



CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA PREVISÃO DE VIDA DAS TRANSMISSÕES POR ENGRENAGENS BI-HELICOIDAIS NAS BOBINDEIRAS DOS LAMINADORES SENDZIMIR SUJEITAS A DANOS ACUMULADOS POR FADIGA DE CONTATO

Douglas Matias Araújo Alvarenga, douglas.alvarenga@hotmail.com¹

Fábio Aguiar da Silva, fabioag@oi.com.br²

Marcell Filho da Silva Ferreira, eng.marcellferreira@gmail.com²

Paulo Roberto Cetlin, pcetlin@demec.ufmg.br²

Antônio Eustáquio de Melo Pertence, pertence@demec.ufmg.br²

¹Aperam South America, Rua 1º de Maio 09, Timóteo, Minas Gerais, Brasil, 35180-018

²Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antonio Carlos 6627, Campus da Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 31270-901

Resumo: Laminadores do tipo Sendzimir são amplamente utilizados em siderúrgicas que produzem aços inoxidáveis. Acompanha o laminador Sendzimir uma bobinadeira esquerda e uma bobinadeira direita. As bobinadeiras são acionadas através de um motor acoplado a um par de engrenagens cilíndricas bi-helicoidais que por sua vez está ligado a um mandril. No presente artigo é apresentado o desenvolvimento de uma metodologia para previsão de vida das transmissões por engrenagens cilíndricas bi-helicoidais nas bobinadeiras dos laminadores Sendzimir sujeitas a danos acumulados por fadiga de contato. A metodologia proposta baseia-se no acúmulo de danos por fadiga de contato nos dentes através da regra linear de danos cumulativos de Miner, onde o histórico cronológico do carregamento e as características físicas e geométricas das engrenagens são introduzidos no modelo de previsão de vida. A ideia é propor uma metodologia para ser aplicada pela manutenção como ferramenta de controle na estimativa de vida de engrenagens sujeitas a danos acumulados por fadiga de contato, bem como gerar ações para prolongar a vida útil da engrenagem através de modificações dos planos de manutenção existentes. A adoção desta metodologia pela área de manutenção permitirá o cálculo da previsão da vida útil das engrenagens, funcionando como um método de controle que poderá orientar as ações da área de manutenção.

Palavras-chave: Laminador Sendzimir, Regra de Miner, Danos por Fadiga de Contato, Engrenagem, Pitting

1. INTRODUÇÃO

A vida útil de estruturas e componentes mecânicos é muitas vezes influenciada por processos de fadiga, causados por aplicações de cargas cíclicas, periódicas ou não. A maior parte da vida é relacionada a uma sequência de processos durante os quais bandas de escorregamentos, deformações localizadas, danos e microtrincas iniciam-se e desenvolvem até o aparecimento de trincas macroscópicas (Mansur, 2003)

O cenário atual, economicamente globalizado e altamente competitivo, exige que as empresas busquem aumentar a lucratividade através da redução de custos operacionais e de manutenção, aumento de produtividade e melhoria da qualidade do produto ou serviço. A manutenção de equipamentos, antes considerada um mal necessário, é atualmente parte integrante dos esforços estratégicos de produtividade das empresas, o que tem levado às mesmas a buscarem metodologias que auxiliem na previsão de vida útil de componentes críticos.

A Aperam South America, siderúrgica tradicional fabricante de aços inoxidáveis e elétricos, localizada em Timóteo, Minas Gerais, realizou uma modernização no Laminador de bobinas nº 1 (LB1) do tipo Sendzimir, aumentando sua capacidade produtiva. Consequentemente, alguns componentes que já eram suscetíveis a danos acumulados por fadiga se tornaram ainda mais vulneráveis.

Bobinadeiras são equipamentos fundamentais nos laminadores do tipo Sendzimir que são usados para a produção de aços laminados a frio. Estes laminadores produzem tiras de aço laminadas através de um processo reversível. Sucessivos passes alongam a tira de aço e reduz a sua espessura até a medida necessária. As bobinadeiras são acionadas

através de dois motores em série com potência de 1500 hp cada, que transmitem potência para um redutor de velocidade que possui um conjunto de engrenagens bi-helicoidais conforme mostrado na Fig. 1.

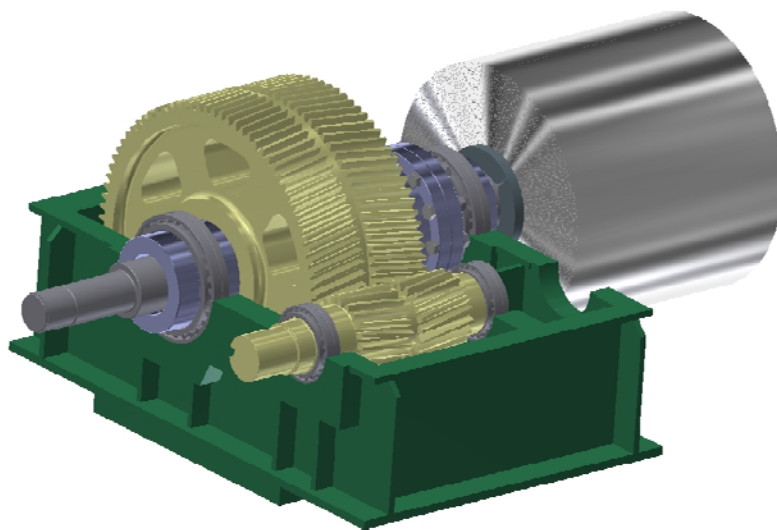


Figura 1. Vista do redutor de uma bobinadeira, em destaque o conjunto de engrenagens bi-helicoidais

O histórico de manutenção das coroas bi-helicoidais do redutor das bobinadeiras do LB1 demonstra que as mesmas possuem grande sensibilidade ao desgaste por fadiga de contato, sendo evidenciados por “*pittings*” através de inspeções visuais. O aumento de produtividade do equipamento leva a uma condição de aceleração deste desgaste que, se não for controlado, pode resultar em falhas catastróficas. Vários fatores exercem influência na formação do dano, tais como: nível da tensão de contato; tipo do perfil do dente; velocidade relativa de contato; acabamento superficial e condições de lubrificação (Muraro, 2012).

Uma maneira de prever quando uma trinca por fadiga de contato ocorrerá é através do desenvolvimento de uma metodologia baseada nos danos acumulados por fadiga. O histórico de sequência de carregamento da coroa e suas características geométricas são introduzidos no modelo de previsão de vida. A regra de Miner é usada para quantificar o dano por fadiga nos flancos dos dentes da coroa causado por cada bobina processada. A regra de Miner é expressa na Eq. (1).

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1.0 \quad (1)$$

Onde n_i é o número de ciclos em determinado nível de tensões i , e N_i é o número de ciclos para falhar nesse nível de tensões. A teoria de Miner afirma que a falha do componente ocorre quando a soma dos danos é igual ou maior que a unidade.

Nos experimentos da teoria de Miner, normalmente dois ou mais blocos de carga de amplitude variável são utilizados. A adaptação da regra de Miner no processo de bobinamento considera cada espira como um único bloco de carga que causa um dano parcial no dente da engrenagem. De acordo com Socha (2004), o período de progresso estável de dano em que defeitos na estrutura do material são introduzidos e o crescimento das micro-trincas seguidas por nucleação ocupam o maior tempo da vida a fadiga, em torno de 80%. Dessa forma, é assumido que a maior parte do tempo gasto no processo de fadiga até a fratura corresponde ao período de nucleação da trinca.

A motivação para o desenvolvimento da metodologia apresentada neste artigo vem da possibilidade de evitar falhas dos dentes por fadiga de contato no sentido de criar uma ferramenta de manutenção que estima a vida remanescente a fadiga de contato em engrenagens sujeitas a danos acumulados por fadiga, verificar a aplicabilidade da regra de Miner para engrenagens submetidas a danos acumulados por fadiga de contato e evitar falhas catastróficas em dentes de engrenagens em operação.

2. FUDAMENTOS TEORICOS

2.1. Engrenagens Cilíndricas Helicoidais e Bi-Helicoidais

As engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais têm seus dentes fresados segundo uma hélice de tal maneira a formar um ângulo β com o eixo de rotação, conforme mostrado na Fig. 2. A engrenagem menor é chamada de pinhão e a engrenagem maior de coroa.

As engrenagens cilíndricas helicoidais estão sujeitas a menos choques as engrenagens cilíndricas retas, por causa do maior recobrimento (número de pares de dentes em contato ao mesmo tempo) propiciando uma transferência mais

gradual da carga de dente para outro dente. Devido à inclinação dos dentes, a transmissão de esforços entre os dentes gera uma força axial sobre os eixos e mancais e para minimizar este efeito os redutores das bobinadeiras utilizam transmissões por engrenagens cilíndricas bi-helicoidais de eixos paralelos.

Nesta situação, o flanco do dente de hélice à direita de uma engrenagem (pinhão) se engrenará no flanco de dente da hélice à esquerda da outra engrenagem (coroa), aumentando a área de contato e a capacidade do trem de engrenagem, possibilitando a redução do volume físico de transmissão e dos esforços axiais sobre eixos e mancais (Shigley, 1989).

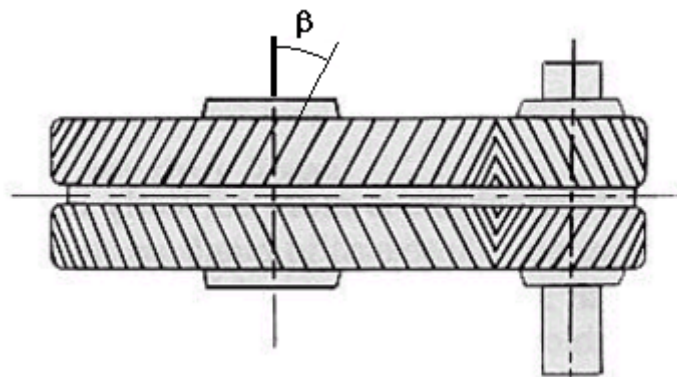


Figura 2. Desenho esquemático de um par de engrenagens bi-helicoidais mostrando o ângulo de hélice β

As características do par engrenado são mostradas na Tab. 1. Embora as bobinadeiras sejam reversíveis, a face de carregamento das engrenagens durante o bobinamento e o desbobinamento é sempre a mesma. No processo de desbobinamento, o sistema de acionamento gera uma tensão à tira contrária ao sentido de laminação com uma magnitude menor do que a bobinadeira.

Tabela1. Características do par de engrenagens cilíndricas bi-helicoidais das bobinadeiras

Características	Pinhão	Coroa
Número de dentes	20	91
Módulo normal	18.69 mm	
Módulo frontal	22.074 mm	
Diametral pitch	1.25 pol	
Passo circular normal	58.686 mm	
Ângulo de pressão	20 graus	
Ângulo de hélice	23 graus	
Material	AISI 4150	
Dureza	36 $\pm$ 2	32 $\pm$ 2
Distância entre centros	1140 mm	

2.2. Mecanismos de Dano por Fadiga de Contato

Embora os mecanismos envolvidos no processo de dano sejam bastante complexos, os mesmos podem ser divididos em três fases: 1) uma curta fase inicial de deformação plástica do volume submetido ao contato, 2) uma longa fase estável onde ocorrem micro-trincas e 3) a fase final quando a macro-trinca se propaga até ocorrer o lascamento. Referente ao crescimento da trinca, a terceira fase pode ser dividida no crescimento da trinca e da fratura final. No entanto, assume-se que a maior parte da vida útil de aplicação do componente submetido a fadiga de contato ocorre durante as duas primeiras fases (Lee, 2005).

Na primeira fase, as maiores mudanças na estrutura do material ocorrem na região com altas tensões sob o ponto de contato. Podem ocorrer mudanças na dureza, tensões residuais, e na microestrutura do material. A rugosidade superficial é reduzida através do desgaste e da deformação plástica.

Na segunda fase, bandas de deformação são criadas pelo escoamento microplástico. Essas bandas causam a formação de zonas de ataque escuras abaixo da superfície. Deformações mais distantes causam a formação de bandas de ataque claras devido a uma nova fase ferrítica. Então os carbeto na região de altas tensões começam a se decompor e se separar. Outras características microestruturais incluem “butterflies” se propagando de grandes inclusões de elevada dureza. As micro-trincas usualmente ocorrem na superfície de contato ou entre esta e a profundidade de mais tensão cisalhante de Hertz. Quando numerosas micro trincas se iniciam na superfície, são chamadas de “surface distress” ou “frosting” devido ao aspecto acinzentado, como se a superfície estivesse congelada. Este defeito é o resultado das primeiras duas fases do processo de falha por tensão de contato.

Na última fase, o lascamento ocorre na medida em que os carregamentos cíclicos continuam e as micro-trincas se propagam até se tornarem macro-trincas, conforme mostrado na Fig. 3. Dependendo do local de início, as crateras deixadas pelo lascamento do material podem ser classificadas como superficiais ou sub-superficiais. (Alfredsson, 2000)



Figura 3. Lascamento da superfície dos dentes de uma engrenagem causado por fadiga de contato

2.3. Metodologia para Previsão da Vida das Transmissões por Engrenagens Bi-Helicoidais

O processo de bobinamento gera um torque na bobinadeira proporcional em relação ao aumento do número de espiras no mandril. Como a força de tração na bobina tem que se manter constante devido às condições operacionais, o torque exercido pela bobinadeira é alterado a cada nova espira enrolada. Isto ocorre tanto no bobinamento quanto no desbobinamento. No entanto, durante o desbobinamento, o torque gerado é menor quando comparado com o bobinamento para que haja uma força de tração constante na tira e uma uniformidade na direção do movimento da mesma, conforme mostrado na Fig. 4.

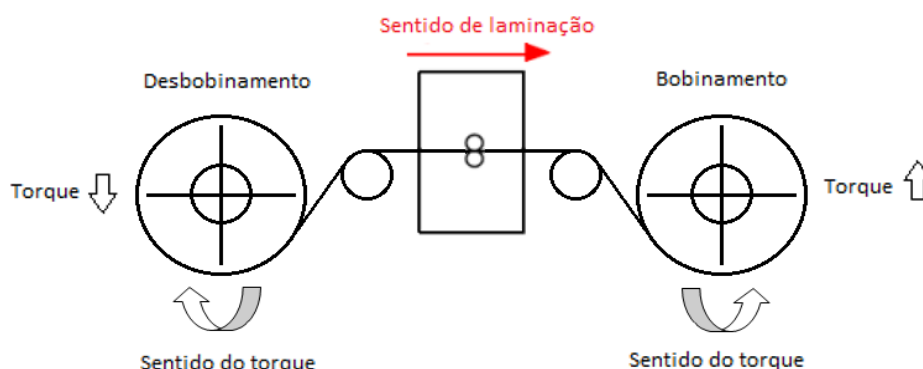


Figura 4. Esquema dos sentidos dos torques das bobinadeiras

Este carregamento variável é repetido a cada passe de laminação, que pode variar de 1 até 12 dependendo do programa de passes. Como todo o primeiro passe de laminação ocorre do lado direito para o esquerdo, pode-se observar que a coroa da bobinadeira esquerda é muito mais solicitada que a coroa da bobinadeira direita, pois em passes ímpares, a bobinadeira esquerda tem uma fase a mais de bobinamento que a bobinadeira direita. Por este motivo, a metodologia desenvolvida é aplicada na bobinadeira esquerda do LB1.

Embora as bobinadeiras sejam reversíveis, a face de carregamento das engrenagens durante o bobinamento e o desbobinamento é sempre a mesma. No processo de desbobinamento, o sistema de acionamento gera uma tensão à tira contrária ao sentido de laminação com uma magnitude menor do que a bobinadeira.

As tensões de contato nos dentes são proporcionais ao torque realizado pelo redutor. Diferente de outros componentes, engrenagens não possuem limite à fadiga para durabilidade superficial (Radzevich, 2012). Existe uma tensão estabelecida em 10 milhões de ciclos (10^7) a partir do qual se considera um vida infinita, ou seja sem influencia da fadiga de contato. O torque T aplicado na bobinadeira é dado pela Eq. (2)

$$T(ne) = Ft \cdot (dm + e \cdot i) \quad (2)$$

onde Ft é a força de tração exercida sobre a tira, dm é o diâmetro do mandril, e a espessura da bobina e ne o número de espiras durante o bobinamento ou desbobinamento.

O número de espiras para cada passe de laminação é expressa pela Eq. (3)

$$ne = \left(\frac{\sqrt{\frac{P \cdot 4}{\rho \cdot \pi \cdot L} + dm^2} - dm}{2} \right) \cdot \frac{1}{e} \quad (3)$$

onde P , L e e são respectivamente o peso, a largura e a espessura da bobina e dm é o diâmetro do mandril.

A definição da velocidade tangencial da engrenagem é determinada pela Eq. (4)

$$Vt(ne) = \pi \cdot dpc \cdot \frac{vp}{\pi \cdot (dm + 2 \cdot e \cdot ne)} \quad (4)$$

Onde Vt e dpc são respectivamente a velocidade tangencial e o diâmetro primitivo da coroa e vp é a velocidade de processo.

As tensões de contato nos dentes da engrenagem foram calculadas conforme a norma AGMA 2001-D04, de acordo com a Eq. (5).

$$S_c = C_p \cdot \sqrt{W_t \cdot K_o \cdot K_v \cdot K_s \cdot \frac{K_m}{d \cdot F} \cdot \frac{C_f}{I}} \quad (5)$$

Onde S_c é a tensão de contato, C_p é o coeficiente elástico, W_t é a força tangencial, K_o é o fator de sobrecarga, K_v é o fator dinâmico, K_s é o fator de forma, K_m é o fator de distribuição, C_f é a condição superficial para resistência ao *pitting*, F é a largura da face do dente, I é o fator de geometria do dente para resistência ao *pitting* e d é o diâmetro primitivo operante do pinhão.

A força tangencial é calculada pela Eq. (6).

$$W_t = T \cdot dpc \quad (6)$$

Seguindo o critério de dimensionamento conforme a norma AGMA 2001-D04, o valor S_c é relacionado à Eq. (7).

$$S_c \leq \frac{s_{ac} \cdot Z_N \cdot C_H}{S_H \cdot K_T \cdot K_R} \quad (7)$$

Onde S_{ac} é a tensão de contato admissível, Z_N é o fator de vida á *pitting*, C_H é o fator de dureza, S_H é o fator de segurança, K_T é o fator de temperatura e K_R o fator de confiabilidade.

Quando S_c satisfaz a equação, então teoricamente a engrenagem está bem dimensionada para trabalhar e é provável não ocorrer o *pitting*. No entanto, esta equação não considera o carregamento variável. Além disso, por se tratar de um desenvolvimento de metodologia, os fatores S_H e K_R serão eliminados da equação.

O fator Z_N ajusta a tensão admissível para o número requerido de ciclos de operação. Conforme o padrão, o número de ciclos é definido para 10^7 , então o fator de vida Z_N ajusta a tensão admissível baseado nos ciclos desejados de operação, conforme mostrado na Fig. 5.

Desta forma, pode-se calcular o valor de N baseado na Fig. 5, através da Eq. (8).

$$N_i = \left(\frac{s_{ci} \cdot K_T}{\frac{s_{ac}}{2,466}} \right)^{\frac{1}{-0,056}} \quad (8)$$

Onde N_i é o número de ciclos que a engrenagem suportaria sem falhar por *pitting* a uma determinada tensão S_{ci} . A regra de Miner é então utilizada para calcular o dano d em cada ciclo, sendo definido pela Eq. (9).

$$d_i = \frac{1}{N_i} \quad (9)$$

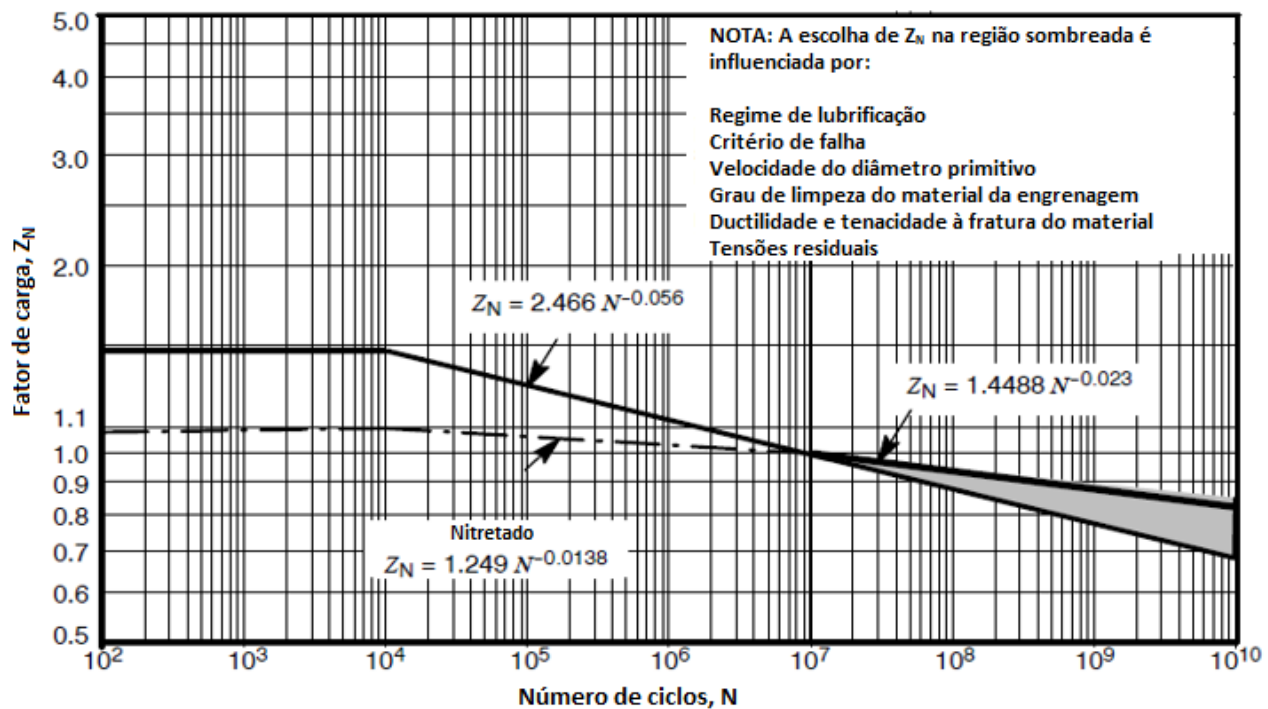


Figura 5. Determinação do fator de vida Z_N . Adaptado de AGMA 2001-D04

3. METODOLOGIA

A metodologia está em fase de desenvolvimento, tanto no aspecto de refinamento dos cálculos quanto na criação de um histórico representativo, já que o lado da engrenagem cuja face do dente ainda não havia sido utilizada começou a operar em 25/02/2016. À medida que os dados forem coletados, mais representativos ficarão os resultados dos danos através da regra de Miner. Os cálculos realizados foram baseados nas Eq. (2) a (9). O estudo de caso contemplou uma bobina com as seguintes características indicada na Tab. 2.

Tabela 2. Características da bobina utilizada no estudo de caso

Material	AISI 304L
Largura	1040 mm
Espessura inicial da chapa	1.2 mm
Espessura final da chapa	0.5 mm
Quantidade de passes	4
Peso	191200 N

A aquisição dos dados foi através do software ibaAnalyser® v. 5.18.0, onde foram coletados valores de tração, velocidade da linha, diâmetro e espessura da bobina, conforme indicado na Fig. 6.

Os resultados de dano parcial obtidos de cada passe são apresentados na Tab. 3. Através dos danos parciais calculados por passe de laminação, pode-se estimar a vida útil à fadiga de contato da coroa da bobinadeira a esquerda do laminador Sendzimir.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos de cada passe são apresentados na Tab. 3. Através dos danos parciais calculados por passe de laminação, pode-se estimar a vida útil à fadiga de contato. Para uma produtividade anual média de 1152×10^3 N, os dados coletados serviriam para auxiliar à equipe de manutenção o melhor momento para inspecionar a coroa.

O resultado apresentado considerou uma bobina com 4 passes de laminação. No entanto, existem materiais que sofrem até 12 passes, o que resultaria em um dano acumulado muito superior, pois além do aumento direto do número de ciclos em função do número de passes, as reduções caracterizam uma menor espessura de processo e maiores ciclos de bobinamento. Realizando uma projeção do dano acumulado da bobina estudada com a produtividade do laminador, a engrenagem teria uma vida útil superior a 30 anos. Esta vida útil é considerada satisfatória para uma engrenagem industrial. O dano poderá ser minimizado se houver a medição e o controle da temperatura do óleo lubrificante da caixa redutora, uma vez que a lubrificação é um agente importante na vida à fadiga por contato.

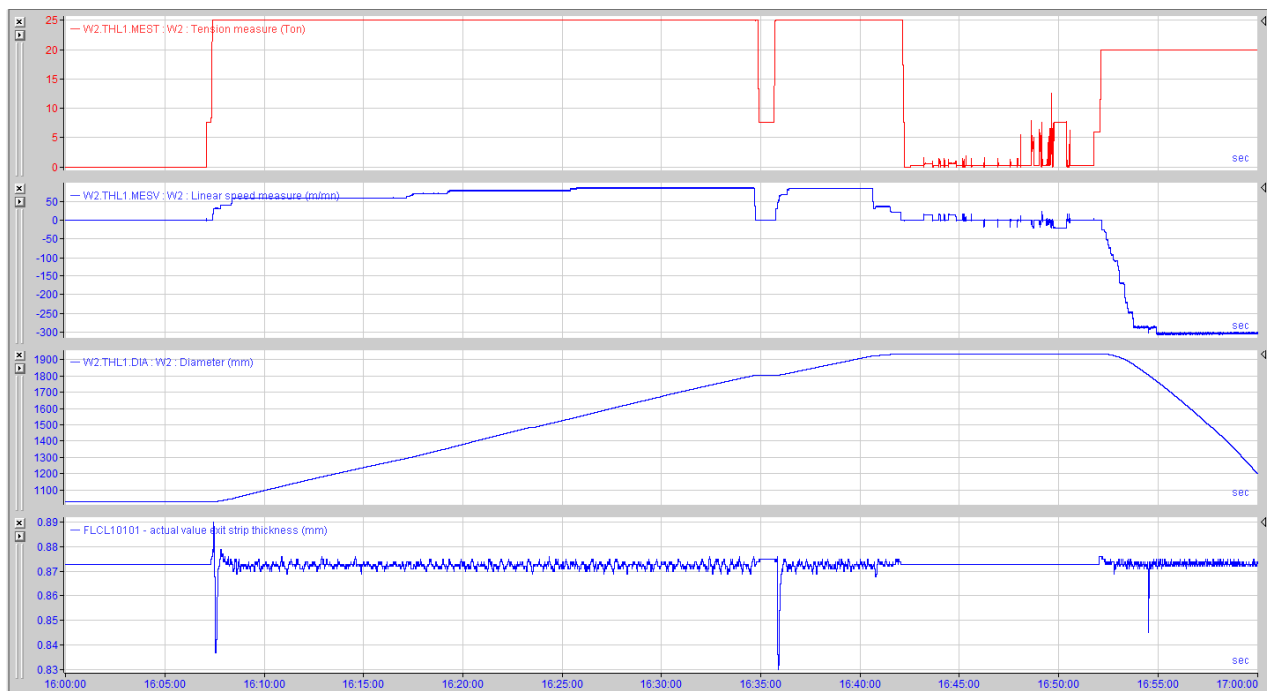


Figura 6. Aquisição de dados dos 4 parâmetros de processo de laminação. Fonte: ibaAnalyser® v. 5.18.0

Tabela 3. Dano acumulado à fadiga de contato conforme regra de Miner para uma bobina laminada

Passes	Dano Parcial
1º Passe de laminação	1.56E-10
2º Passe de laminação	2.36E-09
3º Passe de laminação	7.81E-10
4º Passe de laminação	9.21E-09
Dano Acumulado	1.2507E-08

5. CONCLUSÃO

Através das considerações acerca do mecanismo de dano, da metodologia aplicada e do estudo de caso em uma bobina, podem-se obter os valores de danos parciais conforme a regra de Miner. O resultado obtido para uma bobina revela uma projeção de vida útil para a engrenagem de aproximadamente 30 anos. À medida que mais bobinas forem processadas ao longo do ano de 2016, maior será o banco de dados para o cálculo do dano acumulado. A metodologia aplicada servirá como auxílio à equipe de manutenção para programar a inspeção da coroa e quantificar a gravidade da fadiga por contato (*pittings*). A metodologia não se restringe apenas à engrenagens bi-helicoidais de laminadores Sendzimir, podendo ser aplicada a quaisquer casos em que há registro de parâmetros que servem como base para obtenção da força e velocidade tangencial do par engrenado. Adicionalmente, pode-se criar um método para cálculo do dano acumulado por fadiga de flexão nos dentes, que complementaria a confiabilidade do método, muito embora a falha por fadiga de flexão ocorra em função de algumas variáveis não previstas em projeto.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Aperam South America, CAPES, CNPq, FAPEMIG e Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG pelo suporte para a concretização deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- Alfredsson, B. "A Study on Contact Fatigue Mechanisms". 33p. tese de doutorado- Departamentos Solid Mechanics of Royal Institute of Technology, Estolcomo, Suécia, 2000.
- AGMA 2001 D04, "Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth", 66p.
- Lee Yung-Li, Pan J., Hathaway R., Barkey M., "Fatigue testing and analysis: Theory and Practice", Ed. Elsevier Inc., 2005.
- Mansur, T. R., "Avaliação e desenvolvimento de modelos de determinação de acúmulo de danos por fadiga em um aco estrutural", Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2003.

Radzevich, S. P. "Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture". 2 ed. CRC Press, 2012. 846 p.
Shigley, J. E. e Mischke, C. R., "Mechanical Engineering Design", McGraw-Hill, 5ª Ed., 1989
Socha, G., 2004, "Prediction of the Fatigue Life on the Basis of Damage Progress Rate Curves", International Journal of Fatigue, 26, pp. 339-347.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY TO LIFE PREDICTION IN DOUBLE HELICAL GEARS TRANSMISSION IN SENDZIMIR MILL WINDERS SUBMITTED TO CUMULATIVE CONTACT FATIGUE DAMAGE

Douglas Matias Araújo Alvarenga, douglas.alvarenga@hotmail.com¹

Fábio Aguilar da Silva, fabioag@oi.com.br²

Marcell Filho da Silva Ferreira, eng.marcellferreira@gmail.com²

Paulo Roberto Cetlin, pcetlin@demec.ufmg.br²

Antônio Eustáquio de Melo Pertence, pertence@demec.ufmg.br²

¹Aperam South America, Rua 1º de Maio 09, Timóteo, Minas Gerais, Brasil, 35180-018

²Federal University of Minas Gerais, Av. Antonio Carlos 6627, Campus da Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, 31270-901

Abstract: Sendzimir type mills are widely used in steel mills that produce Stainless steels. A left and a right winder are part of the Sendzimir mill. The winders are driven through electric motors coupled to a gearbox containing a pair of double helical gears that are connected to a mandrel. In this paper is presented the development of a methodology to forecast double helical gear life of Sendzimir winders submitted to cumulative contact fatigue damage. The methodology proposal is based on cumulative damage on the gear teeth through Miner's rule, where the loading records and the gear geometric features are introduced to the life prediction model. The objective is to propose a methodology to be to the maintenance as a control tool in gears life prediction, as well to generate solutions to prolong gear life through modifications of existing maintenance plans.

Keywords: Sendzimir, Miner's rule, Contact Fatigue, Gear, Pitting