplificadas que se propagam através da solução líquida no tanque.



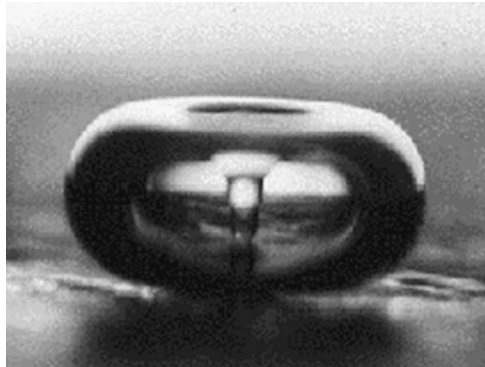
**Figura 32 - Exemplo de transdutores de ultrassons (Kohli 2010).**

O funcionamento é semelhante ao da operação de um altifalante exceto que ocorre a frequências mais elevadas. Quando transmitida através de um líquido, estas ondas de pressão criam o processo de cavitação. Neste processo denominado de cavitação, bolhas de ar de um micron de tamanho formam-se e crescem devido às ondas de pressão alternadas entre positiva e negativa.

As bolhas submetidas a essas ondas de pressão alternada continuam a crescer em pressão negativa e atingem o tamanho máximo até que entram em ressonância e colapsam em compressão como podemos ver na Figura 33.



**Figura 33 - Bolhas criadas e com crescimento em pressão negativa até colapsarem em compressão (Kanegsberg 2001).**



**Figura 34 – Implosão de uma bolha de ar (Kohli 2010).**

Este ciclo repete-se consecutivamente. Pouco antes de a implosão das bolhas (Figura 34), há uma enorme quantidade de energia armazenada no interior da própria bolha. As temperaturas dentro de uma bolha podem ser extremamente elevadas e atingirem pressões de até 500 bar. O evento implosão, quando ocorre próximo de uma superfície dura da peça, transforma a bolha num jacto de cerca de um décimo do tamanho da bolha, que se desloca a velocidades de até 400 km/h para a superfície dura. Com a combinação de pressão, temperatura e velocidade, o jacto solta contaminantes e partículas das suas ligações com o substrato (ASM International 1994).

## 2.6.2-Lavagem com bocais

---

A lavagem com aspersores ou bocais envolve a projeção do líquido, que é forçado a colidir com a superfície do objeto a lavar. Nesta lavagem a projeção do líquido é atingida com a ajuda de bocais mecânicos (Durkee 2006). Estes bocais podem ter diferentes geometrias dependendo do fim a que se destinam tendo em conta a forma como o líquido é projetado contra o objeto. Como observamos na Figura 35 por exemplo podemos ter bocais de enxaguamento, bocais de lavagem, bocais de impacto, entre outros.

A configuração do bocal de enxaguamento não é feito para conseguir um bom rendimento da lavagem. O objetivo deste é conseguir que todas as superfícies da peça sejam cobertas com o fluido de lavagem. Neste caso a pressão de impacto é irrelevante. A forma do bocal de impacto por sua vez tenta conseguir um fluxo de alta pressão de líquido concentrado nas zonas da peça em que o nível de sujidade é maior ou onde a sujidade está mais fortemente aderida à superfície da peça. A geometria do bocal de lavagem direciona o fluido de lavagem sobre a peça para deslocar detritos e sujidades, e diluir líquido de limpeza sujo retido na superfície (Durkee 2006).



**Figura 35 - Três exemplos de bocais com diferentes objetivos (enxaguar, impacto e lavagem) (Cleaning Times 2009).**

## 2.7-Controlo da sujidade – Testes de limpeza

A ferramenta da qualidade que permite hoje em dia controlar a eficiência de lavagem na indústria automóvel (onde se incluem os rolamentos) são os testes de limpeza feitos em laboratório. Graças a estes, é possível conhecer e controlar a sujidade das peças no seu estado final e no seu processo de fabrico.

Estes testes de limpeza consistem na determinação do número de partículas e massa das mesmas por área de superfície, normalmente  $1000\text{cm}^2$ , de cada amostra de rolamentos. Esta relação do número / massa de partículas por  $1000\text{cm}^2$  de área é feita para facilitar a comparação da limpeza de rolamentos com diferentes áreas de superfície.

O princípio do teste de limpeza é fornecido pelas normas internacionais ISO16232-10 e VDA19. Este é constituído por duas fases principais a extração das partículas e a análise propriamente dita como podemos observar na Figura 36.

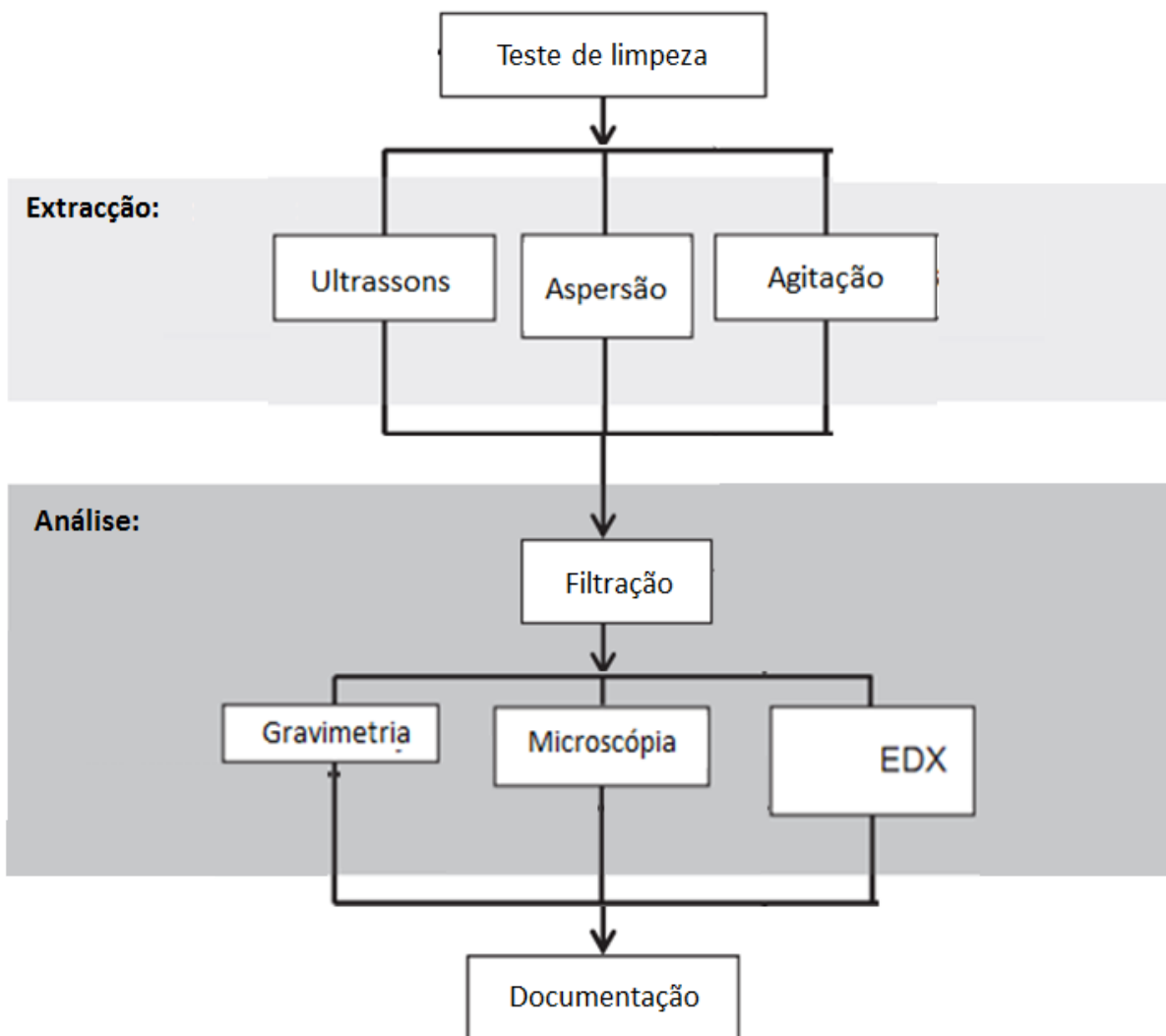


Figura 36 - Sequência e variantes do teste de limpeza (Quality management in automotive industry 2010).

Na fase da extração existem três principais métodos (Figura 36) para conseguir extrair a sujidade (partículas) da peça antes da filtração, os ultrassons, a aspensão e a agitação. Na agitação as peças em análise são mergulhadas num recipiente adequado com fluido de lavagem e aí agitadas durante um determinado período de tempo libertando as partículas.

Na aspensão as peças em análise são lavadas dentro de recipiente adequado recorrendo a um bocal de aspensão. Este projeta fluido de lavagem na superfície da peça com uma determinada pressão durante um determinado período de tempo. Os equipamentos mais comuns neste método são as cabines de lavagem com a da Figura 37.

Nos ultrassons as peças são colocadas dentro de um recipiente com fluido de lavagem, este é colocado num equipamento de lavagem com ultrassons e aí são sujeitas aos efeitos da lavagem acústica durante um determinado período de tempo. É exemplo de equipamento de lavagem com ultrassons o equipamento da marca VWR.

Após a extração o fluido de lavagem utilizado em qualquer um dos métodos é filtrado utilizando um equipamento de filtração e um filtro normalizado. Este é escolhido de acordo com a compatibilidade com o fluido de lavagem e de acordo com a porosidade pretendida. A porosidade vai determinar a dimensão mínima das partículas que irão ficar retidas no filtro.

Na fase de análise do resultado de limpeza existem três principais métodos de utilizados para estudar as partículas retidas no filtro que podem ser utilizados de forma isoladas ou juntas, a análise EDX, a gravimetria e microscopia.



**Figura 37 - Cabine de lavagem (Hydac 2012).**



**Figura 38 - Equipamento de lavagem de ultrassons da marca VWR (VWR 2012).**

A análise EDX (*Energy dispersive X-ray*) ou seja espectroscopia de raios X por dispersão em energia permite identificar os elementos que constituem as partículas. Identificando os elementos das partículas o seu material constituinte é assim descoberto.

A análise gravimétrica mede a quantidade de sujidade presente no filtro em termos de massa, normalmente é expressa em termos de miligrama ou grama por área avaliada (por exemplo mg/1000cm<sup>2</sup>). Esta avaliação é feita recorrendo a diferença de massa do filtro antes e depois a filtração do fluido a analisar.

A análise microscópica do filtro permite obter resultados em termos de distribuição das partículas por dimensão, ou seja número de partículas presentes no filtro e sua dimensão. Esta análise é assegurada normalmente por um microscópio com *software* de contagem automática de partículas como é exemplo o Leica Q-Clean (Figura 39). Este consegue calcular não só o número total de partículas presentes no filtro, como a dimensão das partículas em termos de área, perímetro e principalmente de comprimento máximo como podemos ver na Figura 40. Com esta informação o programa após a avaliação do filtro mostra o número de partículas distribuídas por diferentes dimensões (em termos de comprimento) que representam classes de dimensão diferentes segundo a norma internacional ISO16232 (Quality management in automotive industry 2010) (International standard ISO 2007).



**Figura 39 - Microscópio Leica Q-Clean.**



**Figura 40 - Comprimento máximo de uma partícula.**

## 3-Materiais e métodos

---

### 3.1 – Materiais

---

Os principais materiais que constituem as partículas contaminantes do processo de fabrico dos rolamentos são materiais metálicos e poliméricos.

Os materiais metálicos são constituídos por partículas de aço 1.3505 (100Cr6) provenientes do processo de retificação dos anéis e partículas de aço 1.0347 (DC03) com origem nas gaiolas metálicas e no seu processo de cravação. Os materiais poliméricos são constituídos por poliamida proveniente das gaiolas plásticas e outros polímeros tais como polipropileno provenientes de passadeiras e calhas.

Estes materiais das partículas mais frequentes têm as propriedades e características abaixo descritas:

**Aço de rolamento 1.3505 (100Cr6).** É um aço de alto teor de carbono e baixa liga, com 1% de carbono e 1,5% de cromo. Após o tratamento térmico tem uma microestrutura martensítica, com 1300 MPa de tensão de cedência e uma dureza de 800 HV (dureza vickers) (Steel Grades 2011).

**Aço 1.0347 (DC03).** É um aço de baixo teor de carbono e baixa liga, com 0,1% de carbono e 0,45% de manganês. Tem uma microestrutura ferrítica, com 320 MPa de tensão de cedência e uma dureza de 100 HV (European Steel and Alloy Grades 2011).

**Polímero poliamida (PA66-G25).** É um polímero termoplástico composto por monómeros de amida, reforçado com 25% de fibra de vidro. Tem uma tensão de cedência de 145MPa e um módulo de Young de 7500MPa (Campus 2015).

**Polímero polipropileno (PP).** É um polímero termoplástico derivado do propileno. Tem uma tensão de cedência de 38MPa e um módulo de Young de 1300MPa (Campus 2015).

## 3.2- Método de avaliação da limpeza

---

O teste de limpeza utilizado para controlar o estado de limpeza dos rolamentos e do seu processo na Schaeffler Portugal segue uma das variáveis descritas no ponto 2.7. Utiliza os ultrassons como método de extração de partículas e a análise da sujidade tem por base a gravimetria e a contagem e medição de partículas.

O filtro utilizado para a análise é de polímero na forma de rede com uma porosidade de 5 $\mu$ m. Esta porosidade acaba por definir a dimensão mínima de partículas que acabam por ficar retidas no filtro e assim analisadas.

No decorrer do teste de limpeza são utilizados quatro equipamentos: um equipamento de ultrassons – VWR Ultrasonic Cleaner (Figura 41), uma balança de precisão Mettler Toledo AB204S (Figura 41), um equipamento de filtração Sartorius (Figura 42) e um microscópio Olympus BX51M (Figura 42).



Figura 41 – À esquerda -Banho de ultrassons VWR Ultrasonic Cleaner, À direita -Balança Mettler Toledo AB204S.



Figura 42 – À esquerda – equipamento de filtração Sartorius, À direita microscópio óptico Olympus BX51M.

O teste de limpeza é iniciado com o mergulho da amostra (um número determinado de rolamentos para perfazer os 1000cm<sup>2</sup>) num líquido de lavagem colocado num recipiente apropriado e seguidamente exposta a ultrassons (Figura 43) durante 10 minutos.



**Figura 43 - Lavagem da amostra de rolamentos em ultrassons (1 equipamento de ultrassons, 2 e 3 exposição das peças aos ultrassons).**

Terminada a lavagem nos ultrassons o líquido de lavagem utilizado é filtrado num equipamento de filtração como o da Figura 44, onde este é passado pelo filtro de 5 $\mu$ m e pré tratado para o efeito.



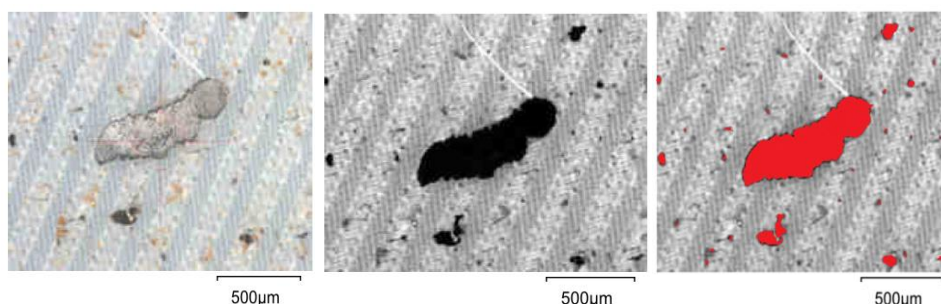
**Figura 44 – Filtração do líquido de lavagem após a lavagem em ultrassons (1 enxaguamento das peças após a lavagem, 2 equipamento de filtração, 3 filtração, 4 filtro de partículas).**

Após esta filtração o filtro é seco e pesado numa balança de precisão e é analisado ao microscópio (Figura 45). A pesagem do filtro após a filtração, juntamente com o dado da massa do filtro antes da filtração, permite analisar a gravimetria da amostra. Ou seja determinar a quantidade de sujidade em termos de massa. Com esta informação obtemos um valor de massa por unidade de área de superfície de rolamentos, expressa em  $\text{mg}/1000\text{cm}^2$ .



**Figura 45 – Exemplo de balança e microscópio (1 – balança para determinar a gravimetria, 2 – microscópio para determinar o número de partículas do filtro).**

Para além da gravimetria o filtro é sujeito a uma análise ao microscópio onde é analisada a distribuição das partículas por dimensão. Esta análise é feita pelo microscópio Olympus BX51M, que dispõe do *software* - Analysis de contagem automática de partículas (Figura 45). Este equipamento permite polarizar a imagem do filtro e com isso a camera digital a gravar na escala de cinzentos permite ao *software* reconhecer as partículas no filtro. Como podemos ver na Figura 46 temos a esquerda a imagem real da partícula, ao centro a imagem em escala de cinzentos da partícula e á direita à imagem do reconhecimento da partícula pelo *software*.



**Figura 46 – Sequência do reconhecimento da partícula pelo *software*.**

Após a avaliação do filtro o *software* dispõe dos dados para preencher o relatório da amostra analisada. Este relatório é composto por três páginas (ver anexo 1), onde inclui uma imagem completa do filtro digitalizado, imagens das dez maiores partículas captadas e o número de partículas por dimensões segundo a ISO16323.

### 3.3- Métodos de lavagem utilizados na montagem de rolamentos

Como objeto de estudo para este trabalho foi selecionada uma linha de montagem de rolamentos da Schaeffler Portugal, a linha de montagem do rolamento 6202 (Figura 47). O fluxo de montagem deste símbolo é idêntico ao descrito no capítulo 2.3.5. Esta linha de tem na sua constituição cinco unidades de lavagem distribuídas ao longo das várias etapas de montagem.

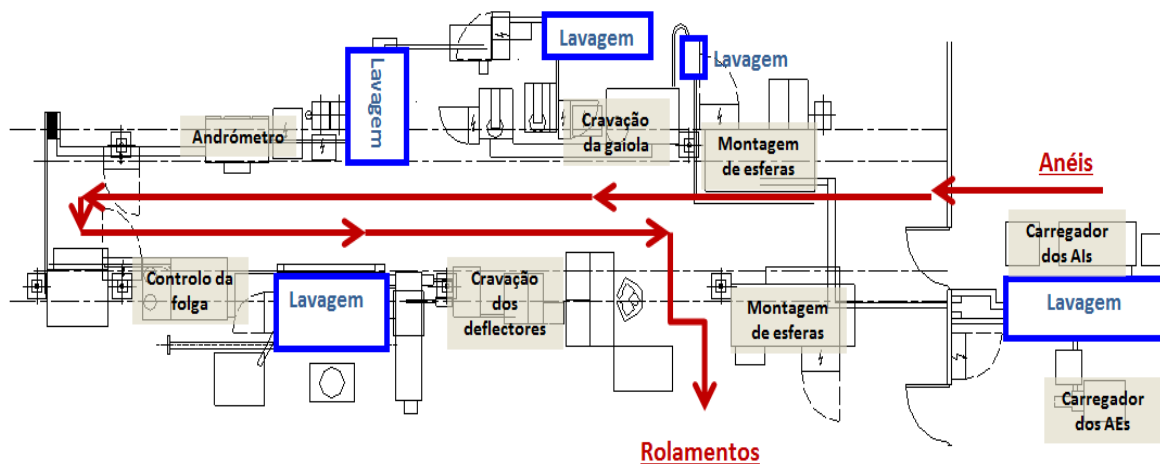


Figura 47 - Planta e fluxo de produção da linha de montagem do rolamento 6202.

No que toca aos quatro fatores que influenciam o desempenho de uma lavagem (temperatura, tempo, química e ação mecânica) nem de todos é possível tirar partido nas lavagens de rolamentos.

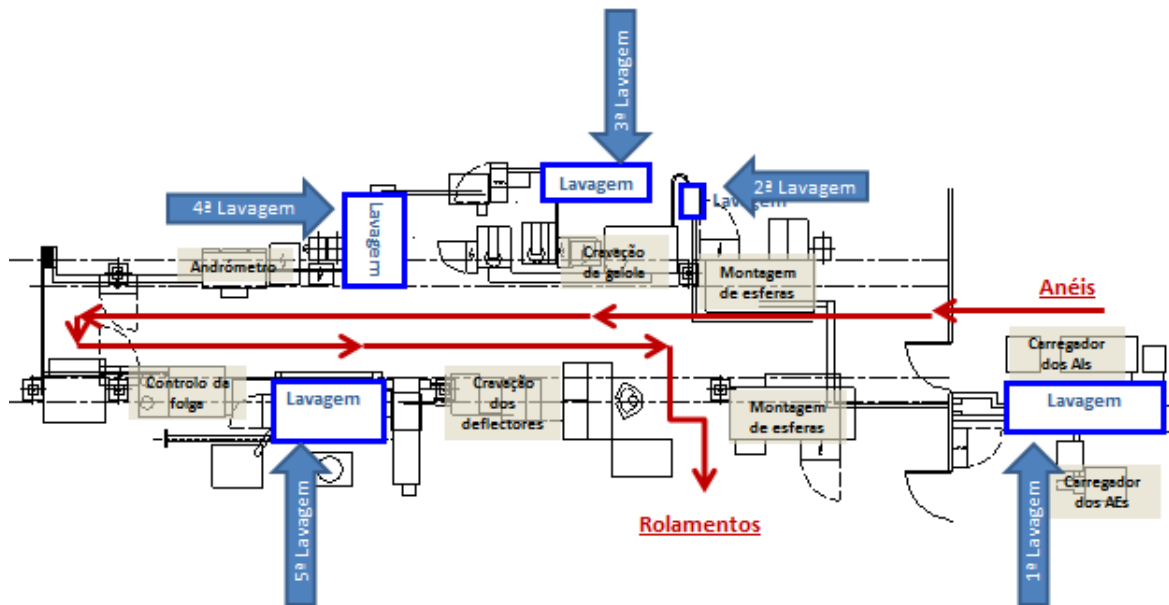
A lavagem de rolamentos e componentes, devido às exigentes medições dimensionais necessárias, é feita à temperatura ambiente não sendo por isso tirado nenhuma vantagem deste fator.

O tempo da lavagem de rolamentos na sua linha de montagem está de forma geral associado ao tempo de ciclo de toda a linha, não sendo por isso ajustável.

No que toca à química as lavagens dos utilizam um hidrocarboneto alifático, o querosene. Este agente de limpeza tem uma grande afinidade com os óleos utilizados nas

operações anteriores à montagem do rolamento o que faz com que seja bastante eficiente na sua remoção assim como das partículas que o acompanham.

Em relação a ação mecânica na linha de montagem 6202 existem os dois principais tipos de ação mecânica de lavagem, aspensão e ultrassons. A primeira lavagem (Figura 48) é utilizada para lavagem os anéis exteriores e interiores, e o funciona através de ultrassons. A segunda, terceira, quarta e quinta lavagem são utilizadas para lavagem rolamento já montado e funcionam por aspensão utilizando bocais especiais denominados blocos de lavagem.

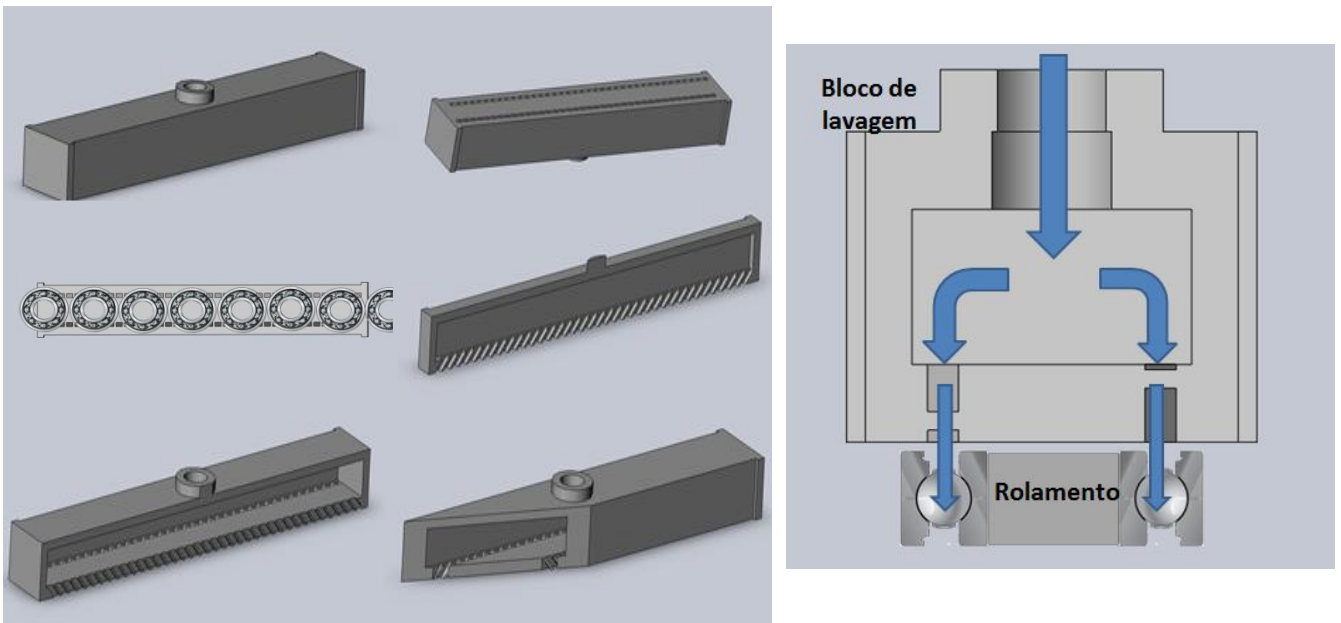


**Figura 48 - Posicionamento e numeração das lavagens na linha 6202.**

Na produção de rolamentos a lavagem com ultrassons é muito eficiente e é amplamente utilizada na lavagem de anéis antes da montagem dos rolamentos, como é o caso da primeira lavagem da linha do 6202. Esta tecnologia não é utilizada na lavagem de rolamentos já montados devido à energia libertada pela implosão das bolhas que provoca vibrações muito fortes nas esferas. Estas vibrações das esferas em contacto com os caminhos dos anéis podem causa danos tanto na esfera como nos anéis. Na lavagem de anéis a cavitação provocada pelos ultrassons permite conseguir uma lavagem eficiente e não os danifica.

A lavagem com bocais é a única tecnologia utilizada para lavar rolamento montado, possuindo bocais adequados a sua atividade - os blocos de lavagem. Os blocos criam uma lavagem de impacto com diversos pontos ao mesmo tempo. Estes blocos de lavagem consistem em tubos de aço na forma de paralelepípedo, onde a alimentação de líquido de

lavagem é feita no topo e a saída do líquido é feita através de diversas ranhuras na parte inferior Figura 49. Cada um destes blocos tem ranhuras em ambos os lados sendo que a distância ente cada lado das ranhuras é igual ao diâmetro da gaiola do rolamento, isto para que o líquido de lavagem projetado embata na zona das gaiolas do rolamento. Além disso as ranhuras têm uma ligeira inclinação e esta inclinação tem sentido contrário entre os dois lados do bloco. Esta inclinação tem o propósito de durante a lavagem a força de impacto do líquido de lavagem conseguir rodar o rolamento de forma a expor ao líquido de lavagem as partículas e sujidade que se encontrem zonas de mais difícil acesso.



**Figura 49 – À direita -Modelo de um bloco da lavagem em várias posições e com várias visões em corte. À esquerda - Vista em corte da passagem do líquido de lavagem pelo bloco de lavagem e rolamento.**



## 4- Estudo de caso

---

O estudo de caso deste trabalho assenta na avaliação do estado de limpeza de rolamentos 6202 (com gaiola metálica) na sua montagem, e com esta avaliação conseguir soluções que permitam melhorar a limpeza final destes rolamentos. Assim este estudo divide-se em duas partes:

- Avaliação do estado de limpeza dos rolamentos 6202 ao longo da montagem;
- Melhoria do processo baseado nos resultados da avaliação do estado de limpeza dos rolamentos 6202 ao longo da linha de montagem;

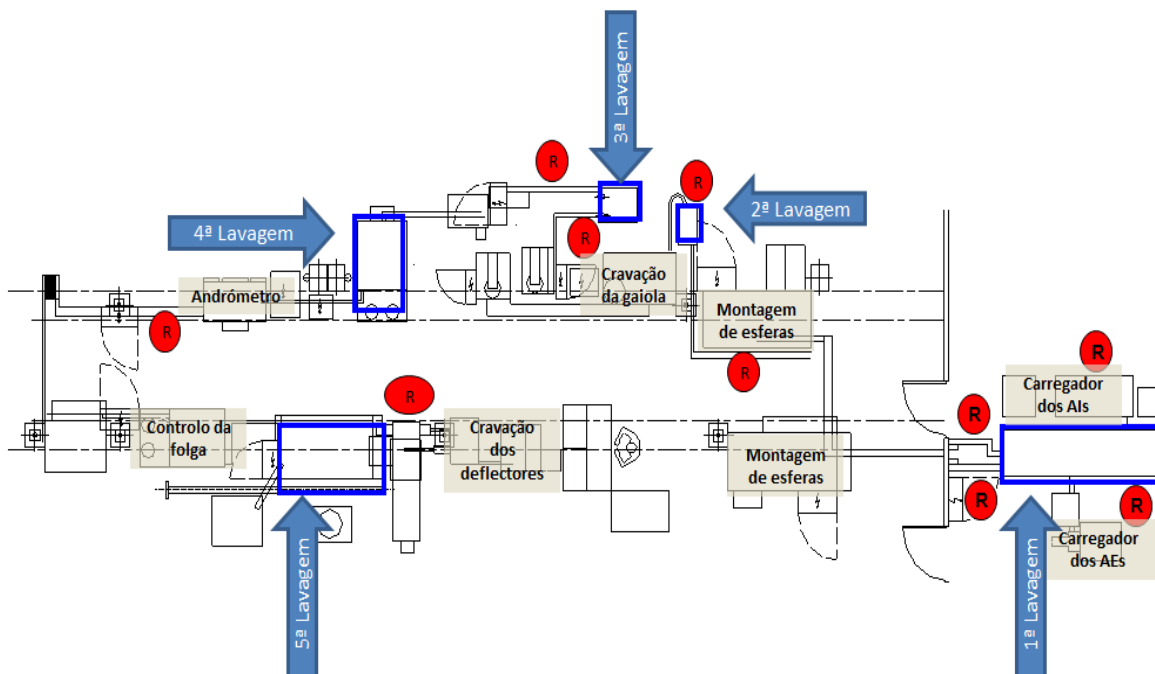
### 4.1- Avaliação do estado de limpeza ao longo da linha de montagem

---

Para estudar o comportamento da limpeza ao na linha de montagem do rolamento 6202 foram escolhidos vários locais de recolha. Em cada local foram recolhidas três amostras aleatórias de forma a tornar os resultados representativos, visto não ser possível analisar exatamente as mesmas peças nos diferentes pontos. Cada amostra é constituída pelo número de peças (rolamento ou anel) necessário para perfazer 1000cm<sup>2</sup> de área tal como descrito nos capítulos 2.7 e 3.2.

A avaliação da limpeza ao longo da linha de montagem foi feita em duas fases a avaliação da lavagem dos componentes anéis interiores e exteriores e avaliação da limpeza ao longo da linha de montagem propriamente. A lavagem de anéis é considerada parte da linha de montagem e é uma etapa de processo muito importante visto determinar o grau de limpeza que os anéis são fornecidos à etapa de montagem propriamente dita. No entanto como é uma lavagem apenas dos componentes anéis a sua avaliação foi feita separadamente das várias etapas de montagem. Outra justificação para a avaliação diferenciada é a tecnologia de lavagem utilizada. Enquanto a lavagem de anéis utiliza ultrassons, a lavagem de rolamentos ao longo da linha de montagem usa blocos de lavagem (tal como descritos nos capítulos 2.7 e 3.2).

Os locais de recolha, como podemos ver na Figura 50 na forma de círculo com a letra R ao centro, foram no total dez. Quatro locais de recolha para avaliar a lavagem dos anéis e seis para avaliar o comportamento da sujidade ao longo da montagem.



**Figura 50 - Locais de recolha de amostras na linha de montagem do 6202 (círculos com a letra R).**

A recolha para avaliação da lavagem de anéis consistiu na recolha de três amostras de anéis interiores antes da lavagem, três amostras de anéis exteriores antes da lavagem assim como uma recolha em igual número de anéis interiores e exteriores após a lavagem. Totalizando 12 amostras de anéis (quatro recolhas de três amostras cada).

As recolhas na montagem foram feitas na montagem de esferas (anéis com esferas), depois após a 2ª lavagem, seguindo-se após a cravação da gaiola, depois após a 3ª lavagem, após a 4ª lavagem e finalmente após a 5ª e última lavagem. Totalizando 18 amostras (seis recolhas de três amostras cada).

No total desta avaliação foram então feitos 30 testes de limpeza conforme descrito no ponto 2.7, onde se obtiveram as médias de sujidade em termos de  $\text{mg}/1000\text{cm}^2$  e número de partículas de cada local de recolha.

## 4.2-Resultados de limpeza ao longo da linha de montagem

De forma a facilitar a observação dos resultados médios estes foram colocados na forma de gráficos representando os dados em termos de massa de sujidade (mg/1000 cm<sup>2</sup>) e número total de partículas (superiores a 5µm).

Na Figura 51 e Figura 52 podemos observar a capacidade de lavagem do equipamento de lavagem de anéis interiores e exteriores. Na Figura 51 os resultados mostrados são expressos em termos de massa de sujidade e na Figura 52 em termos de total de partículas superiores a 5 µm.

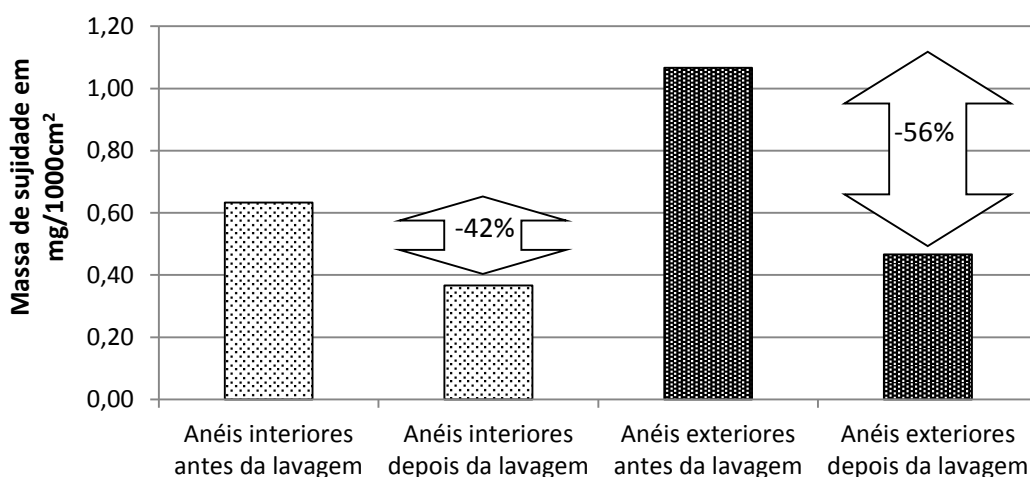


Figura 51 - Massa de sujidade de anéis interiores e exteriores antes e depois da lavagem.

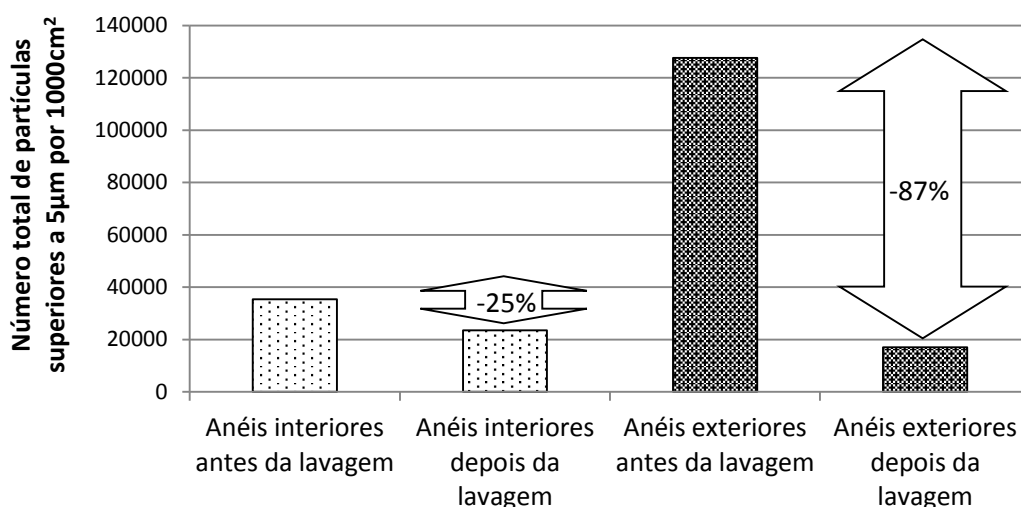


Figura 52 - Número de partículas de anéis exteriores e interiores antes e depois da lavagem.

Na Figura 53 e Figura 54 podemos observar os resultados médios da sujidade em cada etapa da linha de montagem. Na Figura 53 os resultados mostrados são expressos em termos de massa de sujidade por 1000cm<sup>2</sup> e na Figura 54 em termos de total de partículas superiores a 5 micrómetros.

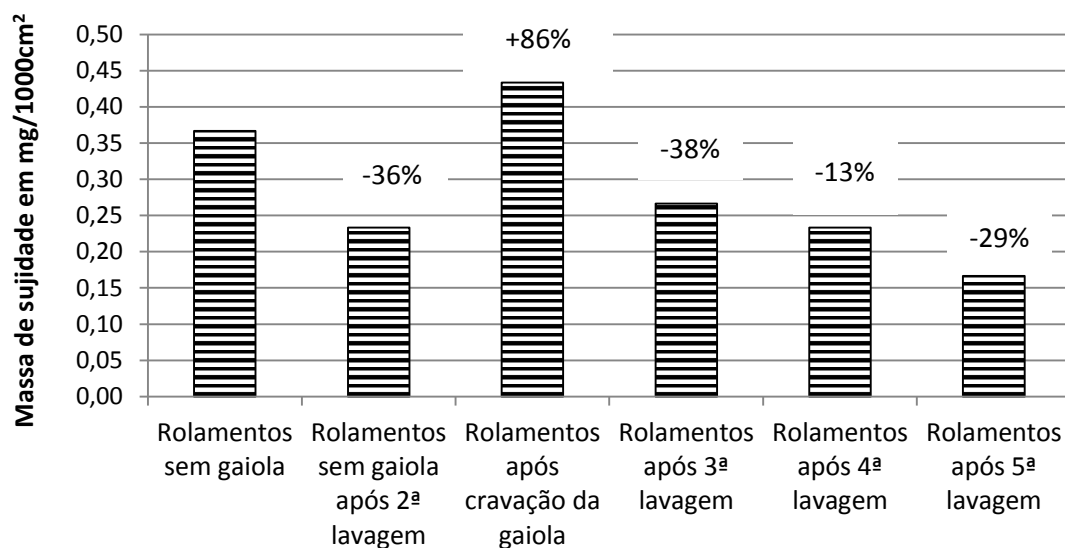


Figura 53 - Massa de sujidade por 1000cm<sup>2</sup> de rolamentos ao longo da linha do 6202.

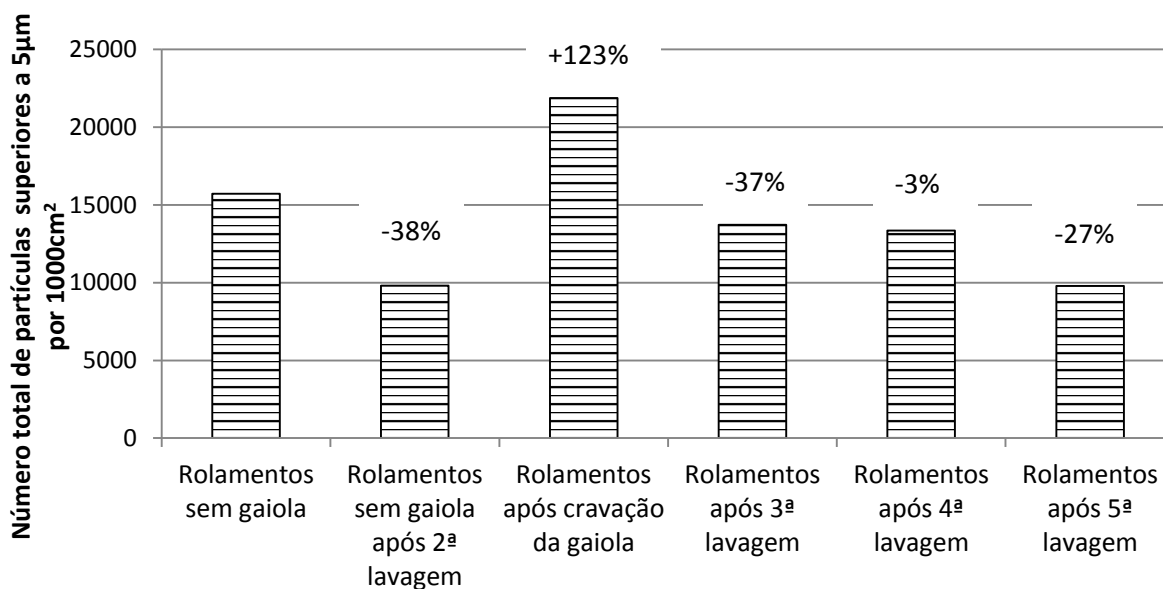


Figura 54 - Número de partículas por 1000cm<sup>2</sup> de rolamentos ao longo da linha do 6202.

## 5-Discussão dos resultados

---

Nos resultados obtidos na avaliação da etapa de lavagem de anéis (Figura 51 e Figura 52) observa-se um comportamento similar entre os dois tipos de resultados (gravimetria e número de partículas). Na lavagem dos anéis exteriores regista-se uma eficiência de lavagem grande rondando os 56 % na gravimetria e 87% em termos de número de partículas. No caso dos anéis interiores a eficiência de lavagem ronda os 42% em termos de gravimetria mas em termos de número de partículas observa-se uma taxa de 25%.

As eficiências de lavagem de anéis interiores e exteriores são um pouco divergente o que é facilmente explicado pela diferente geometria dos anéis. Os anéis exteriores tendo ranhuras interiores (caixas para a cravação de deflectores) por um lado acumulam uma quantidade de sujidade muito superior nas operações de corte por arranque de aparas anteriores e por outro o facto de estas ranhuras serem interiores dificulta o efeito da própria lavagem.

Nos resultados da avaliação da montagem (Figura 53 e Figura 54), em ambos os resultados (gravimetria e número de partículas) o comportamento ao longo da linha é similar o que demonstra a relação direta entre os dois. Os rolamentos com a segunda lavagem mostram uma considerável remoção de sujidade (cerca de 36% na gravimetria e 38% em termos de número de partículas) tanto em termos de massa como em termos de número de partículas. Com a cravação da gaiola a sujidade aumentou substancialmente (cerca de 86% na gravimetria e 123% em termos de número de partículas). Com este aumento de sujidade as três lavagens seguintes (3ª lavagem, 4ªlavagem e 5ªlavagem) conseguem apenas uma redução da sujidade para o mesmo nível anterior a cravação das gaiolas. Esta redução da sujidade nestas lavagens é gradual sendo que a taxa de remoção é inferior à segunda lavagem.

O mais relevante desta análise foi a quantificação do impacto da cravação da gaiola em termos de limpeza. Em termos tecnológicos a lavagem dos anéis com os ultrassons mostram uma maior capacidade de remoção de sujidade do que a utilização dos blocos de lavagem (aspersão) para os rolamentos na linha de montagem.

## 5.1-Melhoria do processo

---

Após a análise de limpeza ao longo da linha de montagem ficou evidente que o principal foco de contaminação de partículas na linha de montagem é na cravação da gaiola. Este fenómeno é justificado pela quantidade de sujidade das gaiolas no seu estado de fornecimento e pelas partículas geradas com o processo de cravação (prensagem) das duas metades das gaiolas.

Tendo em conta esses resultados preconizou-se que uma lavagem adicional das gaiolas poderia ter um grande impacto da redução de sujidade e partículas. A fim de se ensaiar a possibilidade de lavar as gaiolas antes de serem entregues na montagem foi executado um teste de lavagem das gaiolas num equipamento de lavagem exterior à montagem. Este equipamento (máquina Dürr) tem vários tanques de lavagem onde o primeiro tem bocais de lavagem e o segundo tem ultrassons. Para avaliar e quantificar esta melhoria do processo foram feitos testes de limpeza a gaiolas no estado de fornecimento e lavadas num equipamento de lavagem auxiliar.

Como as gaiolas metálicas antes da cravação são constituídas por uma metade com rebite e outra metade sem rebite e são entregues na montagem separadas foram também ensaiadas separadas. Com e sem rebite as gaiolas são fornecidas em varetas para facilitar a colocação na prensa de cravação e como tal o ensaio de lavagem das gaiolas na máquina Dürr foi realizado em varetas (Figura 55).



Figura 55 - Varetas com gaiolas com e sem rebite.

Com o intuito de medir a capacidade de lavagem das gaiolas na máquina Dürr foram executados três testes de limpeza a cada tipo de gaiola (com e sem rebite) e antes e depois da lavagem, num total de 12 testes de limpeza de forma a tornar os resultados representativos.

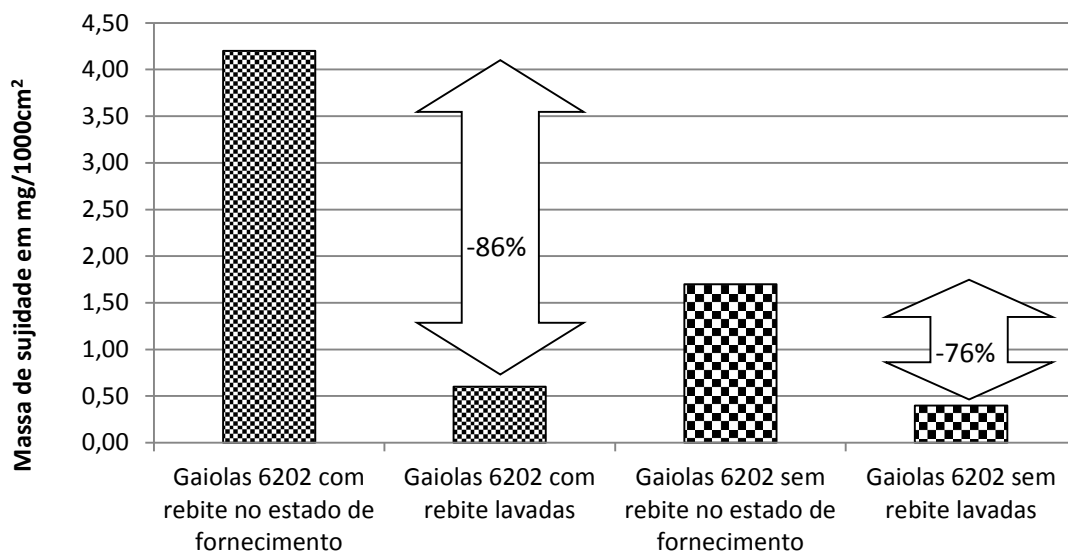
Em paralelo foram realizados outros 12 testes de limpeza a rolamentos após a cravação e após a 5ª lavagem. De forma a tornar os resultados da análise representativos estes testes foram feitos também em triplicado. Ou seja três testes de limpeza a rolamentos cravados com gaiolas no seu estado normal de fornecimento e três testes de limpeza a rolamentos com gaiolas lavadas. Um conjunto de amostras (seis testes) retirados após o módulo de cravação de gaiolas para avaliar o impacto da cravação de gaiolas lavadas e não lavadas. E outro conjunto de (seis amostras) retirados após a 5ª lavagem para avaliar o impacto da lavagem de gaiolas na limpeza do rolamento final.

## 5.2-Resultados da melhoria

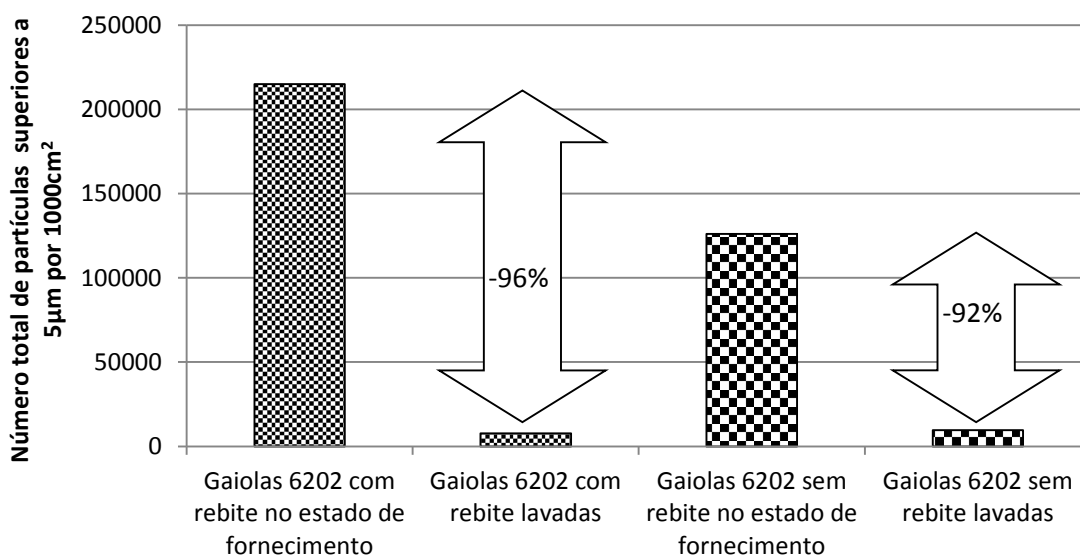
---

Mais uma vez de forma a facilitar a observação dos resultados médios de cada conjunto de três testes, estes foram colocados na forma de gráficos representando os dados em termos de sujidade ( $\text{mg}/1000 \text{ cm}^2$ ) e número total de partículas (superiores a  $5\mu\text{m}$ ).

Na Figura 56 e Figura 57 podemos observar a quantidade de sujidade que o equipamento de lavagem conseguiu retirar das gaiolas face ao seu estado de fornecimento. Na Figura 56 os resultados mostrados são expressos em termos de massa de sujidade e na Figura 57 em termos de total de partículas superiores a  $5 \mu\text{m}$ .



**Figura 56 - Massa de sujidade por 1000cm<sup>2</sup> de gaiolas com e sem rebite lavadas e no seu estado de fornecimento.**



**Figura 57 - Número de partículas por 1000cm<sup>2</sup> de gaiolas com e sem rebite lavadas e no seu estado de fornecimento.**

Com a lavagem das gaiolas foram feitos os testes comparativos em termos de sujidade nos rolamentos com a cravação de gaiolas lavadas ou não lavadas. Testes estes com os dois pontos de recolha, no módulo de cravação de gaiolas e após a 5ª lavagem.

Na Figura 58 e Figura 59 podemos observar em termos comparativos a quantidade de sujidade dos rolamentos com gaiolas lavadas e não lavadas após o módulo de cravação. Na Figura 58 os resultados mostrados são expressos em termos de massa de sujidade e na Figura 59 em termos de total de partículas superiores a 5 micrómetros.

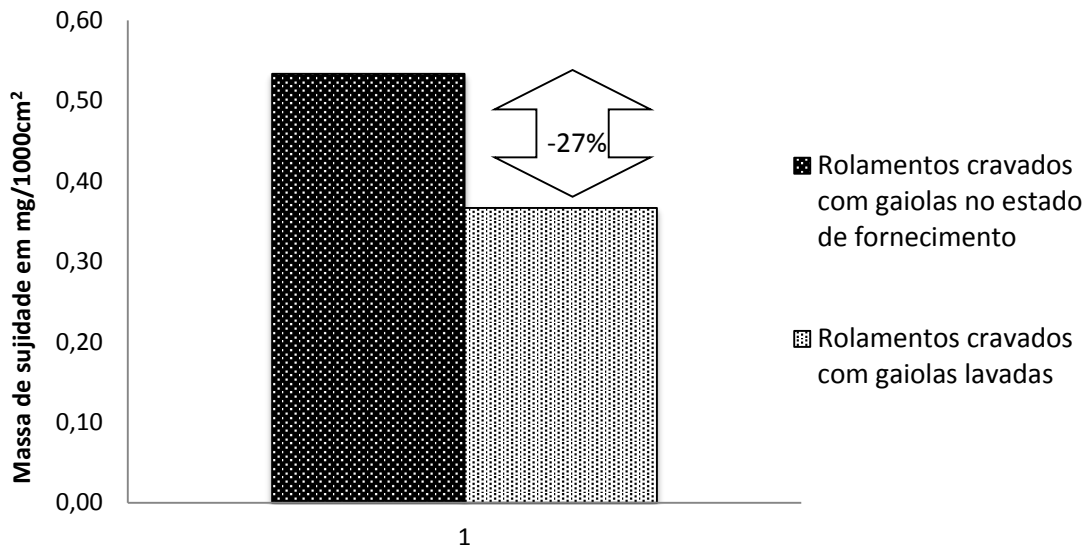


Figura 58 - Massa de sujidade por 1000cm<sup>2</sup> de rolamentos cravados com gaiolas lavadas e no estado de fornecimento recolhidos após o módulo de cravação.

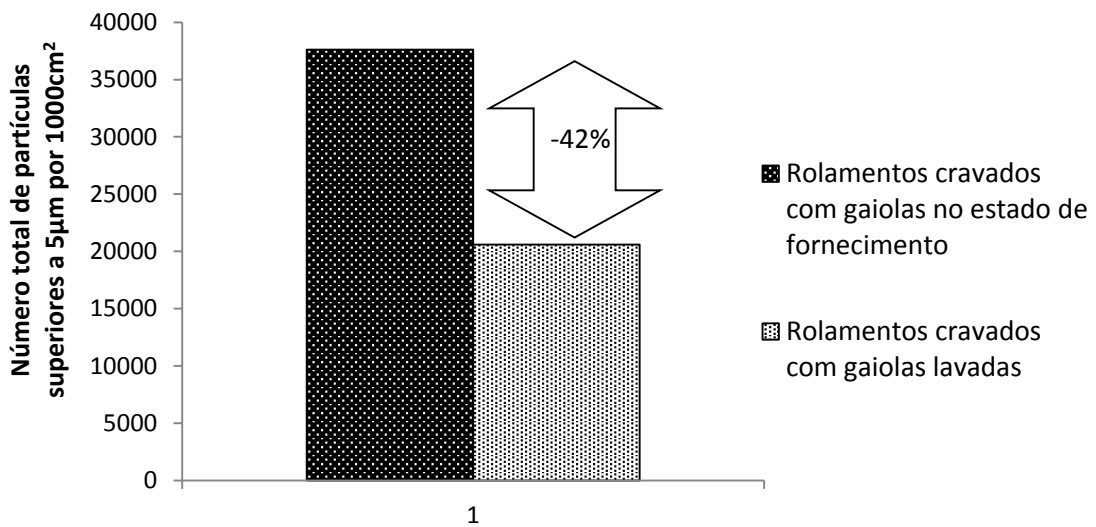


Figura 59 - Número de partículas por 1000cm<sup>2</sup> de rolamentos cravados com gaiolas lavadas e no estado de fornecimento recolhidos após o módulo de cravação.

Na Figura 60 e Figura 61 podemos observar em termos comparativos a quantidade de sujidade dos rolamentos com gaiolas lavadas e não lavadas após a 5ª lavagem. Na Figura 60 os resultados mostrados são expressos em termos de massa de sujidade e na Figura 61 em termos de total de partículas superiores a 5 micrómetros.

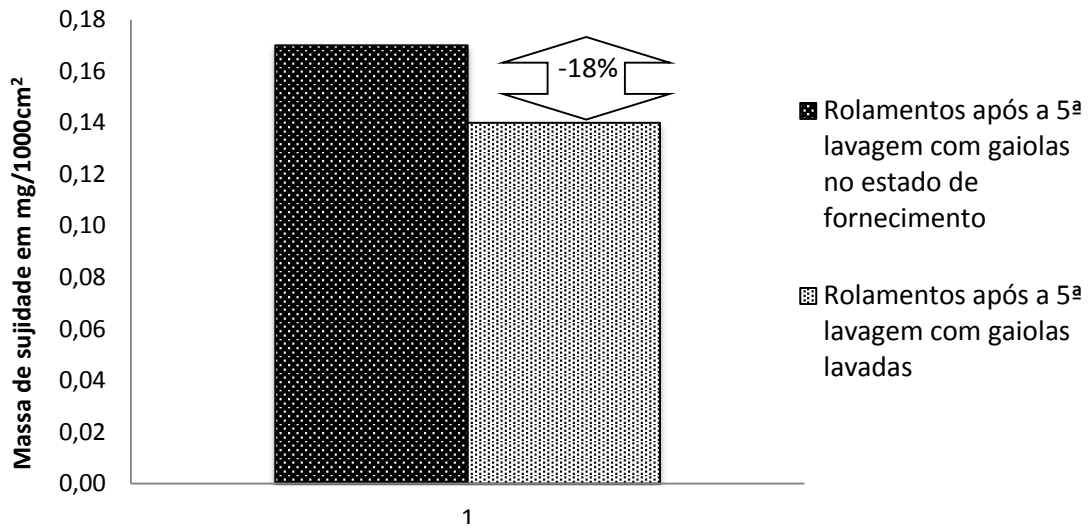


Figura 60 - Massa de sujidade por 1000cm² de rolamentos cravados com gaiolas lavadas e no estado de fornecimento recolhidos após a 5ª lavagem.

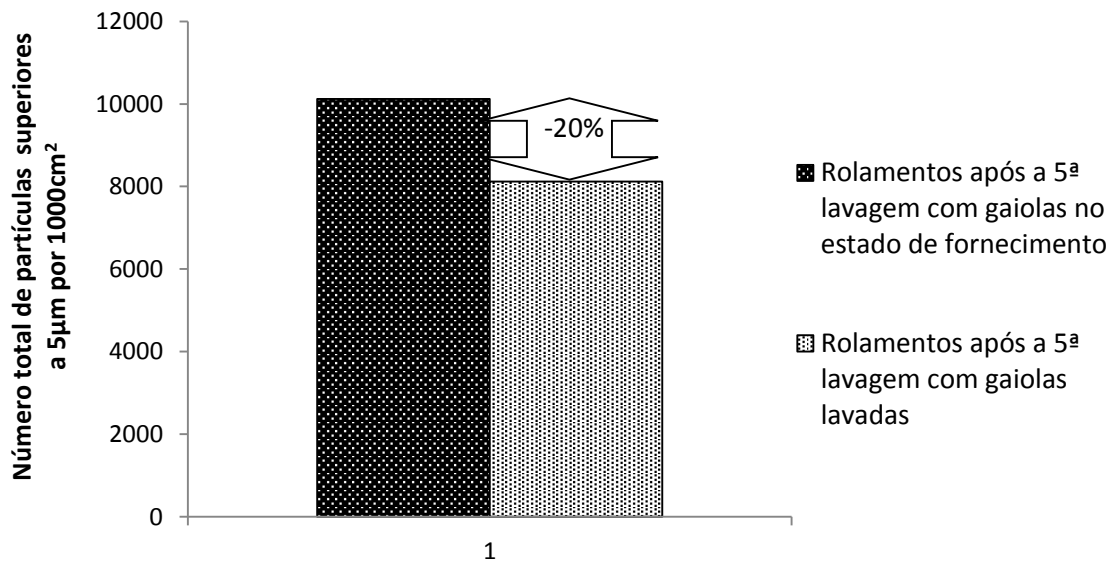


Figura 61 - Número de partículas por 1000cm² de rolamentos cravados com gaiolas lavadas e no estado de fornecimento recolhidos após a 5ª lavagem.

## 5.3-Discussão de resultados da melhoria

---

Nos resultados obtidos na avaliação da sujidade das gaiolas lavadas e no estado de fornecimento (Figura 56 e Figura 57) observa-se também um comportamento similar entre os dois tipos de resultados (gravimetria e número de partículas). A lavagem das gaiolas permitiu, em termos de gravimetria, uma redução da sujidade de 86% nas gaiolas com rebite e de 76% nas gaiolas sem rebite. Em termos de número de partículas uma redução de 96% nas gaiolas com rebite e 92% nas gaiolas sem rebite.

À parte da boa capacidade de redução de sujidade que esta lavagem adicional permitiu, estes testes mostraram que o estado de fornecimento das gaiolas está longe do ideal já que o volume da sujidade é muito superior ao dos rolamentos em qualquer ponto da linha de montagem. Justificando parte do aumento da sujidade dos rolamentos após a cravação das gaiolas.

Com o ensaio no módulo da cravação com gaiolas lavadas e não lavadas (Figura 58 e Figura 59) obtivemos uma redução de sujidade de cerca de 27% em termos de gravimetria e 42% em número de partículas. Extrapolando estes resultados e comparando-os com os da avaliação da sujidade ao longo da linha de montagem apercebemos que esta redução não compensa a totalidade da sujidade que é incrementada no módulo da cravação. Ou seja a percentagem da sujidade que não é reduzida com esta lavagem é a referente a sujidade gerada pelo próprio processo de cravação.

Na avaliação da sujidade após a 5ª lavagem utilizando gaiolas lavadas e no estado de fornecimento (Figura 60 e Figura 61) observamos uma redução de sujidade de cerca de 18% em termos de gravimetria e 20% em número de partículas. Ou seja com esta etapa de lavagem adicional conseguimos melhoria do estado de limpeza final do rolamento 6202 de cerca de 18-20%.

Com a obtenção destes resultados e tendo em conta a importância da limpeza de rolamentos e a necessidade de a melhorar, a empresa alterou o normal fluxo de montagem passando a incorporar nas suas etapas esta lavagem adicional de gaiolas.



## 6-Conclusão

---

Com a realização deste trabalho foi possível entender a importância do tema limpeza na indústria de rolamentos e as consequências da contaminação de partículas nos rolamentos. Foi ainda possível conhecer de forma aprofundada os métodos de avaliar a sujidade, testes de limpeza, tendo sido realizados no total 54 testes de limpeza.

Com a investigação realizada no processo de montagem dos rolamentos 6202 foram retiradas várias ilações sobre o comportamento da sujidade das diferentes etapas da montagem. Ficou demonstrado que a cravação das gaiolas faz com que exista um incremento de partículas no rolamento. Foi possível identificar que as gaiolas no seu estado de fornecimento introduzem sujidade no processo, e com esta conclusão avançou-se com um ensaio de uma lavagem adicional das gaiolas. Com a adição deste procedimento foi possível conseguir uma redução de sujidade após a cravação e no rolamento final.

Em termos de tecnologia de lavagem este trabalho possibilitou mostrar que a tecnologia de ultrassons permite lavagens mais eficientes que a utilização de bocais, pese embora que para caso de rolamento montado apenas esta utilização de bocais de limpeza é possível utilizar.



# Bibliografia

---

- ASM International. *ASM Handbook - Volume 5 Surface engineering*. USA: ASM, 1994.
- Brändlei, Johannes, e Paul Eschmann. *Ball and Roller Bearings: Theory, Design and Application*. Wiley, 1999.
- Campus. *CAMPUS® Datasheet | ALCOM® PP*. 2015.  
<http://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/ALCOM%C2%AE+PP+6202+SV1246-04MCO+Silver/ALBIS+Plastic/5/458ff887/SI?pos=4> (acedido em 15 de 5 de 2015).
- CAMPUS® Datasheet | ALTECH PA66 B 2025/106 GF25*. 2015.  
<http://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/ALTECH+PA66+B+2025106+GF25/ALBIS+Plastic+GmbH/5/280acf97> (acedido em 15 de 5 de 2015).
- Cleaning Times. “Spray Nozzles Play Critical Role in Aqueous, Solvent Cleaning Machines.” *MetalFinishing*, 2009.
- Crocker, Malcolm J. *Handbook of noise and vibration control*. New Jersey: Wiley, 2007.
- Durkee, John B. *Management of Industrial Cleaning Technology and Process*. Elsevier, 2006.
- ECJ. *Water - a most powerful detergent?* 15 de 10 de 2010.  
<http://www.europeancleaningjournal.com/magazine/articles/latest-news/water-a-most-powerful-detergent> (acedido em 10 de 06 de 2015).
- Ecplaza. 2000. <http://abrasivesindia.en.ecplaza.net/> (acedido em 15 de 10 de 2014).
- European Steel and Alloy Grades. *DC03 ( 1.0347 )*. 2011.  
[http://www.steelnumber.com/en/steel\\_composition\\_eu.php?name\\_id=200](http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=200) (acedido em 14 de 5 de 2015).
- FAG TI. *FAG Rolling Bearing Cages*. TI Nr. WL 95-4 E, Germany: FAG, 2000.
- FAG TI. *FAG Rolling Bearings - Fundamentals*. TI No. WL 43-1190 EA, Germany: FAG, 1999.
- Gommel, Udo. “Clean Production – challenges for producers and their supply chains.” *Symposium - Clean Production - Competence Region.*, 2013.
- Guild of Cleaners and Launderers. “INTRODUCTION TO DETERGENCY.” *Technical Bulletin*, 2014.
- Hydac. “Technical clealiness.” *Hydac International*, 2012.

International standard ISO. *ISO 16232-10*. ISO, 2007.

Junker. *JUPITER - Centerless cylindrical grinding*. 2014. <http://www.junker-group.com/grinding/loesungen/schleifmaschinen/jupiter.php> (acedido em 8 de 10 de 2014).

Kanegsberg, Barbara. *Handbook for Critical Cleaning*. CRC, 2001.

Kohli, Rajiv. *Developments in Surface contamination and cleaning*. Oxford - UK: Elsevier, 2010.

Luoyang bearing science. *S09 series bearing vibration measuring instrument Performance*. 2010. <http://www.zysbearing.com/finished-bearing-measuring-instruments/vibration-measurement.html> (acedido em 15 de 10 de 2014).

Miller, Helmut. "Noise characteristics of rolling bearings greases." *Lubrication engineering*, 2000.

Minebea. *NMB - What is a Ball Bearing?* 2011. <http://www.nmbtc.com/bearings/white-papers/what-is-a-ball-bearing-part2/> (acedido em 15 de 10 de 2014).

Momono, Tatsunobu, e Banda Noda. "Sound and Vibration in rolling bearings." *Motion & Control No. 6 - NSK*, 1999.

NSK Control. *NSK Develops Extra Quality Tough Ball Bearings for Transmissions*. 24 de 11 de 2011. <http://www.nsk.com/company/presslounge/news/2011/press111124.html> (acedido em 13 de 11 de 2014).

Quality management in automotive industry. *Inspection of technical cleanliness*. Verband der automobilindustrie VDA, 2010.

Radiac. *Double Disc Grinding for Spherical and Cylindrical Rollers*. 2014. <http://radiac.com/products/double-disc-grinding/> (acedido em 9 de 10 de 2014).

Schaeffler Group. *Baixo Atrito*. 2008. <http://www.fag-generationc.info/pt/geracao-c/vantagens-do-produto/baixo-atrito/> (acedido em 3 de 10 de 2014).

*Baixo nível de ruído*. 2008. <http://www.fag-generationc.info/pt/geracao-c/vantagens-do-produto/baixo-nivel-de-ruido/> (acedido em 3 de 10 de 2014).

*Geração C*. 2008. <http://www.fag-generationc.info/pt/geracao-c/> (acedido em 28 de 10 de 2014).

*Poeira jamais*. 2008. <http://www.fag-generationc.info/pt/geracao-c/vantagens-do-produto/poeira-jamais/> (acedido em 3 de 10 de 2014).

*Rolling Bearing Damage*. Germany: Schaeffler, 2001.

- Schaeffler KG. *Improvements in bearing life* . Technical information, Germany: Schaeffler, 2009.
- Schaeffler KG. *Reason for Vibrations of Bearings*. Technical information, Germany: Schaeffler, 2008.
- SKF. *Bearing Basic*. Technical report, San Diego: @ptitudeXchange, 2004.
- Damage mechanisms of indentations in raceways of rolling bearings*. 17 de 09 de 2012. <http://evolution.skf.com/damage-mechanisms-of-indentations-in-raceways-of-rolling-bearings/> (acedido em 14 de 11 de 2014).
- Longer life and lower energy use with SKF Sealed Energy Efficient deep groove ball bearings*. 1 de 10 de 2014. <http://evolution.skf.com/longer-life-and-lower-energy-use-with-skf-sealed-energy-efficient-deep-groove-ball-bearings/> (acedido em 3 de 11 de 2014).
- Steel Grades. *Steel Grades - 100Cr6* . 2011. <http://www.steel-grades.com/Steel-grades/Tool-steel/100cr6.html> (acedido em 15 de 5 de 2015).
- VWR. *Ultrasound cleaning baths*. 10 de 10 de 2012. [https://si.vwr.com/store/catalog/product.jsp?catalog\\_number=142-0100](https://si.vwr.com/store/catalog/product.jsp?catalog_number=142-0100) (acedido em 14 de 06 de 2015).
- Zuleeg, Jan. *Understanding the generation of grease noise in ball bearings*. München: Klüber Lubrication, 2014.



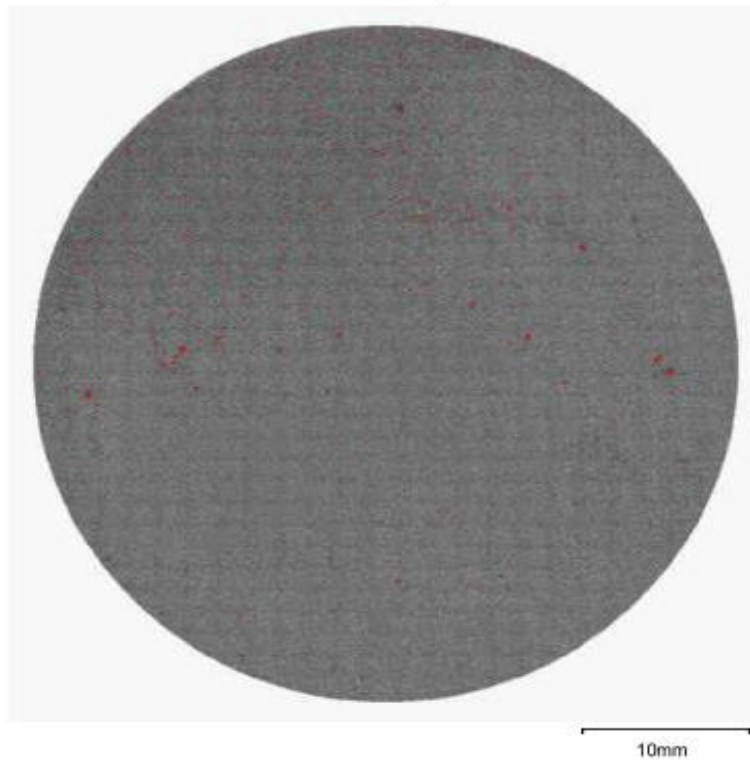
# Anexos

Laboratório Químico .....

	<b>Residue Analysis - Filter Inspection</b> Cleanliness test of Ball Bearing ( Following S252012-1 )	ISO 16232-10 (Ac)
--	---	-------------------

<b>Sample:</b> Rolamento radial	<b>Line :</b> XX
---------------------------------	------------------

Particle Map



<b>Area of bearing (cm2):</b> 139	<b>Nr of Bearings for 1000cm2:</b> 8
	<b>Contaminant mass mg/1000cm2 :</b> 1,6

<b>Operator:</b> Adérito Fernandes	<b>Equipment:</b> Olympus BX51M
<b>Washing fluid:</b> Exsol D220/240	<b>Method:</b> Ultrasonic method
<b>Flow-through area (mm2):</b> 1256,6	<b>Scanned area (mm2):</b> 1352,9

DOC-CQ-105/0802

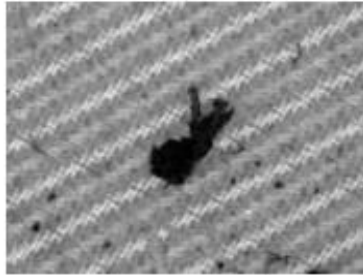
07-02-2013

1

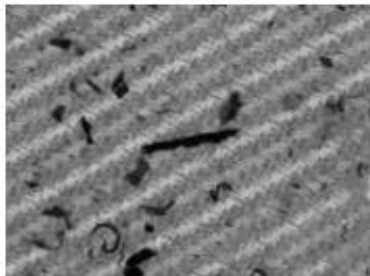
**Residue Analysis - Filter Inspection**  
Cleanliness test of Ball Bearing ( Following S252012-1 )

ISO 16232-10 (Ac)

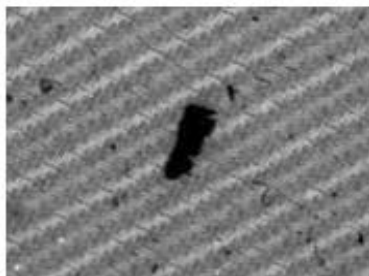
10 Biggest Particles



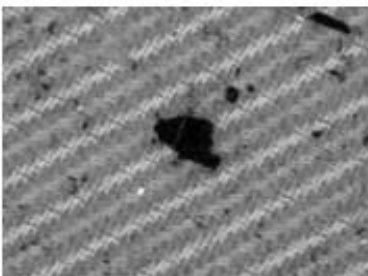
500µm



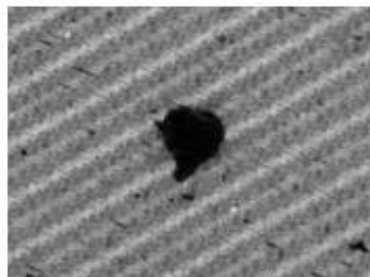
500µm



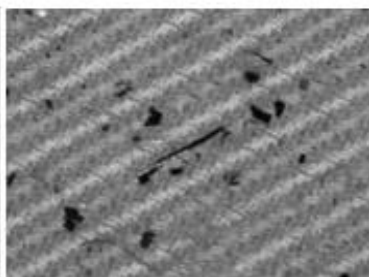
500µm



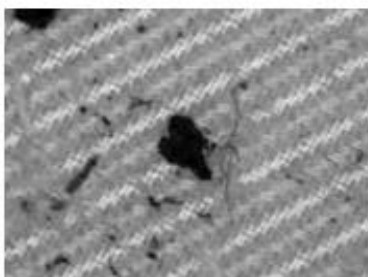
500µm



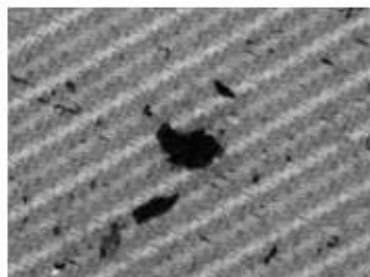
500µm



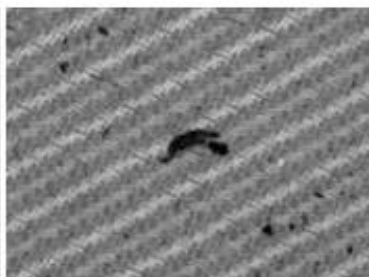
500µm



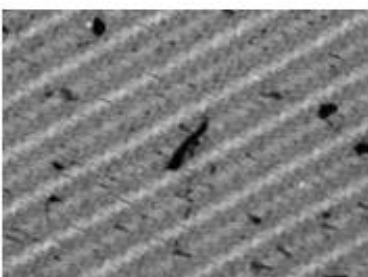
500µm



500µm



500µm

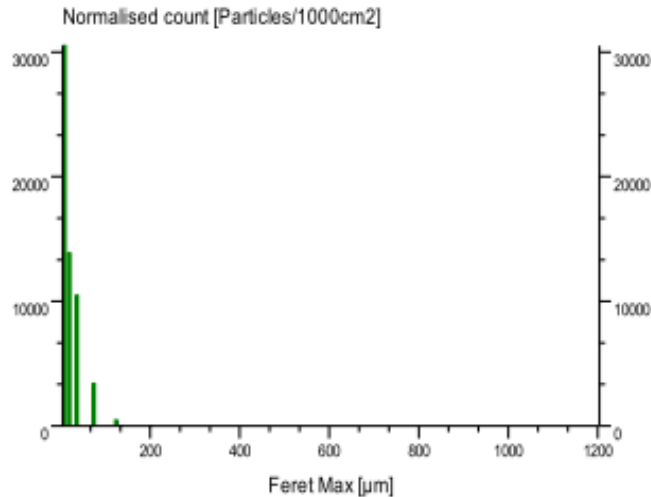


500µm

**Residue Analysis - Filter Inspection**  
 Cleanliness test of Ball Bearing ( Following S252012-1 )

ISO 16232-10 (Ac)

**Graphical Visualisation of the Cleanliness Code**  
 ISO 16232-10 (Ac)



**Particle Size Classes**

ISO 16232-10 (Ac)-C					
	Feret Max	Feret Max	Particle count	Normalised count	ISO 16232-10(Ac) code
	µm	µm	Particles	Particles/1000cm2	
1	5,00	15,00	33918,00	30501,80	B15
2	15,00	25,00	15402,00	13850,72	C14
3	25,00	50,00	11624,00	10453,24	D14
4	50,00	100,00	3729,00	3353,42	E12
5	100,00	150,00	503,00	452,34	F9
6	150,00	200,00	92,00	82,73	G7
7	200,00	400,00	34,00	30,58	H5
8	400,00	600,00	3,00	2,70	I2
9	600,00	1000,00	0,00	0,00	J<0
10	1000,00		0,00	0,00	K<0

**Parameters of the Biggest Particles**

Particle Results				
	Area	Feret Max	ECD	Perimeter
	µm²	µm	µm	µm
1	76781,57	521,75	312,67	1893,37
2	20987,63	483,78	163,47	1131,88
3	48518,50	408,70	248,55	1163,10
4	55700,76	396,70	266,31	1405,70
5	77913,16	396,13	314,96	1320,41
6	6303,61	383,37	89,59	796,18
7	52385,87	364,53	258,26	1178,31
8	46594,80	340,48	243,57	984,96
9	15462,82	316,67	140,31	821,93
10	14104,91	309,60	134,01	842,21