

CONTRASTES EM AMOSTRAS DE SOLOS AGRÍCOLAS POR FOTOELASTICIDADE

SIDNEY LEAL DA SILVA, S. L.¹; RAFAEL ALVES DA SILVA²; GUSTAVO DI CHIACCHIO FAULIN³,
LUIS EDUARDO RISSATO ZAMARIOLLI³

¹Fatec Itaquera - Grupo de Óptica e Aplicações/Laboratório de Óptica e Aplicações

²Fatec Itaquera - Curso Automação Industrial

³Fatec Pompeia - Laboratório de Solos e Tecido Vegetal da Fundação Shunji Nishimura de Tecnologia
sidney.silva6@fatec.sp.gov.br

Contrasts in Agricultural Soil Samples by Photoelasticity

Eixo Tecnológico: *Produção Industrial*

Resumo

Torna-se fundamental a procura de novas metodologias e aperfeiçoamento de outras já existentes para auxiliar na melhoria da produção agrícola industrial. As metodologias ópticas, associadas a sistemas computacionais capazes de efetuar tratamentos rápidos e eficientes de grandes quantidades de dados, apresentam-se como promissoras e modernas na contribuição dos avanços nesses estudos. O objetivo deste trabalho foi verificar as diferenças fotoelásticas entre amostras de solos com maior e menor teor de argila, inseridas em resinas epóxi, por meio das curvas de tensão por deformação obtidas de imagens de franjas fotoelásticas a partir dos esforços realizados sobre as amostras em uma técnica de polariscópio por transmissão e análise por método computacional, fundamentado em Fotoelasticidade e Teoria de Erros. Observou-se, após os estudos, que as amostras de solo mais argilosas possuem módulos de elasticidade maiores, comparadas às amostras de solo siltosas e arenosas. Observou-se, também, que as amostras de solo mais arenosas tem menores módulos de elasticidade. De maneira oposta as dispersões ópticas são maiores para as amostras de solo mais arenosas e menores para as porções de solo mais argilosas. Esses resultados mostraram que é possível diferenciar entre amostras solos mais argilosas, mais siltosas e mais arenosas por meio dessa metodologia, utilizando os parâmetros intrínsecos módulo de elasticidade e coeficiente de dispersão óptica dos materiais estudados.

Palavras-chave: *Elasticidade Mecânica, Radiação da luz, Fotoelasticidade, Materiais minerais, Método dos mínimos quadrados.*

Abstract

It is essential to seek new methodologies and improve existing ones to help improve agricultural production. Optical methodologies, associated with computer systems capable of quickly and efficiently processing large amounts of data, are promising and modern in contributing to advances in these studies. The objective of this study was to verify the photoelastic differences between soil samples with higher and lower clay content, inserted in epoxy resins, through stress-strain curves obtained from images of photoelastic fringes from the efforts performed on the samples in a transmission polariscope technique and analysis by a computational method, based on Photoelasticity and Error Theory. After the studies, it was observed that the more clayey soil samples have higher moduli of elasticity, compared to the silty and sandy soil samples. It was also observed that the more sandy soil samples have lower moduli of elasticity. Conversely, optical dispersions are greater for sandier soil samples and lower for clayier soil samples. These results showed that it is possible to differentiate between clayier, siltier and sandier soil samples using this methodology, using the intrinsic parameters of elasticity modulus and optical dispersion coefficient of the materials studied.

Key-words: *Mechanical elasticity, Light radiation, Photoelasticity, Mineral materials, Least squares method.*

1. Introdução

Solos com texturas mais argilosas ajudam na retenção de água, proporcionando maior umidade e, conseqüentemente, maior liberação de nutrientes às plantas, com menor necessidade de irrigação [1,2]. Esses fatores definem as estratégias de manejo que serão adotadas e, com isso, determinam a melhor produtividade para cada situação [3,4]. Embora eficientes às necessidades agrícolas, as metodologias atuais para obtenção desses fatores são antigas e, muitas vezes, manuais causando demoras nos resultados e, portanto, atrasos nos processos. Torna-se fundamental a procura de novas metodologias e aperfeiçoamento de outras já existentes para auxiliar na melhoria da produção agrícola. Nessa direção, as metodologias ópticas vêm se apresentando como promissoras, modernas e, associadas a sistemas computacionais capazes de efetuar os tratamentos de grandes quantidades de dados de forma rápida e eficiente, poderão contribuir para o avanço dos estudos.

A metodologia Fotoelástica pode ser utilizada para análises de tensão e deformação em materiais. Alguns trabalhos publicados mostram a relevância de aplicações nas áreas de Física, Engenharia Mecânica, Engenharia de Materiais e Odontologia [5-10]. Utilizar a Fotoelasticidade como alternativa inovadora na investigação da textura em solos, especialmente os mais argilosos, torna-se um desafio moderno e promissor com grande potencial na obtenção de resultados fortemente quantitativos, com base em um tratamento computacional fundamentado em Teoria de Erros [11,12], a partir de imagens digitais de franjas fotoelásticas. Fotoelasticidade é um ramo da óptica que estuda a distribuição de tensões e deformações em materiais fotoelásticos com o auxílio da luz polarizada [13-16]. Materiais fotoelásticos têm a propriedade da birrefringência temporária e, principalmente, devido à sua transparência e elasticidade, são amplamente utilizados na indústria para determinação indireta das propriedades dos materiais, como ferro, aço, concreto etc. [17,18].

A lei óptica da tensão, pela teoria de Fotoelasticidade [19,20], diz que

$$n_l - n_t = C (\gamma_l - \gamma_t), \quad (1)$$

$C(\lambda)$ é o coeficiente de dispersão fotoelástico, que é em geral dependente do comprimento de onda, λ , da luz; $n_l - n_t$ é a diferença entre os índices de refração longitudinal, n_l , e transversal, n_t , para o esforço. $\gamma_l - \gamma_t$ é a diferença de tensões internas nas direções longitudinal, γ_l , e transversal, γ_t , aplicadas na amostra fotoelástica. É possível concluir que as tensões externas médias, $\langle \gamma_{externa} \rangle$, são diretamente proporcionais às tensões internas, no material fotoelástico, e obter a expressão da equação (2).

$$\langle \gamma_{externa} \rangle = \frac{\lambda}{2\pi e C(\lambda)} \langle \Delta\phi \rangle. \quad (2)$$

O termo $\frac{\lambda}{2\pi e C(\lambda)}$, onde e é a espessura da amostra, fornecerá o coeficiente de dispersão fotoelástico, $C(\lambda)$, a partir da relação entre os esforços externos mensuráveis e das diferenças de fases médias, $\langle \Delta\phi \rangle$, em geral difícil de medir. Para resolver este problema, utilizando a teoria de Elasticidade Mecânica [21], para o regime elástico, a lei de Hooke convencional estabelece a relação entre a tensão externa média, $\langle \gamma_{externa} \rangle$, e a deformação média, $\langle \epsilon \rangle$, na direção do esforço sobre a amostra [5], segundo o modelo da Fig. 1. Assim, aplicando-se diversos esforços

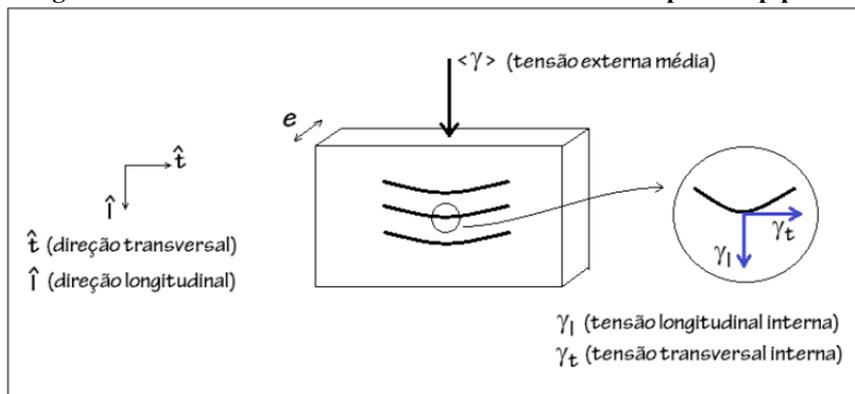
Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

externos sobre a amostra e associando esse esforços às suas respectivas deformações, determina-se o módulo de elasticidade, E , por método computacional gráfico, Fig. 2, e o coeficiente de dispersão óptico, $C(\lambda)$ a partir de E . As expressões finais são apresentadas nas equações (3) e (4).

$$\langle \gamma_{\text{externa}} \rangle = E \langle \epsilon \rangle, \quad (3)$$

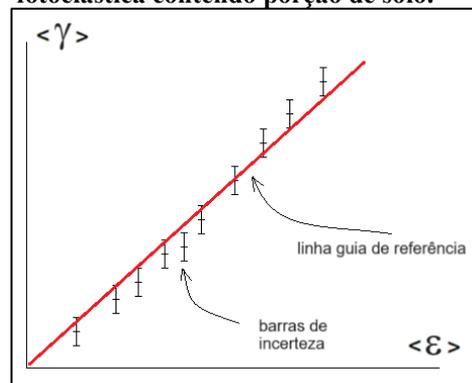
$$C(\lambda) = \frac{2\pi e E}{\lambda}. \quad (4)$$

Fig. 1 - Modelo de amostra fotoelástica na forma de um paralelepípedo.



(Fonte: Sidney Leal da Silva, 2024)

Fig. 2 - Esquema da curva de tensão por deformação a partir dos esforços realizados sobre uma amostra fotoelástica contendo porção de solo.



(Fonte: Grupo de Óptica e Aplicações, 2024)

Durante a construção do gráfico, esquematizado na Fig. 2, no processo de regressão linear, pelo método dos mínimos quadrados, [11,12], foram realizados os cálculos do módulo de elasticidade E e do coeficiente de dispersão óptico, bem como suas respectivas incertezas.

Este trabalho verificou as diferenças fotoelásticas entre amostras de solos com maior e menor teor de argila, inseridas em resinas fotoelásticas, por meio das curvas de tensão versus deformação a partir dos esforços realizados sobre as amostras, com dados, imagens de franjas fotoelásticas, obtidas de uma técnica de polariscópio por transmissão e análise por método computacional, fundamentado em Fotoelasticidade e em Teoria de Erros.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

Foram utilizadas 3 amostras de solo, Fig. 3, com as seguintes características quanto aos seus materiais minerais constituintes: uma amostra mais argilosa, uma mais siltosa e uma mais arenosa, todas com identificações de proporções (g/kg).

Fig. 3 - Amostras de solo: mais argilosa (112427/6), mais siltosa (111930/33) e mais arenosa (111656/2).



(Fonte: Grupo de Óptica e Aplicações, 2024)

Foram confeccionados três conjuntos de amostras fotoelásticas em formato de paralelepípedo, cada conjunto contendo uma amostra pura e outra misturada com uma porção de solo (amostras de solo da Fig. 3). A Fig.4 apresenta as fotografias desses conjuntos.

Fig. 4 - Conjuntos de amostras fotoelásticas: mais argilosa (112427/6), mais siltosa (111930/33) e mais arenosa (111656/2).



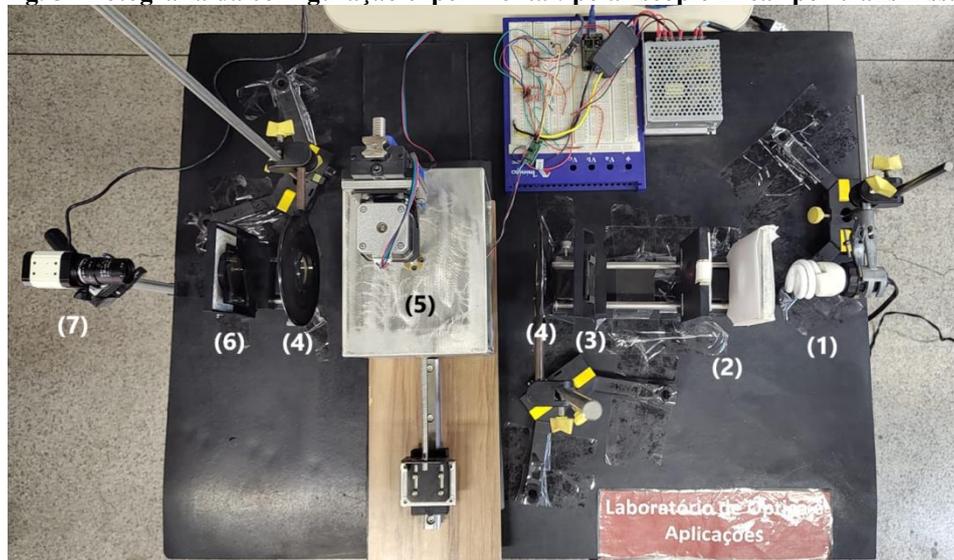
(Fonte: Grupo de Óptica e Aplicações, 2024)

2.2. Metodologia

A técnica óptica utilizada foi o polariscópio linear por transmissão, como mostra a fotografia da Fig. 5. Do ponto de vista da óptica ondulatória, uma frente de onda produzida por uma fonte de luz branca (1) é alterada pelos filtros (2) e segue por dois polarizadores lineares (3) e (6) com estados de polarizações ortogonais, que impedem a passagem da luz, à priori. Entre os polarizadores, encontram-se duas lâminas de quarto de onda (4) para diminuir os efeitos das franjas isoclínicas que dificultam as medições por produzirem franjas escuras sobrepostas às franjas isocromáticas, que carregam as informações para este estudo. Os esforços proporcionados pelo dispositivo automático de cargas (5), na amostra de material fotoelástico, entre as lâminas de quarto de onda, alteram o estado de polarização da luz, permitindo que a câmera digital (7) observe as franjas isocromáticas produzidas na amostra. Como a fonte de luz é branca, várias cores são observadas, mas um filtro de cor vermelha permitiu que somente uma delas fosse transmitida até a câmera digital, que produziu os vídeos armazenados em arquivos

para posterior análise pelo sistema computacional. Obs. o filtro vermelho foi o escolhido, pois as análises de espectroscopia de emissão das amostras de solo mostraram melhor desempenho na região da radiação vermelha.

Fig. 5 - Fotografia da configuração experimental: polariscópio linear por transmissão.



(Fonte: Grupo de Óptica e Aplicações, 2024)

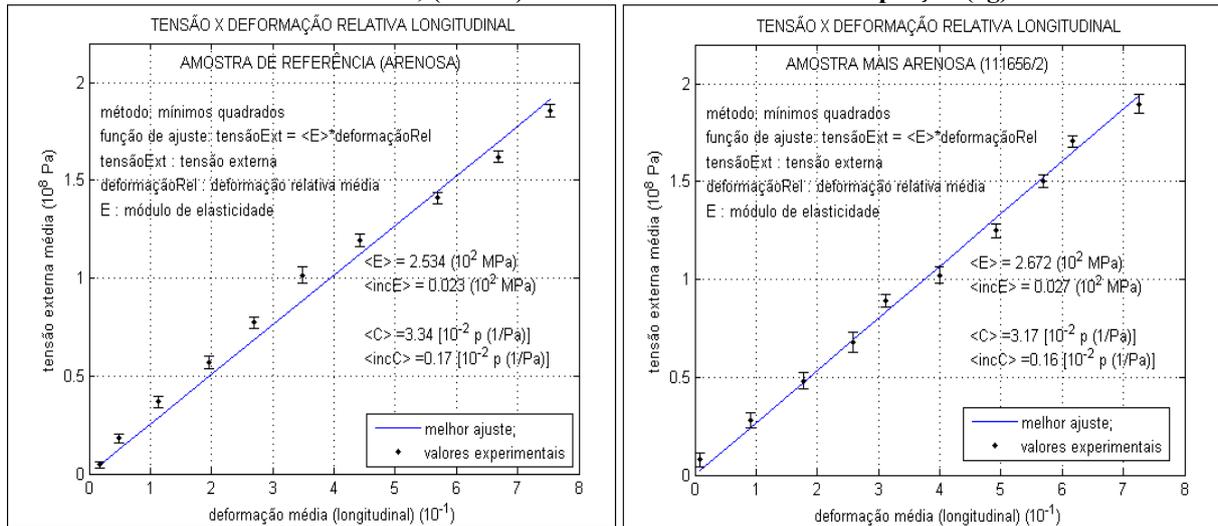
O método desenvolvido durante o trabalho teve o propósito principal de apresentar resultados quantitativos gráficos, por computador, das tensões em função das deformações de cada conjunto de amostras fotoelásticas apresentadas na Fig. 4. Buscando melhorar a acurácia nos resultados, utilizou-se especialmente os métodos da Teoria de Erros [11,12]. Para cada conjunto de amostras, foram produzidos 2 vídeos, 1 da amostra livre e 1 da amostra com mistura de solo. Cada vídeo forneceu os dados para a geração de um gráfico de tensão por deformação, como resultado final. A partir desses gráficos, pelo método dos mínimos quadrados [11,12], foram determinados os módulos médios de elasticidade, $\langle E \rangle$, e os coeficientes médios de dispersão óptico, $\langle C \rangle$. Para obtenção dos módulos médios efetivos de elasticidade de cada tipo de amostra de solo foram realizadas as subtrações dos valores obtidos para as amostras com misturas de solo pelos valores obtidos pelas amostras livres, de cada conjunto.

3. Resultados e Discussão

A Fig. 6 apresenta um dos gráficos das tensões médias em função das deformações médias aplicadas na amostra fotoelástica. Representa o conjunto 3 de amostras. À esquerda a amostra pura e à direita a amostra com percentual (em torno de 3 g) de solo mais arenoso (111656-2).

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

Fig. 6 - Gráficos de tensão x deformação média do conjunto 3, mais arenoso: (esquerda) amostra fotoelástica de referência; (direita) amostra fotoelástica contendo porção (3g) de solo.



(Fonte: Grupo de Óptica e Aplicações, 2024)

A Tab. 1 apresenta os valores e as incertezas do módulo de elasticidade médio ($\langle E \rangle$) e do coeficiente de dispersão óptica médio ($\langle C \rangle$) para o conjunto 3, extraídos dos processamentos que geraram os gráficos da Fig. 6.

Tab. 1 - Valores de $\langle E \rangle$ e $\langle C \rangle$ para o conjunto 3.

	AMOSTRA FOTOELÁSTICA	$\langle E \rangle$ (MPa)	$\langle C \rangle$ (10^2 pPa^{-1})
MAIS ARENOSA (111656-2)	referência	$2,534 \pm 0,023$	$3,34 \pm 0,17$
	com porção de solo (3g)	$2,672 \pm 0,027$	$3,17 \pm 0,16$
	valor efetivo (porção de solo)	$(1,38 \pm 0,35) \times 10^{-1}$	$(6,2 \pm 1,6) \times 10$

A Tab. 2 apresenta os valores sintéticos e as incertezas do módulo de elasticidade médio ($\langle E \rangle$) e do coeficiente de dispersão óptica médio ($\langle C \rangle$) todos os conjuntos, extraídos dos processamentos que geraram os gráficos.

Tab. 2 - Valores de $\langle E \rangle$ e $\langle C \rangle$ para cada amostra de solo.

	$\langle E \rangle$ (MPa)	$\langle C \rangle$ (10^2 pPa^{-1})
valor efetivo da porção de solo mais argiloso (112427-6)	$(9,67 \pm 0,47) \times 10^{-1}$	$8,76 \pm 0,61$
valor efetivo da porção de solo mais siltoso (111930-33)	$(5,60 \pm 0,43) \times 10^{-1}$	$(1,51 \pm 0,14) \times 10$
valor efetivo da porção de solo mais arenoso (111656-2)	$(1,38 \pm 0,35) \times 10^{-1}$	$(6,2 \pm 1,6) \times 10$

As curvas apresentadas nos gráficos de todos os conjuntos estudados mostraram que os coeficientes angulares são maiores para as amostras fotoelásticas contendo porções de solo, contrastados aos das amostras de solo livres, o que era previsto já que a quantidade de solo acrescida à mistura, que forma a amostra, exige mais esforço externo para os deslocamentos. O coeficiente angular representa o valor médio do módulo de elasticidade da amostra fotoelástica.

O resultado da diferença do módulo de elasticidade entre a amostra fotoelástica com porção de solo e livre da porção de solo, em cada conjunto, representa o valor estimado do módulo de elasticidade da porção de solo estudada. Verificou-se que o módulo de elasticidade da amostra mais argilosa é maior contrastado com a amostra mais siltosa e o valor da amostra mais siltosa é maior que o valor para a amostra mais arenosa. Por consequência, a dispersão óptica é maior

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJJI

na seguinte sequência: amostra mais arenosa > amostra mais siltosa > amostra mais argilosa. Esse resultado é coerente com a espectroscopia de emissão dessas amostras.

As incertezas para os módulos de elasticidade estão em média 0,97%, mostrando boa proximidade dos erros cometidos durante o processo de medição. Os valores utilizados para os cálculos dos módulos de elasticidade passaram por processos com muitas repetições, promovendo este bom valor de incerteza. As incertezas das dispersões ópticas estão em média 5,0%, mostrando razoável proximidade dos erros cometidos durante o processo de medição. Neste caso, alguns valores para os cálculos utilizados, como o comprimento de onda da luz e a espessura dos materiais fotoelásticos, não passaram por processos com muitas repetições. Para o próximo trabalho, estes processos serão mais repetidos.

Considerações finais

Do ponto de vista da Fotoelasticidade, foi possível perceber diferenças entre amostras com teores distintos, no caso mais argilosas, mais siltosas e mais arenosas. Para confirmar esses resultados, utilizando a mesma metodologia, uma continuidade do trabalho será realizada em 2025. Desta vez, serão feitos vários vídeos de cada conjunto estudado neste trabalho, bem como de outros conjuntos envolvendo amostras muito argilosa e médias. Serão, também, levados em consideração as proporções das amostras, para normalização dos resultados. Um outro parâmetro intrínseco, o coeficiente de Poisson, será calculado a partir das relações entre as deformações médias longitudinais e transversais. Com os parâmetros módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson será possível determinar a dureza das amostras fotoelásticas.

Agradecimentos

Ao Centro Paula Souza, à CNPq pelo fornecimento das bolsas PIBITI, à Fatec São Paulo por meio do Prof. Dr. Eduardo Acedo Barbosa, pelo empréstimo de parte dos equipamentos, ao IPEN por meio do Dr. Niklaus Ursus Weber e ao Laboratório de Solos e Tecido Vegetal da Fundação Shunji Nishimura de Tecnologia de Pompeia.

Referências

- [1] CENTENO, L. N.; GUEVARA, M. D. F.; CECCONELLO, S. T.; SOUZA, R. O. D.; TIMM, L. C. **Textura do solo: conceitos e aplicações em solos arenosos**. Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade (Pelotas - RS), v. 4, n. 1, p. 31-37, 2017. ISSN: 2448-1661
- [2] KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C. D. **Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro**. Ciência Rural – Santa Maria, v. 40, n. 7, p. 1550-1556, 2010. ISSN: 0103-8478
- [3] FAULIN, G. D. C.; DA SILVA, R. A.; JUNIOR, G. A. L.; CONTINI, R. C. M. S.; DA SILVA, S. L. **Aplicação da Metodologia Speckle na investigação da classe textural do solo**. Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, ConBAP. Campinas, 2022.
- [4] PAULA, M. E. C. C.; DUARTE, M. N.; CLAESSEN, M. E. C.; BARRETO, W. de O. **Manual de métodos de análise de solo**. Segunda edição. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisas do Solo da Embrapa, 212 p., 1997. ISBN: 85-85864-03-6
- [5] DA SILVA, S. L. **Estudo de tensões em amostras fotoelásticas com Holografia Digital**. 1ª Edição: Novas Edições Acadêmicas, Brasil, 2017. p. 153. ISBN: 978-3-330-75868-1.

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJI

- [6] DA SILVA, S. L. et al. **Análise quantitativa de tensões em amostras fotoelásticas por meio de fotoelasticidade**. Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada, v.4, n. 1, 2017.
- [7] DA SILVA, S. L. et al. **Análise qualitativa de tensões em estruturas sólidas acopladas a amostras de resina fotoelástica**. Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada, v.1, n. 2, 1-13 p. 2015.
- [8] DOBRANSZKI, A. et al. **Distribuição de tensões em mini-implantes ortodônticos**. Matéria (Rio de Janeiro), v.15, n. 3, 405-412 p. 2010.
- [9] RAMESH, K. **Digital Photoelasticity**. Measurement Science and Technology, v. 11, n. 12, 2000.
- [10] SOARES, W. A. **Determinação de parâmetros da mecânica de fratura a partir de imagens fotoelásticas, usando processamento digital**. TESE DE DOUTORADO. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1997.
- [11] VUOLO, J. H. **Fundamentos da teoria de erros**. Blucher, 2003.
- [12] MACWILLIAMS, F. J.; SLOANE, N. J. A. **The theory of error-correcting codes**. Elsevier, 1977.
- [13] SALEH, B. E. A.; TEICH, M. C. **Fundamentals of Photonics**. New York, Wiley, Second Edition, 1200 p. 2013.
- [14] FERREIRA, M. **Óptica e Fotônica**. Primeira Edição, Lisboa, Lidel-Edições Técnicas, 438 p. 2003.
- [15] HECHT, E. **Óptica**. Segunda Edição, Lisboa, Portugal, Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.
- [16] GUENTHER, R. D. **Modern Optics**. United States of America, John Wiley & Sons, 1990.
- [17] PARTHASARATHI, N. et al. **Analytical and experimental study on reinforced concrete arch by photoelasticity technique**. Asian Journal of Civil Engineering, [S. l.], v. 19, p. 647-650, 2018.
- [18] TORO, H. A. F. et al. **Análisis de campos de esfuerzos utilizando fotoelasticidad visible e infrarroja**. Visión electrónica, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 89-98, 2017.
- [19] PAWAR, S.S.; PATIL, N. V.; SHETE, H.V. **A Review Paper on “Stress Analysis of Leaf Spring by Using Photo Elasticity Technique”**. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), v.04, issue:12, p. 1475-1478, 2017. ISSN 2395-0056.
- [20] PÉREZ, U. et al. **Validación del uso de fotoelasticidad como herramienta para los cursos de Mecánica de Sólidos**. Revista EIA, v.14, n. 28, p. 117-131, 2017. <https://dx.doi.org/10.24050/reia.v14i28.1145>.
- [21] SORIANO, H. L. **Método de elementos finitos em análise de estruturas**. Edusp, 2003.