

# ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO SISTEMA DE ACIONAMENTO DO LAMINADOR LEVE DA VILLARES UTILIZANDO ODS - OPERATING DEFLECTION SHAPE<sup>1</sup>

Mario Eduardo Corre<sup>2</sup>  
Wilson de Sousa Paulino<sup>3</sup>  
Teonilio Knupp Soares<sup>4</sup>  
Silas Santana<sup>5</sup>

## Resumo

A produção de laminado da Villares de Pindamonhangaba apresentava parada indesejada devido a problemas no sistema de acionamento. Solicitou-se a Engenharia de Confiabilidade da SKF um estudo para identificar as causas dessas intervenções, utilizando-se a técnica de Operating Deflection Shape - ODS a qual permite observar o comportamento dinâmico da estrutura, as defasagens do sistema e determinar os modos de flexão e torção do equipamento. Foram instalados vários sensores tanto na caixa H1 quanto na caixa H3 para comparar as condições em operação. Observou-se que a estrutura da caixa redutora da gaiola H1 apresentava deformações irregulares devido aos esforços. Geram torções na carcaça do redutor, compromete o desempenho mecânico. Esforços associados a uma baixa rigidez do sistema geram desalinhamento dinâmico, impactando na vida do conjunto. Verificou-se que as interações causam defasagem dos elementos, ocasionando folga mecânica. Concluiu-se que a técnica de ODS é uma excelente ferramenta de análise dinâmica para identificar problemas crônicos no ambientes industriais. Recomendou-se a necessidade de revisar a rigidez da carcaça da redutora.

**Palavras-chaves:** ODS; Vibração; Operation deflection shape.

## STUDY OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF THE DRIVING SHAFT SYSTEM OF ROLLING MILL OF VILLARES OF USING OPERATING DEFLECTION SHAPE

### Abstract

The production of rolled products the Villares was taking several unplanned shut-downs to problems in the driving system. The SKF Reliability Engineering was requested to proceed study to identify the causes of these interventions, using the technique of ODS Operating Deflection Shape which allows to observe the behavior of dynamic structure, the system delayed to determine the ways of bending and twisting of the equipment. They were installed several sensors in both gear boxes H1 and H3 to compare the conditions in operation. It was observed that the structure of the gearbox H1 - bearings and shafts - had irregular deformation due to the loads. They generate twists in gear box housing compromising the performance of gears and bearings. These loads associated to a low stiffness of the system generate dynamic misalignment, impacting in the coupling, bearings and gears lives. It was found that the interactions cause delay between the motor and gearboxes, causing mechanical gears between the parties. It was concluded that the technique of ODS is an excellent tool for dynamic analysis to identify chronic problems in industrial environments. Recommended a review in the gearbox housing stiffness.

**Key words:** ODS; Vibration; Operating deflection shape

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 45º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 21 a 24 de outubro de 2008, Ipojuca - Porto de Gainhas - PE*

<sup>2</sup> *Mestrando, Unicamp e Eng. de Análise Dinâmica da SKF do Brasil*

<sup>3</sup> *Membro da ABM, SMRP e M.Sc, Eng. de Aplicação da SKF do Brasil*

<sup>4</sup> *Coordenador de Manutenção da Villares.*

<sup>5</sup> *M.Sc, Coord. da Eng. de Análise Dinâmica da SKF do Brasil.*

# 1 INTRODUÇÃO

O processo de laminação de perfil longo consiste em reduzir e conformar para se obter as dimensões e forma especificadas pelo cliente. As etapas iniciais deste processo são extremamente severas no aspecto dinâmico. Com isso, Aço Villares vem enfrentando paradas indesejadas nos sistemas de acionamento do Laminador Perfil Longo (LPL) da Unidade de Pindamonhangaba. Para melhorar o desempenho do laminador foram feitas várias ações nos sistemas de acionamento. No entanto, essas ações ainda não apresentaram um desempenho satisfatório, principalmente nas redutoras das gaiolas horizontais, cujo foco deste trabalho (Figura 1). Estas paradas impactam severamente em perdas de produção, aumento dos custos de manutenção e desmotivam a equipe. A SKF do Brasil presta serviço para aumento confiabilidade dos ativos através do contrato *Integrated Maintenance Solutions – IMS*. Realizou-se um estudo dinâmico do sistema de acionamento através da técnica *Operating Deflection Shape – ODS*. Este estudo permitirá a concentração dos esforços em ações sincronizadas e planejadas, com objetivo de aumentar confiabilidade dos sistemas de acionamentos do LPL.

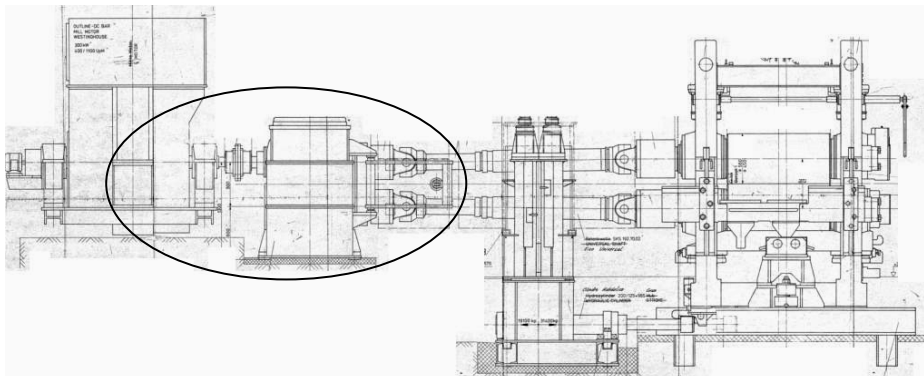


Figura 1 – Arranjo geral do laminador horizontal (circulo – sistema acionamento).

## 2 ESTRATIFICAÇÃO DAS FALHAS NO SISTEMA DE ACIONAMENTO DO LPL

A Figura 2 apresenta as ocorrências relacionados ao sistema de acionamento das redutoras das gaiolas horizontais.

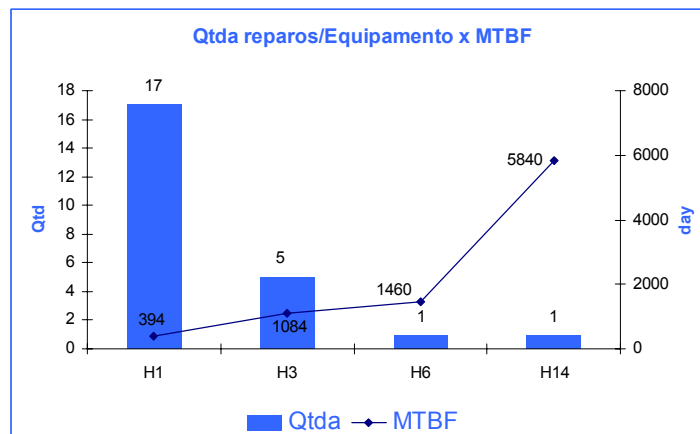


Figura 2 – Comparando dos reparos nas redutoras (horizontal) e relacionando com MTBF (Mean Time Between Faulire - MTBF).

Evidenciou-se que redutora H1 têm 17 ocorrências e apresentando um MTBF de 394 dias para o período avaliado.

A Figura 3 mostra os tipos de manutenção aplicada nos sistemas de acionamento do laminador (nas redutoras das gaiolas horizontais).

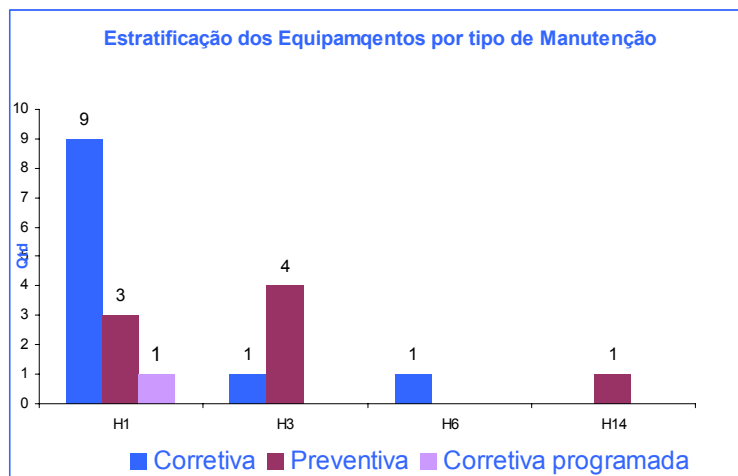


Figura 3 – Redutoras (horizontal) por tipo de manutenção.

A redutora H1 destaca-se com 9 intervenções de natureza corretivas. Este tipo de intervenções exige um elevado custo de manutenção. A Tabela 1 lista das ocorrências do sistema de acionamento da redutora H1 do período de 1990 à 2007.

**Tabela 1.** Ocorrências do sistema de acionamento da redutora H1

Data	Parada	Equipamento	Manutenção	Tempo	Observações
19 a 21/02/90	4	H1	Corretiva		
29 a 30/07/93	23	H1	Corretiva		
24 a 25/09/93	24	H1	Preventiva		
15/05/95	36	H1	Corretiva	625'	Rolamento eixo intermediário
Mar-01	48	H1	Corretiva		Quebra do eixo pinhão de entrada
17 e 18/04/01	49	H1	Corretiva		Quebra do rolamento do eixo ( longo ) de saída lado wobblers
Dec-01	52	H1	Preventiva		Rev. Geral e troca do eixo de sa
18/02/2002	53	H1	Corretiva	10 hs	Quebra do eixo pinhão de entrada
24/02/2002	55	H1	Corretiva	7 hs	Quebra do eixo pinhão de entrada
3/3/2002	56	H1	Preventiva	S/p	Troca do eixo pinhão de entrada
16/08/2002	60	H1	Corretiva	3,5 hs	Quebra do rolam. Lado motor do 2º eixo
21/05/2003	64	H1	Corretiva	5 hs	Quebra do rolamento eixo interm. Par de saída L M
8/7/2003	65	H1	Corretiva	5 hs	Quebra do rolamento eixo interm. Par de saída L O
31/12/2003	66	H1	Preventiva	S/p	Preventiva de fim de ano – troca de todos os rolamentos e o par de saída
04.02.2007	86	H1	Corretiva programada	S/p	Troca do eixo pinhão do segundo par e seus respectivos rolamentos. Eixo apresentou trinças em todos os dentes da engrenagem e foi trocado preventivamente.
05.07.2007	88	H1	Corretiva	3,5 hs	Substituído rolamento 23040 do eixo de saída inferior lado fixo ( oposto ao cardan ).
18.08.2007	89	H1	Corretiva	15,5 hs	Substituído rolamento 23034 do segundo eixo intermediário lado motor do par de saída.

Durante o contrato de IMS, a SKF teve oportunidade de analisar falhas do rolamento (23040 CC/C3W33) da redutora H1.

A Tabela 1 evidenciou 8 casos relacionados a rolamento e 6 casos relacionados à falha de eixo/engrenagem. As últimas ocorrências apresentaram o modo falha semelhantes, ou seja, o rolamento apresentou sobre carga axial (Figura 4).



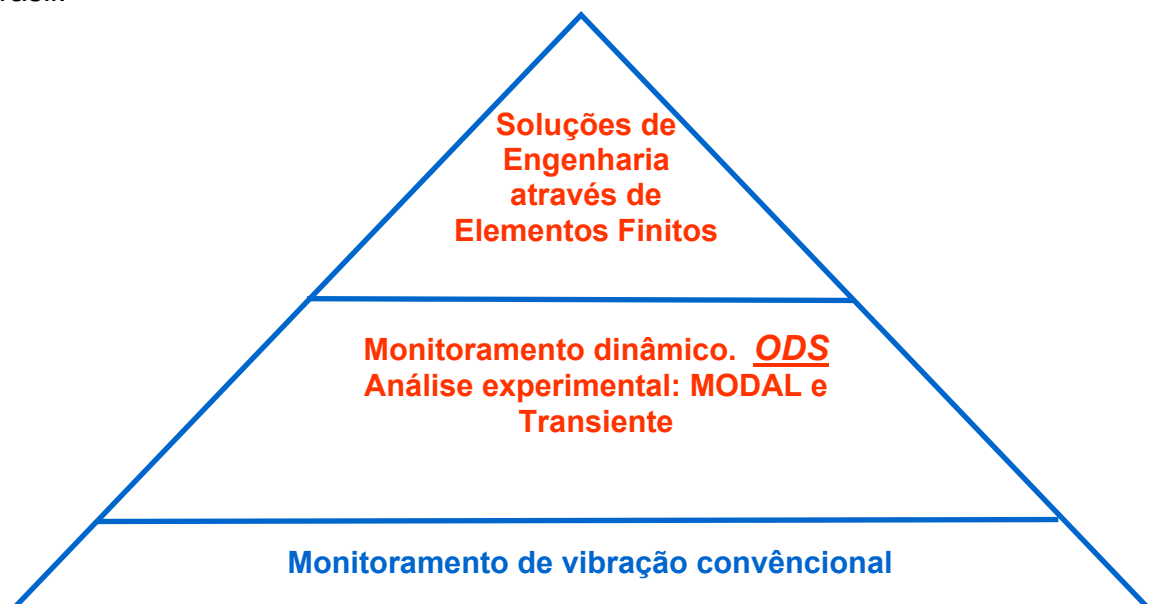
**Figura 4** – Anel interno do rolamento 23040 CC/C3W33 com desgaste excessivo na pista superior.

Desta forma, a SKF do Brasil através do contrato IMS recomendou um estudo avançado no que tange o comportamento dinâmico do sistema de acionamento por meio da técnica *Operation Deflection Shape* – ODS.

### 3 OPERATING DEFLECTION SHAPE ODS

O programa Visual ODS Pro permite visualizar o comportamento dinâmico do sistema estrutural da máquina durante operação normal.

A Figura 5 mostra a escala de solução de problemas estruturais fornecido pela SKF do Brasil.



**Figura 5** – Escala de solução de problemas utilizando ferramentas dinâmicas disponíveis pela equipe da SKF do Brasil.

### 4 OBJETIVOS

- Estudar o comportamento dinâmico, obtendo as deflexões da base e estruturas na condição operacionais.
- Verificar os movimentos dos eixos e mancais através de deformações por torção e deflexão, para determinar as causas que geram as quebras dos componentes, eixos e rolamentos da caixa redutora da gaiola H1.

## 5 ETAPAS DA IMPLEMENTAÇÃO DO ODS

A Figura 6 apresenta as etapas de implementação, coleta de dados, modelagem e análise do ODS.

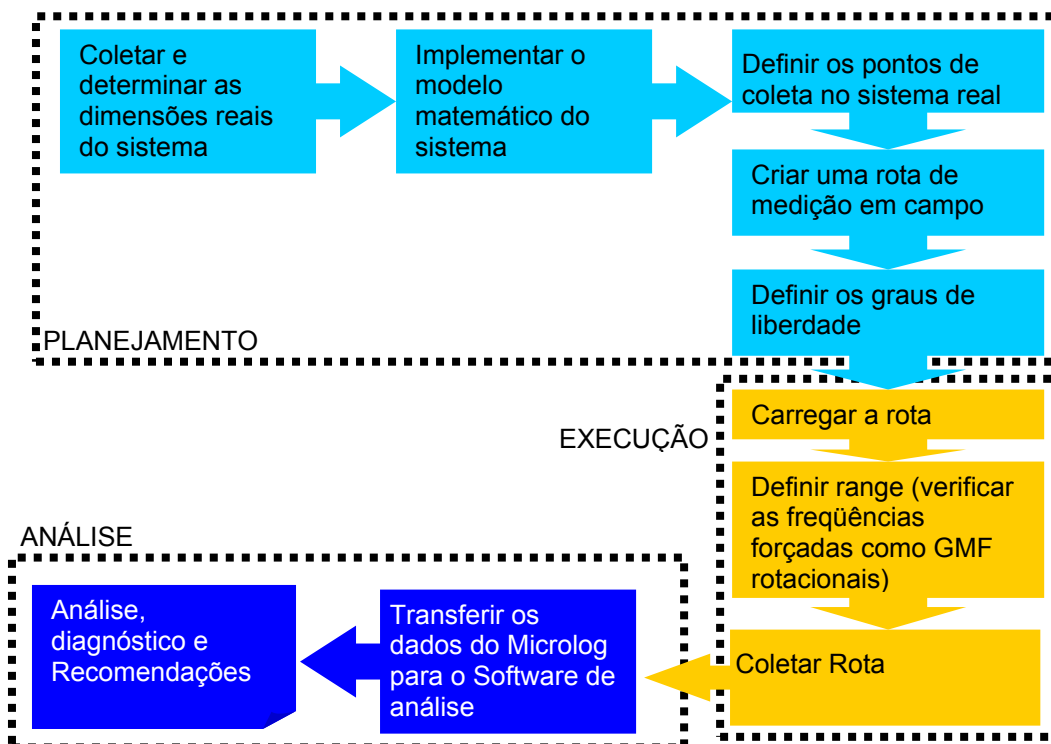


Figura 6 – Etapas de implementação, coleta de dados, modelagem e análise do ODS.

A Figura 7.a mostra uma tela do software e a Figura 7.b mostra a implementação do modelo matemático do sistema real.

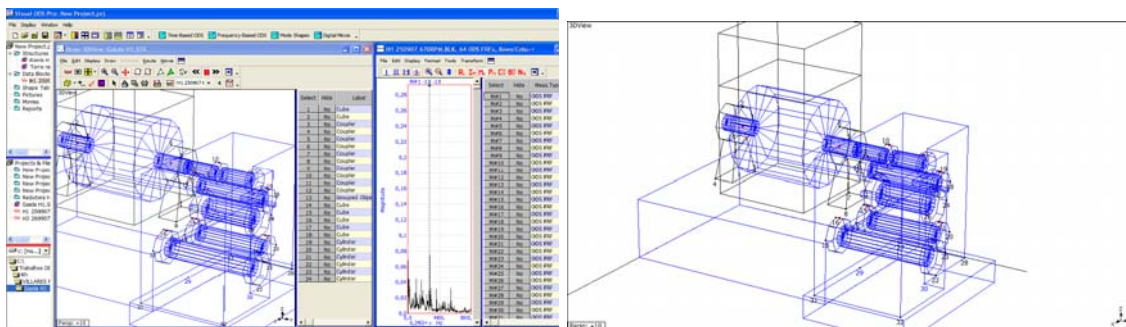
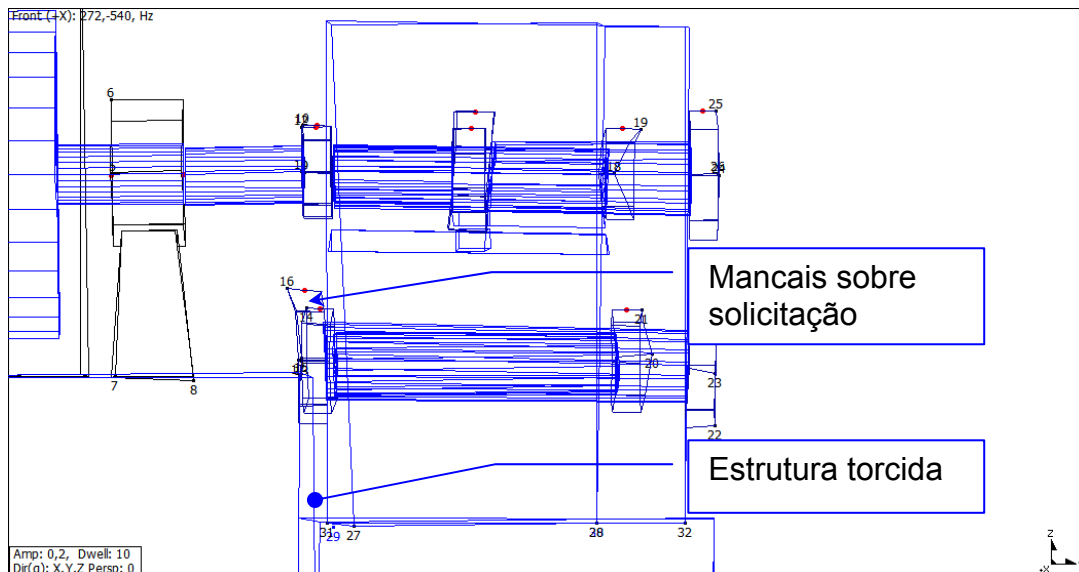


Figura 7 – a) Tela do software e b) modelo matemático do sistema de acionamento do Laminador.

## 6 DEFINIR OS PONTOS DE COLETA NO SISTEMA REAL

As direções de medições x, y e z são consideradas os graus de liberdade do nosso sistema. Definiu as direções de acordo com que objetiva identificar no sistema estrutural, são parametrizadas as direções x, y e z. Assim permite observar os movimentos relativos existentes na estrutura, e demais componentes do sistema acionamento.

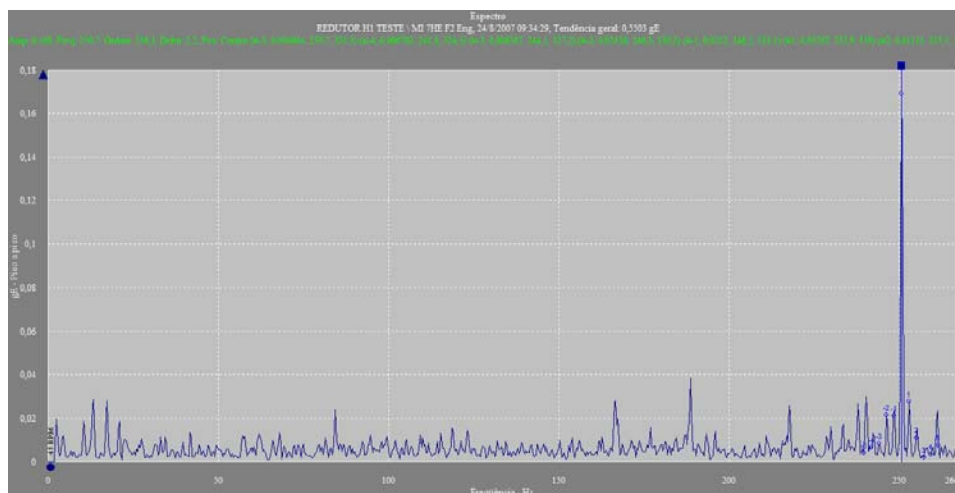




**Figura 9** – Movimento torcional estrutura da caixa redutora H1 GMF em destaque o excesso de esforço nas engrenagens e nos mancais (geração de carga axial).

A Figura 10 apresenta o espectro do sensor do mancal intermediário.

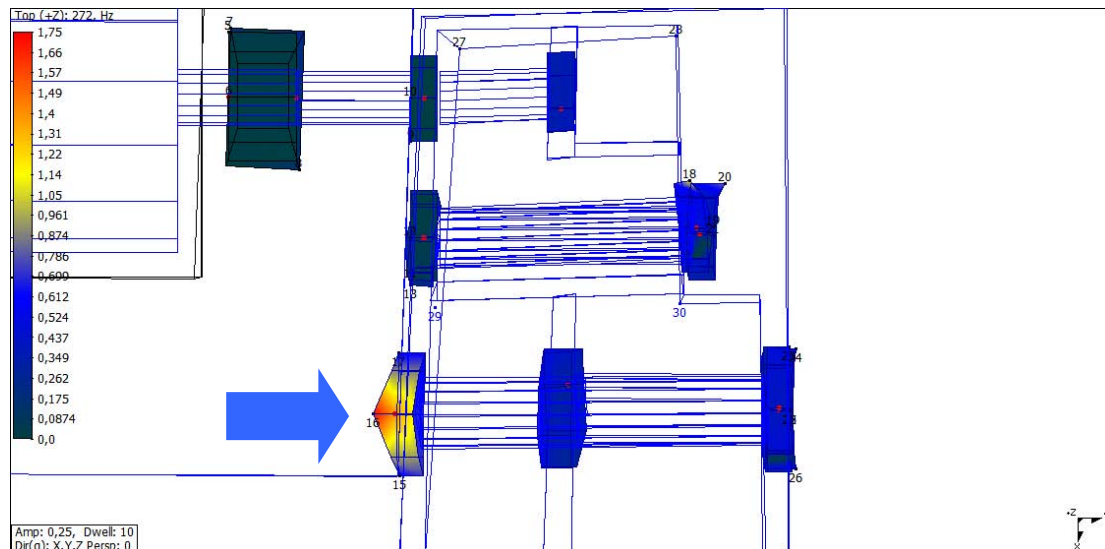
Verifica-se ocorrência de bandas laterais de aproximadamente 2,2 Hz na rotação do eixo intermediário. Este fenômeno, pressupõe-se o movimento torcional promovido pelo esforço do engrenamento (Gear Mesh frequency GMF).



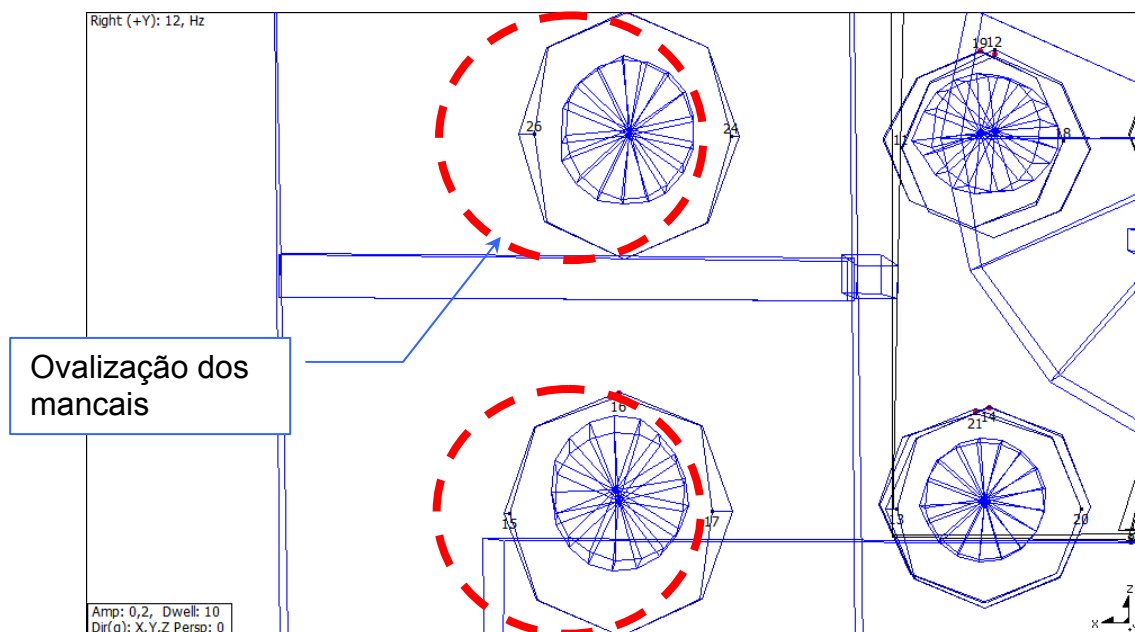
**Figura 10** – Espectro referente à rotação do eixo intermediário – bandas laterais de 2,2 Hz – Caracterizando os esforços de engrenamento.

A Figura 11 mostra modelo uma visão sobre a caixa redutora.

Nesta condição, verifica-se ocorrência de movimentos de caráter torcional, flexão e defasagem no mancais e eixo. Este fenômeno pode causar ovalização dos alojamentos dos mancais (Figura 12), por sua vez, comprometendo severamente a vida útil dos rolamentos. Os esforços atuantes em excesso nos eixos podem ocasionar aparecimentos de trincas nas regiões de maior concentração de tensão. Este tipo de esforço axial observado na análise de ODS corrobora com as últimas ocorrências de falha dos rolamentos das redutoras apresentado na Tabela 1.



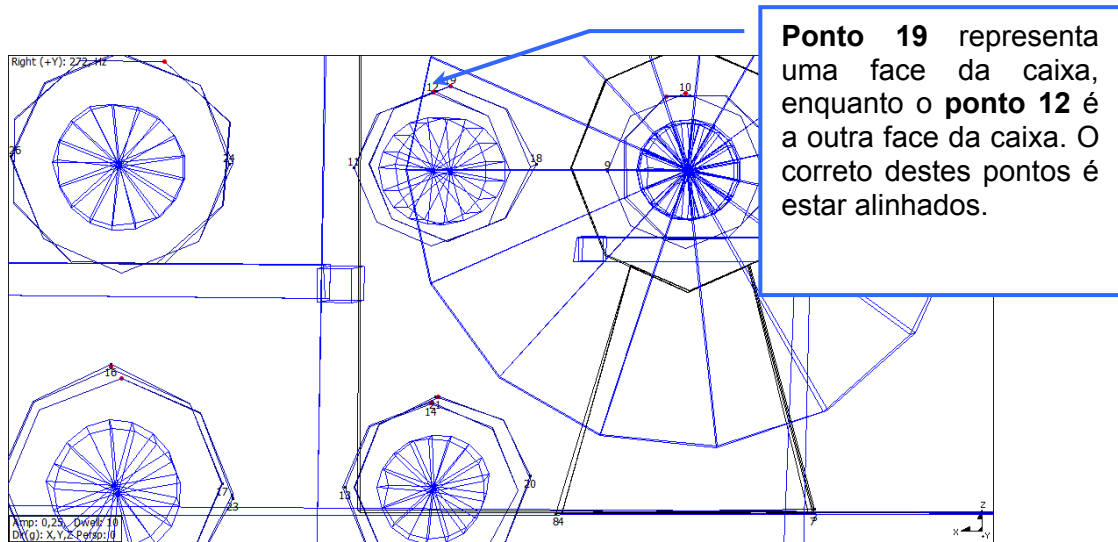
**Figura 11** – Movimento torcional na caixa redutora GMF 272Hz. A seta destaca o esforço ocorrido no mancal inferior lado oposto da saída. Este ocorrência causa esforços diretamente no engrenamento e no rolamento.



**Figura 12** – Os círculos mostram a ocorrência de ovalização dos mancais. Este tipo de ocorrência compromete a vida do rolamento.

A Figura 13 mostra sobreposição dos movimentos relativos dos mancais. Observa-se a ocorrência de desalinhamento entre mancais do eixo intermediário. O movimento transmitido para o sistema gera um desalinhamento dinâmico no conjunto, eixos e engrenagens. Este movimento gera tensões que danificam os dentes das engrenagens e demais componentes do sistema como, acoplamento, fixações de base e ou empenamento do eixo.

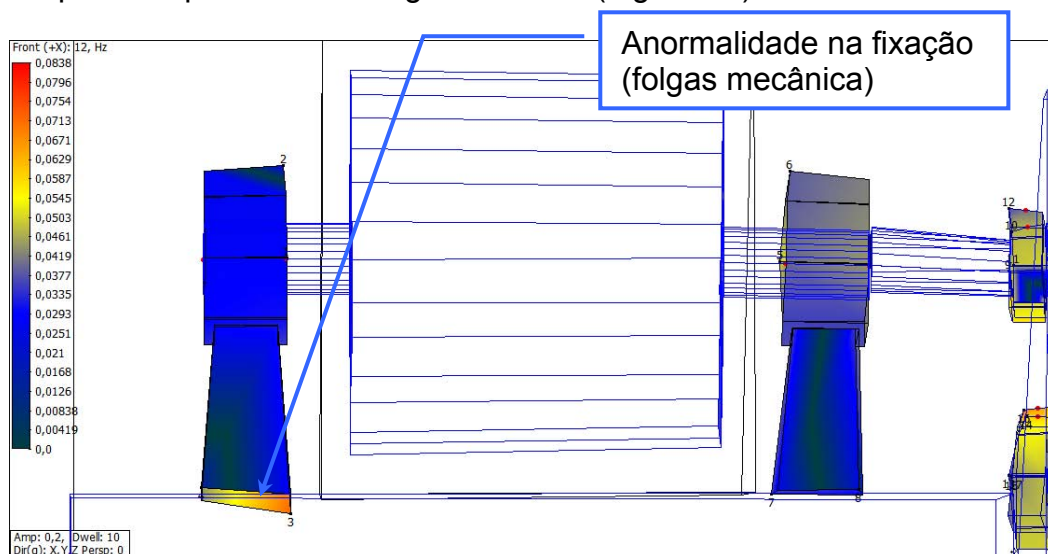




**Figura 13** – Desalinhamento dinâmico comprometendo engrenagens e demais componentes GMF em destaque forçando engrenagens e eixos.

A Figura 14 mostra os movimentos relativos dos mancais do motor.

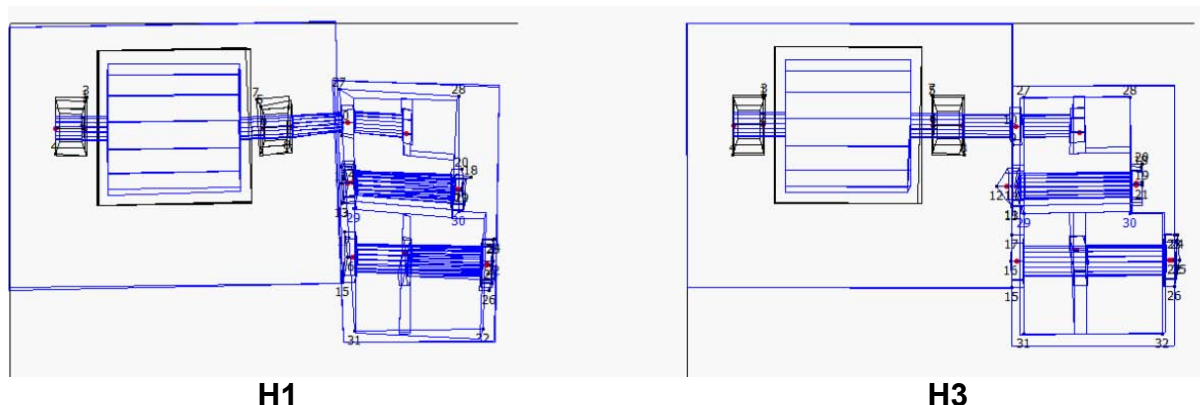
Na frequência de rotação do conjunto de aproximadamente 12Hz, Observa-se um movimento do conjunto em relação à base. Este fenômeno, ocasionando defasagem entre o parafuso de fixação do mancal do motor lado oposto ao acoplado. Esta vibração é amplificada na estrutura com maior evidência na região dos pontos 3, e 4 devido a possível problema de folga mecânica (Figura 14).



**Figura 14** - Fixação mancal motor LOA defasado folga mecânica (rotação) eixo de entrada (acoplamento) folga.

Outra evidencia observada durante estudo, foi o desalinhamento angular dos flanges do cardan os quais geram esforços que podem danificar as cruzetas, bem com rolamentos. Este fenômeno podendo ocasionar movimento torcional nos eixos do cardan que também podem comprometer o produto laminado.

De forma comparativa, foi feita análise simultânea do sistema de acionamento da gaiola H3. Nota-se que o comportamento dinâmico da caixa redutora da H1 é anômalo em relação ao comportamento dinâmico da caixa redutora H3. A Figura 15 mostra a comparação entre os sistemas de acionamento.



**Figura 15** – Comparação dos sistemas de acionamento da H1 e H3 em condições operacionais similares. A estrutura da H1 apresenta níveis de deformações superiores do que H3.

## 8 CONCLUSÕES

- A técnica de ODS, para investigar as falhas que vinham ocorrendo na caixa redutora da H1, foi exata para apontar o fenômeno que ocorre durante a operação.
- O sistema de acionamento sofre deformações por modo torcional, deflexão dos eixos, que compromete o alinhamento dinâmico do sistema.
- A caixa da redutora apresenta durante a operação ovalização nos alojamento dos mancais de rolamento, comprometendo diretamente a vida do rolamento e causando cargas axiais.
- A fixação do mancal do motor apresenta folga mecânica entre a base metálica e a base civil, causando movimento torcional no acoplamento e mancal.
- A caixa redutora H1 não apresenta rigidez suficiente para suportar os esforços do processo. recomendou-se uma reavaliação do projeto da caixa redutora por simulação numérica através da técnica de elementos finitos.

## Agradecimentos

Agradecemos a colaboração e envolvimento da equipe operacional e técnica da Villares e da SKF.

## REFERÊNCIAS

- 1 \_\_\_\_\_ MACHINERY ANALYSIS, “Quadro sobre Diagnóstico de Vibrações” TECHNICAL ASSOCIATES OF CHARLOTTE, INC. 1997.
- 2 MCHARGUE, P. L. and RICHARDSON, M. H. “Operating Deflection Shapes From Time Versus Frequency Domain Measurements” Vibrant Technology, Inc. Presented at 11th IMAC Conference, Kissimmee, FL, February, 1993, USA.
- 3 MCHARGUE, P. L. and RICHARDSON, M. H. “Introduction to Operating Deflection Shapes” CSI Reliability Week, Orlando, FL, October, 1999.
- 4 RICHARDSON, Mark H. and. ELLIOTT, Andrew S “Virtual Experimental Modal Analysis (VEMA)”, Vibrant Technology, Inc, IMAC XVI, February, 1998