

MOIRÉ SUPPORTED STRESS DISTRIBUTION STUDY ON GEARS
/

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE MOIRÉ NO ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS EM ENGRENAGENS

BSAE. Stud. Eng. Villa D.¹⁾, Prof. Ph.D. Eng. Gazzola J.²⁾, Prof. Ph.D. Eng. Dal Fabbro I.M.¹⁾,
Ph.D. Stud. Eng. Silva M.V.G.¹⁾,

¹⁾Faculty of Agricultural Engineering, UNICAMP, Campinas, SP, Brazil; ²⁾Department of Agricultural Engineering, UFS, Aracaju, SE, Brazil
Tel: +55 19 3521-1059; E-mail: inacio@feagri.unicamp.br

Abstract: Gears are widely employed in farm machinery transmission units. However, the severe environment imposed to the machine operation generates special problems associated to maintenance, as well as to the expected time life. Machinery which works on field are exposed to excessive dust, moisture, heat, chemicals, uneven mechanical loading and quite frequently the manufacturer recommendations are not adequate or not even available. Based on that, the proposal of new methods for strain and stress distribution analysis on gears under different working conditions is considered necessary. This research paper introduces the application of moiré methods to replace the popular strain gage technique. The proposed method is included in the photomechanical techniques and is considered of easy as well as of low cost application. The moiré family of methods is based on the projection of optical grids onto the object under analysis, generating optical fringes which displace as the object is deformed under mechanical loads. In this research work the tests were carried under different working conditions, as (1) non lubricated clean gears, (2) clean and lubricated, (3) lubricated and contaminated with soil. The comparison of these three situations indicated the influence of soil contamination as well as of the lubrication. The conclusion emphasizes the application of the proposed method to gear transmission design as well as to maintenance.

Key words: gear design, gear maintenance, moiré methods, photoelastic moiré

INTRODUCTION

Farm machinery works quite often in severe environments which are hazardous to the equipment time life as well as to the maintenance procedure and chronogram. The objective of this research work was to study the effects of lubrication and dirt on gears deformation and stress loading which directly affects time working life. The experimental procedure of this research includes the application of a moiré photoelastic technique, specifically the shadow moiré. Hertz contact stress theory assumes that the pressure exerted by spheres in contact follows an elliptical distribution [8,12]. Equations associated to that theory are important to numerical calculation, as well as, its use with finite elements to promote numerical simulations [3,10]. Numerical simulation shows that gear failure occurs due to certain kind of mechanical loading, as contact loading due normal stress and loading placed on teeth root [14]. Stress distribution on coupled gears is concentrated on regions of gears contact, on teeth root and stress concentration is distributed along specimen with some displacement in the same direction of gear rotation [15].

Resumo: Elementos de transmissão são bastante aplicados a projetos de máquinas agrícolas e a engrenagem figura como um dos mais aplicados. Porém, o ambiente severo dos meios agrários exigem maiores cuidados no projeto de máquinas. Problemas como sujeira e ausência de lubrificação em engrenagens induzem a tensões que podem sair do comportamento esperado. Softwares de simulação computacional não são hábeis em determinar tais comportamentos devido à sua complexidade. Técnicas fotomecânicas analisam qualitativamente a distribuição de tensão em corpos indiferente de sua geometria em situações de carregamento adversas. Entre as técnicas fotomecânicas, destaca-se a técnica de moiré. Neste trabalho de pesquisa, objetiva-se analisar o comportamento mecânico de engrenagens sujeita a ação de contaminação por terra e por falta de lubrificação. Duas engrenagens de dente reto tiveram cargas aplicadas sob três situações: Limpa e sem lubrificação; Limpa e Lubrificada; Contaminada e sem lubrificação. Os dados da engrenagem limpa e sem lubrificação foram rebatidos com os resultados das outras duas situações. Os resultados mostraram a influência dos agentes contaminante e lubrificante sobre o comportamento mecânico de engrenagens. O trabalho é concluído com informações importantes para ser aplicados em projetos de transmissão por engrenagens.

Palavras-chave: Projeto de Máquinas Agrícolas; Engrenagens; Técnica de Moiré de Sombra

INTRODUÇÃO

Máquinas agrícolas trabalham frequentemente em ambientes severos ao qual são nocivos ao tempo de vida útil dos equipamentos, tão bem como, ao procedimento e cronograma de manutenção. O objetivo deste trabalho de pesquisa foi estudar os efeitos da lubrificação e da sujeira na distribuição de tensão e deformação em engrenagens ao qual afeta diretamente sua vida útil de trabalho. O procedimento experimental deste trabalho de pesquisa include a aplicação da técnica fotoelástica de moiré, especificadamente a técnica de moiré de sombra. A teoria de contato de Hertz assume que a pressão desenvolvida por esferas em contato apresenta uma distribuição elíptica [8,12]. As equações associada à teoria são importante para o cálculo numérico, tão bem como, seu uso com elementos finitos para promover a simulação numérica [3,10]. Simulação numérica mostra que a ruptura em engrenagens ocorre devido a certos tipos de carregamento mecânico, como carregamento de contato devido às tensões normais e carregamentos localizados no pé do dente [14]. A distribuição de tensão em engrenagens acopladas fica concentrada nas regiões de contato, na raiz do dente e a concentração de tensão está distribuída ao longo do corpo de prova com alguns deslocamentos na mesma direção de rotação da engrenagem [15]. A fotoelasticidade é uma família de

The photoelasticity is a family of methods of experimental stress and strain analysis applied in evaluating, validating and developing of structural elements which is subjected to mechanical loadings. Photoelastic techniques permit determining strain and deformation at any point of interest on the structural element [6]. Stress direction and intensity are obtained from the information provided by the isocline and isochromatic fringes [13]. Isocline fringes inform regions which every main stresses exhibits the same direction, meanwhile the isochromatics inform regions where is able to obtain the angle between main stresses [17]. Photoelastic methods do not include destructive procedures and can be applied on structural members of any geometric configuration [1,4]. The *moiré* phenomenon is generated when screens of certain mesh density are superposed, producing waves like patterns or fringes, which move when its relative positions are displaced [7,11]. The selected method for this research work is named shadow *moiré*, which consists in generating an interference pattern with a grid before the object in study and its shade project onto the object [5,16]. *Moiré* interferometry gives support to similar photoelastic techniques, allowing similar applications as the conventional methods, presenting high precision and confidence as well. *Moiré* methods require low cost experimental setups and generate reliable results [2,9]. The objective of this research work is to carry on shadow *moiré* technique to determine stress distribution on coupled gears under compressive stress loading. Tests will be carried with clean gears, lubricated gears and lubricated dirt gears.

MATERIAL AND METHODS

The selected experimental setup to carry the shadow *moiré* tests in this research work included a SAMSUNG digital camera 7.1 mega pixels with remote control to avoid undesired movement, a white light source, a set of Ronchi grids of 0.2 mm period, a loading press, considered appropriate to carry Shadow *Moiré* tests, as recommended by [2]. Testing gears were coupled and diametrically loaded and the grid was placed in front of the specimen, before the light source and the digital camera, in an angular position as shown on Figure 01. Loaded and non-loaded specimen images were captured through the following procedure: (1) The Ronchi grid was projected onto the gears surface with no load and photographed to generate the image $I_1(x,y)$. (2) The grid was projected onto the gears under traction loads of 05 kgf, 10 kgf and 30 kgf, generating the images $I_2(x,y)$, $I_3(x,y)$ and $I_4(x,y)$ respectively. Image processing included the application of the software ImaeJ and Kilimanjaro. Image from load and non-load gears was captured and processing, including the creation of masks.

In this test, three different diametrical loads were applied on the coupled gears as 5 kgf, 10 kgf and 30 kgf. The 05 kgf and 10 kgf loads augmented the contact area between teeth, however the 30 kgf load rotated the gears from their original position besides of increasing the contact area.

métodos experimentais de análise de tensão e deformação específicas aplicadas para a avaliação, validação e desenvolvimento de elementos estruturais ao qual está sujeito a carregamentos mecânicos. Técnicas fotoelásticas permitem determinar tensão e deformação em qualquer ponto de interesse no elemento estrutural [6]. A direção e a intensidade das tensões são obtidas de informações providas da análise das franjas isóclinas e isocromáticas [13]. Franjas insóclinas informam regiões na qual todas as tensões principais exibem a mesma direção, enquanto que as franjas isocromáticas informam regiões onde é possível de se obter o ângulo entre as tensões principais [17]. Métodos fotoelásticos não incluem procedimentos destrutivos e podem ser aplicados em membros estruturais de qualquer configuração geométrica [1,4]. O fenômeno *moiré* é gerado quando duas telas de mesma densidade de malha são superpostas, produzindo ondas padrões ou franjas, ao qual movem-se quando sua posição relativa é deslocada [7,11]. O método selecionado para este trabalho de pesquisa é chamado de *moiré* de sombra, e consiste na geração e interferência das franjas padrões com uma grade posicionada antes do objeto em estudo e sua sombra projeta sob o objeto [5,16]. A interferometria *moiré* dá suporte a técnicas fotoelásticas similares, permitindo similar aplicação como os métodos convencionais, apresentando alta precisão e confiabilidade. O método *Moiré* requer equipamentos de baixo custo para o arranjo experimental e gera resultados confiáveis [2,9]. O objetivo deste trabalho de pesquisa foi desenvolver a técnica de *moiré* de sombra para determinar a distribuição de tensão e deformação em engrenagens acopladas sob tensão de compressão. Os ensaios foram feitos com engrenagens limpas, engrenagens lubrificadas e engrenagens lubrificadas e com presença de sujeiras.

MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios fotomecânicos foram levados a cabo no Laboratório de Óptica da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, localizado na cidade de Campinas/SP. Como corpo de prova selecionou-se duas engrenagens cilíndricas de dentes retos confeccionadas em material plástico. Uma mesa metálica foi utilizado para dar suporte aos corpos de prova. O arranjo experimental para o ensaio de carregamento ainda incluiu uma prensa hidráulica acoplada a sensores para determinar o módulo do carregamento. O ensaio fotomecânico de *moiré* incluiu uma grade Ronchi com período de 0,2 mm, um projetor multimídia da marca SONY e uma câmera digital da marca SAMSUNG de 6,1 Mega Pixels com controle remoto para a captura de imagens, prevenindo qualquer tipo de movimentação indesejável, como recomendado por [2]. O corpo de prova foi pintado de cor branca fosca para que as franjas padrões apresentassem maior contraste. A grade Ronchi foi posicionada frontalmente ao corpo de prova conforme está indicado na Figura 1 a qual ilustra o arranjo experimental utilizado para este trabalho de pesquisa.

Para este trabalho de pesquisa, três taxas de carga foram aplicadas no ensaio de carregamento (5, 10 e 30 kgf) e em três situações de trabalho diferentes, tais como, engrenagem limpa, lubrificada e lubrificada com sujeira.

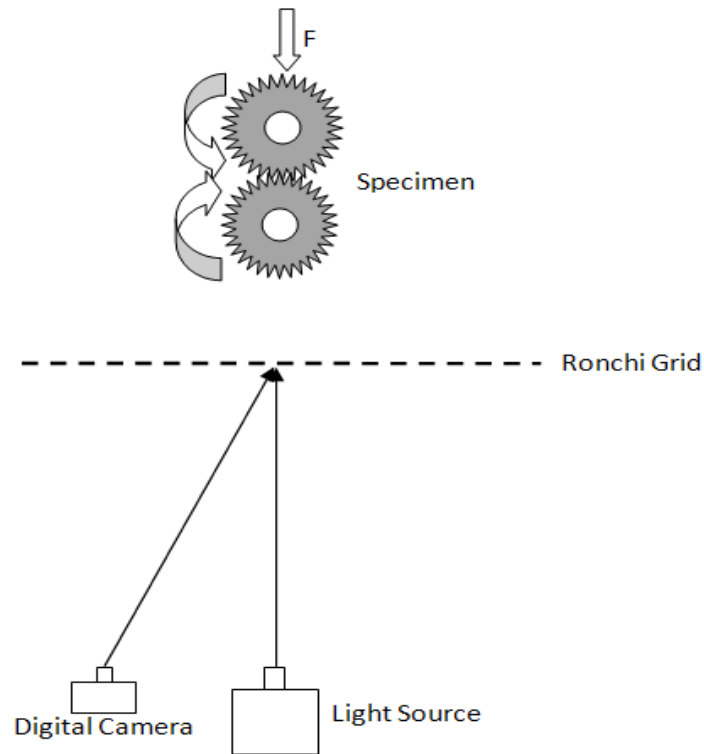


Fig. 1 – Shadow *moiré* setup selected to carry diametrical load on the coupled gears

RESULTS AND DISCUSSIONS.

Figures 2, 3 and 4 exhibits the resulting isodeformation maps as obtained through the shadow *moiré* method respectively for clean gears, lubricated gears and lubricated dirt gears.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 2, 3 e 4 mostram os resultados do mapa de isodeformações, obtidos pela técnica de *moiré* de sombra para os casos de: engrenagem limpa, engrenagem lubrificada e engrenagem lubrificada com sujeira, respectivamente.

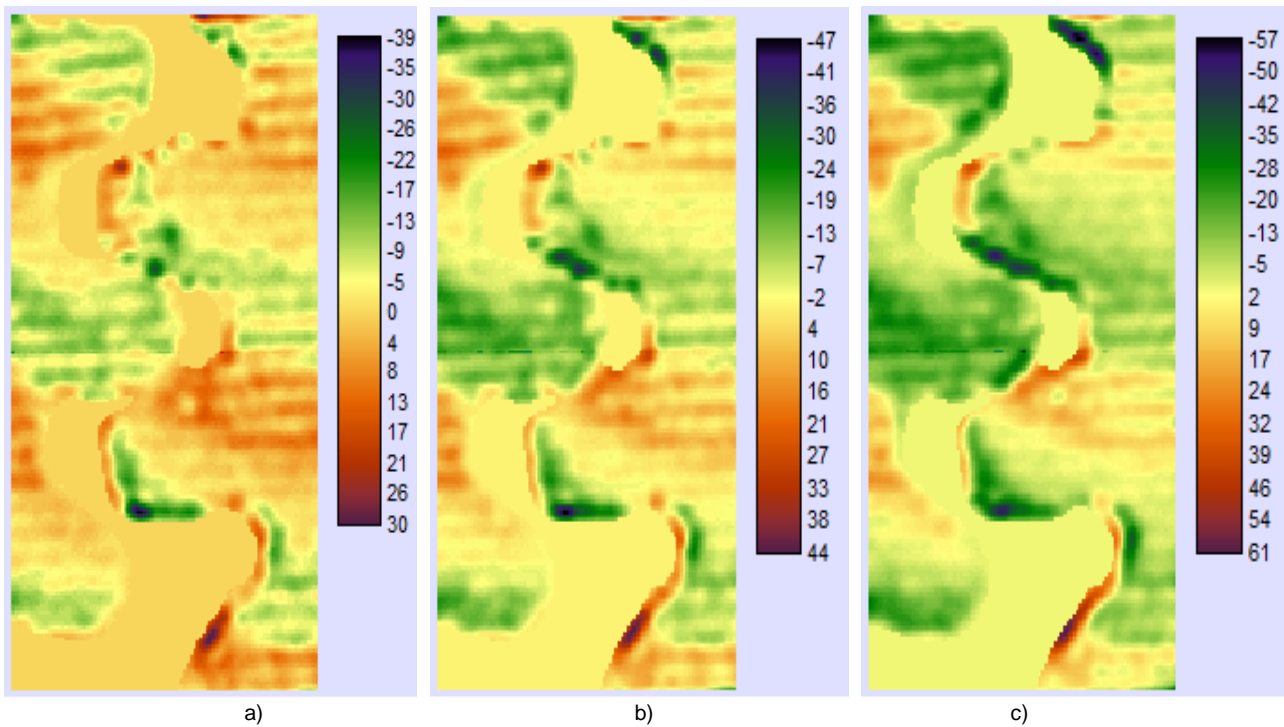


Fig. 2 - Isodeformation maps of clean gears loaded with:
a) 05 kgf. b) 10 kgf. c) 30 kgf

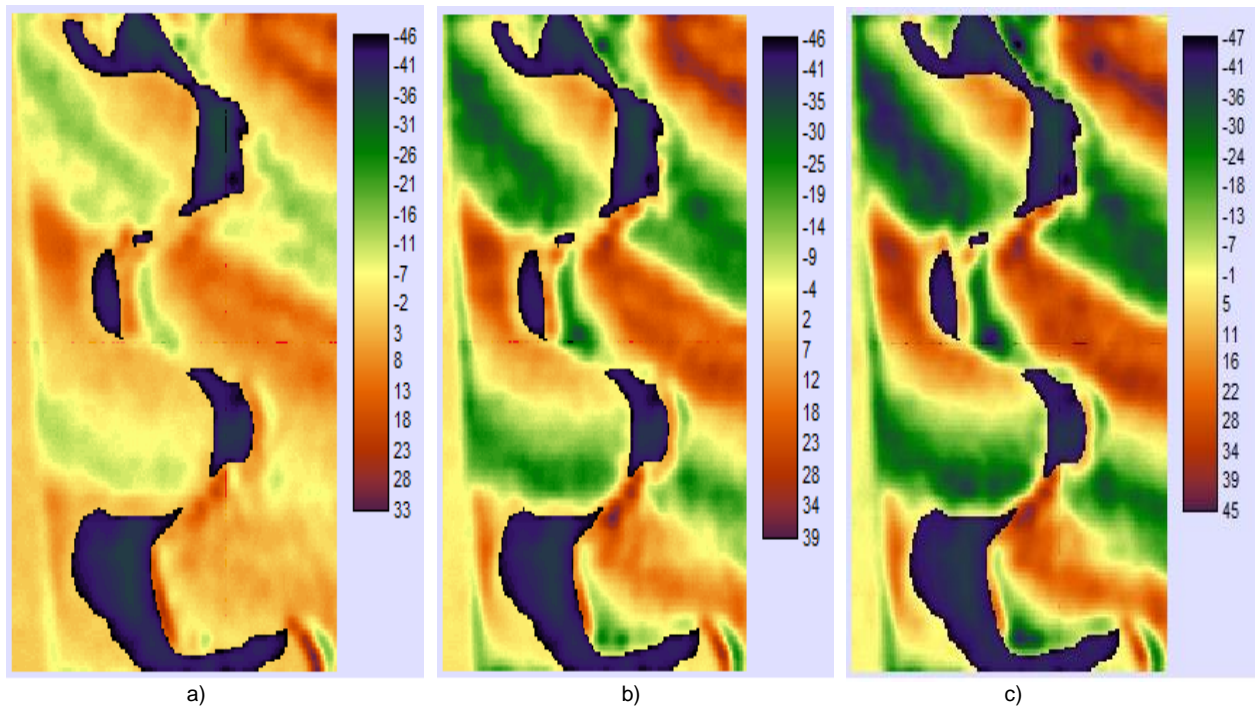


Fig. 3 - Isodeformation maps of lubricated gears loaded with:
a) 5 kgf. b) 10 kgf. c) 15 kgf

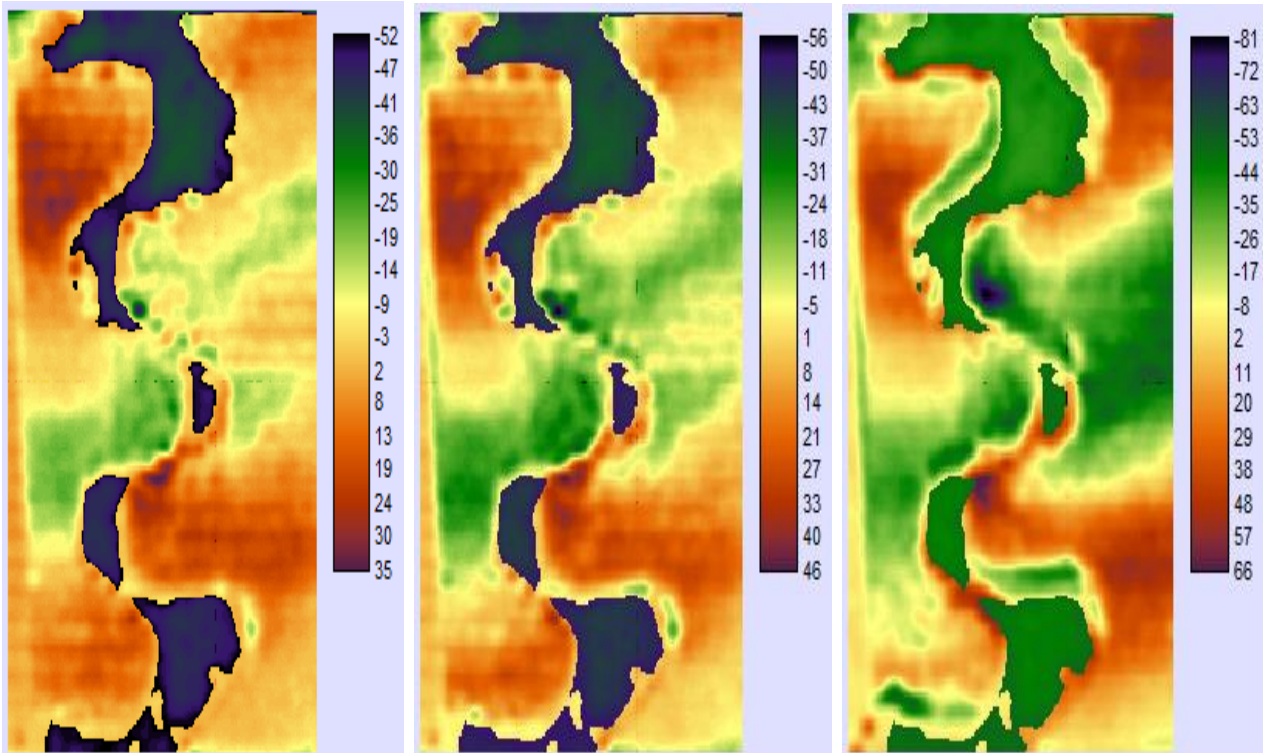


Fig. 4 - Isodeformation maps of lubricated dirt gears loaded with:
a) 5 kgf. b) 10 kgf. c) 30 kgf

Figures 5, 6 and 7 shows the isoclinics and isochromatic curves as obtained by the moiré method for respectively for clean gears, lubricated gears and lubricated dirt gears.

As Figuras 5, 6 e 7 mostram os resultados de franjas isocromáticas e isoclínicas, obtidos pela técnica de moiré de sombra para os casos de: engrenagem limpa, engrenagem lubrificada e engrenagem lubrificada com sujeira, respectivamente.

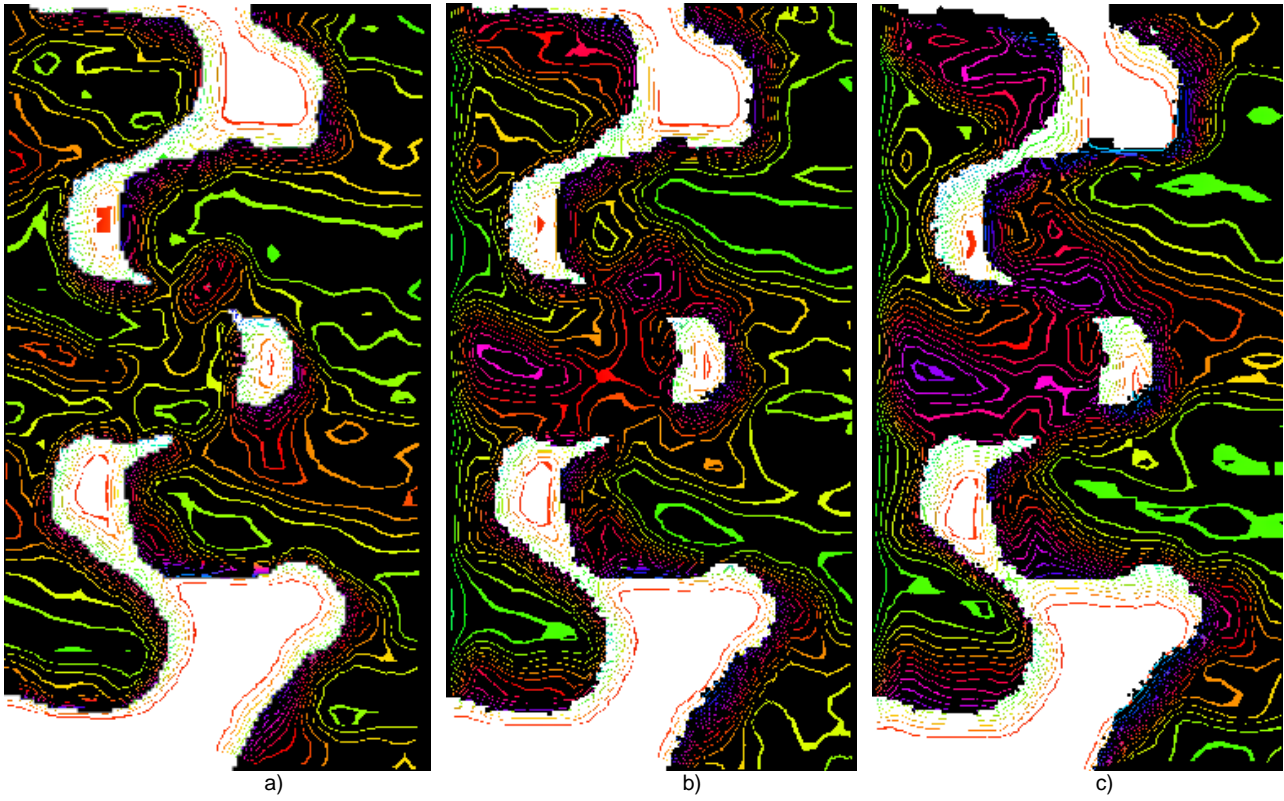


Fig. 5 - Isoclinics and isochromatics curves for clean gears loaded with: a) 5 kgf. b) 10 kgf. c) 30 kgf

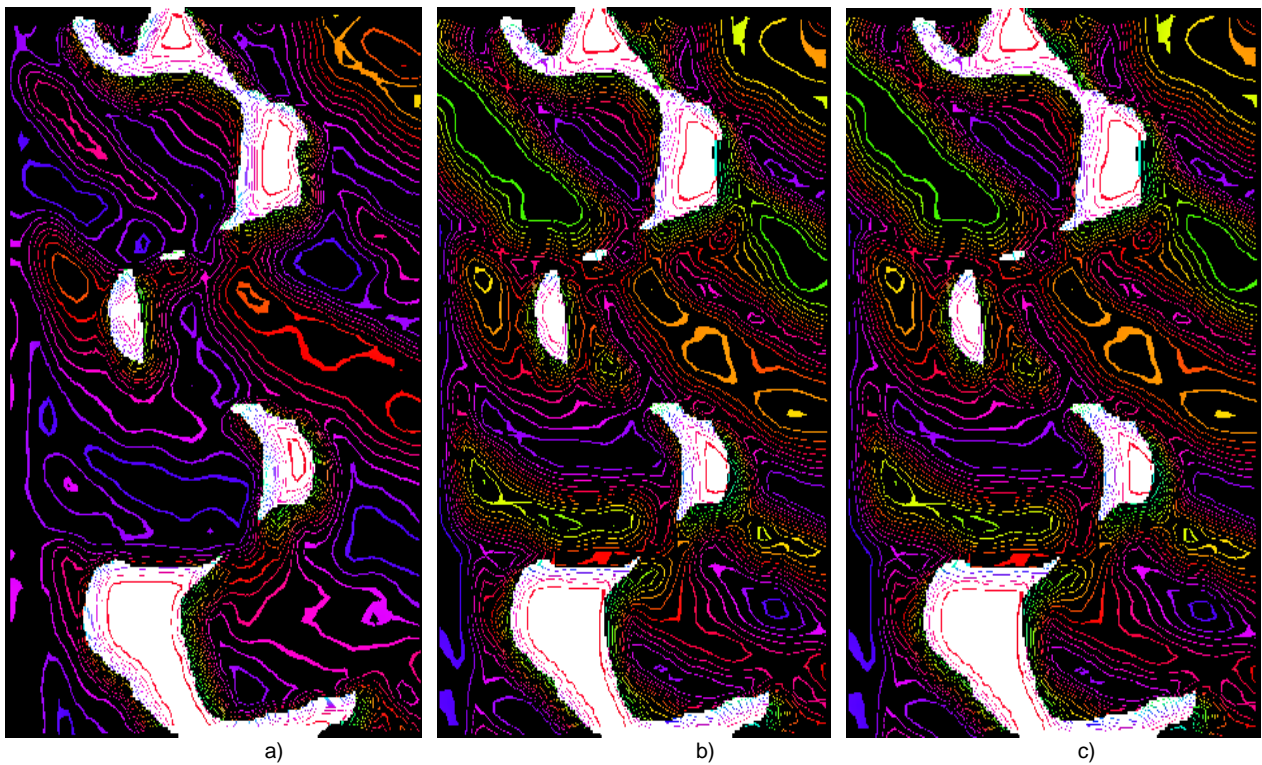


Fig. 6 - Isoclinics and isochromatics curves for lubricated gears loaded with: a) 5 kgf. b) 10 kgf. c) 30 kgf

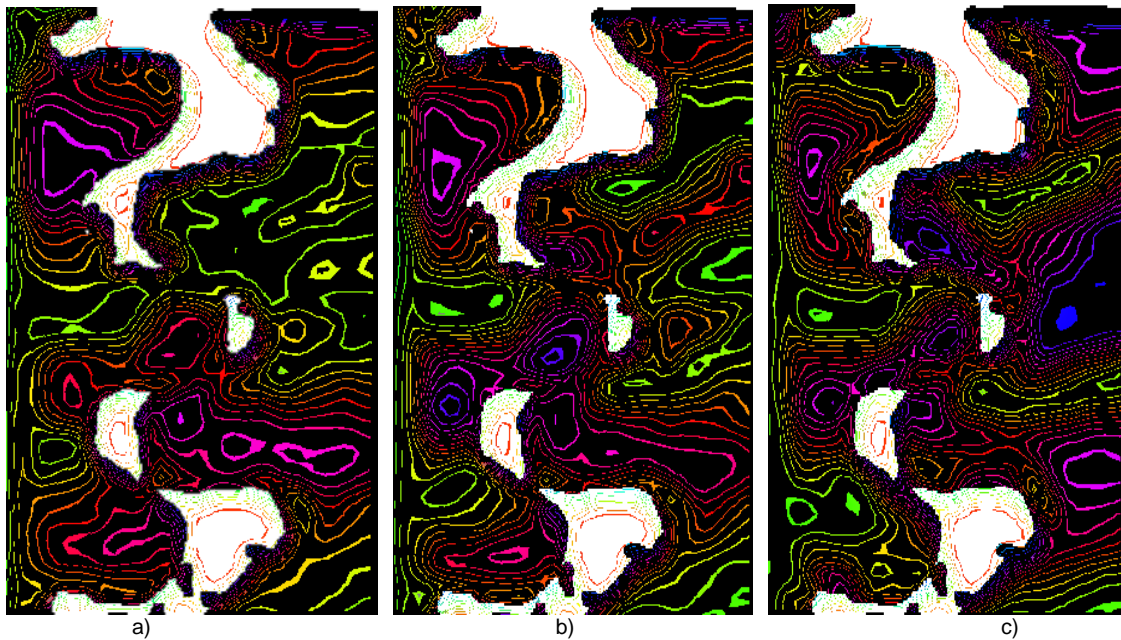


Fig. 7 - Isoclinics and isochromatics curves for lubricated dirt gears loaded with:
a) 5 kgf. b) 10 kgf. c) 15 kgf

The differentiation of pattern fringes generated from deformed and non-deformed gears as shown on Figure 2, 3 and 4 produced a color scale associated to pixel color which varies according to the testing body deformation. The high the color variation, the high the body deformation, which can be verified in all the cases mentioned before. Color pixel variation starting with lubricated dirt gear which presented the highest pixel variation, the clean gear presenting average pixel variation meanwhile the lubricated gear presented the lowest pixel variation. Following, it is possible to state that dirt increases gear deformation, meanwhile lubrication minimizes deformation. Isochromatic lines presented on Figures 5, 6 and 7 when analyzed with the color scale indicate load and deformation concentration to be in close agreement despite the loading conditions, however certain discrepancies are also noted. Isochromatic fringes distribution indicates a clear association of stress with applied force. As loading increased isochromatic fringes spacing decreased, tending to occupy the whole observed area. Fringes distribution density indicates stress concentration. It was also noted that fringes concentrations were initially positioned at gears tooth top and bottom.

As soon as the loading increased, fringes concentration moved to tooth border, following, to gear central areas. Low material density areas, as tooth region, experienced high fringes concentration. The above referred discrepancies, as fringes slops, are associated to gears working conditions; clean gear presented the lowest fringe slop, followed by lubricated gear and finally by the lubricated dirty gear.

CONCLUSIONS

Based on what it has been exposed before, the following conclusions can be drawn. Lubricated gears presented the best load distribution, and the lowest

As figuras resultantes da diferenciação entre as franjas padrões do corpo de prova deformado e não deformado, apresentados nas Figuras 2, 3 e 4, obteve como resultado uma régua graduada relativa à intensidade das cores de pixel. A intensidade dos pixels pode ser relacionada de acordo com a deformação do objeto, i.e., quanto maior for a variação das cores de pixels, maior será a deformação relacionada à força aplicada. Analisando esta variação pixelar, percebe-se que, para todos os casos analisados, houve o aumento da intensidade do pixel à medida que o carregamento aplicado no corpo de prova foi ampliado. Também é notado que, de acordo com a variação dos pixels, a engrenagem com lubrificação apresentou menor variação que os outros casos. A engrenagem lubrificada e com sujeira apresentou o maior índice de variação pixelar, enquanto que a engrenagem limpa ficou com variação intermediária entre os casos. Logo, é possível afirmar que a lubrificação apresenta menores taxas de deformação que a engrenagem trabalhando sem lubrificação alguma e também é possível afirmar que a sujeira é um fator que aumenta consideravelmente a deformação do corpo de prova. Analisando as franjas isocromáticas da Figura 5, 6 e 7, e adotando a régua de cores obtidas pelo processamento da imagem, percebe-se que, comumente, independente da situação de carregamento a concentração de tensão e deformação apresenta situações de comum comportamento e outros de certa discrepância.

Analisando as franjas isocromáticas em termos de espaçamento, pode-se observar que as linhas isocromáticas ficam mais próximas umas das outras, ou seja, ocorre um aumento de tensão proporcional ao aumento da força aplicada. À medida que o carregamento foi ampliado, a distribuição de tensão foi tomando toda a área correspondente ao corpo de prova e seu distanciamento foi diminuindo. Esse aumento de densidade das linhas mostra a concentração de tensões no corpo de prova.

CONCLUSÕES

Pelo que foi exposto acima, pode-se concluir que engrenagens trabalham com melhor distribuição de tensão com lubrificação por ter uma menor variação da

deformation variation. In case of dirt penetration, stress concentration and stress intensity variation as well as deformation were shown to be higher, indicating decreasing element working life.

The results are considered very useful, since the working conditions of farm machinery are severe. In the case dirt material penetrated between gears, stress concentration and intensity variation were noted to be higher which implies in working life reduction.

REFERENCES

- [1]. Cohen E. A., (2001) - *Stress Concentration Investigation of holes in Ortropical Sheet applying the Reflection Fotoelasticity Method*, 103 p. PhD. Thesis. University of São Paulo, São Paulo, Brazil;
- [2] Dal Fabbro, I. M., Gazzola, J., Rabelo, G. F., Rodrigues, S., (2005) – *Mechanical Behavior of Sugarcane Stalks Under Diametrical Compression Assisted by a Moiré Technique*, In: Proceedings of ITAFE '05, pp. 234-236, ADANA, Turkey;
- [3]. Doyle J.F., (2008) - *Hybrid Methods*, Springer handbook of Solid Mechanics, Ed. Sharpe, New York;
- [4]. Gazzola J., Affonso E.A., Dal Fabbro I.M., (2013) - *Application of the Moiré Optical Technique in Determining the Deformation Map on Bodies under Axial Loading*, Journal Sinergia, São Paulo, pp. 211-216;
- [5]. Gazzola J., Dal Fabbro I.M., Soriano J., Silva M.V.G., Rodrigues S. (2012) - *Photomechanical analysis of wooden testing bodies under flexural loading*, World Academy of Science, Engineering and Technology, v. 70, pp. 396-401;
- [6]. Gazzola J., (2011) - *Application of the Moiré Technique in the Stress Distribution Study on Log Bundles Reduced Models and Cut Wooden Pieces*, Master Degree Dissertation. Faculty of Agricultural Engineering, State University of Campinas, SP, 151 p. Brazil;
- [7]. Gomes S.T., (2009) - *Calibration of the Moiré Technique Applied to Mechanical Prototypes Profile*, Science and Agrotechnique, vol. 33, no. 2, Lavras Mar./Apr. 2009; <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542009000200033>;
- [8]. Koda F., (2009) - *Study of Contac Fatigue in Straight Teeths Cylindrical Gears*, Master Degree Thesis, Technological University of Paraná – UTFPR;
- [9]. Kuninari F., Dal Fabbro I.M., Lino A.C.L., Almeida C., (2008) - *Moiré aided soil-tractor tire contact area and contact volume determination*, Journal of Agricultural Machinery Science, vol. 4, no. 1, p. 39-43;
- [10]. Lei Z., Yun H., Yun D., Kang Y., (2007) - *Numerical analysis of phase-stepping interferometric photoelasticity for plane stress separation*, Optics and Laser in Engineering, vol.45, no.1, pp. 77-82;
- [11]. Lino A.C.L., (2008) - *Application of the Phase Displacement Projection Moiré Method in Generating Plant Organs Digital Models*, PhD Thesis, Faculty of Agricultural Engineering, State University of Campinas, SP, 92 p., Brazil;
- [12]. Maugis, D., (2000) – *Contact, adesion and rupture in elastic solids*. New York: Springer-Verlag;
- [13]. Myiake, et al., (2004) *Experimental Stress Analysis applying Digital Processing of Reflection Fotoelastical Method*. In: Brazilian Society of Computational and Applied Mathematic, Ilha Solteira, v.1, p. 1427-1431;
- [14]. Rodrigues L.E.M., (2008) - *Specialization Course on Total Productive Maintenace*, <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAe50cAJ/falhas-engrenagens>>;

deformação do corpo de prova, i.e., a lubrificação ajuda a conservar o elemento de máquina. Nos casos onde há a penetração de sujeira, o comportamento mecânico mostrou que a concentração de tensões e variação da intensidade de tensão e deformação foi maior, o que pode implicar seriamente na diminuição da vida útil da peça. Em projetos de engenharia agrícolas, estas informações são de crucial importância para o dimensionamento de engrenagens utilizados em máquinas, pois as condições de trabalho são de certa agressividade aos elementos mecânicos envolvidos.

REFERÊNCIAS

- [1]. Cohen E. A., (2001) - *Investigação da Concentração de Tensões em Furios de Chapas Ortótopas usando o Método da Fotoelasticidade de Reflexão*, 103 p. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil;
- [2] Dal Fabbro, I. M., Gazzola, J., Rabelo, G. F., Rodrigues, S., (2005) – *Comportamento Mecânico de cana Hastes Sob diametral Compression Assistido por uma técnica de Moiré*, In: Anais da ITAFE '05, pp. 234-236, ADANA, Turkey;
- [3]. Doyle J.F., (2008) - *Métodos híbridos*, Springer manual de Mecânica dos Sólidos, Ed. Sharpe, New York;
- [4]. Gazzola J., Affonso E.A., Dal Fabbro I.M., (2013) – *Aplicação da Técnica Óptica de Moiré de Sombra na Determinação do Mapa de Deformações de Corpos Carregados Axialmente*, Revista Sinergia, São Paulo, 211-216;
- [5]. Gazzola J., Dal Fabbro I.M., Soriano J., Silva M.V.G., Rodrigues S., (2012) - *Análise fotomecânica de organismos de ensaio de madeira sob o carregamento de flexão*, Academia Mundial da Ciência, Engenharia e Tecnologia, v. 70, pp. 396-401;
- [6]. Gazzola J., (2011) - *Aplicação da técnica de Moiré no estudo de estresse Distribuição em Log Bundles modelos reduzidos e cortar pedaços de madeira*, Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, SP, 151 p., Brazil;
- [7]. Gomes, S.T., (2009) - *Calibração da Técnica de Moiré aplicada a perfis de Protótipos Mecânicos*, *Ciência e Agrotecnologia*, Vol.33, no. 2, Lavras Mar./Abr. 2009; <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542009000200033>;
- [8]. Koda F., (2009) – *Estudo de Fadiga de Contato em Dentes Cilíndricos Retos*, Tese de Doutorado, Universidade Tecnológica do Paraná – UTFPR;
- [9]. Kuninari F., Dal Fabbro I.M., Lino A.C.L., Almeida C., (2008) - *Moiré ajudou solo-tractor área de contato do pneu e contato determinação do volume*, Revista da Maquinaria Agrícola Ciência, vol. 4, no. 1, p. 39-43;
- [10]. Lei Z., Yun H., Yun D., Kang Y., (2007) - *Análise numérica de fotoelasticidade interferométrico-stepping fase de separação plano de tensão*, Óptica e Laser em Engenharia, vol. 45, no. 1, p. 77-82;
- [11]. Lino A.C.L., (2008) – *Aplicação do Método de Moiré de Deslocamento de Fase na Geração de Modelos Digitais de Órgãos de Plantas*, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 92 p., Brasil;
- [12]. Maugis, D., (2000) - *Contacto, adesão e ruptura dos sólidos elásticos*. Nova York: Springer-Verlag;
- [13]. Myiake, et al., (2004) - *Análise Experimental de Tensões Usando Processamento Digital de Imagens Fotoelásticas de Reflexão*. In: Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, Ilha Solteira, v.1, p. 1427-1431;
- [14]. Rodrigues L.E.M., (2008) – *Curso de Especialização em Manutenção Produtiva Total*. <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAe50cAJ/falhas-engrenagens>>;

[15]. Santos A.A., (2002) - Notes on Machine Elements 2, Campinas, march,
<http://www.fem.unicamp.br/~lafer/em618/pdf/Apostila%20Engrenagens%204.pdf>.
[16] Sciammarella, C. A. (1982) - The moiré method – A review. *Experimental Mechanics*. v.44, n.8, p. 418-433;
[17]. Spinelli H.A., Silva F.A., (2003) - *Application of Photoelasticity on Structural Analysis of a Riveted Joint for Aeronautical Application*, Anais. Guaratinguetá.

[15]. Santos A.A., (2002) - Notes de Elementos de Máquinas 2, Campinas, march,
<http://www.fem.unicamp.br/~lafer/em618/pdf/Apostila%20Engrenagens%204.pdf>.
[16] Sciammarella, C. A. (1982) - The moiré method – A review. *Experimental Mechanics*. v.44, n.8, p. 418-433;
[17]. Spinelli H.A., Silva F.A., (2003) - *Aplicação de fotoelasticidade em Análise Estrutural de uma junta rebitada para Aeronautical Aplicação*, Anais. Guaratinguetá.