



METODOLOGIA DE ENSAIOS TRIBOLÓGICOS EM ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS

Gustavo Garbuio Brandalize

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Av. Sete de Setembro, 3165. Rebouças. Curitiba, PR.
gutobranda@yahoo.com.br

Fabio Koda

fabioKoda@yahoo.com.br

Carlos Henrique da Silva

carloshs@utfpr.edu.br

Resumo: Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma metodologia de ensaios de fadiga de contato em engrenagens cilíndricas de dentes retos. Estes ensaios foram realizados em uma máquina desenvolvida no Laboratório de Superfícies e Contato (LASC), a qual se baseia no princípio de recirculação de potência e é capaz de comparar a resistência ao desgaste de engrenagens fabricadas em diversos materiais. Uma das principais características deste equipamento é a possibilidade de simular as condições de trabalho em campo, principalmente, os movimentos relativos de rolamento e deslizamento. Com o objetivo de provocar a ocorrência do dano superficial denominado de **pitting**, foi adaptada uma metodologia de ensaio, a qual considera diversos níveis de carregamento (pressão de contato), temperatura do lubrificante, rotação e critério de fim-de-ensaio. Além disto, foi desenvolvida também uma metodologia de recebimento de corpos-de-prova, pois sendo as engrenagens modificadas em seu adendo, é necessário verificar o perfil da involuta, além do acabamento superficial. Os resultados preliminares realizados em engrenagens de ferro fundido nodular austemperado mostraram que o equipamento é capaz de provocar o tipo de desgaste desejado. No entanto, algumas não conformidades ainda necessitam de ações corretivas, pois a estabilização da temperatura de ensaio e o método de quantificação da área danificada por **pitting** necessitam de ajustes.

Palavras-chave: Engrenagem, Pitting, Fadiga de contato, Metodologia de ensaio, Ferro fundido nodular austemperado.

1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste artigo é expor o trabalho que está sendo realizado no Laboratório de Superfície e Contato (LASC) da Universidade Tecnológica do Paraná (UTFPR) com relação à construção e utilização de uma máquina para ensaios de fadiga de contato em engrenagens cilíndricas de dentes retos.

No estudo das características tribológicas de um dado sistema, é comum nos depararmos com a seguinte indagação: Que tipo de ensaio de desgaste deve-se realizar para conseguir uma informação que seja representativa do sistema, mas que também satisfaça as limitações de tempo, recursos e análises? Parte desta resposta está na escolha entre os ensaios de campo, os ensaios laboratoriais e a modelagem matemática (HUTCHINGS, 1992). Do ponto de vista da simulação dos eventos característicos de desgaste em engrenagens, *pitting* e *spalling* (ASM, 1990), o LASC optou por obter informações de desempenho destes componentes através de ensaios laboratoriais acelerados.

A literatura (MAGALHÃES *et al.*, 2000; ASLANTAS *et al.*, 2004) especializada no estudo de fadiga de contato em engrenagens mostra uma grande vantagem na utilização de um equipamento de ensaio baseado no princípio da recirculação de potência (*power recirculation rig*). Como este equipamento foi inicialmente desenvolvido no instituto para elementos de máquina *Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau*, ele é mundialmente conhecido como FZG. O equipamento desenvolvido pelo LASC (SANTOS *et al.*, 2006) também segue o mesmo princípio de funcionamento sendo, portanto, denominado de FZG-LASC. Uma das principais características deste equipamento é a possibilidade de simular as condições de trabalho em campo, principalmente, os movimentos relativos de rolamento e deslizamento (BESSON, 2002).

Os ensaios tribológicos que utilizam a máquina FZG seguem normas específicas e necessitam de uma correta caracterização dos corpos-de-prova. Em geral, os equipamentos FZG prevêm a aplicação de 13 níveis de carregamento e diversos níveis de velocidade e temperatura, além de etapas de amaciamento (*runninig-in*) e estado permanente (*steady-state*).

Com o objetivo de padronizar os ensaios realizados no equipamento FZG-LASC, foram propostas metodologias de recebimento de corpos-de-prova, realização de ensaio e análise de resultados.

2. CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

Para a etapa de caracterização das engrenagens foram implementados métodos de verificação do perfil das engrenagens, dimensões principais e acabamento superficial.

2.1 Perfil do flanco da engrenagem

As engrenagens utilizadas nos ensaios da FZG-LASC apresentam perfil de adendo modificado, ou seja, o engrenamento utilizado é do tipo V (STIPKOVIC, 2001). Com este perfil obtém-se uma aceleração dos efeitos danosos da fadiga de contato, reduzindo consideravelmente o tempo de ensaio.

Para a verificação do perfil das engrenagens, foram gerados gabaritos de perfis com o auxílio de *software CAD* conforme os parâmetros de correção de adendo estipulado no projeto das engrenagens. Estes perfis desenhados foram comparados com imagens obtidas a partir de um projetor de perfil com ampliação de 10x.

2.2 Verificação das dimensões principais

Um outro conjunto de informações importantes para a realização destes ensaios são as dimensões principais das engrenagens, tais como diâmetro externo, largura e diâmetro interno do cubo. Com a utilização do projetor de perfis, foi possível também identificar algumas medidas básicas das engrenagens como a altura do dente e a espessura do dente.

Para a verificação da largura, diâmetro externo e interno, tanto do cubo quanto da própria engrenagem, foi utilizado um paquímetro MASSI.

2.3 Acabamento superficial

Para a verificação da rugosidade, as medições foram feitas sobre o flanco dos dentes no sentido axial e transversal, conforme mostra a Figura 1.

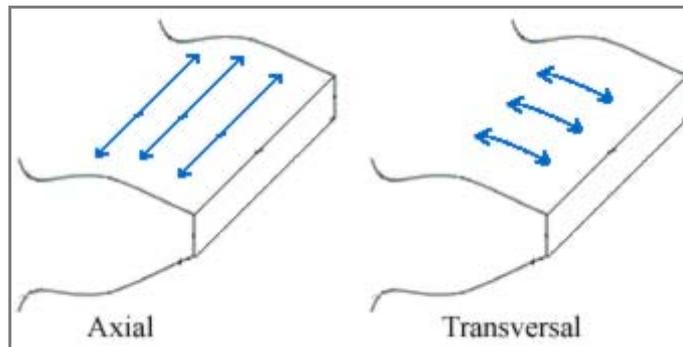


Figura 1: Medições de rugosidade sobre superfície dos corpos de prova.

As medidas de rugosidade foram realizadas com um rugosímetro modelo *Surtronic 25 Taylor/Robson* e as condições de medição estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros para a medição da rugosidade.

Parâmetros	Axial	Radial
Comprimento de medição - l_m	4 mm	0,25mm
Comprimento de corte - l_c (<i>cut-off</i>)	0,8 mm	0,05mm
Filtros	- filtro polinomial de 2° grau (erro de forma) - filtro gaussiano de 0,08 mm (ondulação)	- filtro polinomial de 2° grau (erro de forma) - filtro gaussiano de 0,08 mm (ondulação)

Os dados de rugosidade foram coletados na etapa de recebimento dos corpos-de-prova e também após cada etapa de ensaio para que fosse feito um acompanhamento detalhado das superfícies estudadas. Os parâmetros utilizados para a medição de rugosidade foram limitados devido à forma e tamanho da superfície medida.

3. METODOLOGIA DE ENSAIO

Os ensaios que este equipamento é capaz de realizar são padronizados para cada tipo de falha de fadiga de contato, estaremos neste trabalho dando enfoque à ocorrência de *pitting* na superfície do flanco.

Para a realização do ensaio de *pitting*, será utilizado o mesmo procedimento padronizado pelo instituto *Technische Universitat Arcisstraße* (FZG, 1992). O ensaio pode ser dividido em duas etapas: a primeira refere-se ao *running-in* e a segunda às condições de ensaio de *pitting* (*steady-state*).

Para uma melhor compreensão do método empregado, um desenho esquemático detalhado do equipamento FZG-LASC está apresentado na Figura 2, a qual mostra a máquina e alguns de seus acessórios.

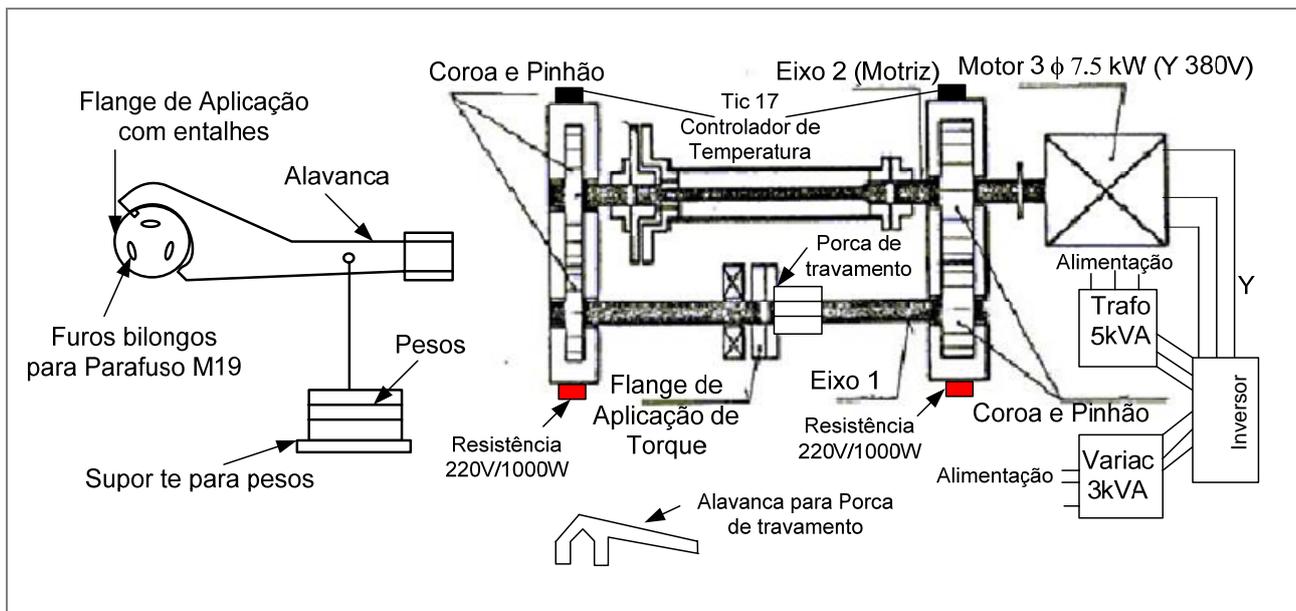


Figura 2: Esquema detalhado da máquina.

Para ajustar a velocidade de trabalho nos dois eixos, é necessário verificar a relação de transmissão, pois o eixo 1 deverá girar á 1450 rpm. A Equação 1 mostra o cálculo das rotações em cada eixo, dependendo do número de dentes das engrenagens. No caso em questão Z_1 e Z_2 são o número de dentes das engrenagens montadas nos eixos 1 (movido) e 2 (eixo árvore). Uma informação importante na Figura 2 é que o torque no eixo 1 (T_1) é aplicado pelo braço de alavanca.

$$i = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$\frac{24}{16} = \frac{1450}{n_2}$$

$$n_2 = 967 \text{ rpm}$$

(1)

A Figura 3 mostra o fluxograma da metodologia proposta para o ensaio de *pitting* segundo a FZG 1992 e seus devidos parâmetros.

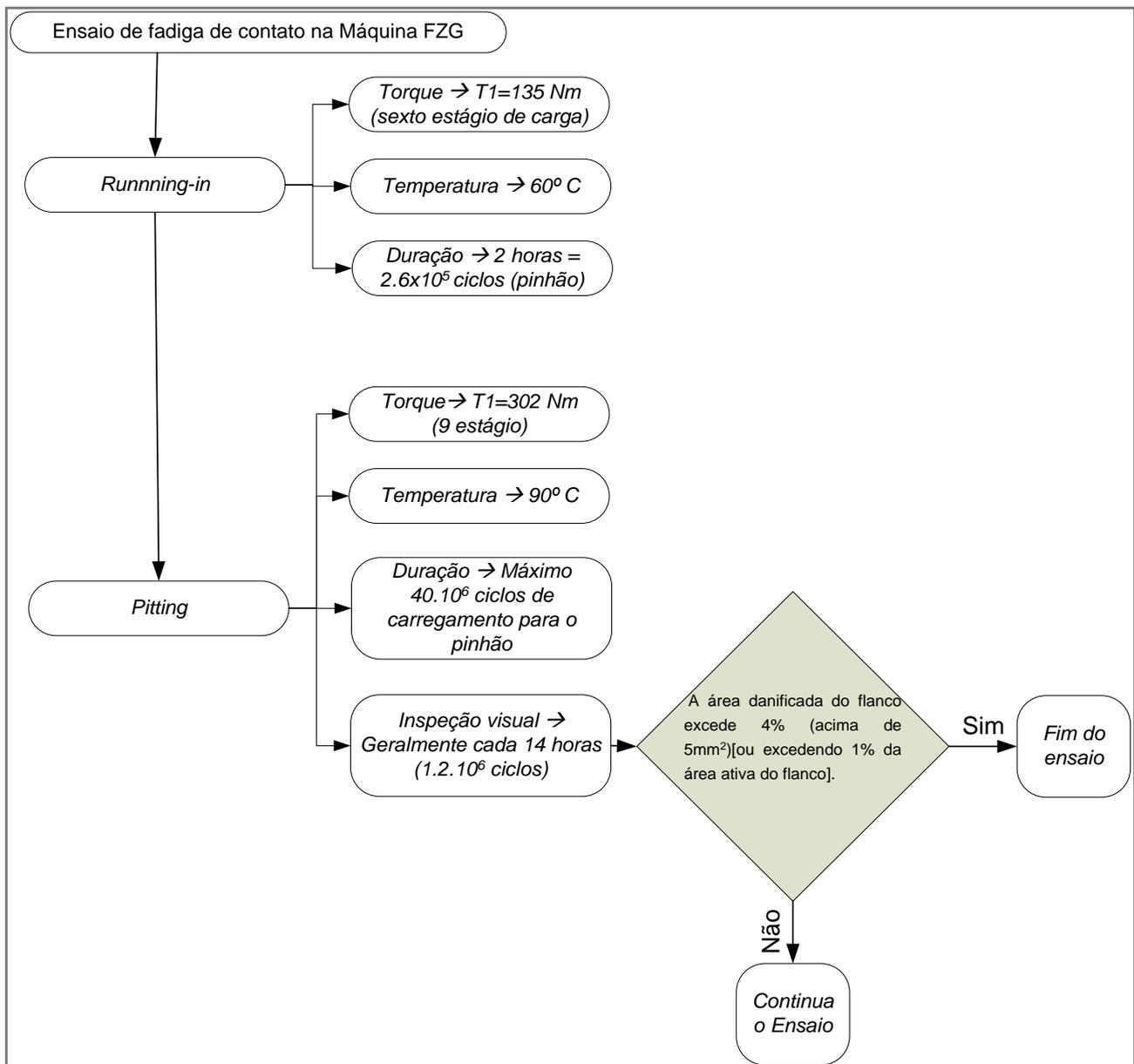


Figura 3: Metodologia de ensaio FZG-LASC

Cada par de engrenagens é testado para ambos os flancos. O flanco sem carregamento é revestido com uma camada de líquido (*Dykem red* ou tinta para peças metálicas).

Para o cálculo da área afetada, após cada etapa do ensaio foram tiradas fotos dos flancos dos corpos de prova em estudo antes e após os ensaios com o auxílio do estereoscópio. A porcentagem afetada é calculada com o uso de um *software* analisador de imagens e por meio de comparações entre as superfícies antes e após o ensaio. É importante ressaltar que para a verificação da área danificada por *pitting* no flanco do dente poderá ser utilizado um analisador de imagem com selecionamento por polígonos da área danificada e depois será feita a contagem da área ou, ainda, poderá ser utilizado um revelador para ressaltar esta área danificada.

Alguns parâmetros fornecidos pelo inversor de frequência foram monitorados, que são: torque no motor (função P009), corrente no motor (função P003), tensão de saída (função P007), tensão no *Link CC* (função P004), potência de saída do inversor (função P010) além da temperatura fornecida pelo TIC 17.

O óleo a ser utilizado no projeto será o ISO VG 100, que é um fluido hidráulico de base mineral, isento de zinco, com elevada estabilidade térmica e elevada propriedade antidesgaste, seu índice de viscosidade é de 100. Os ISO VG100 são recomendados para uso em sistemas hidráulicos contendo componentes de prata e possuem excelente desempenho antidesgaste quando comparados aos fluidos à base de zinco (Castrol, 2007).

4. RESULTADOS PRELIMINARES

4.1 – Caracterização do perfil

A Figura 4 mostra uma comparação feita entre a projeção do perfil da engrenagem utilizando o projetor de perfis e o perfil gerado em *software CAD*. A Figura 4 (a) corresponde a um perfil não conforme e a Figura 4 (b) a um perfil em conformidade. Tal verificação se faz necessária devido ao perfil das engrenagens ser modificado para um melhor desempenho dos ensaios da FZG-LASC.

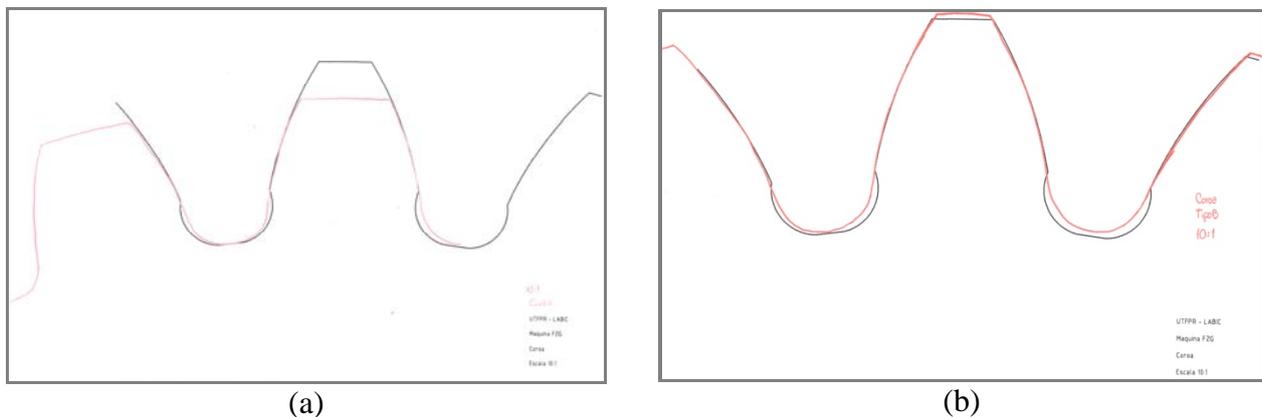


Figura 4: Comparação do perfil projetado com o perfil gerado via *software CAD*. a) Perfil não conforme. b) Perfil em conformidade.

4.2 – Rugosidade

Constata-se um aumento da rugosidade Ra média no sentido axial para coroa após o ensaio de *running-in* (Figura 5 (a)) e o mesmo acontece para o pinhão no sentido axial (Figura 5 (b)), porém as rugosidades radiais se mantiveram instáveis, aumentando em alguns dentes e diminuindo em outros. Os valores de rugosidade radiais para coroa estão presentes na Figura 6 (a) e para o pinhão na Figura 6 (b).

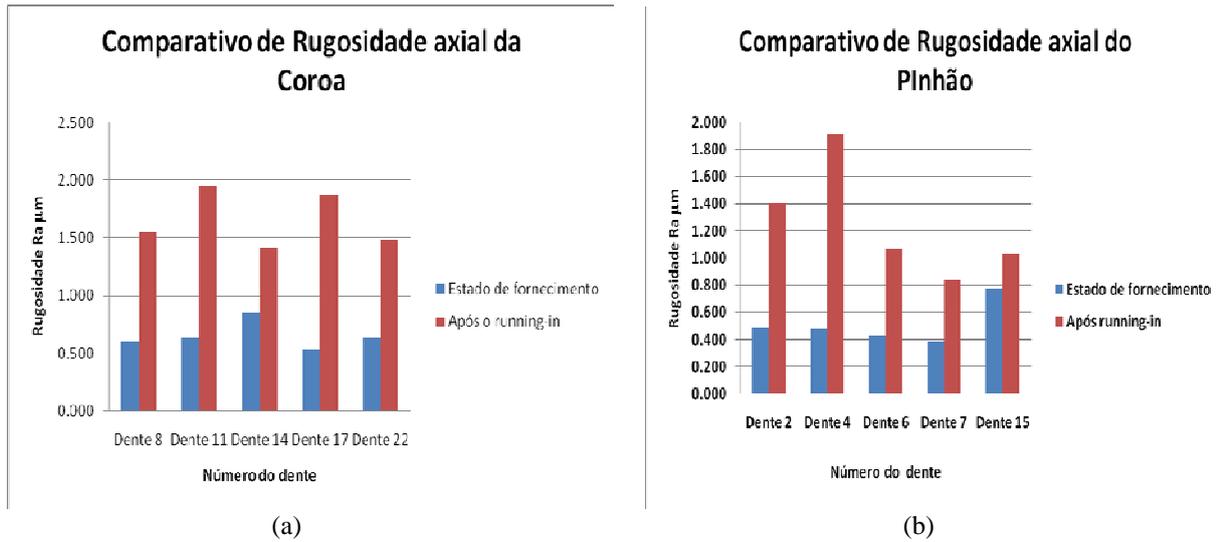


Figura 5: Comparativo de rugosidades no fornecimento e após o *running-in*. a) Rugosidade Ra da coroa axial. b) Rugosidade Ra do pinhão axial

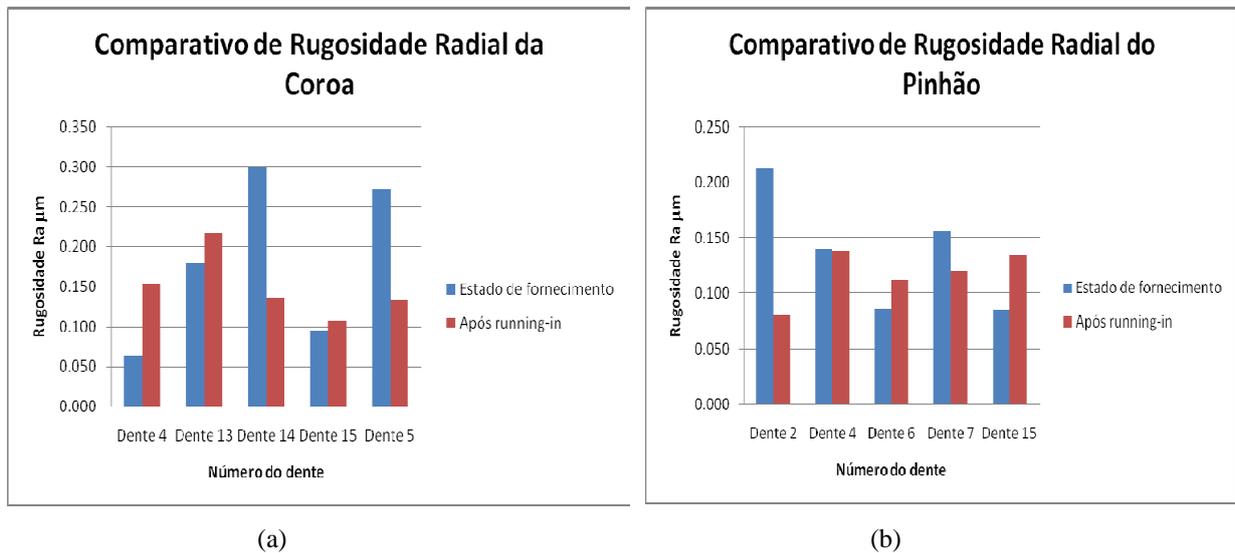


Figura 6 : Comparativo de rugosidades no fornecimento e após o *running-in*. a) Rugosidade Ra da coroa radial, b) Rugosidade Ra do pinhão radial.

4.3 – Superfície do flanco

A macrografia da superfície do flanco da engrenagem foi realizada no estado de recebimento (Figura 7 (a)) e após o ensaio de *running-in* para verificação de ocorrência de danos (Figura 7 (b)).

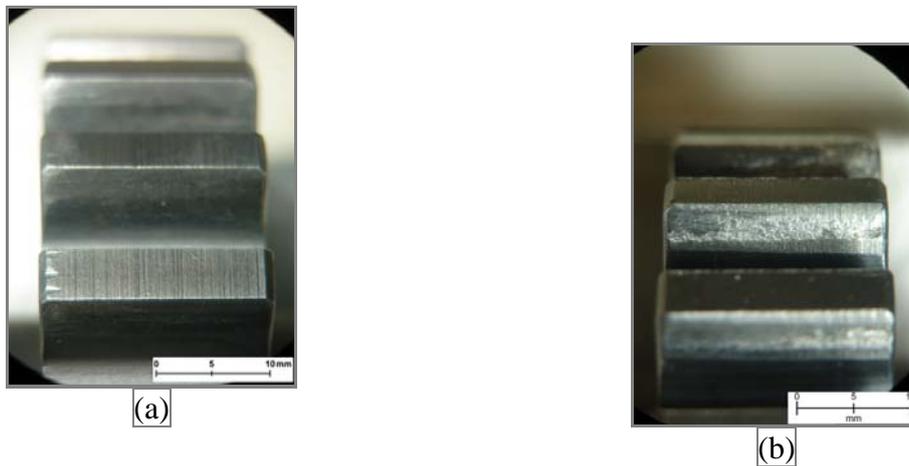


Figura 7: Macrografia do estado da superfície de contato do dente 8 da coroa.
a) Recebimento. b) Após o ensaio de *running-in*.

Não foi possível medir a rugosidade devido às crateras (*spalling*) nos flancos das engrenagens. A Figura 8 (a) mostra o dente 8 da coroa na condição após *running-in* e a Figura 8 (b) mostra o dente 2 do pinhão após o ensaio de *pitting*.

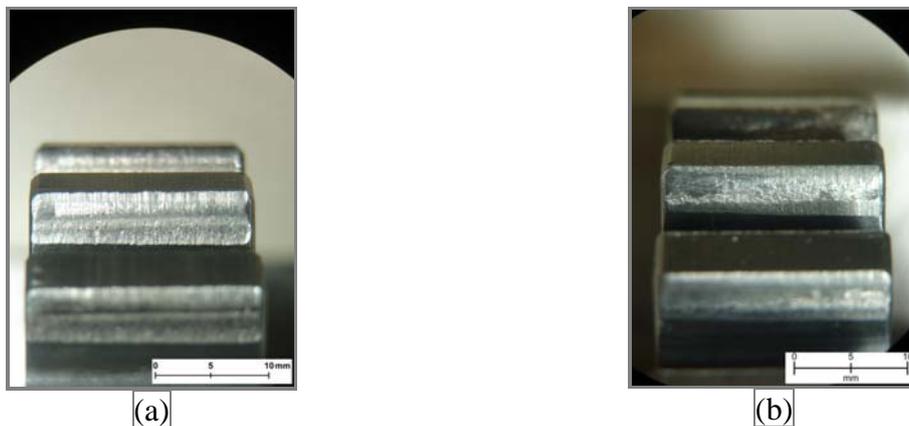


Figura 8: Macrografia da superfície de contato do dente 8 da coroa a) *Running-in*. b) Após o ensaio de *pitting*.

5. CONCLUSÕES

Neste ensaio preliminar foram constatadas algumas não conformidades tais como a temperatura fora da faixa de tolerância aceitável para o ensaio e a dificuldade em quantificar a área danificada após o ensaio.

As hipóteses levantadas para o aquecimento elevado levam em conta o perfil errado das engrenagens de teste (altura do dente e largura do flanco fora das especificações), o que aumenta a área de contato dos dentes e, por conseguinte o atrito que eleva a temperatura.

Constatou-se que os danos de *pitting* acontecem, porém existem dificuldades metodológicas para quantificá-lo. Alguns métodos propostos incluem a utilização de *software* analisador de imagens e o selecionamento por polígonos da área danificada juntamente com a posterior contagem da área.

A rugosidade axial aumentou após a etapa de amaciamento (*running-in*), porém a radial fica instável. Após o ensaio de *pitting* (*steady-state*), não foi possível medir a rugosidade devido a grande profundidade das crateras geradas pela fadiga de contato.

6. AGRADECIMENTOS

Aos nossos colegas e ao apoio da Tupy Fundições Ltda.; Wieser, Pichler & Cia Ltda; WEG Indústrias SA; Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica e Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica que colaboraram imensamente com nosso projeto.

7. REFERÊNCIAS

- ASLANTAS, k.; TASGETIREN, S. “A study of spur gear pitting formation and life prediction”, *Wear*, Vol. 257, pp 1167–1175, 2004.
- ASM Handbook, Failure Analysis and Prevention, Vol. 11, p. 843, EUA, 1990.
- BESSON, J-M; ANTONIE, F. Simplified modellization of gear micropitting; *ImechE* 2002.
- FZG. Description of the pittingtest. Technische Universitat Arcisstraße ,1992.
- HARDING, R.A. “The use of austempered ductile iron for gears”, *Proceedings of the 2nd World Gear Congress, Paris, 1986.*
- HUTCHINGS, I. “Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials”. Edward Arnold-Londres, 1992, p 273.
- IZCILER, M.; Tabur, M.; “Abrasive wear behavior of different case depth gas carburized AISI 8620 gear steel”, *Wear*, Vol. 2260, pp. 90-98, 2006.
- MAGALHÃES, L; SEABRA, J; SÁ, C, “Experimental Observations of contact Fatigue Crack Mechanisms for Austempered Ductile Iron (ADI) discs”, *Wear*, Vol. 246, pp. 134-148, 2000.
- STIPKOVIC, M.. Engrenagens. Printon, 2001
- SANTOS, Thiago M. C. A. dos; KODA, Fábio; SILVA, Carlos H. da. Desenvolvimento de Equipamento para Estudo do Fenômeno de Fadiga de Contato Utilizando Sistemas Tribológicos com Engrenagens. IX Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR,2006.
- http://www.castrol.com/liveassets/bp_internet/castrol/castrol_brazil/STAGING/local_assets/download/t/TDS_Hyspin_AWS_Linha_Brasil_10062004.pdf Acesso em:13 de junho de 2007.

TRIBOLOGICAL SPUR GEARS TEST METHODOLOGY

Gustavo Garbuio Brandalize

Federal University of Technology - Paraná, Av. Sete de Setembro, 3165. Rebouças. Curitiba, PR.
gutobranda@yahoo.com.br

Fabio Koda

fabioskoda@yahoo.com.br

Carlos Henrique da Silva

carloshs@utfpr.edu.br

Abstract: *This paper has as main objective the development of a spur gear fatigue contact test methodology. These tests have been performed with a machine that has been built by the Contact and Surface Laboratory (LASC), which is based on the power recirculation principle and is capable of compare the gear's wear resistance between different materials. One of the main characteristics of this equipment is the possibility of simulate the working conditions, specially the relative movements of rolling and sliding. Aiming to cause a surface damage named pitting, a test methodology has been adapted, which takes into account the different load levels (contact pressure), the lubricant temperature, the rotation and the end-of-test criterion. Additionally, a methodology for receiving new samples has been developed. Given the fact that the gears have modified addendum, a involute profile verification is necessary, as well as the verification of the superficial finishing. The preliminary results obtained with austempered ductile iron gears have shown that the equipment is capable of causing the desired damages. However, some non-conformity is still requiring corrections in order to stabilize the test temperature and to quantify the pitted area.*

Keywords: *Gears, Pitting, Contact fatigue, Test methodology, austempered ductile iron.*