

Análise de falhas em rolamentos de aerogeradores

Carlo Giuseppe Filippin



Lactec



O Lactec é um dos maiores centros privados de pesquisa, tecnologia e inovação do Brasil.



Números expressivos



+ 60 anos
de atuação



+500
colaboradores



Unidades em Curitiba e
Salvador, com **cobertura**
nacional



Aproximadamente
400 projetos de **P&D**
realizados



Estrutura laboratorial com
35mil m² e amplo suporte
tecnológico



Mercados Principais



Energia



Indústria



Conectividade



**Meio
Ambiente**



**Mobilidade
Elétrica**

Ensaio e Análises
Laboratoriais

Serviços Tecnológicos

Pesquisa,
Desenvolvimento e
Inovação

A união de competências a uma ampla infraestrutura

As nossas **Unidades Tecnológicas** atuam em diversas áreas de análises laboratoriais, com diversas especialidades, e estrutura total de 34,5 mil m².

Possuímos ampla infraestrutura e suporte tecnológico para a realização de **pesquisas, ensaios, testes e análises laboratoriais qualificadas**, muitos deles acreditados pelo Inmetro.



Consultoria Especializada

Área Estratégicas



Ambiental



Geossoluções



Tecnologia da
Informação



Hidráulica



Sistemas
Elétricos



Serviços para
Obras de
Infraestrutura



Eletrônica



Estruturas Civas



Sistemas
Mecânicos



Materiais Poliméricos e
Corrosão



Laboratório de
Testes e Ensaios



Falha – perda da capacidade de realizar o serviço previsto em projeto

Origem:

1. Deficiências de projeto
2. Desvios de fabricação
3. Operação
4. Manutenção inadequada

Rolamento

Causas:

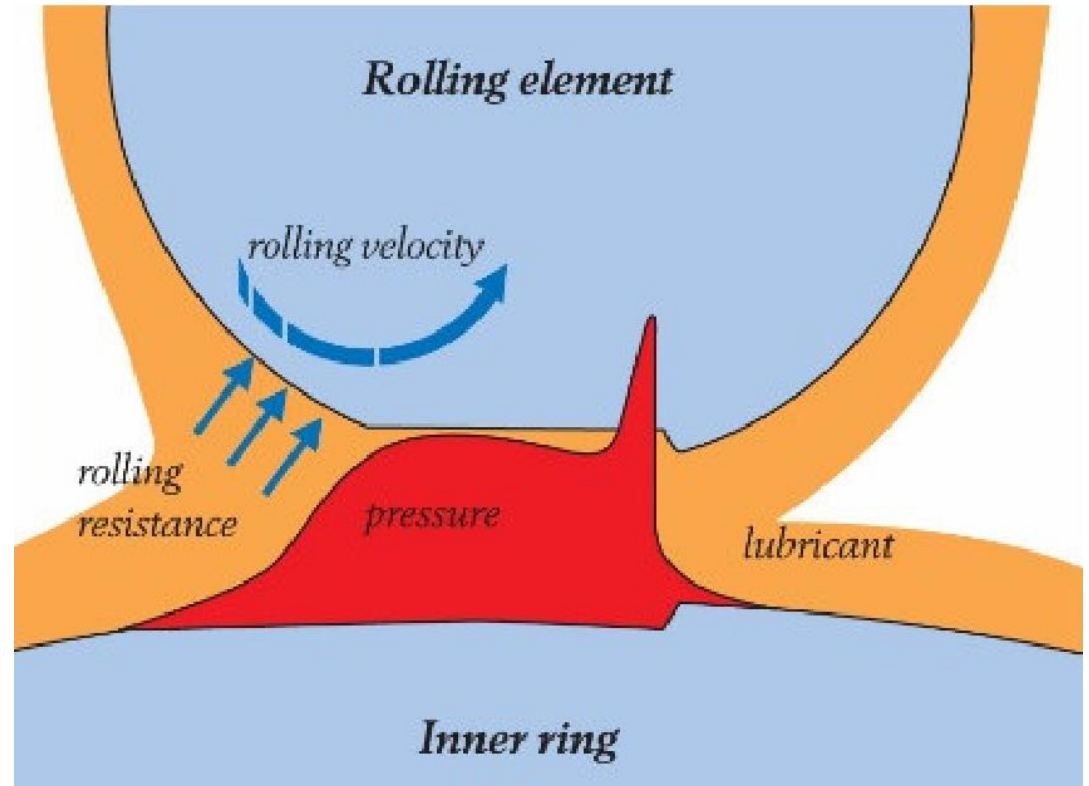
1. Seleção / especificação errada
2. Material / geometria
3. Cargas maiores que as de projeto
4. Lubrificação / vedação



Análise de Falha

Lubrificação elastohidrodinâmica

- Carga
- Material
- Lubrificação

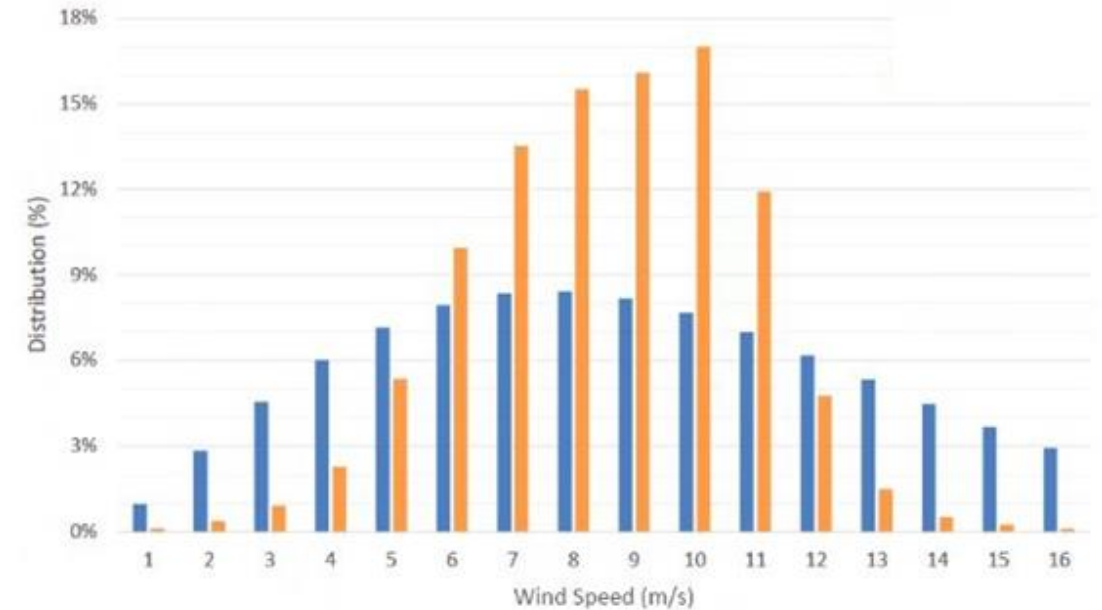
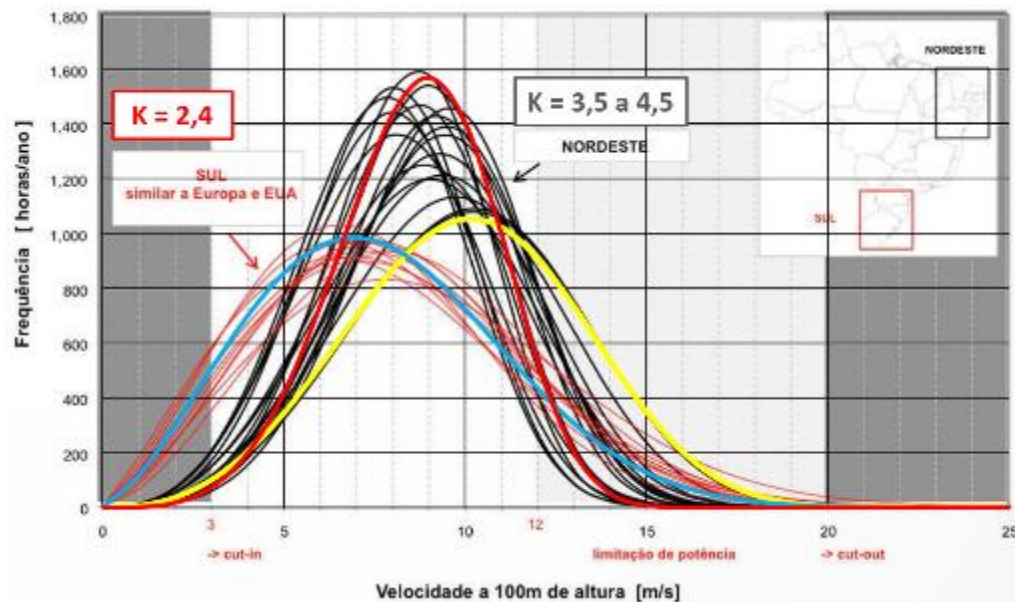


Vida finita



Análise de Falha

Ventos experimentados em algumas regiões do Brasil apresentam uma distribuição diferente dos normativos, apesar de possuírem média de velocidades abaixo da norma IEC 61400.



Essa variação na distribuição dos ventos faz com que o fator de potência para a região nordeste seja em geral maior que o apresentado pela região sul do país.



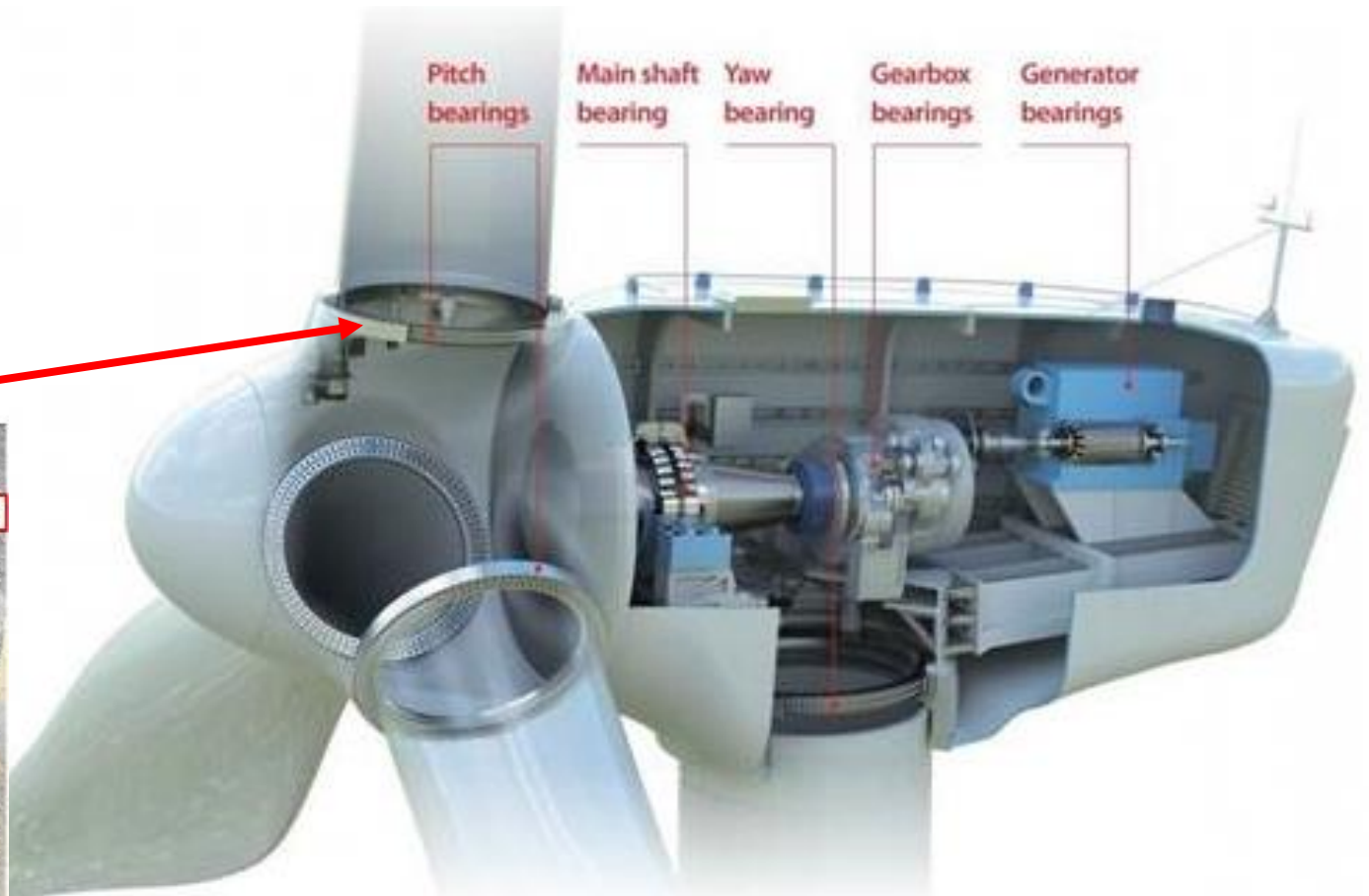
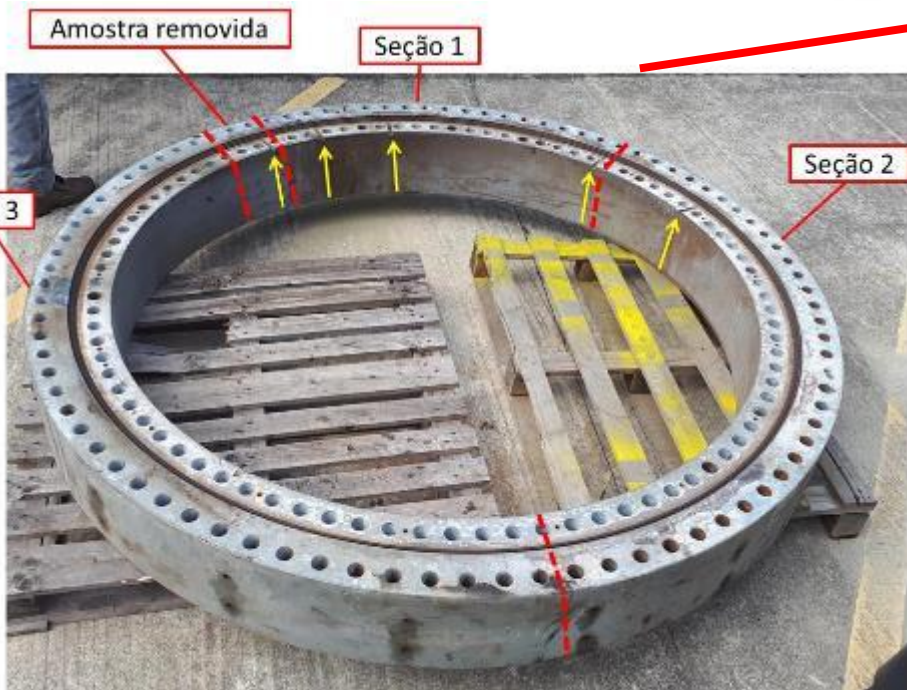
Análise de falha

Caso 01 - Rolamento de pitch



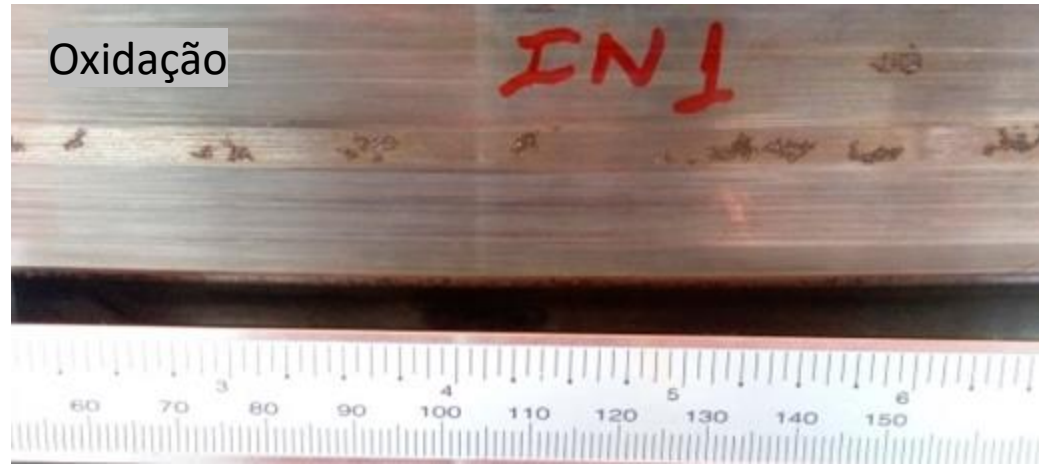
Rolamento de pitch

1. INSPEÇÃO VISUAL E MACROGRAFIA
2. ANÁLISE METALGRÁFICA
3. MEDIÇÃO DE DUREZA
4. COMPOSIÇÃO QUÍMICA
5. ANÁLISE DA GRAXA

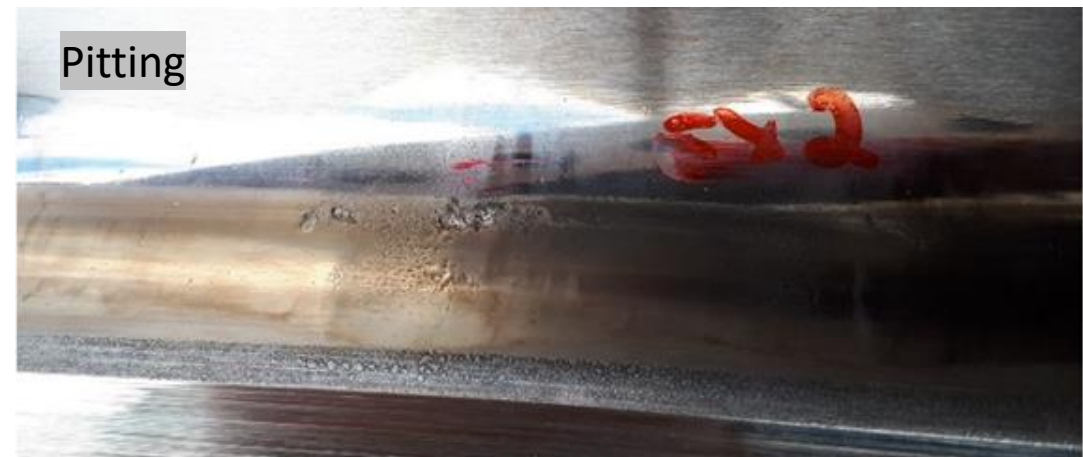


Rolamento de pitch

Inspeção visual e macrografia

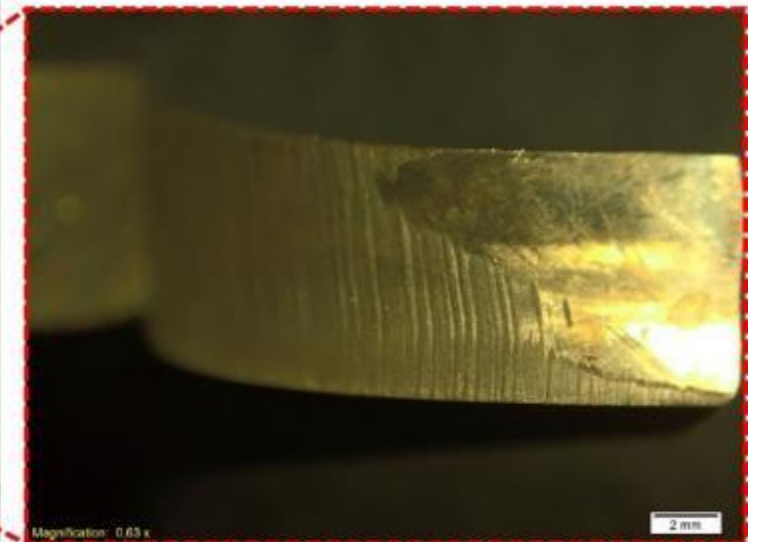
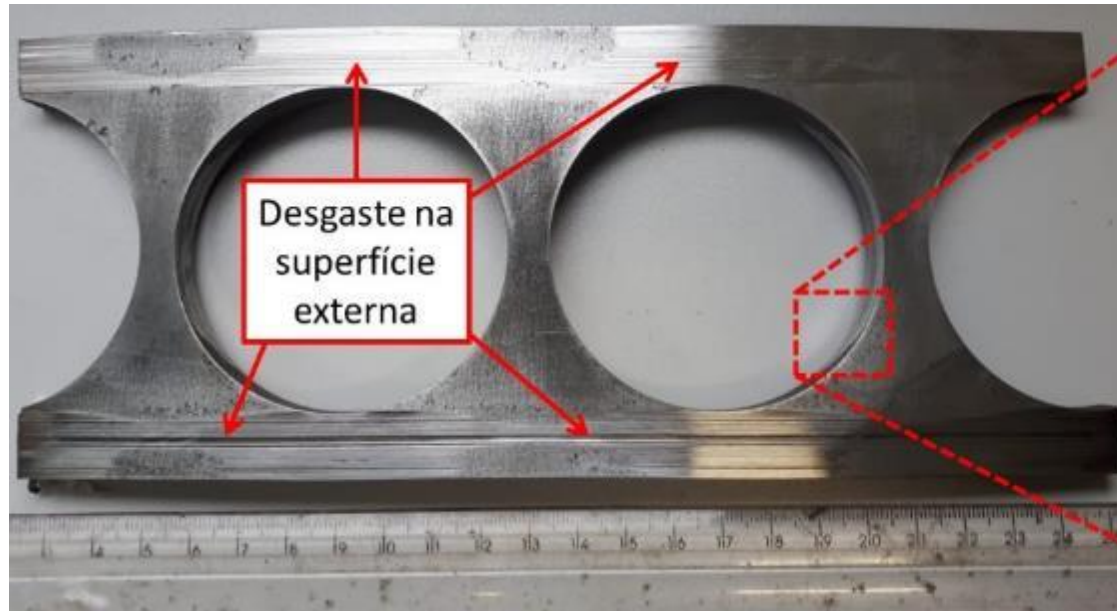
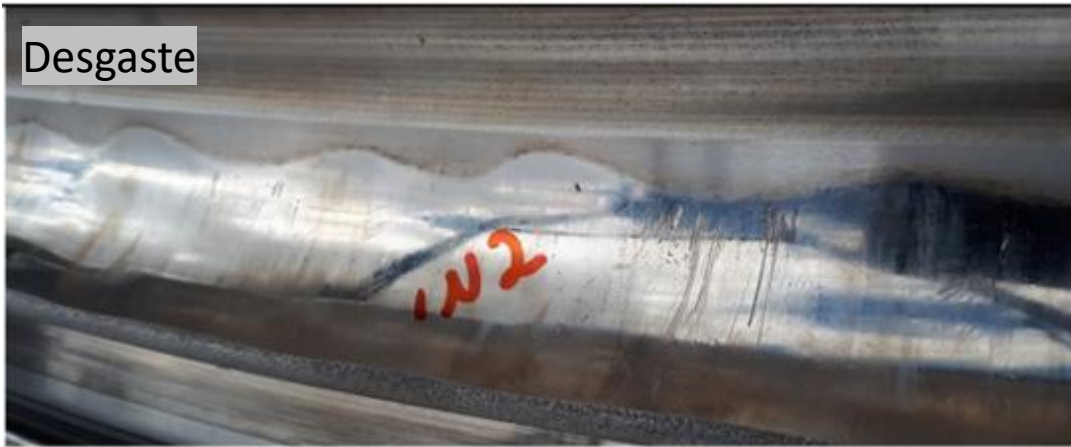


Presença de Pitting somente na seção 1, sugere a influência da carga decorrente de uma possível distribuição de carga de operação, devido a característica construtiva do sistema de posicionamento do pitch.



Rolamento de pitch

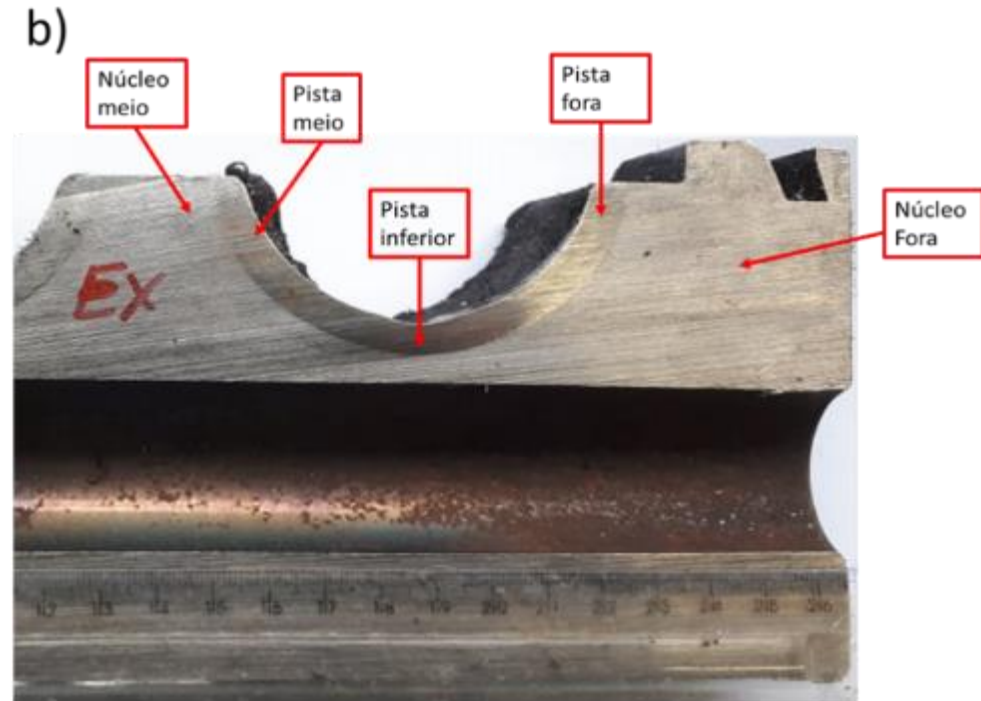
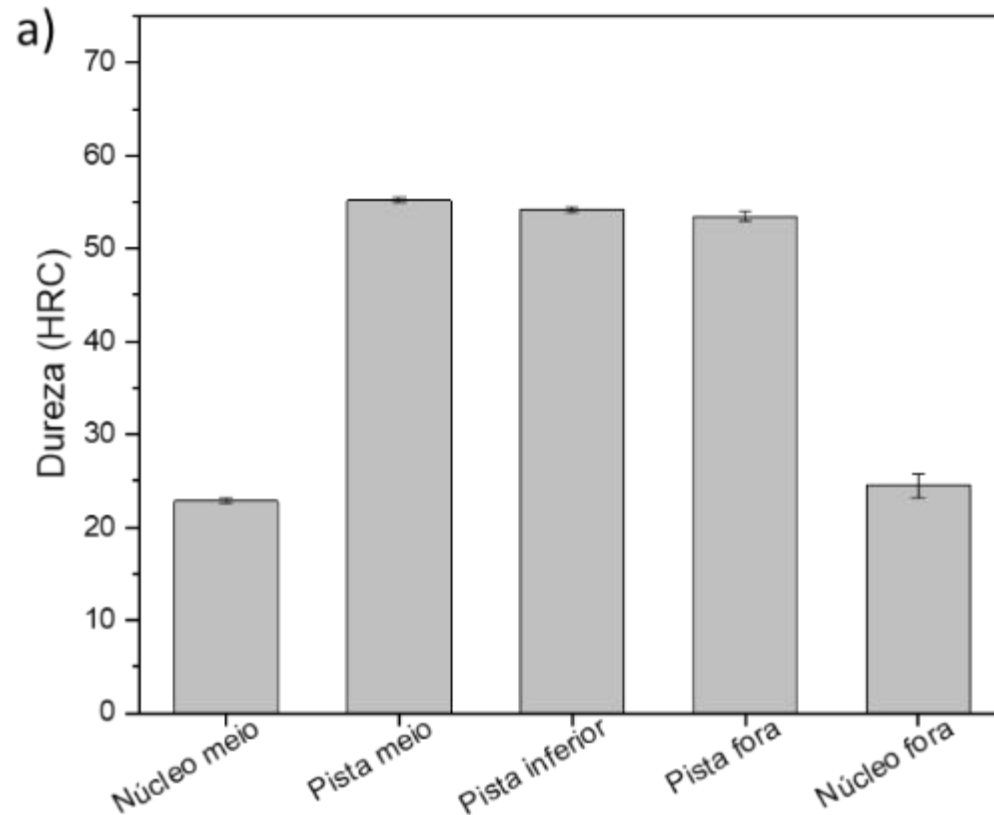
Inspeção visual e macrografia



Rolamento de pitch

Medições de dureza

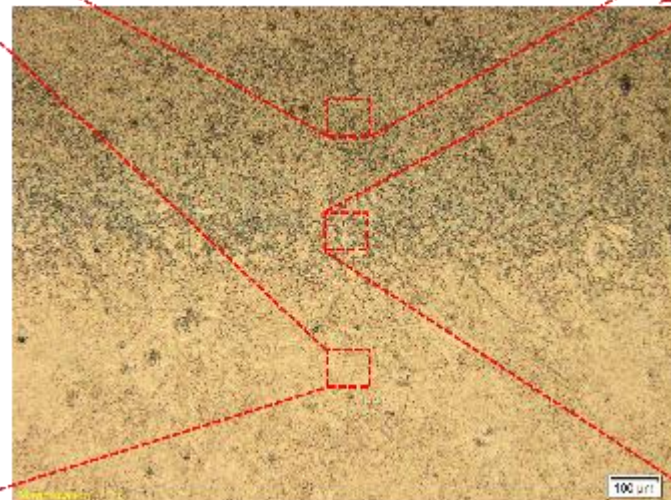
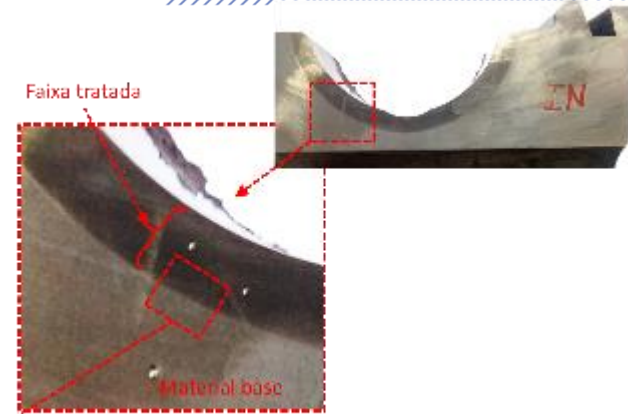
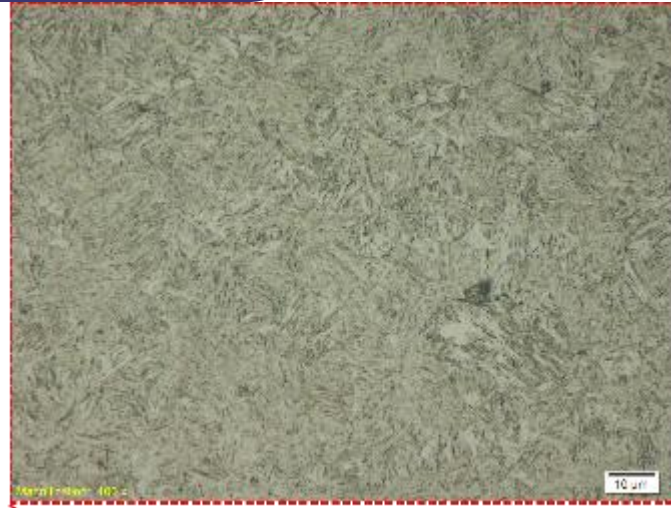
Resultados de Dureza Rockwell C da seção transversal do corpo do rolamento.
Em (a) gráfico com os valores de dureza e em (b) indicações dos pontos de medição.



Rolamento de pitch

Microscopia ótica

Microestruturas
martensíticas refinadas



Micrografia da seção transversal do anel interno em uma região próxima a uma das pistas.
Ataque com nital 5% e aumento de 1000x.



Rolamento de pitch

Análises de composição química

| Elemento | Anel Externo | Norma SAE J404 Material 4140 (ed. 2007) |
|-----------------|--------------|---|
| C (Carbono) | 0,393 | 0,38 – 0,43 |
| Si (Silício) | 0,200 | 0,15 – 0,35 |
| Mn (Manganês) | 0,779 | 0,75 – 1,00 |
| P (Fósforo) | 0,0062 | 0,030 _{máx} |
| S (Enxofre) | 0,015 | 0,040 _{máx} |
| Cr (Cromo) | 0,943 | 0,80 – 1,10 |
| Mo (Molibdênio) | 0,195 | 0,15 – 0,25 |
| Ni (Níquel) | 0,090 | 0,25 _{máx} |
| Cu (Cobre) | 0,108 | 0,35 _{máx} |

| Elemento | Gaiola | Norma ABNT NBR 6656 – Grau LNE 420 (ed. 2008) |
|---------------|--------|---|
| C (Carbono) | 0,096 | 0,12 _{máx} |
| Si (Silício) | 0,176 | 1,60 _{máx} |
| Mn (Manganês) | 1,534 | 0,35 _{máx} |
| P (Fósforo) | 0,013 | 0,025 _{máx} |
| S (Enxofre) | 0,0035 | 0,015 _{máx} |
| Al (Alumínio) | 0,038 | 0,015 _{mín} |
| Nb (Nióbio) | 0,021 | 0,09 _{máx} |
| V (Vanádio) | 0,0010 | 0,12 _{máx} |
| Ti (Titânio) | 0,0036 | 0,15 _{máx} |

| Elemento | Anel Interno | Norma SAE J404 Material 4140 (ed. 2007) |
|-----------------|--------------|---|
| C (Carbono) | 0,439 | 0,38 – 0,43 |
| Si (Silício) | 0,196 | 0,15 – 0,35 |
| Mn (Manganês) | 0,788 | 0,75 – 1,00 |
| P (Fósforo) | 0,0065 | 0,030 _{máx} |
| S (Enxofre) | 0,014 | 0,040 _{máx} |
| Cr (Cromo) | 0,977 | 0,80 – 1,10 |
| Mo (Molibdênio) | 0,209 | 0,15 – 0,25 |
| Ni (Níquel) | 0,142 | 0,25 _{máx} |
| Cu (Cobre) | 0,128 | 0,35 _{máx} |

| Elemento | Esfera | Norma WNr. 1.3520 DIN 100 CrMnSi 6-4 (ed. 2007) |
|---------------|--------|---|
| C (Carbono) | 1,022 | 0,93 – 1,05 |
| Si (Silício) | 0,505 | 0,45 – 0,75 |
| Mn (Manganês) | 1,035 | 1,00 – 1,20 |
| P (Fósforo) | 0,016 | 0,025 _{máx} |
| S (Enxofre) | 0,0060 | 0,015 _{máx} |
| Cr (Cromo) | 1,437 | 1,40 – 1,65 |
| Cu (Cobre) | 0,168 | 0,30 _{máx} |
| Al (Alumínio) | 0,025 | 0,050 _{máx} |



Rolamento de pitch

Análise da graxa

Quantificação dos elementos por meio da técnica de espectrometria de absorção atômica.

| METAL | GRAXA NOVA | GRAXA USADA |
|--------------------|------------|-------------|
| Prata (mg/kg) | <0,5 | <0,5 |
| Cromo (mg/kg) | <0,5 | 408,8 |
| Cobre (mg/kg) | <0,5 | 82,2 |
| Ferro (mg/kg) | 9,7 | 929,2 |
| Molibdênio (mg/kg) | 505,4 | 403,1 |
| Níquel (mg/kg) | <0,5 | 56,1 |
| Chumbo (mg/kg) | <1,0 | 9 |
| Estanho (mg/kg) | <5,0 | <5,0 |
| Titânio (mg/kg) | 30,3 | 44,1 |
| Alumínio (mg/kg) | <5,0 | <5,0 |
| Potássio (mg/kg) | 32,3 | 208,2 |
| Sódio (mg/kg) | 190,9 | 622,3 |
| Silício (mg/kg) | 521,7 | 176,4 |
| Cálcio (mg/kg) | 64,1 | 302,6 |
| Magnésio (mg/kg) | 6,4 | 127,6 |
| Zinco (mg/kg) | 40,2 | 131,5 |

| ÂNION | GRAXA NOVA | GRAXA USADA |
|------------------|------------|-------------|
| Fluoreto (mg/kg) | 1,9 | 50,8 |
| Cloreto (mg/kg) | <0,25 | 16,5 |
| Nitrito (mg/kg) | <0,5 | <0,5 |
| Brometo (mg/kg) | <0,5 | <0,5 |
| Nitrato (mg/kg) | <1,0 | <1,0 |
| Fosfato (mg/kg) | 754,9 | 1062,6 |
| Sulfato (mg/kg) | 3646,1 | 4166,3 |



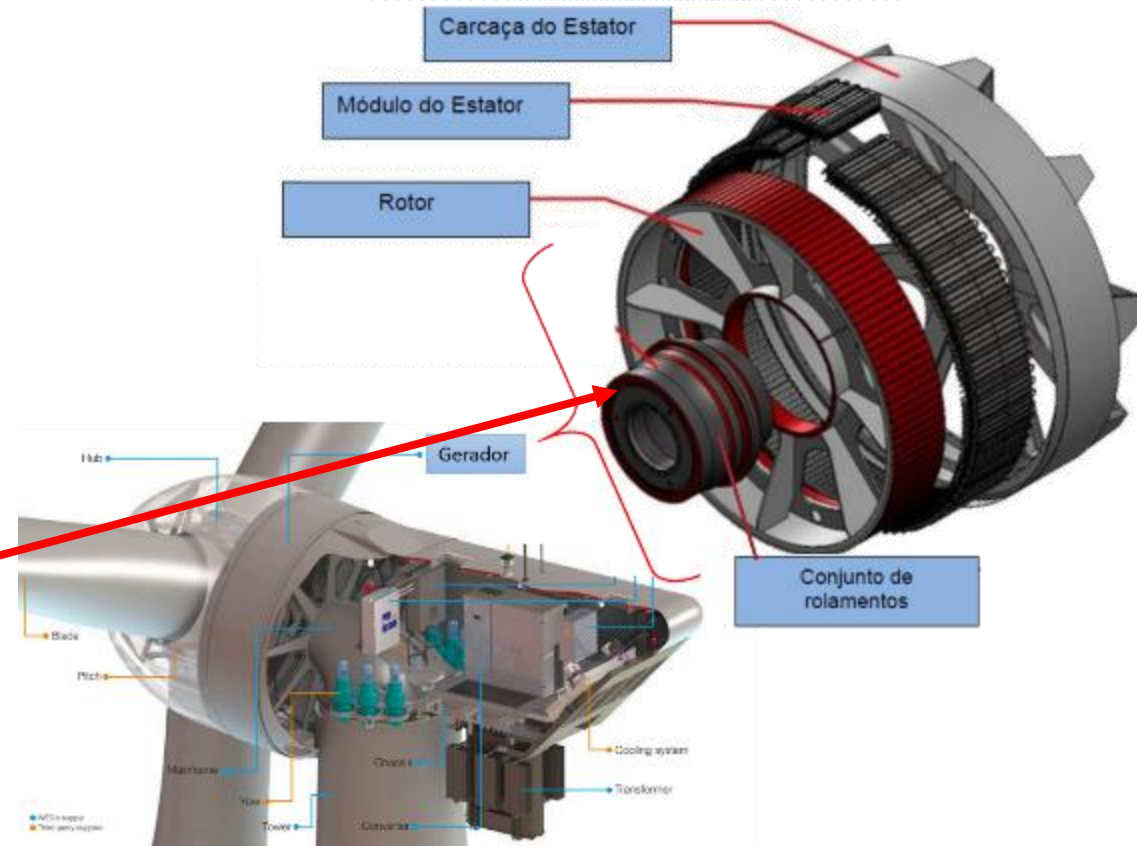
Análise de falha

Caso 02 - Rolamentos do Spindle



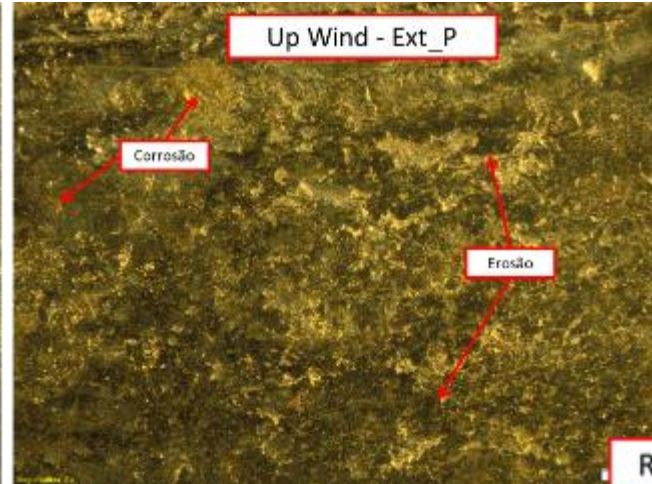
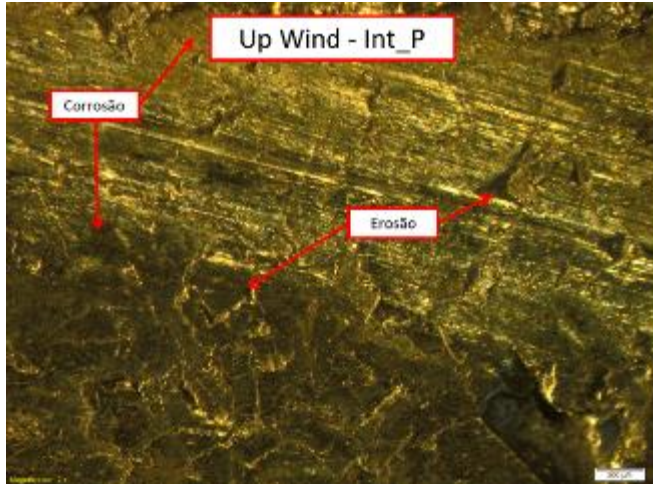
Rolamentos do Spindle

- Rolamento Up Wind
- Rolamento Down Wind



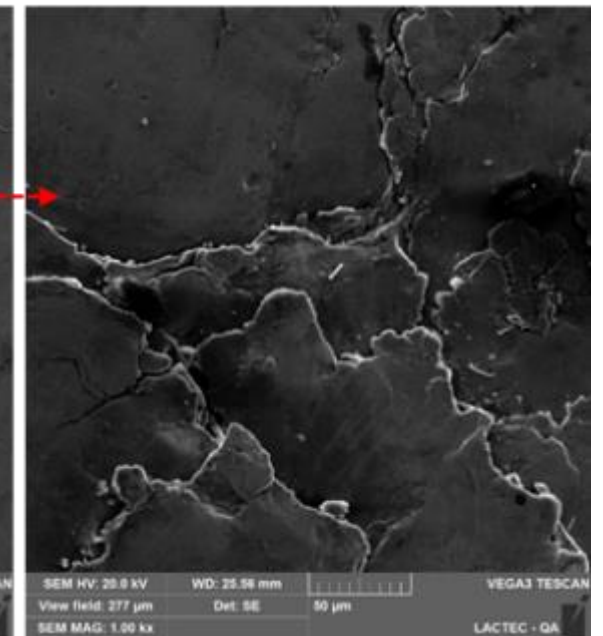
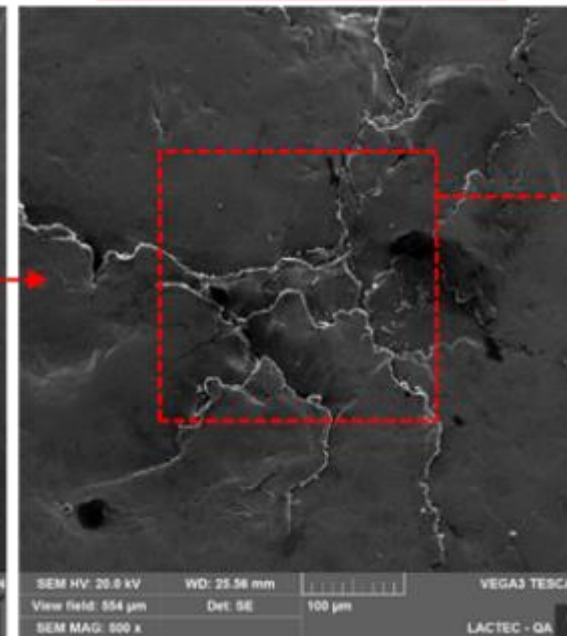
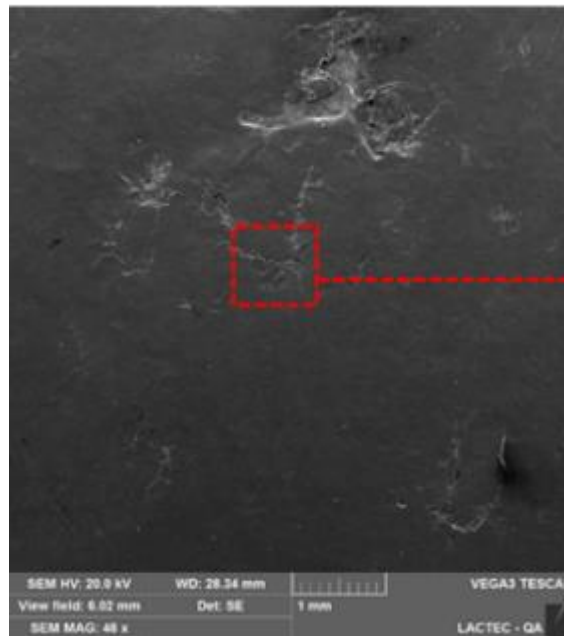
Rolamentos do Spindle

INSPEÇÃO VISUAL E IMAGENS DE MEV



Escamamento gerado por trincas superficiais de fadiga. Após a nucleação de trincas na superfície, com a sua evolução logo se tornam paralelas a pista de rolagem, se propagando até gerar um lascamento, resultando e uma perda de material.

Rolete pequeno (Upwind)



Macrografia das superfícies das pistas do rolamento de Up Wind (Pequeno). Ampliação 2x.



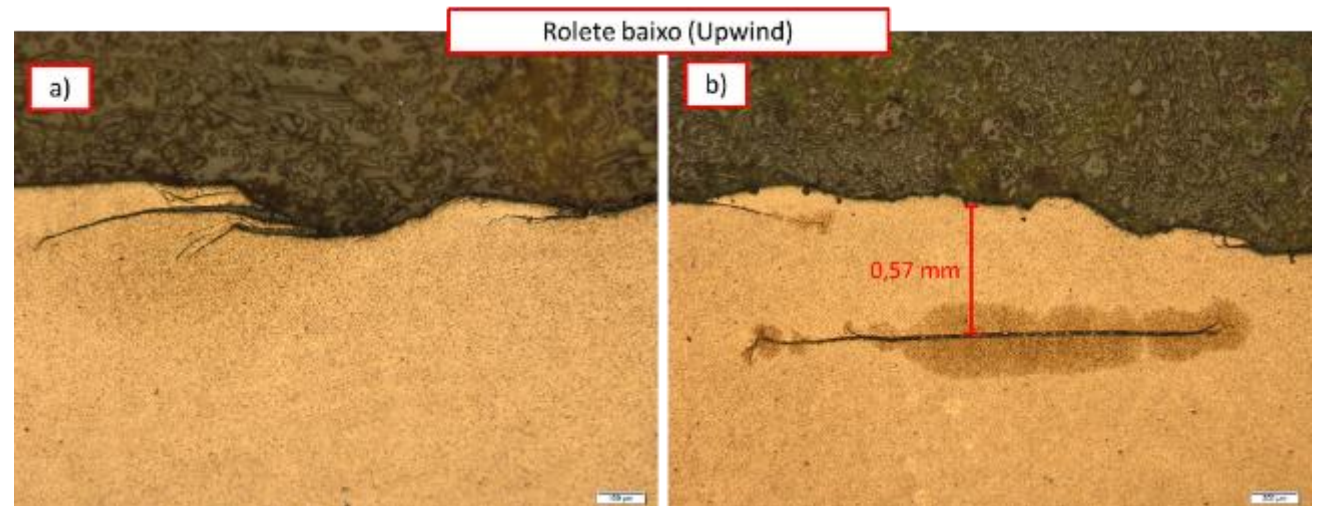
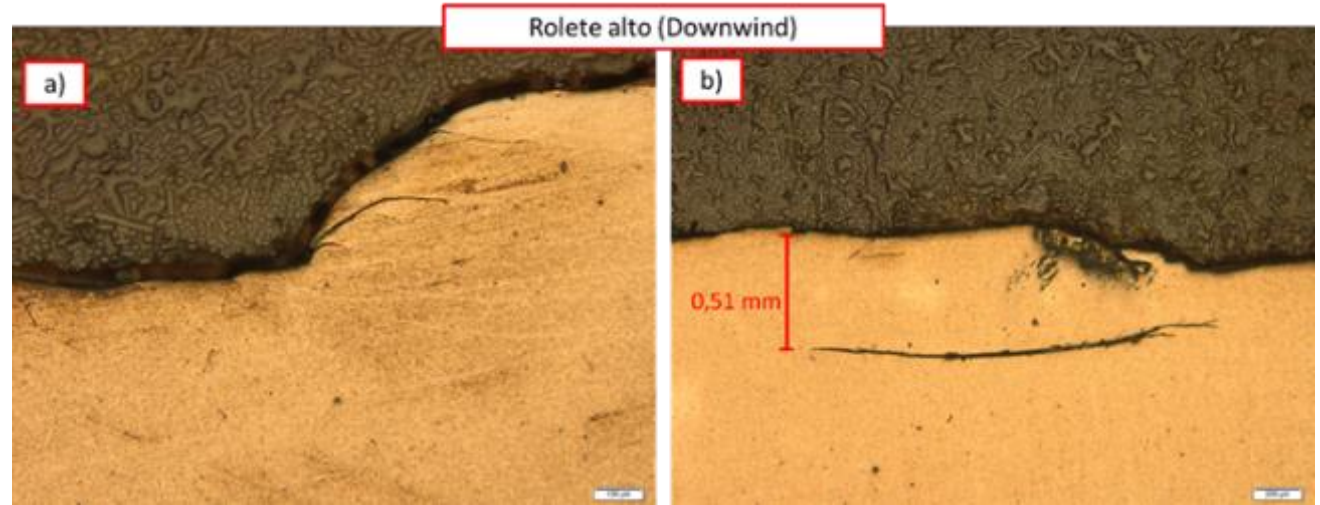
Rolamentos do Spindle

ANÁLISE METALOGRÁFICA

Seção transversal da superfície dos roletes de Downwind e Upwind.

Em (a) superfície com erosão e trinca superficial.

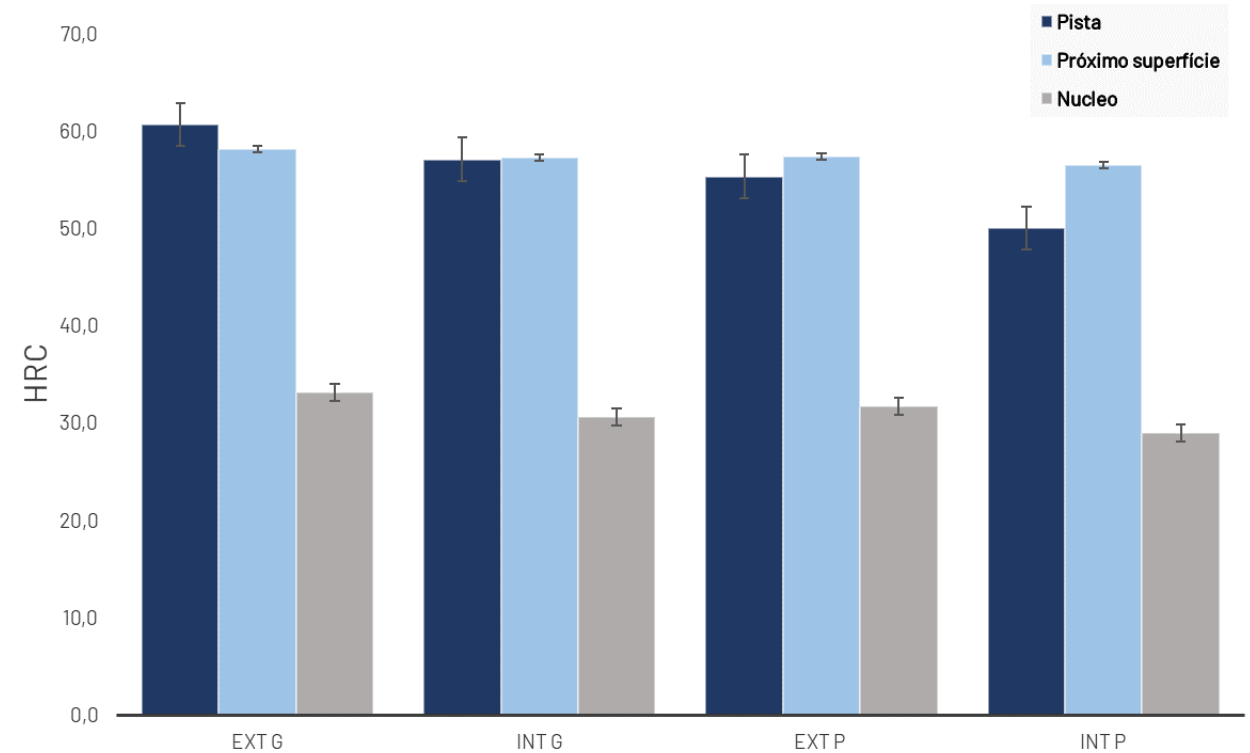
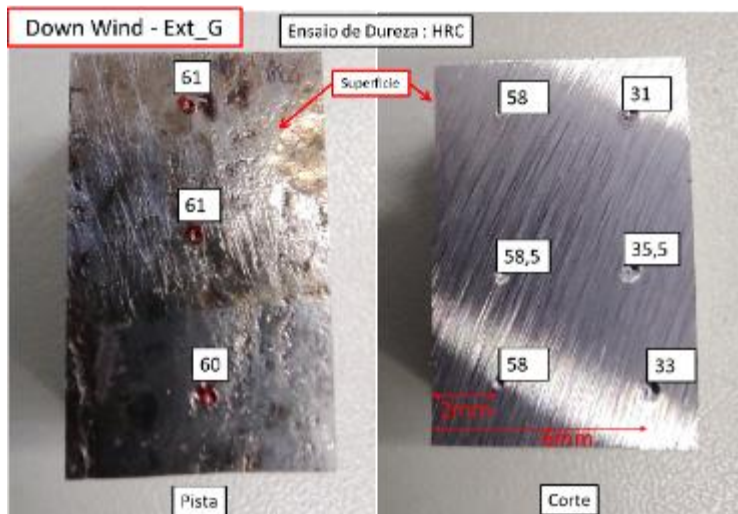
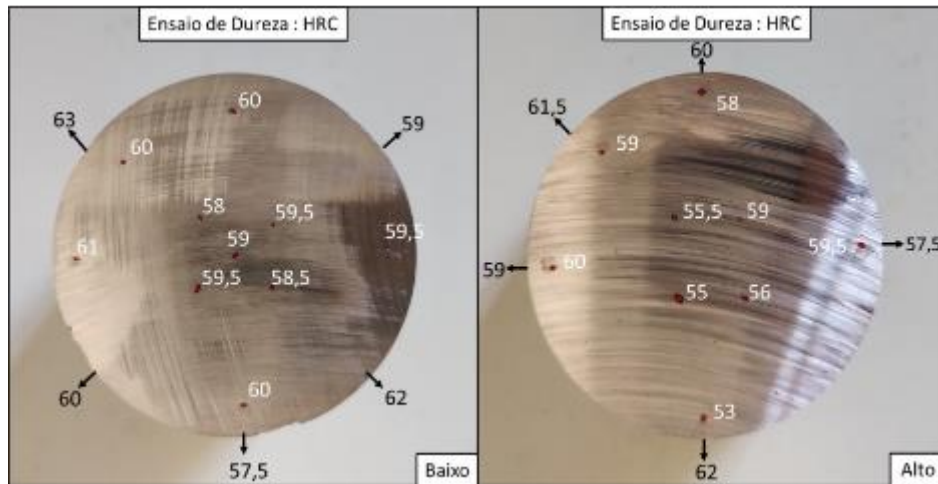
Em (b) trinca subsuperficial.



Rolamentos do Spindle

Medições de Dureza

Dureza HRC dos anéis dos rolamentos e dureza Rockwell C nas amostras dos roletes e do rolamento de Down Wind



Rolamentos do Spindle

Composição Química

| Elemento | | Anel Ext G | Anel Int G | Norma GB/YB/JB T3077 ISC A43122 Material 12Cr2Ni4 (ed. 2007) |
|----------|--------------|------------|------------|--|
| C | (Carbono) | 0,118 | 0,106 | 0,10-0,16 |
| Si | (Silício) | 0,299 | 0,28 | 0,17-0,37 |
| Mn | (Manganês) | 0,337 | 0,32 | 0,30-0,60 |
| P | (Fósforo) | 0,01 | 0,01 | 0,035máx. |
| S | (Enxofre) | 0,01 | 0,0085 | 0,035máx. |
| Cr | (Cromo) | 1,372 | 1,337 | 1,25-1,65 |
| Mo | (Molibdênio) | 0,103 | 0,098 | 0,15máx. |
| Ni | (Níquel) | 3,269 | 3,158 | 3,25-3,65 |
| Cu | (Cobre) | 0,177 | 0,164 | 0,30máx |

| Elemento | | Rolete Alto Down Wind | Rolete Baixo Up Wind | Norma DIN WNr. 1.3519 Material 100CrMnSi6-6 (ed. 2007) |
|----------|--------------|--------------------------|-------------------------|--|
| C | (Carbono) | 0,908 | 0,886 | 0,93-1,05 |
| Si | (Silício) | 0,602 | 0,659 | 0,45-0,75 |
| Mn | (Manganês) | 1,515 | 1,525 | 1,40-1,70 |
| P | (Fósforo) | 0,014 | 0,014 | 0,025máx. |
| S | (Enxofre) | 0,0081 | 0,0074 | 0,015máx. |
| Cr | (Cromo) | 1,427 | 1,416 | 1,40-1,65 |
| Mo | (Molibdênio) | 0,091 | 0,073 | 0,10máx. |
| Ni | (Níquel) | 0,228 | 0,16 | Não |
| Cu | (Cobre) | 0,184 | 0,163 | 0,30máx. |
| Al | (Alumínio) | 0,013 | 0,02 | 0,050máx. |

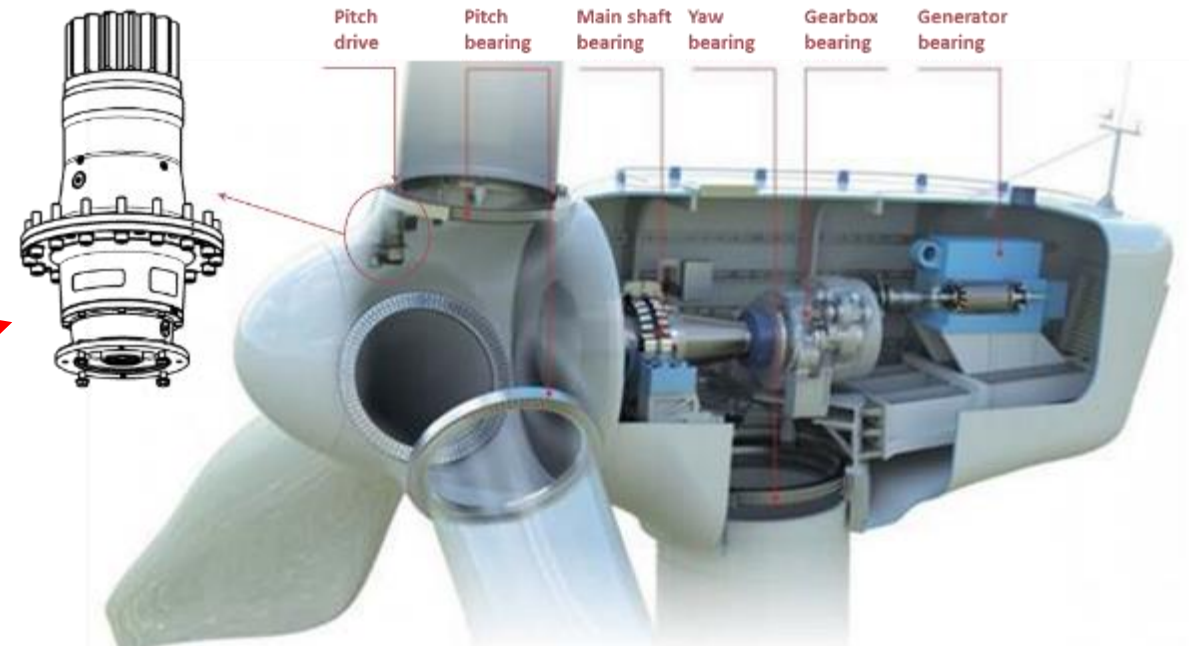


Análise de falha

Caso 03 – Motorreductor do pitch

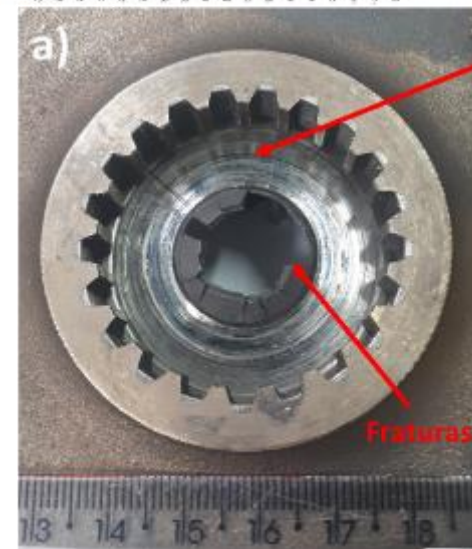
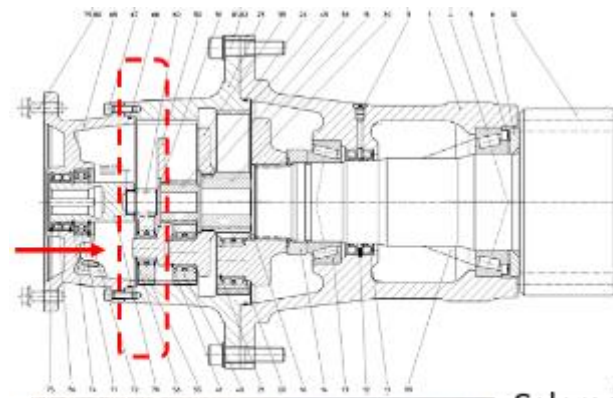
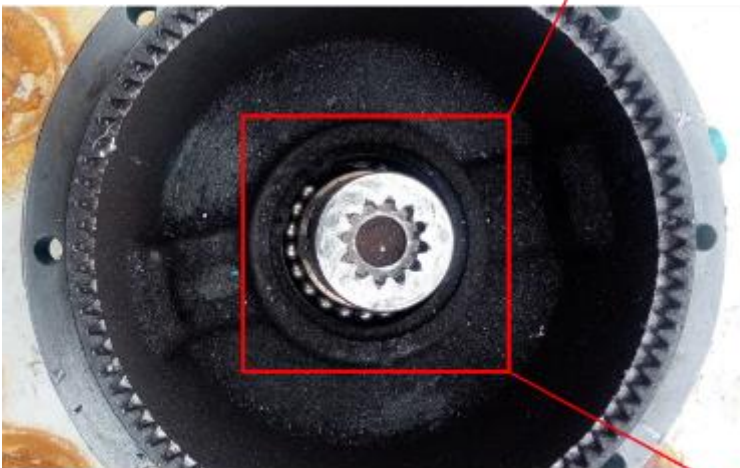
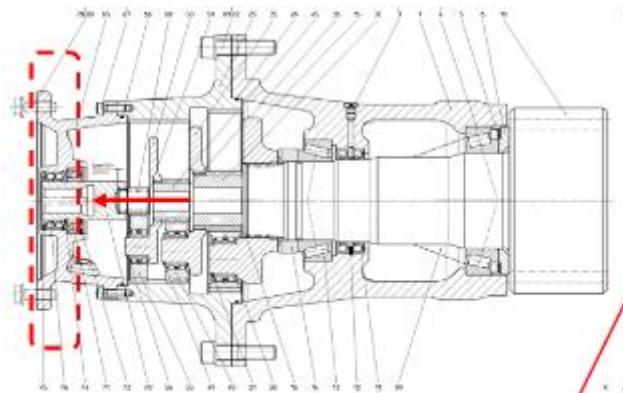


Motorreductor do Pitch



Motoredutor do Pitch

Inspeção Visual e Macrografia

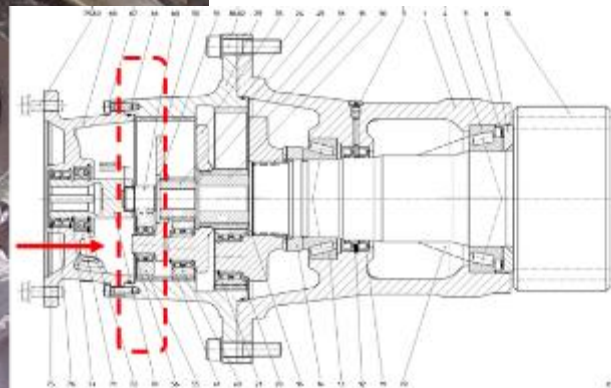
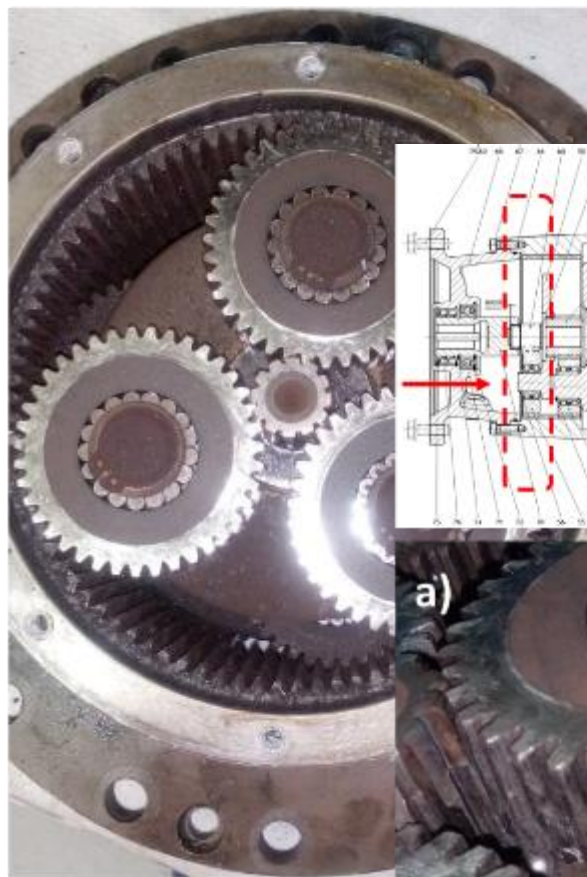
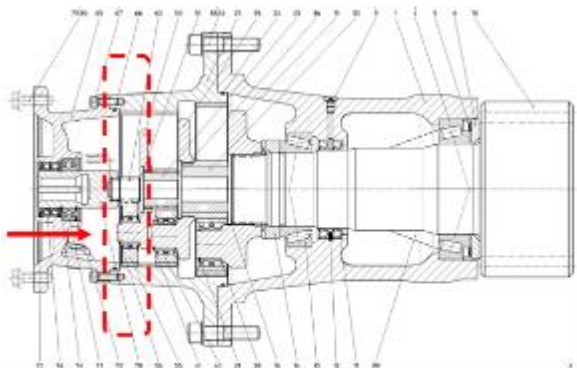


Coloração de elevada temperatura



Motoredutor do Pitch

Inspeção Visual e Macrografia

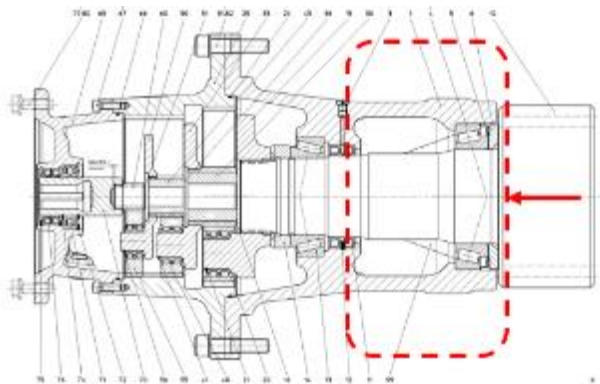


Quebra de engrenagem e engasgamento na coroa

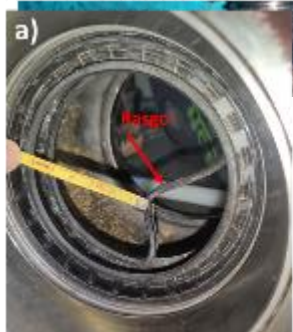
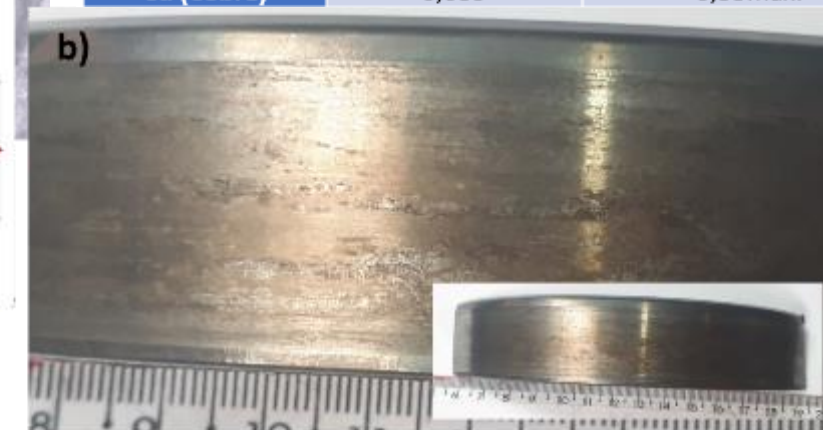
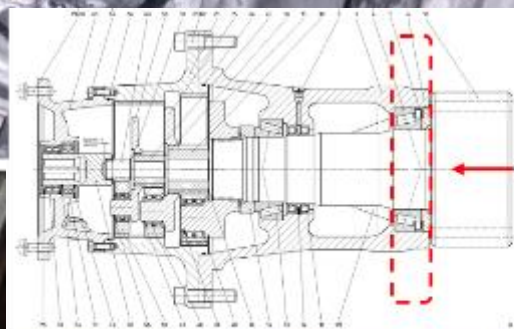
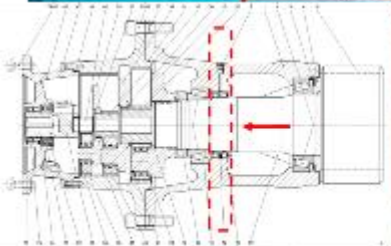


Motoredutor do Pitch

Inspeção Visual e Macrografia



| Elemento | anel externo do rolamento inferior | Norma SAE J404 Material E52100 (ed. 2007) |
|-----------------|------------------------------------|---|
| C (Carbono) | 0,983 | 0,98-1,10 |
| Si (Silício) | 0,343 | 0,15-0,35 |
| Mn (Manganês) | 0,371 | 0,25-0,45 |
| P (Fósforo) | 0,016 | 0,025máx |
| S (Enxofre) | 0,010 | 0,025máx. |
| Cr (Cromo) | 1,508 | 1,30-1,60 |
| Mo (Molibdênio) | 0,009 | 0,060máx. |
| Ni (Níquel) | 0,070 | 0,25máx. |
| Cu (Cobre) | 0,039 | 0,35máx. |



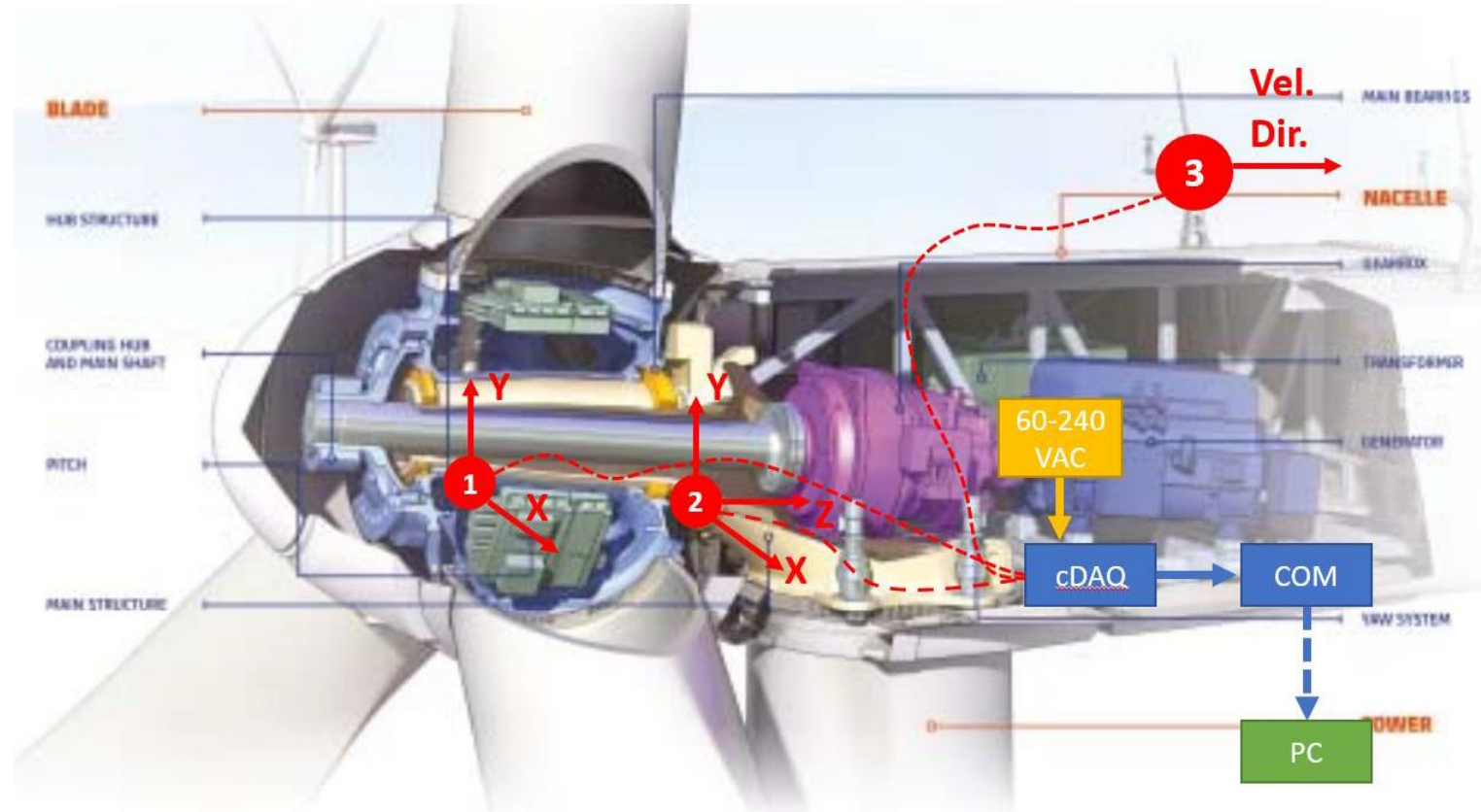
Caso 04 - Monitoramento de vibrações



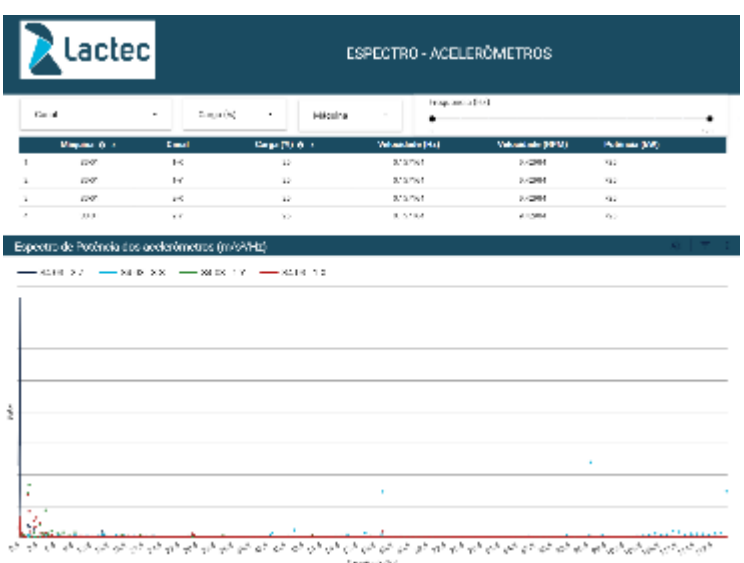
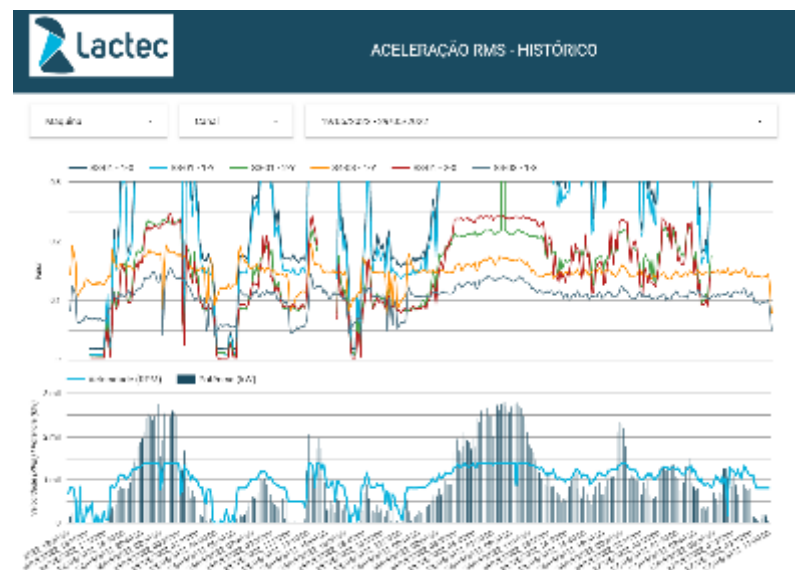
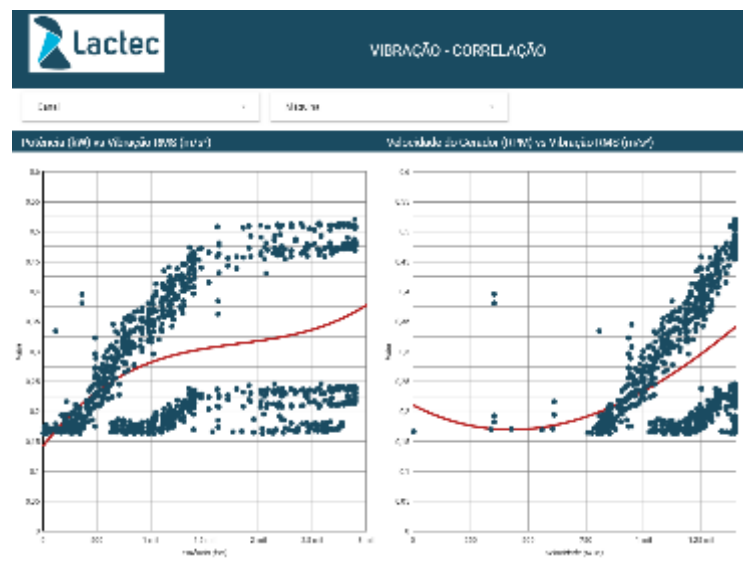
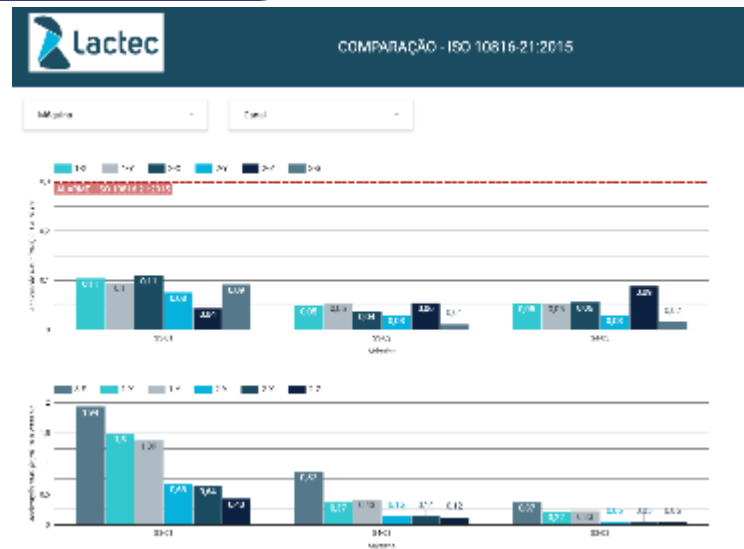
Monitoramento de vibrações

- 1) Acelerômetros para o monitoramento do main bearing na extremidade do hub, instalados entre o eixo flutuante e a main structure, em dois eixos (X e Y);
- 2) Acelerômetros para o monitoramento do main bearing na proximidade da nacele, instalados entre o eixo flutuante e a main structure, em três eixos (X, Y e Z);

- 3) Medição de velocidade e direção do vento com emprego de anemômetro do tipo turbina, instalado fora da nacele, na estrutura do anemômetro da máquina.



Monitoramento de vibrações





CARLO GIUSEPPE FILIPPIN

Gerente de P&D

filippin@lactec.com.br

www.lactec.org.br



Siga-nos em nossas redes sociais