



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Agrícola

ANGELO ROBERTO BIASI

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS FOTOMECÂNICAS COMO
SUPORTE AO ENSAIO DE LOBO - CARNEIRO**

**APPLICATION OF PHOTOMECHANIC TECHNIQUES AS A
SUPPORT TO THE LOBO - CARNEIRO TEST**

Campinas
2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Agrícola

ANGELO ROBERTO BIASI

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS FOTOMECÂNICAS COMO
SUPORTE AO ENSAIO DE LOBO - CARNEIRO**

**APPLICATION OF PHOTOMECHANIC TECHNIQUES AS A
SUPPORT TO THE LOBO - CARNEIRO TEST**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção de título de Mestre em Engenharia Agrícola, na Área de Máquinas Agrícolas.

Dissertation presented to the Faculty of Engineering Agricultural of the University of Campinas in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master, in Engineering Agricultural, in the area of Agricultural Machinery.

Orientador: Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabbro

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Caetano de Almeida

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO ANGELO ROBERTO BIASI, E ORIENTADA PELO PROF. DR. INÁCIO MARIA DAL FABBRO

Campinas
2022

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

B47a Biasi, Angelo Roberto, 1955-
Aplicação de técnicas fotomecânicas como suporte ao ensaio de Lobo -
Cameiro / Angelo Roberto Biasi. – Campinas, SP : [s.n.], 2022.

Orientador: Inácio Maria Dal Fabbro.
Coorientador: Carlos Caetano de Almeida.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade
de Engenharia Agrícola.

1. Metrologia. 2. Módulo de elasticidade. 3. Testes não-destrutivos. 4.
Método de Moiré. 5. Fotoelasticidade. I. Dal Fabbro, Inácio Maria, 1944-. II.
Almeida, Carlos Caetano de, 1976-. III. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Application of photomechanic techniques as a support to the Lobo
- Carneiro test

Palavras-chave em inglês:

Metrology

Modulus of elasticity

Non-destructive testing

Moire method

Photoelasticity

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Inácio Maria Dal Fabbro [Orientador]

Jonathan Gazzola

Kelen Cristiane Cardoso

Data de defesa: 18-05-2022

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

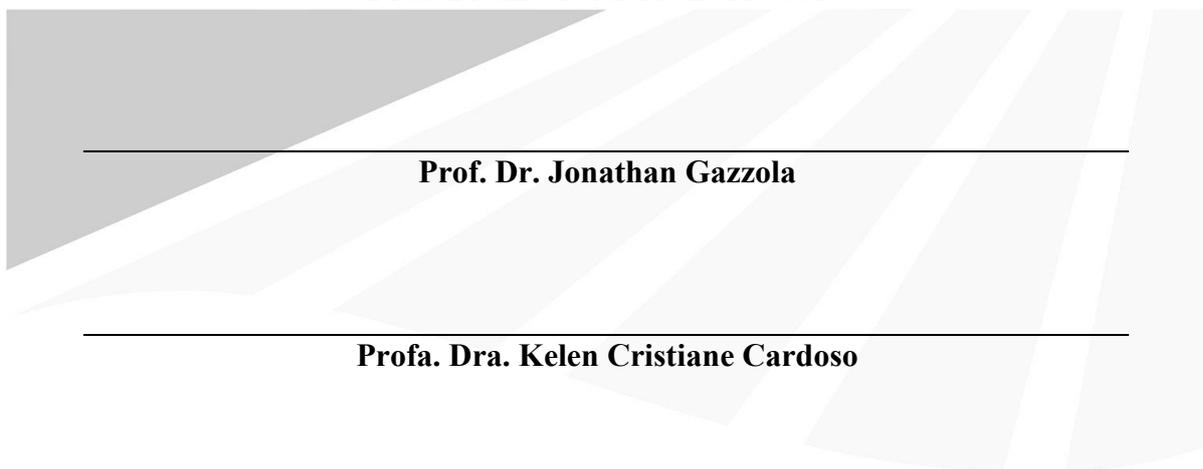
- ORCID do autor: <http://orcid.org/0000-0001-8915-2918>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/3232000679418308>

Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Dissertação de Mestrado** defendida por **Angelo Roberto Biasi**, aprovada pela Comissão Julgadora em 18 de maio de 2022, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

FEAGRI

Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabbro



Prof. Dr. Jonathan Gazzola

Profa. Dra. Kelen Cristiane Cardoso

Faculdade de
Engenharia Agrícola
Unicamp

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Dedico à minha esposa Mariângela Ribeiro Resende, aos meus filhos Anderson, Gabriel, Lucas e aos meus pais Oswaldo Biasi e Ilíria G. Biasi (*in memoriam*).
Em especial a Maria Anita Ribeiro Resende (*in memoriam*).

Bem-aventurados os mansos, porque eles herdarão a terra;
Bem-aventurados os que têm fome e sede de justiça, porque eles serão fartos;
Bem-aventurados os misericordiosos, porque eles alcançarão misericórdia;
Bem-aventurados os limpos de coração, porque eles verão a Deus;
Bem-aventurados os pacificadores, porque eles serão chamados filhos de Deus;

Mateus 5:5-9

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) processo número CNPq 130603.

Ao Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabbro pela amizade, pelo carinho, pela paciência apoio e orientação.

Ao meu Co-orientador Prof. Dr. Carlos Caetano de Almeida.

À minha esposa Prof.^a Dra. Mariângela Ribeiro Resende (FCM) e aos meus filhos pelo apoio, compreensão e incentivo.

À Comissão de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Agrícola - FEAGRI da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP.

Ao Coordenador da Pós graduação da FEAGRI Prof. Dr. Ariovaldo José da Silva.

As Professoras, Professores e funcionárias/os da FEAGRI especialmente a Valéria F. Altmann Ferreira e a Fernanda Von Hertwig Mascarenhas Fontes da Secretaria da Pós-graduação por todo apoio incondicional.

Ao Doutor Antônio Carlos Loureiro Lino do IAC - Jundiaí.

Ao Professor Mestre, meu orientador de TCC do MBA (Gestão da Produção)- Antônio Manuel Ribeiro por seu apoio e dedicação.

Meu muito obrigado ao técnico responsável pelo Laboratório das Propriedades Físicas dos Materiais Biológicos - Leandro Moraes.

Ao colega de mestrado Claudio Soldera (mestrando em Máquinas Agrícolas) por todo apoio e contribuição no desenvolvimento da macro para agilizar o tratamento dado pelo *software IMAGEJ*.

Agradeço as/os colegas pelo apoio incondicional:

Jeniffer da Silva Gomes Santos - Doutoranda em Máquinas Agrícolas.

Thainar Pizão - Mestranda em Máquinas Agrícolas.

Gabriel Del Álamo Cardoso de Moraes - Mestrando em Máquinas Agrícolas.

RESUMO

A resistência à tração diametral tem se mostrado um importante parâmetro para a caracterização mecânica dando origem a muitos métodos indiretos. O ensaio de “Lobo Carneiro”. é conhecido internacionalmente sob o título de *Brazilian test* com a finalidade de estudar a tração em concreto, no entanto, sua aplicação se expandiu à determinação das constantes elásticas de materiais biológicos. A combinação de diferentes técnicas ópticas interferométricas são aplicáveis na determinação da área de contato bem como da deformação de um corpo de prova cilíndrico sob tensão mecânica. O objetivo geral do presente trabalho é de determinar as propriedades mecânicas de um corpo de prova submetido à compressão diametral por diferentes técnicas: técnica fotomecânica de *Moiré*, Técnica a *Laser*. Como modelo ideal foram utilizados 03 corpos de prova (CP) de borracha maciça (Bo) sendo submetidos a 5 diferentes razões de deformação específica (*strain rate*) gerando assim os gráficos que representam o comportamento do CP quando submetido a compressão diametral a diferentes valores de *strain rate*. As técnicas do Carimbo e da Medição direta estão alinhadas e dão suporte aos ensaios de *Moiré* e do *Laser* sendo que os resultados foram bem parecidos, pois foram feitos ao mesmo tempo durante a compressão do CP e comprovam que a área de contato pode-se notar a partir dessas técnicas. As Técnicas do *Laser* e a Fotomecânica/*Moiré* foram feitas separadamente, porém utilizando o *IMAGEJ* e *Moiré Fringes softwares*, nota-se que ambas proporcionaram a montagem das semi-elipses de onde partiram os cálculos para a área da Elipse total e da área total de contato.

Palavras-chave: Metrologia óptica; Módulo de elasticidade; Método não destrutivo; Compressão diametral; Franjas de *Moiré*; Técnica Fotomecânica.

ABSTRACT

Diametral tensile strength has been shown to be an important parameter for mechanical characterization giving rise to many indirect methods. Lobo-Carneiro test is internationally known under the title of Brazilian test with the purpose of studying the traction in concrete, however, its application has expanded to the determination of the elastic constants of biological materials (Sherif, S.M.,1979). The combination of different optical interferometric techniques are applicable in determining the contact area as well as the deformation of a cylindrical specimen under mechanical stress. The general objective of the present work is to determine the mechanical properties of a specimen submitted to diametric compression by the different techniques: photomechanical moiré technique, Laser Technique. As an ideal model, 03 specimens (CP) of solid rubber (Bo) were used, being subjected to 5 different specific strain ratios (strain rate), thus generating the graphs that represent the behavior of the CP when subjected to diametric compression at different values of strain rate values. The Stamping and Direct Measurement techniques are aligned and support the Moiré and Laser tests and the results were very similar, as they performed at the same time during the CP compression and prove that the contact area can be noticed from these techniques. The Laser Techniques and Photomechanics/Moiré were done separately, however using the IMAGEJ and Moiré Fringes software, it is noted that both provided the assembly of the semi-ellipses from which the calculations for the total Ellipse and the total area of contact.

Keywords: Optical metrology; Modulus of elasticity; Non-destructive method; Diametric compression; Moiré fringes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Igreja de São Pedro (Esq.) Movimentação com Rolos de concreto (Dir.)....	18
Figura 2: Ensaio de compressão diametral ou de tração indireta em concreto, criado por Lobo-Carneiro (1943)	19
Figura 3: Corpos de prova de borracha	22
Figura 4: Compressão Diametral de um Corpo de Prova P Cilíndrico de Borracha (Bo) (Ensaio de Lobo-Carneiro, BT – <i>Brazilian Tensile Test</i>). Onde F representa a força diametral aplicada e U representa a deformação.....	24
Figura 5: Setup experimental da técnica da silhueta	27
Figura 6: Linhas de Grade e Passo de Grade.....	29
Figura 7: Modelos de Grade de Ronchi.....	29
Figura 8: Modelos de Grade de Ronchi.....	30
Figura 9: Arranjo Experimental – Moiré.....	30
Figura 10: Técnica Fotomecânica/ Moiré	31
Figura 11: Coeficiente de Poisson (ν)	36
Figura 12: Grade explicativa dos ensaios experimentais	37
Figura 13: Técnica do carimbo.....	38
Figura 14: Módulo DalFabbro e incidência da luz laser	40
Figura 15: Técnica Fotomecânica, grades de Ronchi.....	41
Figura 16: Técnica fotomecânica/Moiré	41
Figura 17: Disposição dos pratos planos na aplicação da força diametral F construídos especialmente para o presente trabalho de pesquisa.	43
Figura 18: Gráfico da seção transversal elíptica dos corpos de prova	45
Figura 19: Técnica do carimbo. Área de contato impressa pela aplicação de força diametral (F) de 30 KGF	45
Figura 20: Deformação diametral dos corpos de prova de borracha.....	46
Figura 21: Gráfico de deformação lateral.....	47
Figura 22: Gráfico da técnica do carimbo CP1	48
Figura 23: Técnica do Carimbo CP2.....	49
Figura 24: Técnica do Carimbo CP3	50
Figura 25: Técnica Fotomecânica / Moiré CP1.....	51
Figura 26: Semi elipses geradas pela técnica fotomecânica / Moiré CP1	52
Figura 27: Técnica fotomecânica / Moiré CP2.....	53

Figura 28: Semi elipses geradas pela técnica fotomecânica / Moiré CP2.....	54
Figura 29: Técnica Fotomecânica / Moiré CP3.....	55
Figura 30: Gráfico força diametral / Laser CP1.....	57
Figura 31: Semi elipses / Laser CP1.....	58
Figura 32: Gráfico força diametral / Laser CP2.....	59
Figura 33: Semi-elipses / Laser CP2.....	60
Figura 34: Gráfico força diametral / Laser CP3.....	62
Figura 35: Semi elipses / Laser CP3.....	63
Figura 36: Gráfico força diametral / Área de contato [mm ²] CP1.....	64
Figura 37: Gráfico força diametral / Área de contato [mm ²] CP2.....	65
Figura 38: Gráfico força diametral / Área de contato [mm ²] CP3.....	66
Figura 39: Gráfico força diametral / Área de contato [mm ²] CP's 1, 2, 3.....	67
Figura 40: Feixe de luz laser de linha a 90 ⁰ incidindo sob o corpo de prova.....	74
Figura 41: Módulo DalFabbro acoplado a Prensa Kanners.....	75
Figura 42: Laser de linha com opção de alterar o ângulo de incidência.....	75
Figura 43: Laser de linha na cor vermelha.....	76
Figura 44: Modelo de laser de linha produzido no Brasil pela Laser Line a ser utilizado no Up Grade do Módulo DalFabbro.....	77
Figura 45: LASERLine cotação em R\$.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos corpos de prova de borracha.....	22
Tabela 2: Coeficiente de Poisson da borracha.....	35
Tabela 3: Variação das dimensões.....	44
Tabela 4: Dimensões do raio maior da elipse.....	46
Tabela 5: Dimensões do raio menor da elipse.....	47
Tabela 6: Força diametral X área de contato da elipse CP1	48
Tabela 7: Força diametral X área de contato da elipse CP2.....	49
Tabela 8: Força diametral X área de contato da elipse CP3.....	50
Tabela 9: Técnica Fotomecânica / Moiré X Força Diametral F (kgf) aplicada no CP1	51
Tabela 10: Técnica Fotomecânica / Moiré X Força Diametral F (kgf) aplicada no CP2, área de contato A (mm ²) correspondente	53
Tabela 11: Técnica Fotomecânica / Moiré X Força diametral F(kgf) aplicada no CP3	55
Tabela 12: Técnica laser. Força diametral F(kgf) aplicada no CP1	57
Tabela 13: Técnica Laser. Força diametral F(kgf) aplicada no CP2	59
Tabela 14: Técnica laser. Força diametral F(kgf) aplicada no CP3	61
Tabela 15: Medição direta. Força diametral F(kgf) aplicada no CP1	64
Tabela 16: Medição Direta. Força diametral F(kgf) aplicada no CP2.....	65
Tabela 17: Medição Direta. Força diametral F(kgf) aplicada no CP3.....	66

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. JUSTIFICATIVA	16
1.2. OBJETIVO GERAL	16
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1. A TÉCNICA DE LOBO-CARNEIRO	17
2.1.1. HISTÓRICO.....	17
2.1.2. EQUAÇÃO DE LOBO-CARNEIRO.....	20
2.2. CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS DE PROVA (CP) DE BORRACHA .	22
2.3 FOTOELASTICIDADE CLÁSSICA	24
2.4 MÉTODOS FOTOMECÂNICOS	26
2.4.1 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS DA SILHUETA	26
2.4.2 FENOMENOLOGIA DE <i>MOIRÉ</i>	27
2.4.3 ERROS EXPERIMENTAIS	32
3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.3 COEFICIENTE DE POISSON (ν).....	36
3.4 TÉCNICA DO CARIMBO.....	38
3.5 TÉCNICA LASER	39
3.6 TÉCNICA FOTOMECÂNICA (<i>MOIRÉ</i>).....	40
3.7 TÉCNICA DA MEDIÇÃO DIRETA (PAQUÍMETRO).....	42
3.8 ENSAIOS DE COMPRESSÃO DIAMETRAL (BRAZILIAN TEST)	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS	44
4.4 DADOS GERADOS PELA TÉCNICA FOTOMECÂNICA (<i>MOIRÉ</i>).....	51
4.5 DADOS GERADOS POR LASER	57

4.6	TÉCNICA DA MEDIÇÃO DIRETA	64
5	CONCLUSÕES	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
	APÊNDICES	74
	APÊNDICE A - Obtenção de dados por laser	74
	APÊNDICE B - Tipos de lasers	76

1. INTRODUÇÃO

A fenomenologia que se apresenta sob o título genérico de “área de contato” envolve diversos casos os quais dão suporte teórico para a análise mecânica associada a cada caso. Esse tema pode ser subdividido em duas grandes áreas, a saber, “Hertz” e “Lobo-Carneiro”. (EVANGELISTA 2002). O presente trabalho se dedica exclusivamente ao estudo dos ensaios de Lobo-Carneiro, também conhecido sob o nome de *Brazilian Test*. A aplicação dos ensaios de Lobo-Carneiro se estende desde a análise mecânica de corpos de prova de concreto, ensaios de rolamentos cilíndricos, corpos de prova vegetais, plásticos, metais, madeira e compósitos.

A abordagem técnica deste trabalho de pesquisa está baseada no uso de corpos de prova cilíndricos, de borracha, de forma a facilitar o desenvolvimento da análise proposta, dado o caráter de continuidade, homogeneidade e isotropia desse, conforme preconiza a mecânica dos meios contínuos. No entanto, deve ser observado que a metodologia proposta deverá ser estendida a materiais que não se enquadram nessas premissas. A determinação da área de contato nos ensaios Lobo-Carneiro se apresenta como uma lacuna a ser preenchida, pois, de posse desse dado, a distribuição de tensão, bem como de deformação específica, entende-se que a progressão da área de contato pode ser função da deformação específica, caso o material em pauta exiba comportamento visco elástico. (FEITOSA 2014)

O objetivo deste trabalho é de mensurar como as Técnicas alternativas tais como: Técnica do Carimbo, da Medição Direta, Técnica a Laser e a Técnica Fotomecânica/*Moiré* podem contribuir em paralelo ao *Brazilian Test* para resultados semelhantes obtidos de formas diferentes. Portanto em laboratório foram mensuradas todas as técnicas com apoio de softwares como *IMAGEJ*, *Moiré Fringe* e macros para que as fotos sejam processadas de forma mais rápida e eficiente. No decorrer deste trabalho será apresentado todos os experimentos para obter os dados da deformação lateral do corpo de prova e relacioná-los com a área de contato. As Técnicas Fotomecânicas/*Moiré* (LINO 2008), *Laser* e Medição direta medem a deformação lateral. A Técnica do Carimbo determina a largura de contato do corpo de prova, a largura irá determinar as propriedades mecânicas por compressão diametral.

1.1. JUSTIFICATIVA

Este trabalho apresenta técnicas ópticas interferométricas aplicáveis na determinação da área de contato bem como da deformação de um corpo de prova cilíndrico sob tensão mecânica e se justifica pela oportunidade de se desenvolver uma análise em um corpo de prova tido como ideal, confeccionado em borracha (Bo) sob ensaio mecânico não destrutivo. Isso está associado também na determinação das propriedades mecânicas do material em pauta. Por se tratar de um CP tido como ideal as mesmas metodologias são adotadas na determinação das propriedades mecânicas de materiais biológicos de geometria aproximadamente cilíndrica, tais como colmo-de cana-de-açúcar e outros aplicáveis na otimização dos processos industriais, visando maior eficiência no processo, bem como a minimização do uso de energia.

1.2. OBJETIVO GERAL

Obter dados de deformação lateral do corpo de prova e relacioná-los com a área de contato. As Técnicas de *Laser*, Técnica Fotomecânica/*Moiré* e Medição direta medem a deformação lateral. A técnica do Carimbo determina a largura de contato do corpo de prova. A largura irá determinar as propriedades mecânicas por compressão diametral.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a possibilidade do uso das técnicas alternativas para determinar a área de contato de corpos de prova sob compressão diametral como base de apoio para o ensaio de Lobo-Carneiro (*Brazilian Test*);
- Determinar a área de contato de acordo com a força aplicada utilizando a técnica do Carimbo;
- Determinar a deformação diametral pelas técnicas Fotomecânica/*Moiré*, *Laser* e da Medição direta.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A TÉCNICA DE LOBO-CARNEIRO

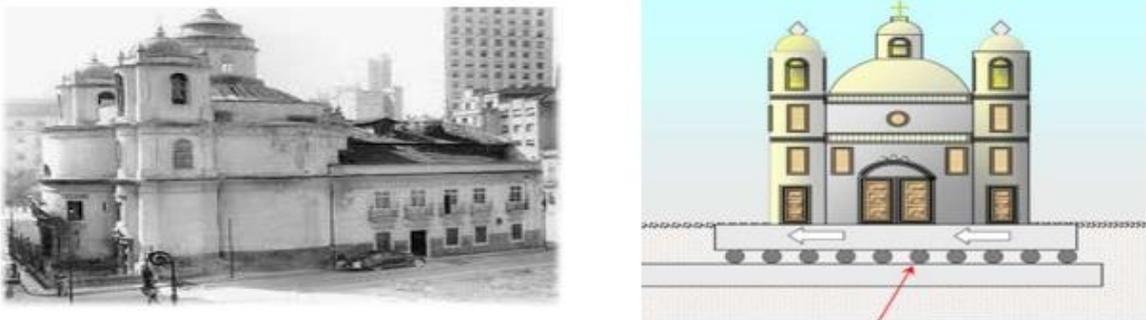
2.1.1. HISTÓRICO

A resistência à tração tem se mostrado um importante parâmetro para a caracterização mecânica dando origem a muitos métodos indiretos, dada as dificuldades surgidas em se estudar esse tema por meio de técnicas diretas. (ASSAN, 2010)

Fernando Luiz Lobo Barbosa Carneiro elaborou o método de dosagem experimental de concretos denominado *Brazilian test* – ensaio brasileiro. Esse método foi apresentado na 5ª Reunião da Associação Brasileira de Normas Técnicas em setembro de 1943, e a literatura pertinente revela que após dez anos descobriu-se que um pesquisador japonês de nome Tsuneo Akasawa chegara de forma independentemente aos mesmos resultados no Japão na cidade de Tokio em novembro de 1943, dois meses após a comunicação do engenheiro Lobo-Carneiro.

Através da RILEM *Reunião Internacional dos Laboratórios de Ensaios*, este método foi divulgado internacionalmente, e foi adotado pelo Comitê Europeu de Concreto, pela RILEM e pela *American Society for Testing Materials*. No período da Segunda guerra Mundial, Lobo-Carneiro que ainda estava no início de sua carreira, recebeu a proposta de estudo de deslocar a igreja de São Pedro, uma igreja com valor histórico, de pequenas proporções, construída em arte barroca e com planta de forma elíptica – para o outro lado da Avenida Presidente Getúlio Vargas, de tal forma que pudesse evitar que ela fosse demolida. Esse projeto consistia em substituir a fundação da igreja por rolos de concreto com a finalidade de desloca-la para a outra margem da avenida. A empresa de fundações e infraestruturas FRANKI – tinha tido sucesso num caso semelhante na Europa no transporte de construções sendo utilizando rolos de aço (Figura 1).

Figura 1: Igreja de São Pedro (Esq.) Movimentação com Rolos de concreto (Dir.)



Fonte: clubedoconcreto.com.br/2013/a-origem-do-brazilian-test.html

No Brasil surgiu a ideia de se utilizar rolos de concreto devido à escassez do aço devido a segunda guerra mundial, porém na Alemanha foram utilizados rolos de aço. O corpo de prova assim construído foi testado na prensa de ensaios mecânicos rompendo de maneira inteiramente diferente em relação ao rolo de aço com uma fissura vertical, partindo em dois pedaços. Lobo-Carneiro então estudou o caso e lhe ocorreu propor um novo método para a determinação da resistência à tração de concretos.

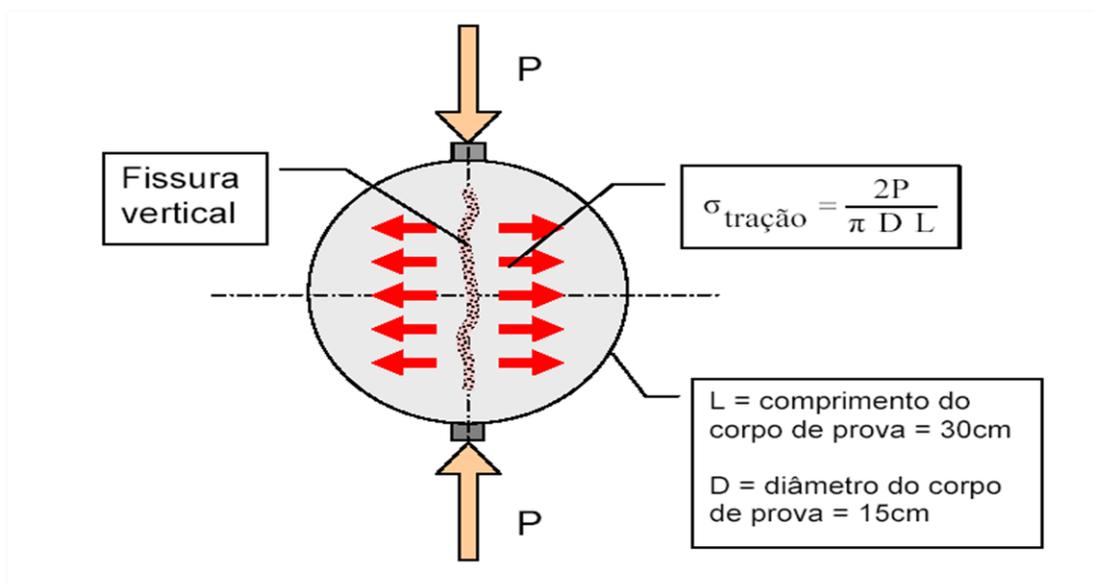
A resistência à compressão era determinada em cilindros ensaiados diametralmente, colocando os cilindros em posição horizontal entre os pratos da prensa para determinar as características da resistência à tração. A igreja acabou sendo demolida, porque suas alvenarias eram bastante espessas, algumas tinham mais de um metro, mas completamente heterogêneas, dentro delas havia pedaços de estátuas, madeira, tijolos o que as tornavam frágeis, além disso, o prefeito da época, Henrique Dodsworth, passou a ser ridicularizado. Então o prefeito decidiu questionar a empresa FRANKI com o intuito de saber se ela poderia garantir que esta operação teria sucesso e diante da negativa do diretor da empresa o prefeito deu o caso por encerrado e decidiu por demolir a igreja. A resistência à compressão era determinada em cilindros ensaiados diametralmente, colocando os cilindros deitados entre os pratos da máquina e determinaria a resistência à tração. O ensaio de Dosagem de Concretos (BOGGIO 2000) apresenta um método experimental mais conhecido como Método do INT (LOBO CARNEIRO 1953), o qual estabelece as proporções dos componentes que são empregados na elaboração do concreto. Lobo-Carneiro desenvolveu um método internacional para o cálculo da resistência de concreto à tração diametral e levada em 1948 para a reunião da fundação

da Rilem a qual reuniu vários líderes dos mais importantes laboratórios de engenharia do mundo.

No Brasil naquela época não foi dada a importância devida ao método, porém na França foi utilizado com o nome de (*Essai Brésilien*). Já em 1984 esta metodologia conquistou o prêmio Interamericano de Ciência Bernardo Houssay, sendo então denominado como *Brazilian test* e tendo sido adotado pela Associação Internacional para Padronização (ISO) nos anos 80. Isto posto, este trabalho baseado na Técnica de Lobo-Carneiro propôs o estudo de viabilidade de o mesmo ser utilizado em outros materiais nesse caso o CP de borracha como modelo ideal o qual poderá oferecer suporte técnico aos ensaios de compressão diametral aplicada a vários diferentes materiais usados na engenharia, notadamente em corpos de prova vegetais.

Lobo-Carneiro estudou teoricamente esta possibilidade e lhe ocorreu propor um novo método para determinar a resistência à tração dos concretos. Sabe-se que a resistência à compressão era determinada com CP cilíndricos de dimensões 15 cm de diâmetro e 30 cm altura, ensaiados diametralmente.

Figura 2: Ensaio de compressão diametral ou de tração indireta em concreto, criado por Lobo-Carneiro (1943)



Fonte: CARNEIRO, F.L.L., 2ª Edição, Rio de Janeiro. 1953.

2.1.2. EQUAÇÃO DE LOBO-CARNEIRO

O ensaio de tração por compressão diametral é conhecido mundialmente como ensaio brasileiro de tração, criado pelo Prof. Fernando Luiz Lobo-Carneiro, onde se consegue de forma indireta encontrar a resistência a tração do concreto, através de uma relação com sua compressão diametral.

$$E = \frac{8(1-\nu^2)Z^2F}{\pi D}$$

$$\frac{D}{d} = \frac{1}{2Z^2} \left[\ln(2Z) + \frac{1}{2} \right]$$

$$Z = \frac{R}{b}$$

$$D = \frac{-b^2}{R} \left[\ln\left(\frac{b}{2R}\right) - \frac{1}{2} \right]$$

Onde:

E - Módulo de elasticidade (Mpa)

ν - Modulo de Poisson (adimensional)

b – Metade da largura da superfície de contato para *Brazilian Test* (mm)

D – Deformação (mm)

F – Força aplicada (N)

R e d – Raio e diâmetro do cilindro (mm)

Z = eixo de simetria

A área de contato é desenvolvida em função das características mecânicas do material constituinte do corpo de prova; m assim sendo, a área de contato é função das propriedades mecânicas do corpo de prova. Se os ensaios mecânicos forem programados para se levar a cabo compressão diametral em cilindros de mesmas dimensões, porém exibindo módulo de elasticidade de diferentes valores, os valores das áreas de contato também exibirão respectivamente valores diferentes. Os materiais possuem várias propriedades que são distintas uma das outras e podem ser classificados em dúcteis e frágeis e que dependem de suas características de tensão-deformação. Materiais dúcteis por exemplo quando comprimidos deformações laterais apreciáveis são geradas até o ponto de ruptura apresentando o (efeito barril), e a fragilidade é a capacidade do material fraturar-se com pouca deformação. A dureza é a propriedade mais utilizada na indústria de borracha e é medida em unidades de (*SHORE A*) (CAETANO 2008). A medida da dureza baseia-se na penetração de uma esfera rígida num provete normalizado, em condições previamente fixadas, A relação entre a profundidade de penetração de uma esfera rígida e o módulo de Young de um material perfeitamente elástico e isotrópico.

$$\frac{F}{E_0} = 0,0038 * R^{0,65} * p^{1,65}$$

Sendo:

F – Força de penetração, em Newton;

E₀ – Módulo de Young, em MPa;

R – Raio do penetrador esférico, em mm;

P – Profundidade de penetração, em mm.

2.2. CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS DE PROVA (CP) DE BORRACHA

Dentre os 20 (vinte) corpos de prova mostrados na (figura.3) abaixo foram selecionados 03 (três) aleatoriamente, que apresentaram as melhores condições de utilização para este experimento. Corpos de prova utilizados no experimento (Figura 3) apresentam as características listadas na Tabela 1:

Figura 3: Corpos de prova de borracha



Fonte: Autoria própria

Tabela 1: Características dos corpos de prova de borracha

Corpo de Prova (CP)	Altura (L) (mm)	Diâmetro (D) (mm)	Dureza (shore A)	Variância (V)
1	76,64	30,79	76,50	0,35
2	77,22	38,33	76,60	0,12
3	76,68	50,03	76,60	0,10

Fonte: Autoria própria (2022)

Obs.: O Módulo de Elasticidade (E_i) e Poisson (ν) da borracha foram calculados durante a pesquisa e são citados nas tabelas 2 e 3. Referência- Tese de Doutorado Renato Laurenti – março de 2003.

De acordo com a Tabela 1, Dureza Shore é uma medida de resistência (solidez) que um material tem a indentação.

A variância é uma medida de dispersão utilizada na estatística para calcular a variabilidade dos dados, ou seja, o afastamento dos dados em relação à média do conjunto analisado. Para tal determina-se o valor médio das diferenças quadradas da média.

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}$$

Onde:

σ^2 : variância

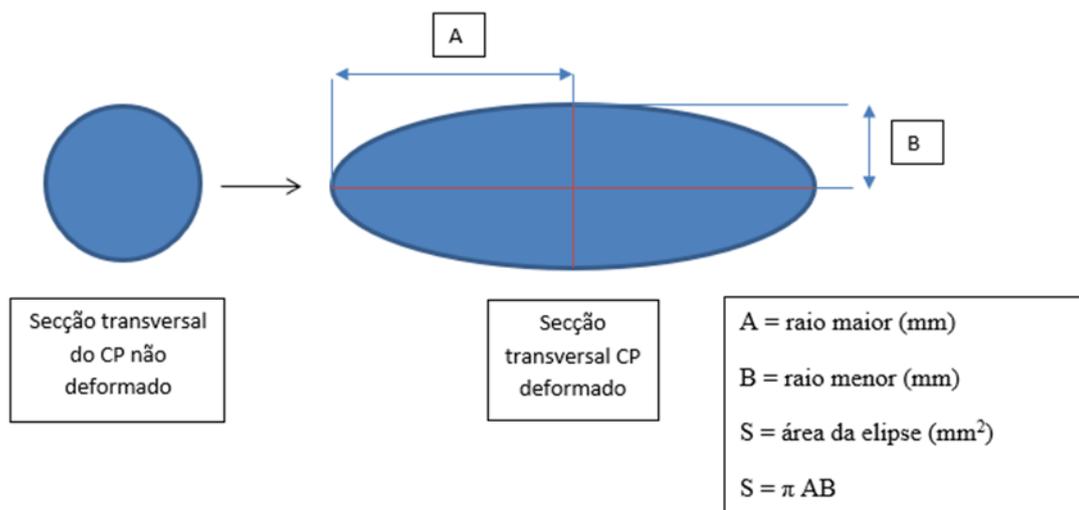
X_i : valor analisado

\bar{X} : média aritmética do conjunto

n: número de dados do conjunto

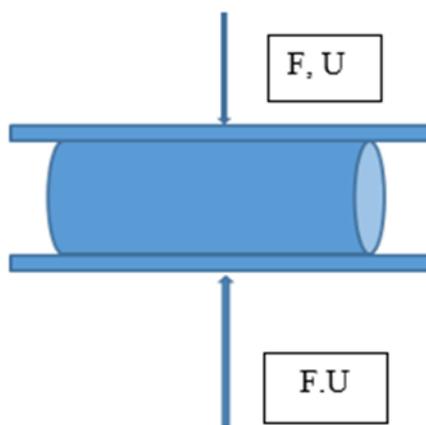
Fonte: Martins, (2013)

Figura 4: Área da Secção Transversal Elíptica (mm)



Fonte: Boulos & Camargo 1987

Figura 4: Compressão Diametral de um Corpo de Prova P Cilíndrico de Borracha (Bo) (Ensaio de Lobo-Carneiro, BT – *Brazilian Tensile Test*). Onde F representa a força diametral aplicada e U representa a deformação.



Fonte: Boulos & Camargo 1987

2.3 FOTOELASTICIDADE CLÁSSICA

TIMOSHENKO E GOODIER (1970) explicam a metodologia da fotoelasticidade e baseia-se na descoberta de David Brewster quando uma grade de vidro é tensionada e examinada à luz polarizada que atravessa essa grade, surge então uma configuração colorida devido as tensões.

As técnicas perfilométricas são de grande importância para vários seguimentos tais como: indústria, medicina, biologia, engenharia e tudo o que se refere as práticas de controle de qualidade, na modelagem matemática, e também em diagnósticos clínicos. Em se tratando da Engenharia Agrícola nota-se que vários tipos de problemas os quais envolvem o estudo perfilográfico das superfícies irregulares algumas dais quais: órgãos vegetais, elementos das máquinas agrícolas. A Fotomecânica é a

técnica pelo qual se utiliza processos fotográficos na produção de forma que serão impressas mecanicamente.

Com a finalidade de atingir os objetivos CALLISTER JR. (2006) explica que no ensaio de fotoelasticidade, quando um corpo é deformado elasticamente junto com o material birrefringente, as propriedades ópticas desta amostra se tornam anisotrópicas. Franjas de interferência então são geradas e, conseqüentemente, a distribuição de tensões no interior da amostra pode ser deduzida, quando submetido a esforços de carregamento, o resultado será a produção proporcional de efeitos ópticos, que aparecem sob a forma de franjas. Dando início ao carregamento do modelo, com formato de pequenos incrementos no esforço aplicado, as franjas vão surgindo.

De forma em que se aumentam os esforços aplicados, novas franjas irão surgindo e as franjas iniciais vão se dirigindo para as áreas menos tensionadas. Este efeito terá continuidade até que ao parar este incremento no carregamento ou o modelo entre em colapso. MIYAKE (2000) explica que a técnica de fotoelasticidade clássica consiste em aplicar uma película fotoelástica (material birrefringente) sobre a superfície da estrutura de um corpo de prova para a obtenção das franjas. Porém, para ser obtido um resultado confiável, deve haver uma perfeita ligação entre a manta e a interface da estrutura para que a tensão gerada no corpo de prova seja transferida completamente para a película. A observação das franjas só é possível com o uso de um polarímetro de transmissão.

SPINELLI et al. (2003) afirmam que a análise de tensões na fotoelasticidade clássica necessita do entendimento de dois tipos de franjas: as franjas isoclínicas e as franjas isocromáticas. A primeira ocorre sempre que qualquer direção da tensão principal coincide com o eixo de polarização do polarizador, fornecendo assim, informações sobre as direções das tensões principais. Quinan (2005) afirma que

[...] as franjas isocromáticas são obtidas por materiais com dupla refração, ou seja, birrefringentes os quais submetidos a ações que exibem o campo de tensões/deformações na forma de faixas coloridas. Tal padrão de franja é linearmente proporcional às diferenças entre as tensões/deformações principais, isto é, franjas de mesma cor apresentam mesma intensidade de tensão e deslocamento. A direção da tensão pode ser obtida através da propriedade das isoclínicas, esta representa o local geométrico ao longo do qual as direções das tensões principais são as mesmas em todos os seus pontos (QUINAN, 2005)

SANTOS et al. (2010) “apresentam outra informação importante sobre as franjas, formadas sobre o corpo está relacionada com o distanciamento entre elas. O mesmo explica que as franjas podem indicar a concentração de tensões através de sua proximidade, isto é, quanto maior a proximidade das franjas, maior será a concentração de tensão neste local. A coloração das franjas é obtida de acordo com a fonte de luz utilizada. Para franjas claras e escuras, utiliza-se fonte de luz monocromática, enquanto, para franjas coloridas, a fonte de luz tem de ser branca (SPINELLI et al. 2003)

Fotoelasticidade clássica aplicada ao ensaio de Lobo-Carneiro para determinar os campos de tensão.

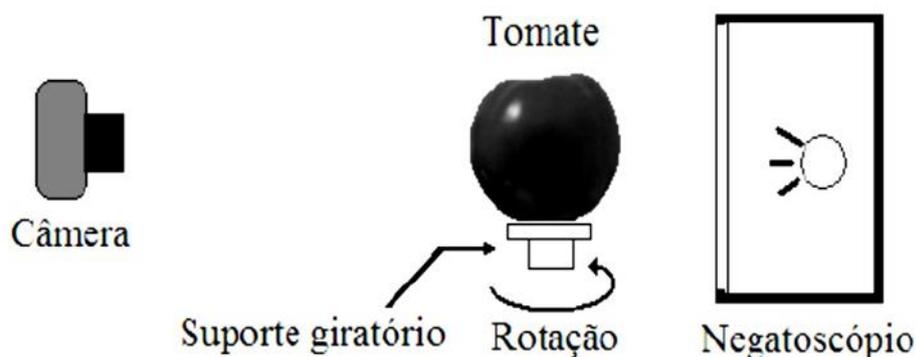
2.4 METÓDOS FOTOMECÂNICOS

2.4.1 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS DA SILHUETA

Técnica da Silhueta não será utilizada nesse experimento; Segundo Lino (2012),

Horticultura Brasileira 30: S7536-S7543, a técnica da silhueta emprega uma câmera fotográfica digital com iluminação de fundo de forma a realçar a silhueta dos corpos de prova. A partir de uma rotina aberta, cria-se o arquivo da imagem transformando a figura captada em binária, reconhecendo o contorno do corpo de prova gerando a matriz com as coordenadas do contorno do CP, i.e., obtendo então a figura 3D do CP. Os volumes dos corpos de prova foram calculados e comparados com o volume determinado pelas silhuetas. O autor apresenta o seguinte esquema do *setup* experimental empregado em ensaios com a técnica da silhueta. (LINO, 2012).

Figura 5: Setup experimental da técnica da silhueta



Fonte: Lino (2012)

O setup experimental aplicado nessa técnica envolve uma câmera fotográfica SAMSUNG manual, sendo o corpo de prova posicionado na base da Prensa *Canners* com iluminação de cor branca ao fundo, posicionada em uma caixa com lâmpadas e com tampa de material transparente, conforme ilustra a Figura 11.

2.4.2 FENOMENOLOGIA DE *MOIRÉ*

A técnica Fotomecânica de *Moiré* (TM) é baseada na fenomenologia *Moiré*, pela qual são utilizadas duas grades superpostas que geram franjas padrões e que por meio do tratamento da imagem de forma adequada permite deduzir qualitativamente o mapa de distribuição de tensões e deformações. As técnicas de *Moiré* (TM) são subdivididas em: *Moiré* de projeção, *Moiré* de sombra, *Moiré* de interferometria, *Moiré* microscópico, *Moiré* holográfico e *Moiré* de interferência⁹.

Sciammarella (1982) relata que a palavra **Moiré** é de origem francesa dando ideia de uma superfície molhada. No passado essa técnica era empregada para qualificar tecidos de seda, importado da China. A amostra do tecido era posicionada em duas camadas e quando em movimento relativo entre as camadas aparecem padrões semelhantes a ondas, as quais são denominadas “franjas de *Moiré*”. Embora a técnica de *Moiré* seja conhecida há algum tempo, somente nos últimos anos vem sendo estudada mais a fundo, isso devido ao avanço das tecnologias de captura e processamento de imagens. Pode-se como fonte de luz branca, um projetor multimídia acoplado a um

computador e com a utilização do *software Fringe Projection*, câmera digital para captura de imagens e as grades de *Moiré* (digitais ou físicas), neste caso digitais. A interação entre as grades de *Moiré* produz “franjas de *Moiré*” com o corpo deslocado e com o corpo não deslocado gerando franjas denominadas de “franjas-padrões” as quais permitem determinar o mapa de deformação do corpo de prova.

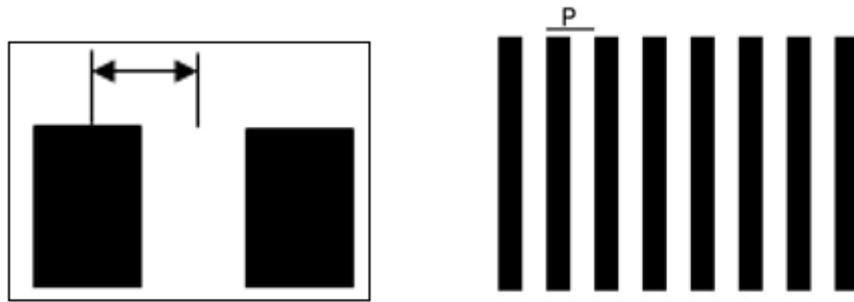
As várias técnicas de *moiré* exibidas na literatura pertinente são capazes de gerar a área deformada do CP. Essa área quando associada ao software IMAGEJ poderá gerar a área de contato entre o CP e a superfície de suporte da prensa de ensaios. Segundo (Lino 2008) “franjas podem ser obtidas por duas formas: pelo método de *Moiré* de sombra ou então por *Moiré* de projeção. Em *Moiré* de sombra, o retículo o qual possui faixas claras e transparentes é colocado à frente do objeto, sendo o mesmo iluminado por uma fonte de luz branca. A sombra do retículo então é projetada sobre a superfície do CP, gerando assim o retículo modelo (Rm). As franjas de *Moiré* são formadas pela interferência dos dois retículos, quando o observador olha através do retículo de referência (Rr)”. A técnica de projeção, (CLOUD 1998):

[...] mostra que o retículo é projetado sobre a superfície do objeto, de forma a modular ou acompanhar as variações geométricas desta superfície, gerando desta forma o Rm. Este retículo que projetado sobre o plano de referência dá origem ao (Rr) sendo as franjas observadas por superposição de ambas as imagens (CLOUD, 1998).

É o fenômeno óptico provocado pela sobreposição de duas grades compostas por faixas alternadas de cor clara e escura com larguras idênticas e com mesmos períodos.

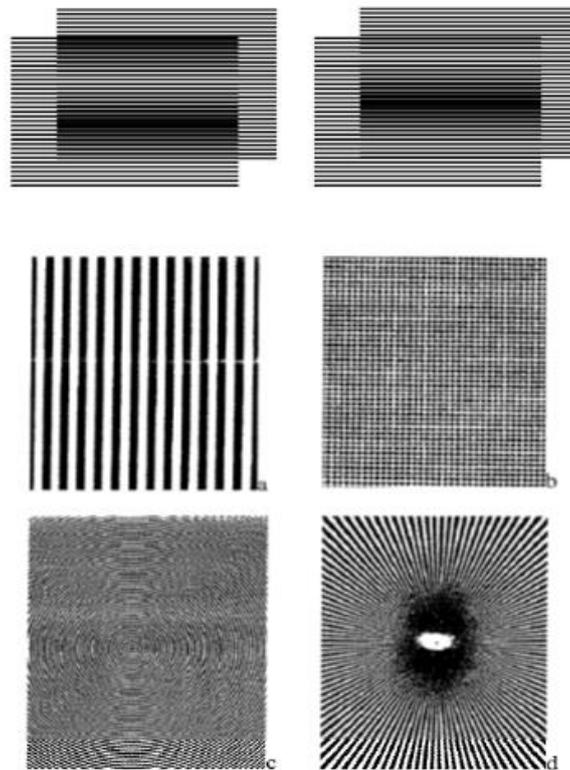
De acordo com (LINO 2002) os retículos são compostos de faixas transparentes e escuras alternadas entre si, paralelas e equidistantes. O centro das faixas (claras ou escuras) é chamado de linhas de grade, e a distância entre os centros de linha de grade de duas faixas escuras (ou claras) contíguas são chamados de período ou passo (p).

Figura 6: Linhas de Grade e Passo de Grade



Fonte: Adaptado de Gazzola (2013)

Figura 7: Modelos de Grade de Ronchi

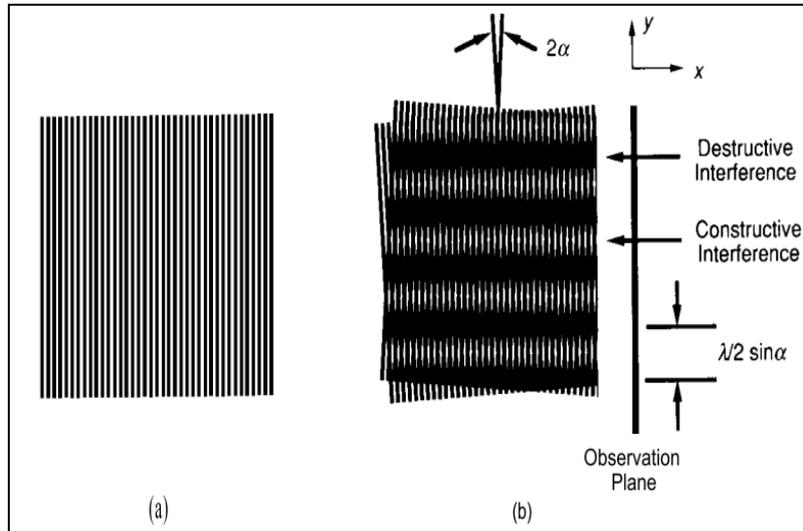


Fonte: Adaptado de Gazzola (2013)

Esta figura apresenta a sobreposição de duas grades deslocadas por um movimento relativo angular (θ) que gera uma terceira faixa semelhante a ondas e com ângulo e período diferenciados das duas telas que produzem o fenômeno *Moiré*, uma das grades denominada grade referencial se mante fixa enquanto a segunda grade que é denominada por grade objeto sofre deslocamentos angulares. O fenômeno físico da

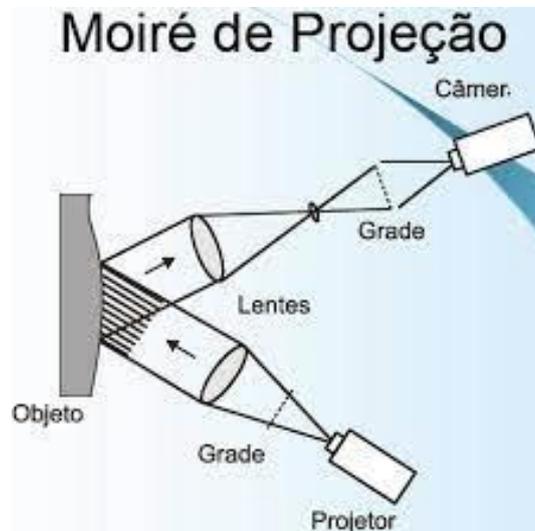
técnica de *Moiré* é explicado por (SCIAMARELLA 1982); (apud LINO e Dal Fabbro, 2004).

Figura 8: Modelos de Grade de Ronchi



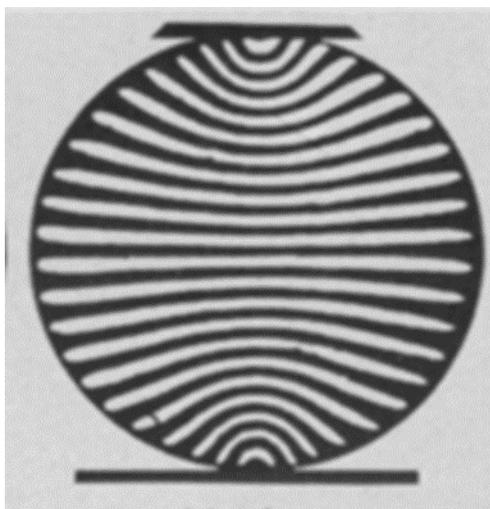
Sobreposição das grades e a formação de franjas claras e escuras. Fonte: Gazzola (2012)

Figura 9: Arranjo Experimental – Moiré



Técnica de Moiré por projeção. Fonte Adaptado de Gazzola (2013)

Figura 10: Técnica Fotomecânica/ Moiré



Fonte: Timoshenko e Goodier (1970) apud Gazzola (2013)

2.4.2 LASER

Com a utilização de um feixe de luz laser é possível medir deslocamentos e deformações diretamente sobre a superfície de estruturas e componentes mecânicos, por meio de processo não destrutivo o que é um dos objetivos desse trabalho.

O Laser – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, foi inventado nos anos 60 por Theodor H. Maiman e teve como precedente da sua pesquisa um artigo científico com publicação em 1917 por Albert Einstein o qual seguiria a emissão estimulada de uma radiação luminosa bem como em 1954 do MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation), bem como na Segunda Guerra Mundial o desenvolvimento do RADAR (Radio Detection and Ranging (BRANDALIZE e PHILIPS¹, 2002 apud CARDOSO, 2016).

¹ BRANDALIZE, M. C. B.; PHILIPS, J. W. Lasers nos levantamentos terrestres. Revista InfoGeo, ano 4, n. 22, p. 52-55, jan./fev. 2002.

2.4.3 ERROS EXPERIMENTAIS

Curless (2001) propõe os parâmetros para que possam ser verificados a qualidade ou consistência das medidas obtidas pelas técnicas experimentais de perfilometria.

- Resolução: As menores mudanças na topografia as quais o sensor pode captar e quantificar.
- Exatidão: As variações estatísticas entre as medições que são repetidas de um valor conhecido.
- Reprodutibilidade: As medidas podem ser repetidas?
- Sensibilidade ambiental: fatores ambientais que podem influenciar as medições.
- Velocidade: A velocidade em que as medidas dos perfis são obtidas pelas técnicas.

Quando são realizadas medições sempre há erros que acompanham. Fontes de erros fazem com que todas as medidas por mais cuidadosas que possam ser podem ser afetadas por erros experimentais. Erros estes que pertencem a dois grupos que são: os erros sistemáticos e os erros aleatórios.

De acordo com (LINO 2012, p. 26), erros sistemáticos são aqueles que fazem com que as medidas feitas estejam consistentemente acima ou abaixo do real valor. As fontes de erros são identificáveis de forma fácil, e podem ser eliminadas ou compensadas. Erros os quais prejudicam a exatidão da medida e pode inclusive acontecer por motivo de instrumentos descalibrados, pelos métodos de observação de forma inadequada, efeitos do meio ambiente onde está sendo feito o experimento, e pela simplificação de modelos teóricos.

Os erros aleatórios são as variações normais das medidas, com desvio para valores maiores ou menores da média, afetando a precisão da medida, nem sempre se pode identificar suas fontes.

Willmot et al. (1985) afirmam que: a precisão é o grau de dispersão dos valores em torno da média. Não se pode deixar de mencionar como possibilidade de erros a calibração da Prensa *Kanners* a qual é necessário verificar se a prensa tem certificado

de calibração recente e também se os corpos de prova estão íntegros em relação a tempo de vida útil e as várias compressões sofridas pelos mesmos; pois são polímeros.

Fontes de erros encontrados durante a pesquisa:

- Os corpos de prova de borracha por terem sido prensados por várias vezes podem ter perdido as características originais inclusive por pelo motivo de terem mais de 5 anos de fabricação.
- A variação dos gráficos do estudo mostra que a mesma pode ser devido a idade do corpo de prova e suas características como modo de elasticidade por exemplo e dureza shore.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi conduzido no Laboratório das Propriedades Físicas dos Materiais Biológicos, na Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI - da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, e apresenta as principais características físicas dos corpos de prova empregados nos ensaios mecânicos, bem como as características dos equipamentos utilizados nos ensaios ópticos e mecânicos. O ensaio mecânico denominado *Brazilian test* será aplicado em todos os casos. No entanto, a interpretação dos resultados será apresentada por quatro diferentes métodos, a saber: técnica do carimbo, medição direta, técnica laser e fotomecânica / *Moiré*, conforme está apresentado na revisão da literatura.

A grade explicativa mostrada na (Figura 13) detalha o planejamento dos ensaios a serem executados no Laboratório. Para a moldagem dos Corpos de Prova do ensaio de compressão foram escolhidos três CP's de borracha (Figura 3), dos quais apresentaram a melhor condição para serem considerados Modelo Ideal. As dimensões dos CP's de Bo são apresentados na Tabela 1, o Módulo de Elasticidade é apresentado na Tabela (2) e o Coeficiente de Poisson na Tabela (2). As forças F(kgf) aplicadas diametralmente no corpo de prova assumiram os seguintes valores: 30 kgf, 60 kgf, 90 kgf, 120 kgf e 150 kgf de forma a não causar a ruptura do corpo de prova de Bo. Com a aplicação da força diametral o CP deforma, assumindo uma secção transversal aproximadamente elíptica cujos raios maiores (A_i) e (B_i) para i (1,3) bem como a área (S_i) estão ilustrados na (Figura 4).

O módulo de elasticidade define-se como o cociente entre a tensão e a deformação, no caso da borracha, face à não proporcionalidade entre tensões e deformações, o módulo é definido para cada percentagem de alongamento, tal como segue:

De acordo com a pesquisa no site abaixo segue a tabela com o coeficiente de Poisson.

Tabela 2: Coeficiente de Poisson da borracha

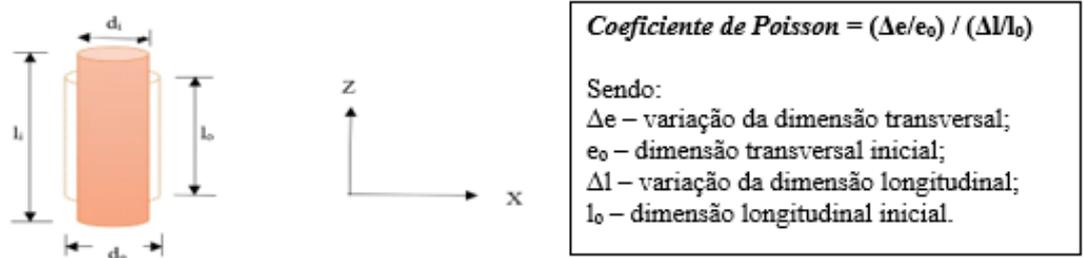
Material	Valor Máximo	Valor Mínimo
Borracha	0,50	0,45
Borracha dura (Ebonite)	0,43	0,39
Borracha Termoplástica	0,50	0,45

Fonte: Caetano 2022

3.3 COEFICIENTE DE POISSON (ν)

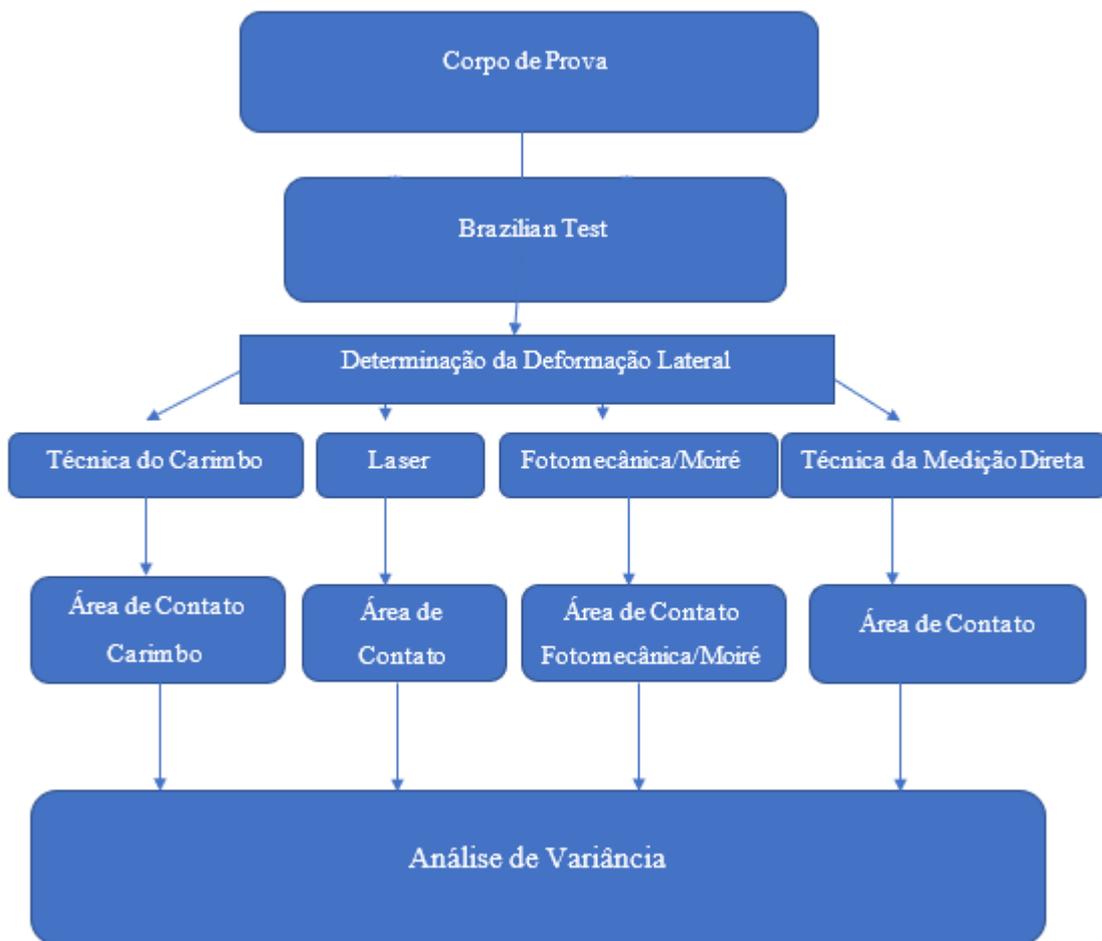
Denomina-se Coeficiente de Poisson (ν) a relação adimensional entre a deformação transversal relativa e a deformação longitudinal relativa.

Figura 11: Coeficiente de Poisson (ν)



Fonte: Caetano 2022

Figura 12: Grade explicativa dos ensaios experimentais



Fonte: Autoria própria

3.4 TÉCNICA DO CARIMBO

A Técnica do Carimbo é feita e medida de forma analógica e consiste em inserir uma folha de papel sulfite no modelo A4 e aplicar tinta de carimbo fosca no CP de borracha. Durante a compressão diametral a área de contato será impressa no papel. Manteve-se constante a razão de deformação de 0,25 mm/s para todas as forças aplicadas para cada CP de Bo sendo medida a deformação por compressão diametral por um paquímetro, sendo tabuladas numa planilha Excel com a finalidade de montar gráficos da deformação diametral do CP de Bo.

Figura 13: Técnica do carimbo



Áreas de contato impressas na compressão diametral dos corpos de prova 1, 2 e 3 comprimidos na força de 150 kgf.

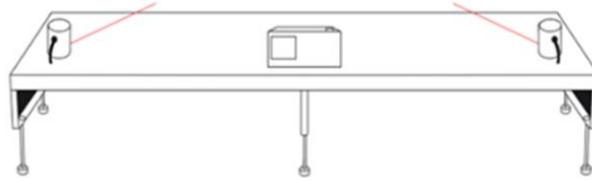
3.5 TÉCNICA LASER

A palavra em Inglês que significa: *Light Amplification by Stimulated Emission*.

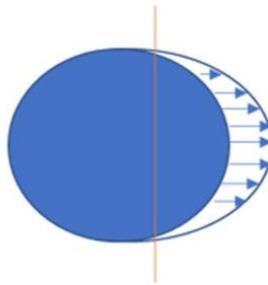
A Técnica da emissão de *Laser* de linha na cor vermelha consiste em emitir um feixe de linha laser na cor vermelha sob o CP de Bo apresentado na figura abaixo para a utilização da Técnica *Laser* foi desenvolvido o Módulo DalFabbro com as seguintes medidas: 430 mm de comprimento e 425 mm de largura que é acoplado à prensa *Kanners*. Quando da emissão da linha laser no CP a mesma foi utilizada como ponto de referência ZERO e a partir deste ponto pode-se medir a deformação do CP.

O Módulo *Dalfabbro* emite 2 feixes de luz laser de linha na cor vermelha diretamente no CP de borracha a ser comprimido com 30, 60, 90, 120 e 150 kgf, respectivamente. Em concomitância emite-se as 4 grades Ronchi geradas pelo software *Moiré Fringe*. Esses dados são então processados pelo *software* IMAGEJ o qual transforma os dados em PIXELS e, na sequência, transformados em mm com a finalidade de gerar as semi- elipses (mm²) nas figuras: 34, 35, 36, 37 e 38.

Figura 14: Módulo DalFabbro e incidência da luz laser



Linha laser vermelha ponto inicial Zero



Linha laser vermelha ponto inicial Zero

Dilatação do CP tomada a partir da linha laser na marca zero.

Fonte: Autoria própria

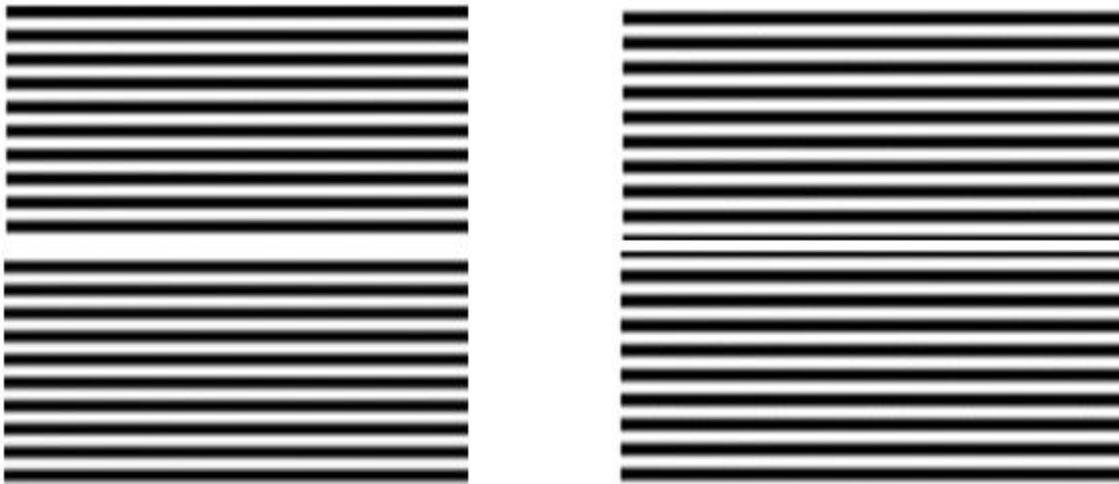
3.6 TÉCNICA FOTOMECÂNICA (MOIRÉ)

Técnica Fotomecânica (*Moiré*) consiste em emitir as grades de Ronchi (através do *software Moiré Fringes*) sob os três Corpos de Prova de Bo quando estão sob as compressões de 0, 30, 60, 90, 120 e 150 kgf, de acordo com o (*set up*) da Figura 4. Uma máquina fotográfica Samsung fotografa quadro a quadro os quatro tipos de grades de *Moiré* emitidas sob os Corpos de Prova de Bo que estão sob as compressões acima descritas e desta forma após serem feitas todas as fotos as mesmas tem um tratamento pelo *software IMAGEJ* de forma que serão visualizadas as imagens em *Pixels* e que serão transformadas em mm^2 para a plotagem das elipses e os gráficos de deformação.

O processamento de imagem foi feito conforme recomendado por (GAZZOLA 2013) em sua tese de doutorado na FEAGRI – UNICAMP.

Grades Defasadas 90° geradas pelo *software MoireFringe* entre si e projetadas sobre os CP cilíndricos gerando o modelo digital topográfico, processado pelo *software ImageJ*.

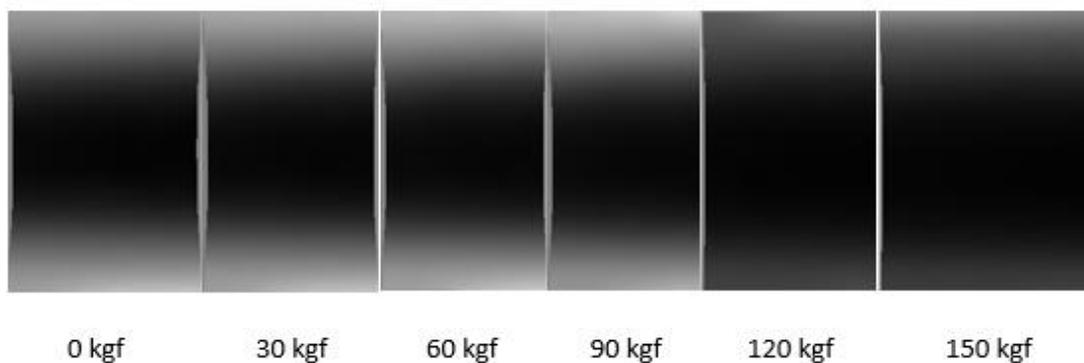
Figura 15: Técnica Fotomecânica, grades de Ronchi



Fonte: Gazzola (2013)

Modelo digital topográfico gerado pela projeção das quatro grades defasadas 90° entre si sobre o CP 1 Comprimido Diametralmente e Analisado pela Técnica de *Moiré*. *Software ImageJ*.

Figura 16: Técnica fotomecânica/Moiré



Fonte: Gazzola (2013)

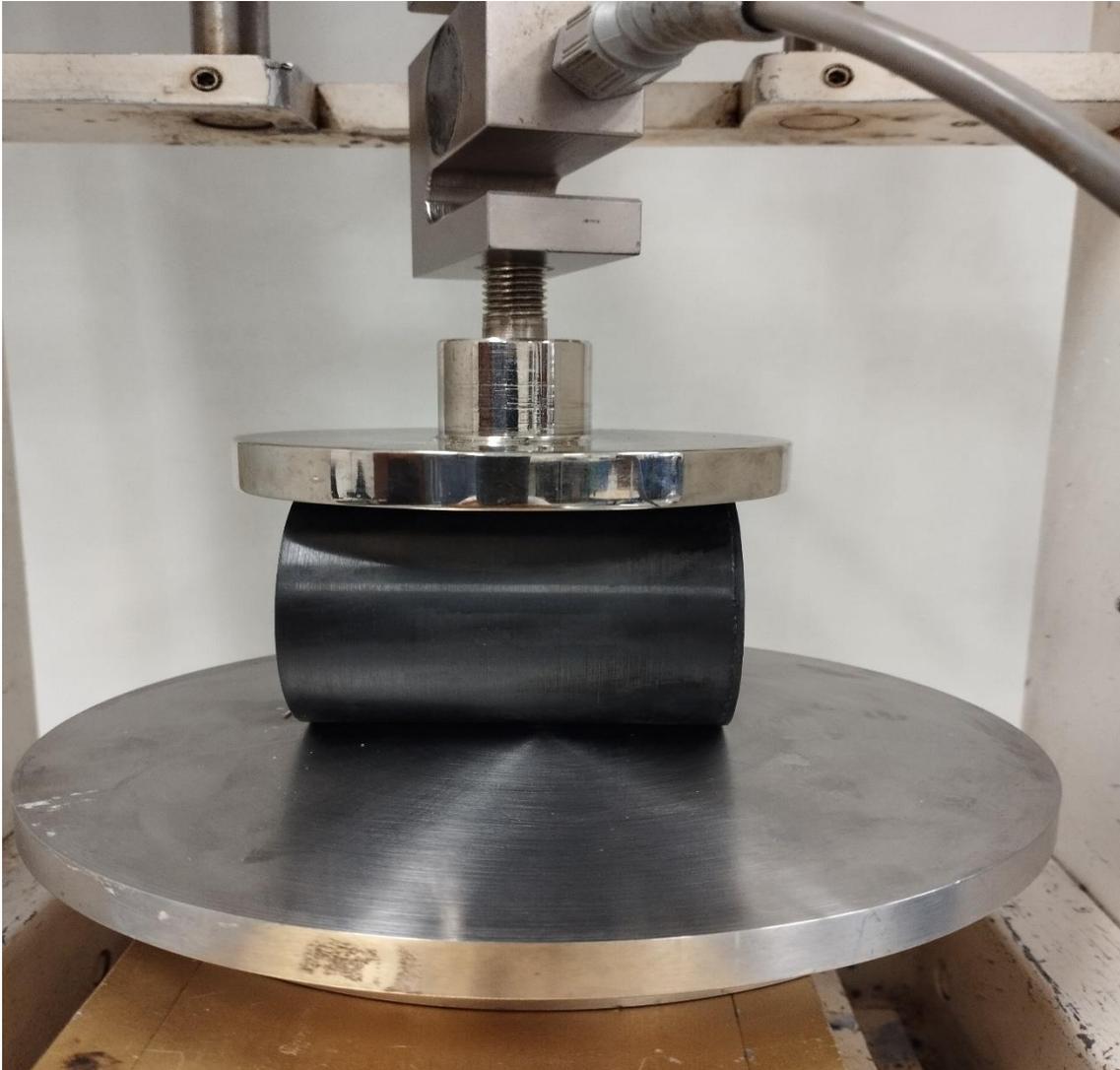
3.7 TÉCNICA DA MEDIÇÃO DIRETA (PAQUÍMETRO)

O ensaio da Medição Direta consiste em tomar as medidas dos raios menores e maiores dos corpos de prova com o paquímetro digital no momento da compressão diametral com razão de compressão de 0,25 mm/s com as forças de 30, 60, 90, 120 e 150 kgf respectivamente com os dados planilhados em Excel em mm² com a finalidade de verificar se esta Técnica dá suporte as Técnicas Fotomecânicas e com o *Brazilian test*.

3.8 ENSAIOS DE COMPRESSÃO DIAMETRAL (BRAZILIAN TEST)

Os ensaios de compressão diametral também foram conduzidos no Laboratório de Propriedades Mecânicas dos Materiais Biológicos da FEAGRI, UNICAMP. Para a realização dos ensaios mecânicos e fotoelásticos foi utilizada uma máquina universal de ensaio (D.1804.C/ *CANNERS MACHINERY LIMITED*) acoplada a um sistema de aquisição de dados munido pelo *software SPIDER 8*, com comando informatizado. Para o ensaio o autor construiu, no laboratório da FEAGRI, uma nova peça para a prensa *CANNERS*, com a finalidade de cobrir completamente o corpo de prova, para que a compressão fosse igual em todos os pontos do CP de Bo. Esses ensaios foram interpretados segundo as técnicas anteriormente mencionadas, a saber, técnica do carimbo, medição direta, laser e fotomecânica. O ensaio de compressão diametral é apresentado na Fig.5. onde foram necessários dois discos metálicos fabricados especificamente para este ensaio nas instalações do Laboratório da FEAGRI no Departamento de Mecânica. O Corpo de Prova foi cuidadosamente centralizado no prato de carga de forma a não deslizar durante o ensaio.

Figura 17: Disposição dos pratos planos na aplicação da força diametral F construídos especialmente para o presente trabalho de pesquisa.



Fonte: Autoria própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

De acordo com a pesquisa no site abaixo as propriedades mecânicas dos materiais são características que definem o comportamento dos materiais quando sujeitos à esforços mecânicos, e estão relacionadas com à capacidade de resistência ou transmissão destes.

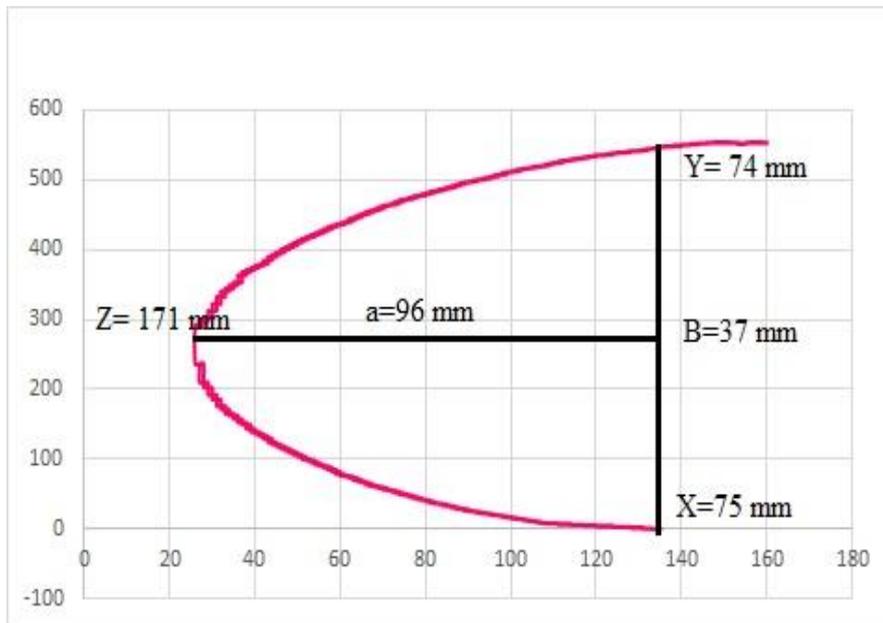
Tabela 3: Variação das dimensões

Força (kgf)	Ponto Z Def. Max. (mm)	Ponto X Eixo X (mm)	Ponto Y Eixo Y (mm)	A (mm)	B (mm)	Área Total (mm ²)
0	171	75	74	96	37	11159
30	166	66	400	200	200	62832
60	224	40	416	208	208	120235
90	184	49	383	192	192	81218
120	167	69	405	203	203	62345
150	160	50	379	190	190	65487

Fonte: Autoria própria

Variação das dimensões da secção transversal elíptica dos corpos de prova gerada pela força diametral aplicada.

Figura 18: Gráfico da secção transversal elíptica dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria

Figura 19: Técnica do carimbo. Área de contato impressa pela aplicação de força diametral (F) de 30 KGF



Fonte: Autoria própria

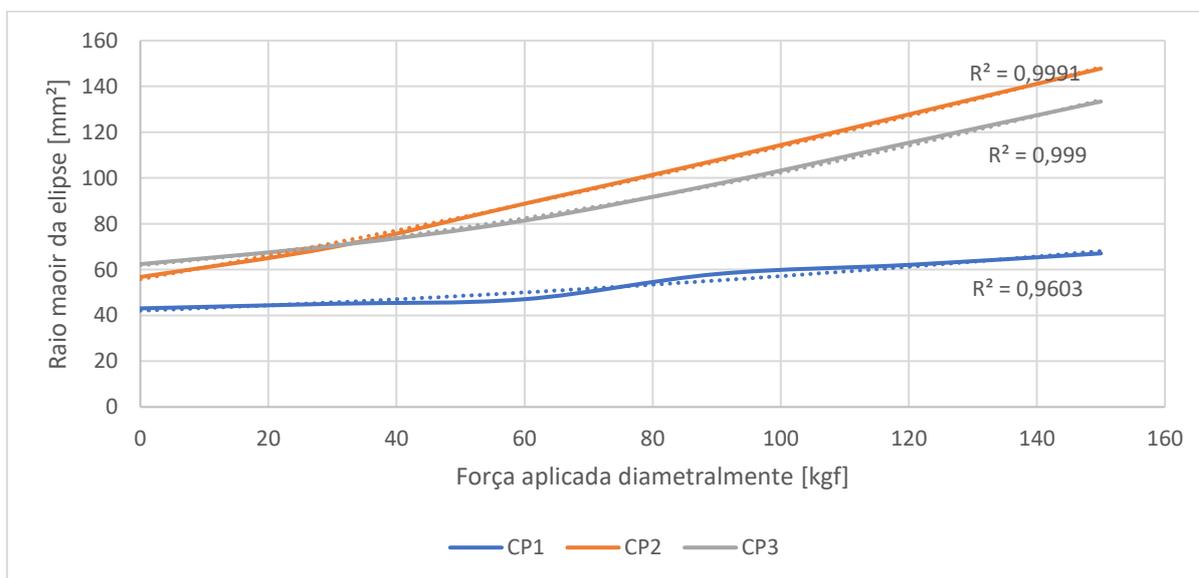
Tabela 4: Dimensões do raio maior da elipse

CP 1		CP 2		CP 3	
kgf	A (mm ²) 1/2 do raio maior da elipse.	kgf	A (mm ²) 1/2 do raio maior da elipse	kgf	A (mm ²) 1/2 do raio maior da elipse
0	43,06	0	56,77	0	62,38
30	45,06	30	69,77	30	70,38
60	47,06	60	88,77	60	81,38
90	58,06	90	107,77	90	97,38
120	62,06	120	127,77	120	115,38
150	67,06	150	147,770	150	133,38

Fonte: Autoria própria

Correlação da força em kgf com A 1/2 do raio maior da elipse dos CP1, 2, 3 de prova geradas nos eixos X (mm) Y (mm²). R² mostra o quão próximo da realidade está nossos dados em relação a linha de tendência, quanto mais próximo do valor 1 mais próxima da a realidade.

Figura 20: Deformação diametral dos corpos de prova de borracha



Fonte: Autoria própria

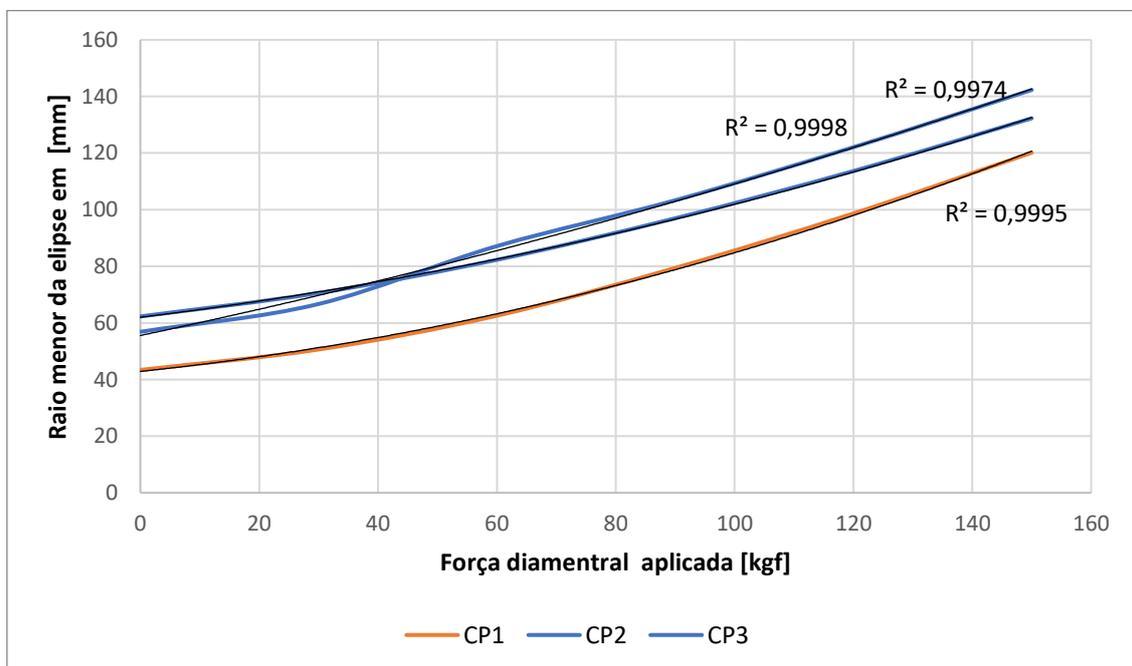
Tabela 5: Dimensões do raio menor da elipse

CP 1		CP 2		CP3	
kgf	B (mm ²) 1/2 do raio menor da elipse.	kgf	B (mm ²) 1/2 do raio menor da elipse	kgf	B (mm ²) 1/2 do raio menor da elipse
0	43,4	0	56,86	0	62,29
30	50,63	30	66,7	30	70,58
60	62,56	60	87,14	60	82,3
90	79,42	90	103,32	90	96,95
120	98,68	120	122,07	120	113,65
150	120,13	150	142,3	150	132,28

Fonte: Autoria própria

Correlação da força em kgf com B 1/2 do raio menor da elipse dos CP1, 2, 3 de prova geradas nos eixos X (mm) Y (mm²). R² mostra o quão próximo da realidade está nossos dados em relação a linha de tendência, quanto mais próximo do valor 1 mais próxima da realidade.

Figura 21: Gráfico de deformação lateral



Fonte: Autoria própria

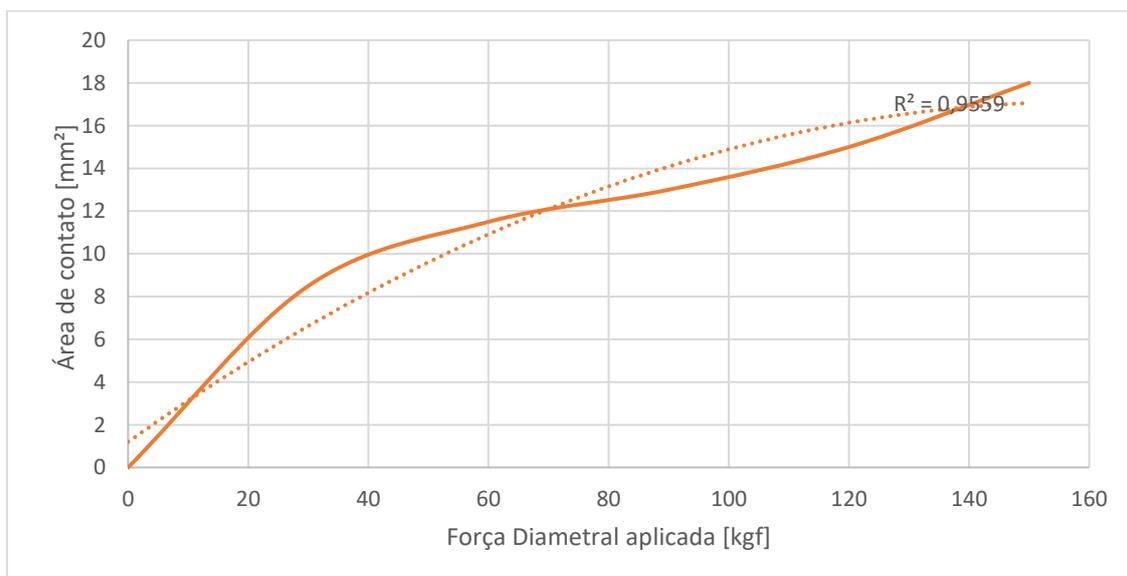
Tabela 6: Força diametral X área de contato da elipse CP1

Força Diametral F (kgf)	Área de Contato Impressa A (mm ²)
30	5
60	9
90	14
120	17
150	19

Técnica do Carimbo. CP1. Força diametral F(kgf) aplicada no CP , área elíptica da secção transversal S (mm²) e área de contato A (mm²) impressa correspondente. Obs.: Nesta tabela assume-se que a área de contato será utilizada com a letra maiúscula A.

Representação Linear da Força diametral F(kgf) aplicada, área elíptica da secção transversal S (mm²) e área de contato A (mm²) impressa correspondente. R² mostra o quão próximo da realidade está nossos dados em relação a linha de tendência, quanto mais próximo do valor 1 mais representada a realidade.

Figura 22: Gráfico da técnica do carimbo CP1



Fonte: Autoria própria

Tabela 7: Força diametral X área de contato da elipse CP2

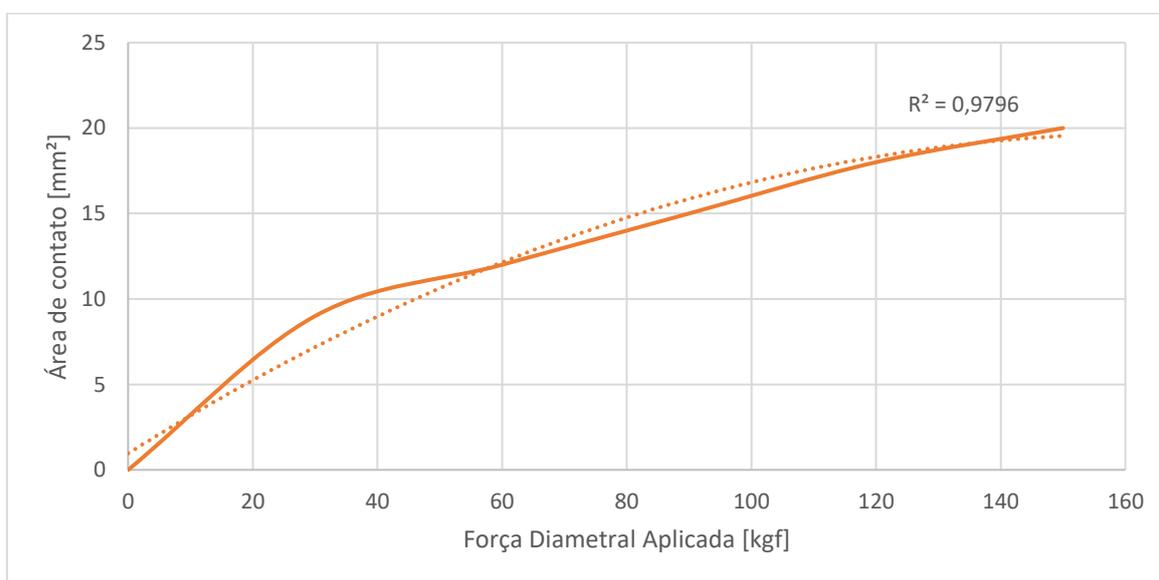
Força Diametral F (kgf)	Area de Contato Impressa A (mm ²)
30	9
60	12
90	15
120	18
150	20

Fonte: Autoria própria

Técnica do Carimbo. Força diametral F(kgf) aplicada no CP 2 , área de contato A (mm²) impressa correspondente.

Representação Linear da Força diametral F(kgf) aplicada, área de contato A (mm²) impressa correspondente. R² mostra o quão próximo da realidade está nossos dados em relação a linha de tendência, quanto mais próximo do valor 1 mais representada a realidade.

Figura 23: Técnica do Carimbo CP2



Fonte: Autoria própria

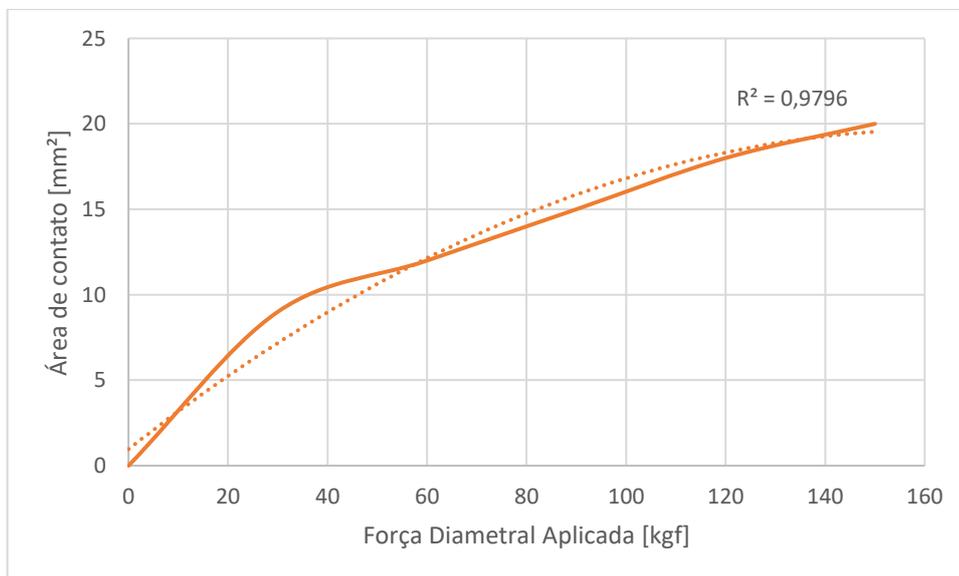
Tabela 8: Força diametral X área de contato da elipse CP3

Força Diametral F (kgf)	Area de Contato Impressa A (mm ²)
30	8,5
60	11,5
90	13
120	15
150	18

Técnica do Carimbo. Força diametral F(kgf) aplicada no CP 3, área de contato A (mm²) impressa correspondente.

Representação Linear da Força diametral F(kgf) aplicada, área de contato A (mm²) impressa correspondente. R² mostra o quão próximo da realidade está nossos dados em relação a linha de tendência, quanto mais próximo do valor 1 mais representada a realidade.

Figura 24: Técnica do Carimbo CP3



Fonte: Autoria própria

4.4 DADOS GERADOS PELA TÉCNICA FOTOMECÂNICA (*MOIRÉ*)

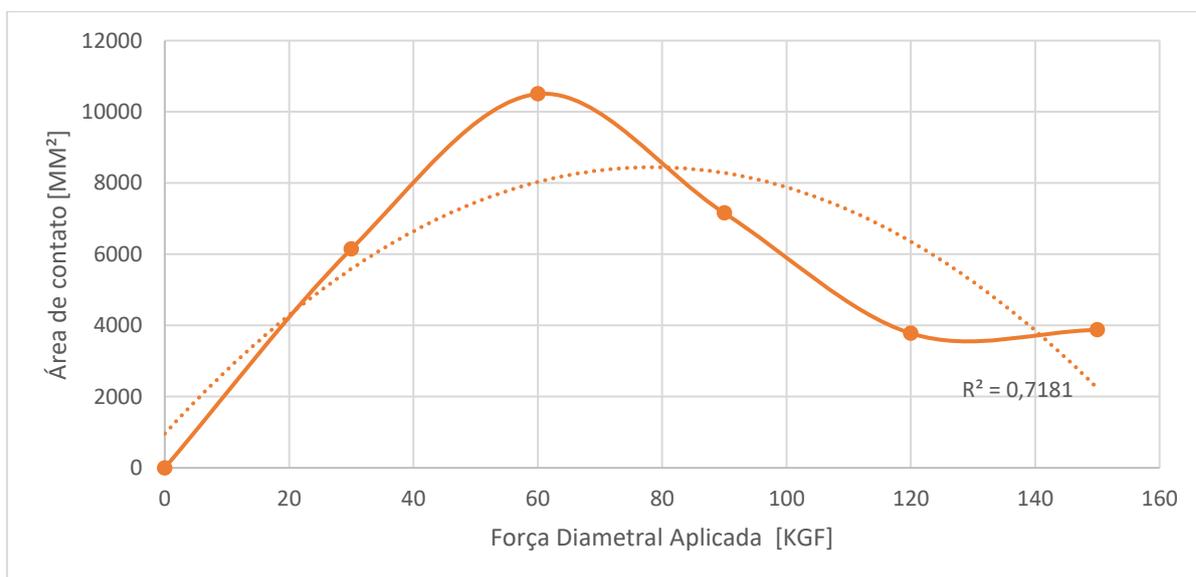
Tabela 9: Técnica Fotomecânica / Moiré X Força Diametral F (kgf) aplicada no CP1

Força Diametral F (kgf)	Área de Contato A (mm ²)
30	6147,945205
60	10500,90089
90	7155,78978
120	3778,488
150	3874,949822

Fonte: Autoria própria

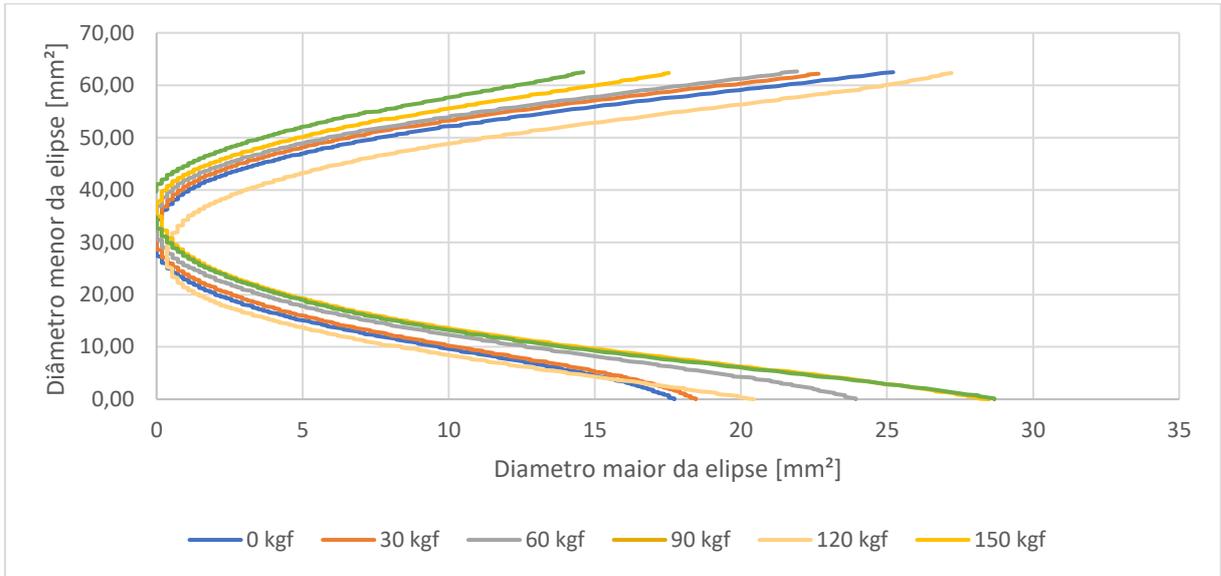
Representação Linear da Força diametral F(kgf) aplicada, área de contato A (mm²) correspondente. R² mostra o quão próximo da realidade está nossos dados em relação a linha de tendência, quanto mais próximo do valor 1 mais representada a realidade.

Figura 25: Técnica Fotomecânica / *Moiré* CP1



Fonte: Autoria própria

Figura 26: Semi elipses geradas pela técnica fotomecânica / Moiré CP1



Fonte: Autoria própria

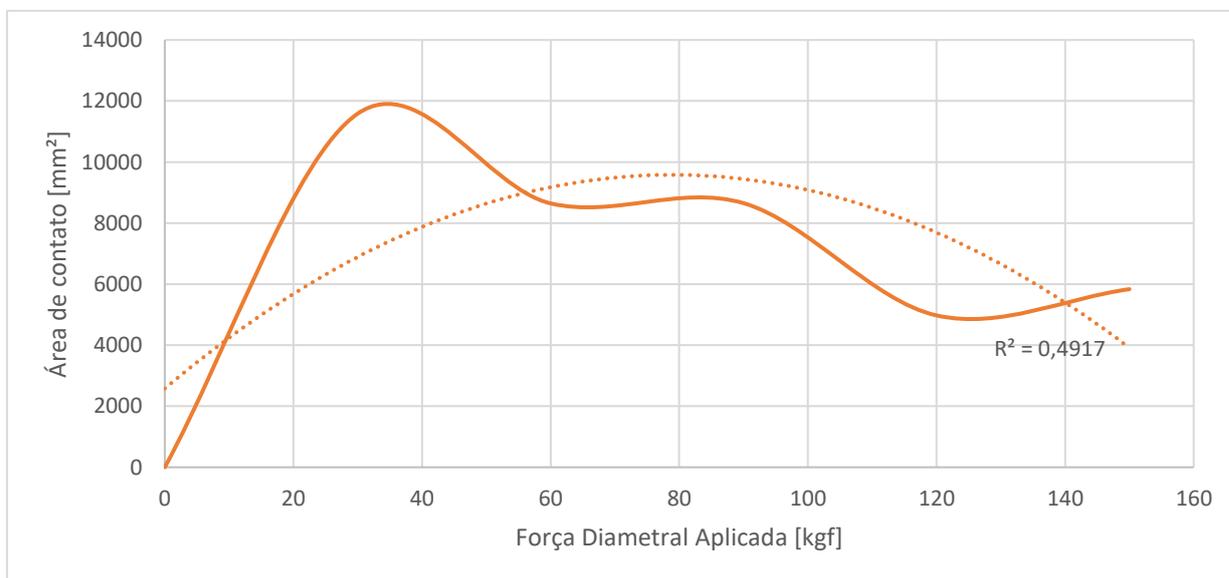
Tabela 10: Técnica Fotomecânica / Moiré X Força Diametral F (kgf) aplicada no CP2, área de contato A (mm²) correspondente

Força Diametral F (kgf)	Area de Contato A (mm ²)
30	11587,03233
60	8645,299074
90	8653,101251
120	4975,152
150	5834,731953

Fonte: Autoria própria

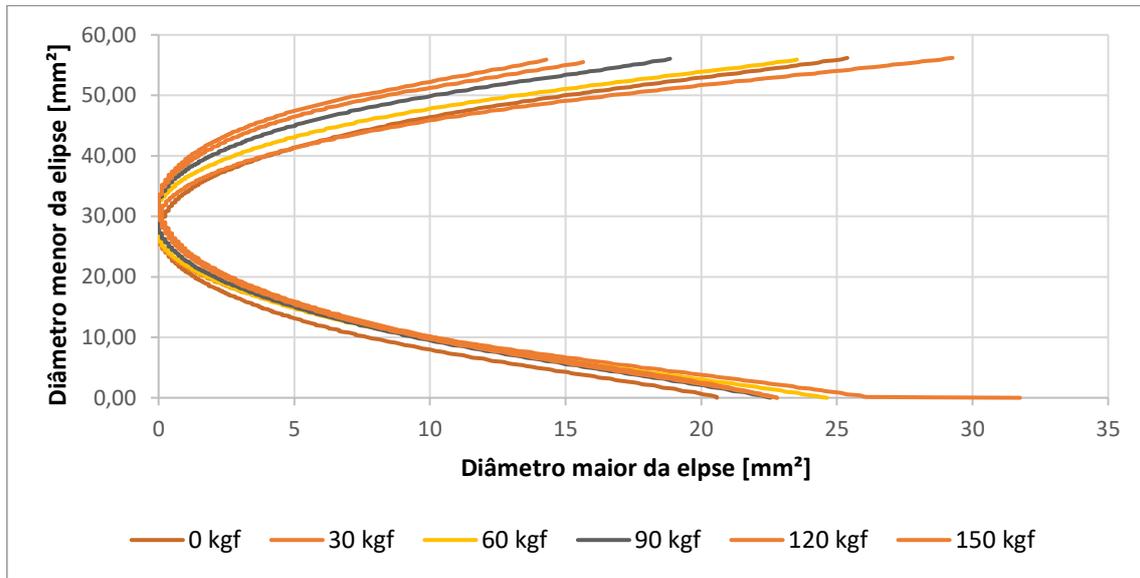
Representação Linear da Força diametral F(kgf) aplicada, área de contato A (mm²) correspondente. R² mostra o quão próximo da realidade está nossos dados em relação a linha de tendência, quanto mais próximo do valor 1 mais representada a realidade. Neste gráfico pode-se notar que o CP2 apresenta uma anomalia em relação aos outros CP's, que pode ser que o Polímero deve estar com suas propriedades originais alteradas.

Figura 27: Técnica fotomecânica / Moiré CP2



Fonte: Autoria própria

Figura 28: Semi elipses geradas pela técnica fotomecânica / Moiré CP2



Fonte: Autoria própria

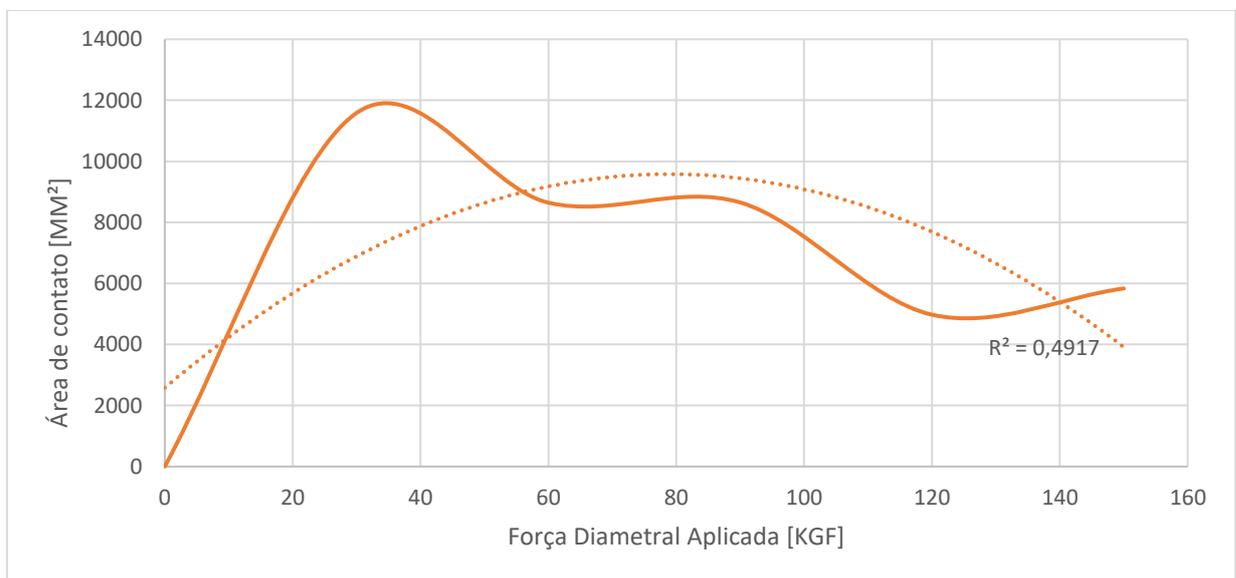
Tabela 11: Técnica Fotomecânica / Moiré X Força diametral F(kgf) aplicada no CP3

Força Diametral F (kgf)	Area de Contato A (mm ²)
30	4323,83
60	4330,92
90	3723,82
120	3375,21
150	2150,76

Fonte: Autoria própria

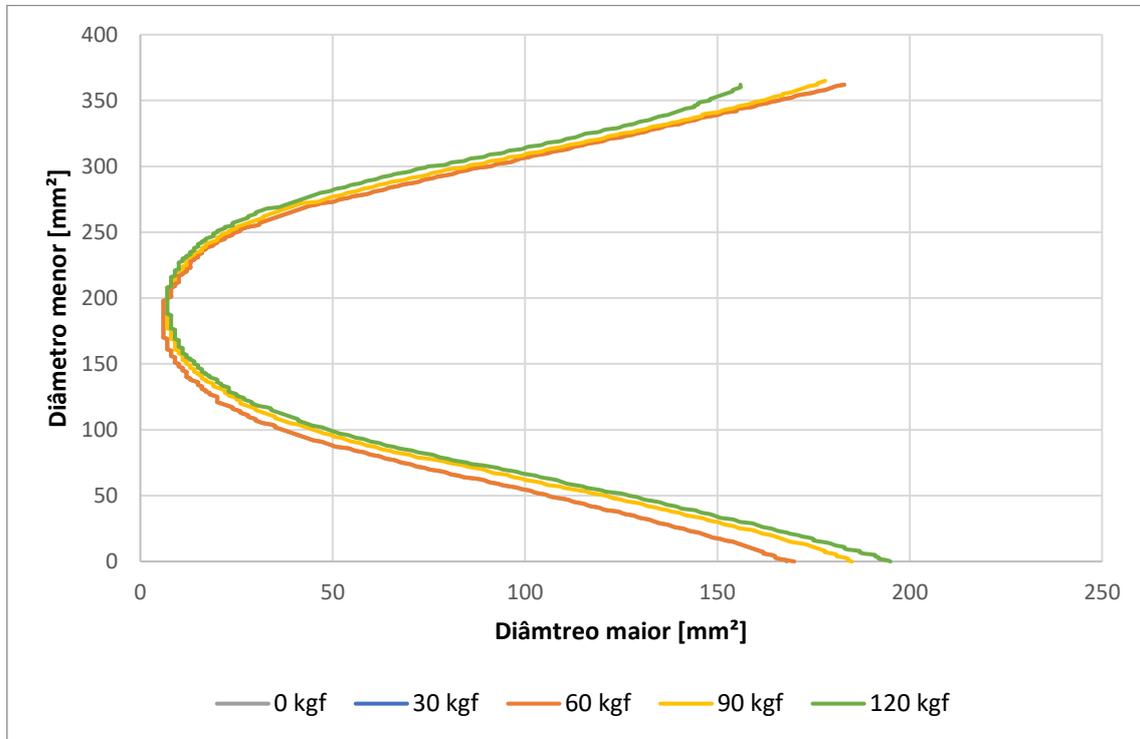
Representação Linear da Força diametral F(kgf) aplicada, área de contato A (mm²) correspondente. R² mostra o quão próximo da realidade está nossos dados em relação a linha de tendência, quanto mais próximo do valor 1 mais representada a realidade. Neste gráfico pode-se notar que o CP3 apresenta uma anomalia em relação aos outros CP's, que pode ser que o Polímero deve estar com suas propriedades originais alteradas.

Figura 29: Técnica Fotomecânica / Moiré CP3



Fonte: Autoria própria

Figura 31: Semi elipses geradas pela técnica fotomecânica / Moiré CP3



Fonte: Autoria própria

4.5 DADOS GERADOS POR LASER

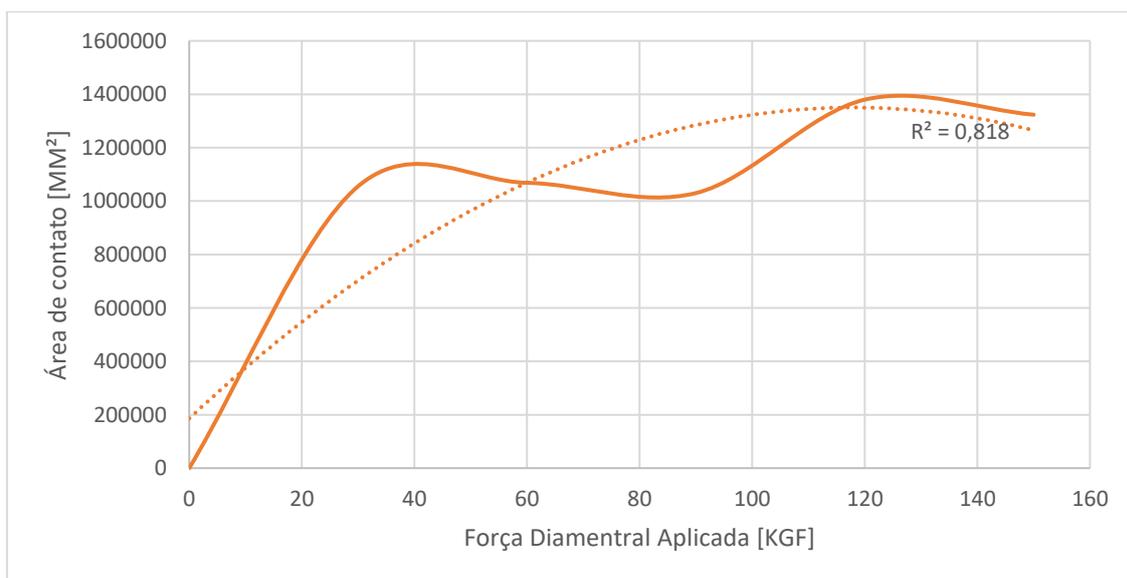
Tabela 12: Técnica laser. Força diametral F(kgf) aplicada no CP1

Força Diametral F (kgf)	Area de Contato Impressa A (mm ²)
30	1055553,236
60	1068404,123
90	1030102,562
120	1379944,715
150	1323514,264

Fonte: Autoria própria

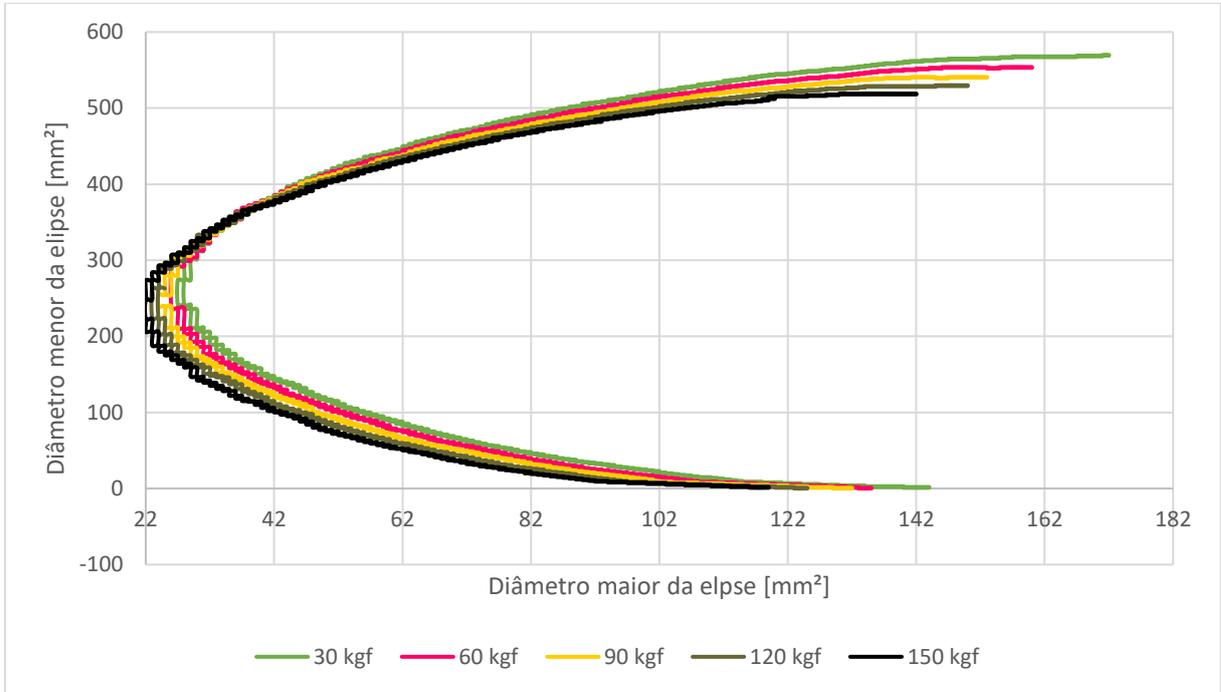
Representação Linear da Força diametral F(kgf) aplicada, área elíptica da secção transversal S (mm²) e área de contato A (mm²) correspondente. R² mostra o quão próximo da realidade está nossos dados em relação a linha de tendência, quanto mais próximo do valor 1 mais representada a realidade.

Figura 30: Gráfico força diametral / Laser CP1.



Fonte: Autoria própria

Figura 31: Semi elipses / Laser CP1



Fonte: Autoria própria

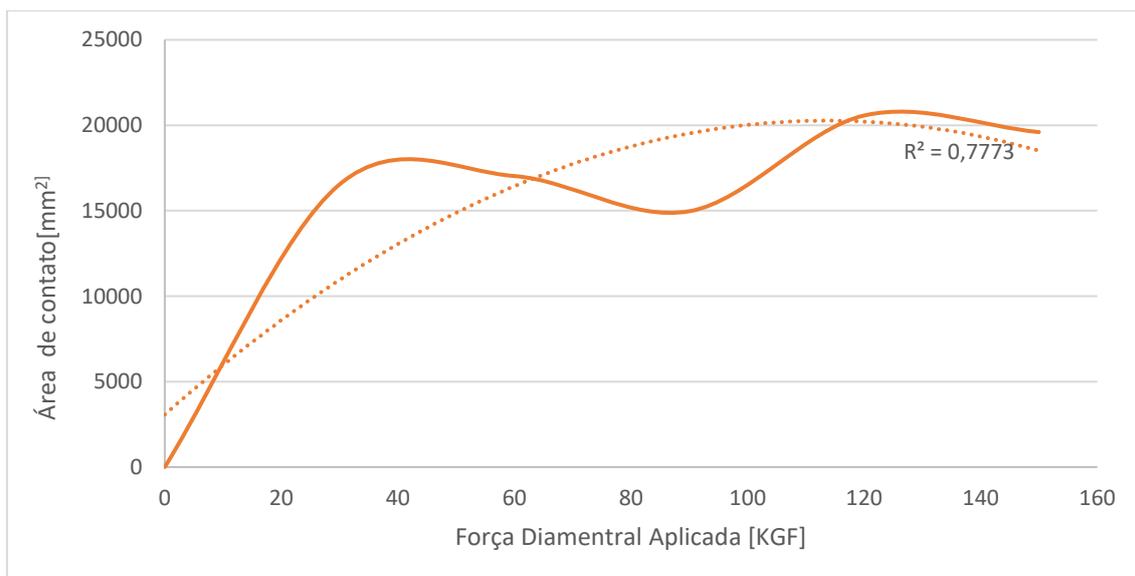
Tabela 13: Técnica Laser. Força diametral F(kgf) aplicada no CP2

Força Diametral F (kgf)	Area de Contato Impressa A (mm ²)
30	16542,96124
60	17027,83008
90	14967,44948
120	20569,55956
150	19599,8585

Fonte: Autoria própria

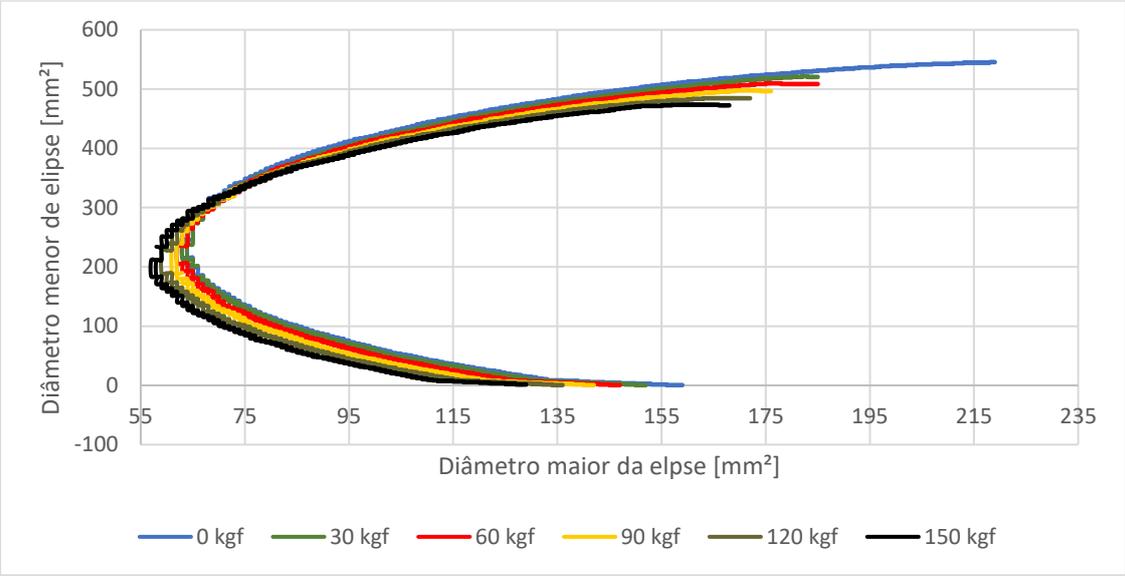
Representação Linear da Força diametral F(kgf) aplicada, área de contato A (mm²) correspondente. R² mostra o quão próximo da realidade está nossos dados em relação a linha de tendência, quanto mais próximo do valor 1 mais representada a realidade.

Figura 32: Gráfico força diametral / Laser CP2



Fonte: Autoria própria

Figura 33: Semi-elipses / Laser CP2



Fonte: Autoria própria

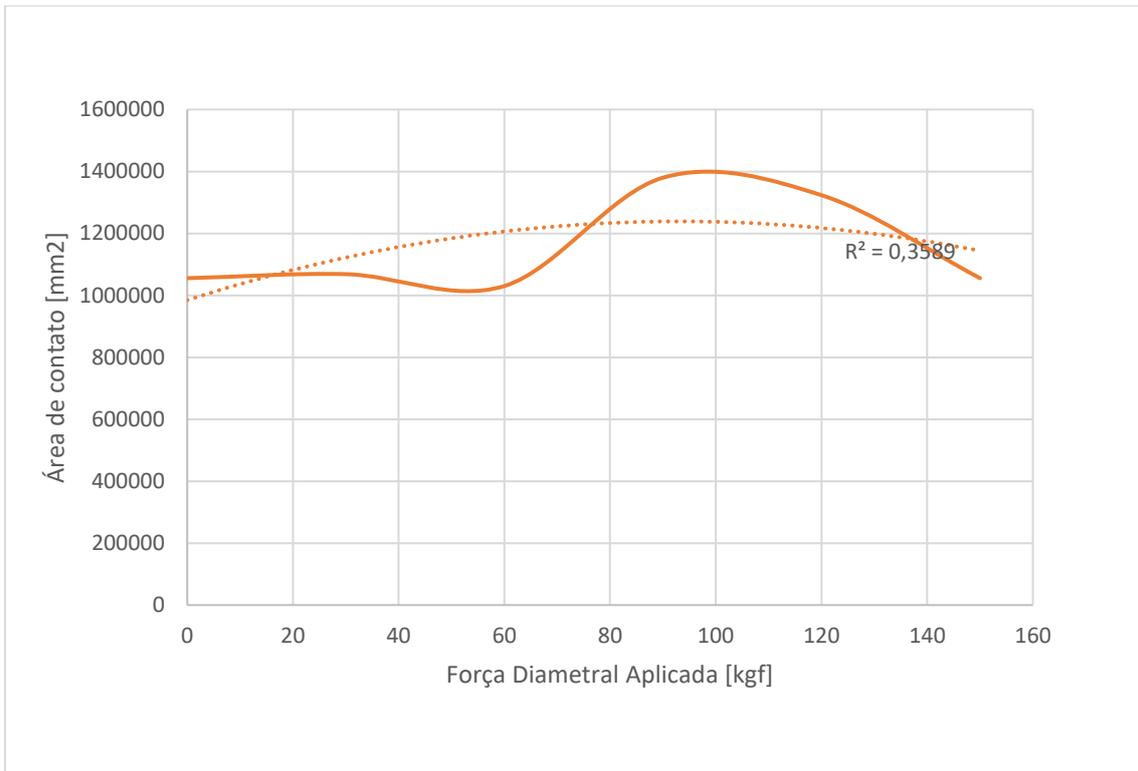
Tabela 14: Técnica laser. Força diametral F(kgf) aplicada no CP3

Força Diametral F (kgf)	Area de Contato Impressa A (mm ²)
0	1055553,236
30	1068404,123
60	1030102,562
90	1379944,715
120	1323514,264
0	1055553,236

Fonte: Autoria própria

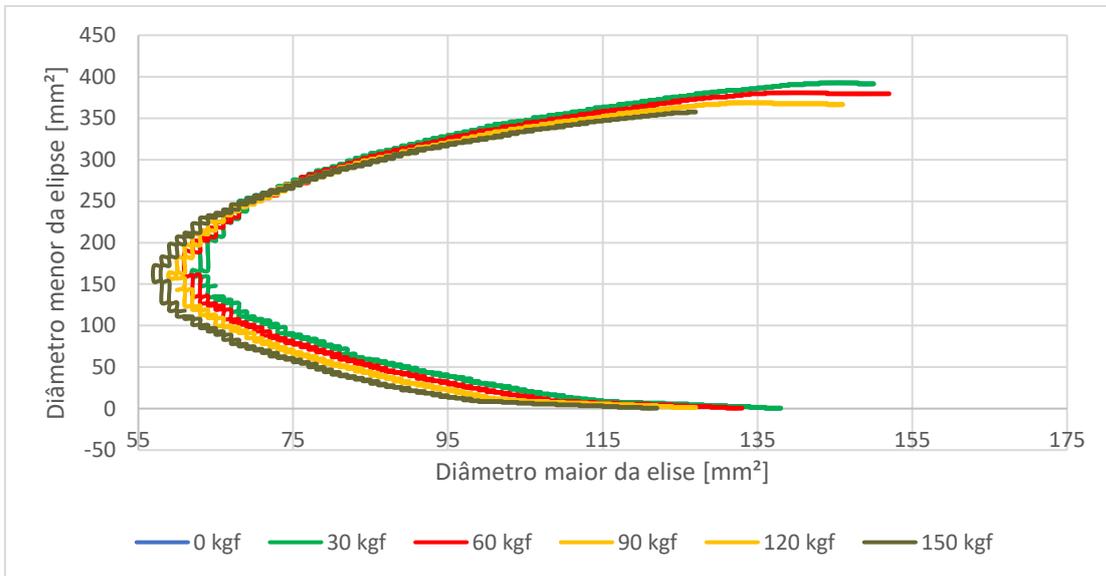
Representação Linear da Força diametral F(kgf) aplicada, área de contato A (mm²) correspondente. R² mostra o quão próximo da realidade está nossos dados em relação a linha de tendência, quanto mais próximo do valor 1 mais próxima da realidade. Neste gráfico pode-se notar que o CP3 apresenta uma anomalia em relação aos outros CP's, que pode ser que o Polímero deve estar com suas propriedades originais alteradas. Neste gráfico pode-se notar que o CP3 apresenta uma anomalia em relação aos outros CP's, que pode ser que o Polímero deve estar com suas propriedades originais alteradas.

Figura 34: Gráfico força diametral / Laser CP3



Fonte: Autoria própria

Figura 35: Semi elipses / Laser CP3



Fonte: Autoria própria

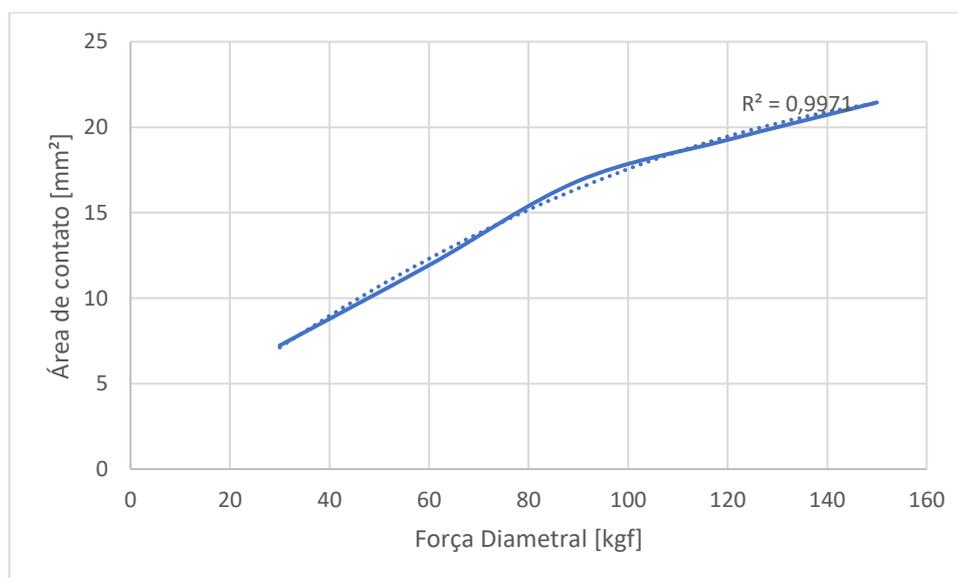
4.6 TÉCNICA DA MEDIÇÃO DIRETA

Tabela 15: Medição direta. Força diametral F(kgf) aplicada no CP1

Força Diametral F (kgf)	Área de Contato Impressa A (mm ²)
30	7,23
60	11,93
90	16,86
120	19,26
150	21,45

Fonte: Autoria própria

Figura 36: Gráfico força diametral / Área de contato [mm²] CP1



Fonte: Autoria própria

Representação linear da Força diametral F(kgf) aplicada CP1, área de contato A (mm²) correspondente. R² mostra o quão próximo da realidade está nossos dados em relação a linha de tendência, quanto mais próximo do valor 1 mais próxima da realidade.

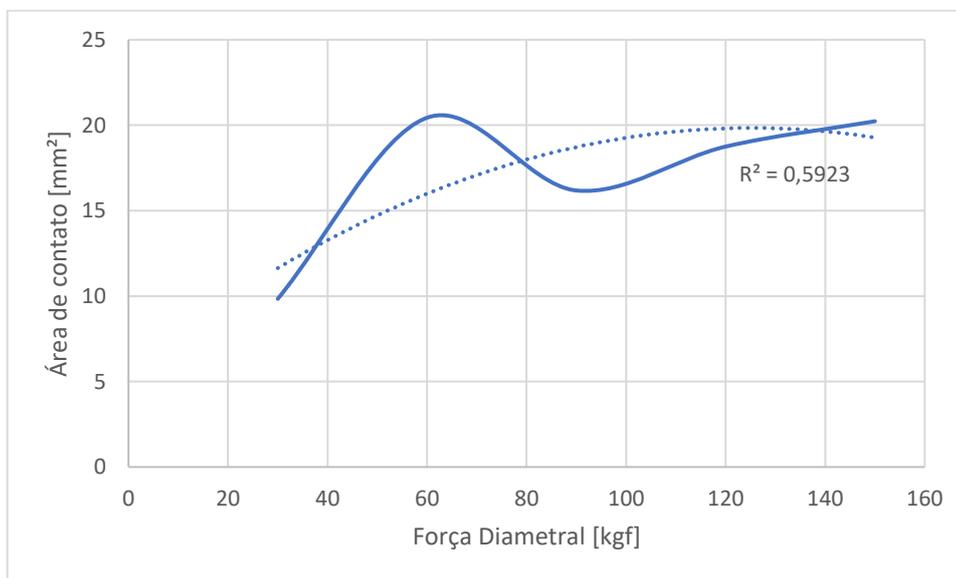
Tabela 16: Medição Direta. Força diametral F(kgf) aplicada no CP2

Força Diametral F (kgf)	Area de Contato Impressa A (mm ²)
30	9,84
60	20,44
90	16,18
120	18,75
150	20,23

Fonte: Autoria própria

Representação linear da Força diametral F(kgf) aplicada, área de contato A (mm²) correspondente. R² mostra o quão próximo da realidade está nossos dados em relação a linha de tendência, quanto mais próximo do valor 1 mais próxima da realidade. Neste gráfico pode-se notar que o CP2 apresenta uma anomalia em relação aos outros CP's, que pode ser que o Polímero deve estar com suas propriedades originais alteradas.

Figura 37: Gráfico força diametral / Área de contato [mm²] CP2



Fonte: Autoria própria

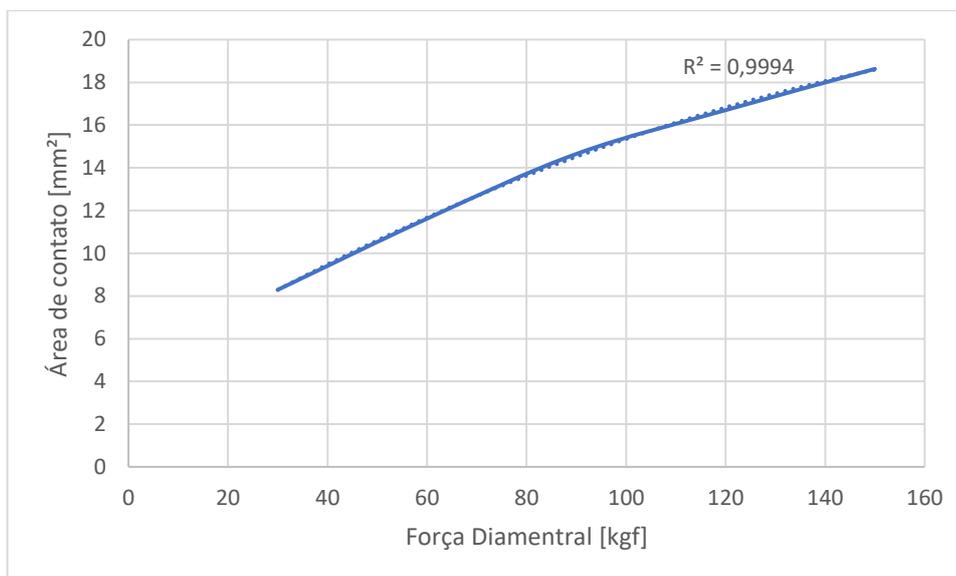
Tabela 17: Medição Direta. Força diametral F(kgf) aplicada no CP3

Força Diametral F (kgf)	Area de Contato Impressa A (mm ²)
30	8,29
60	11,62
90	14,65
120	16,7
150	18,63

Fonte: Autoria própria

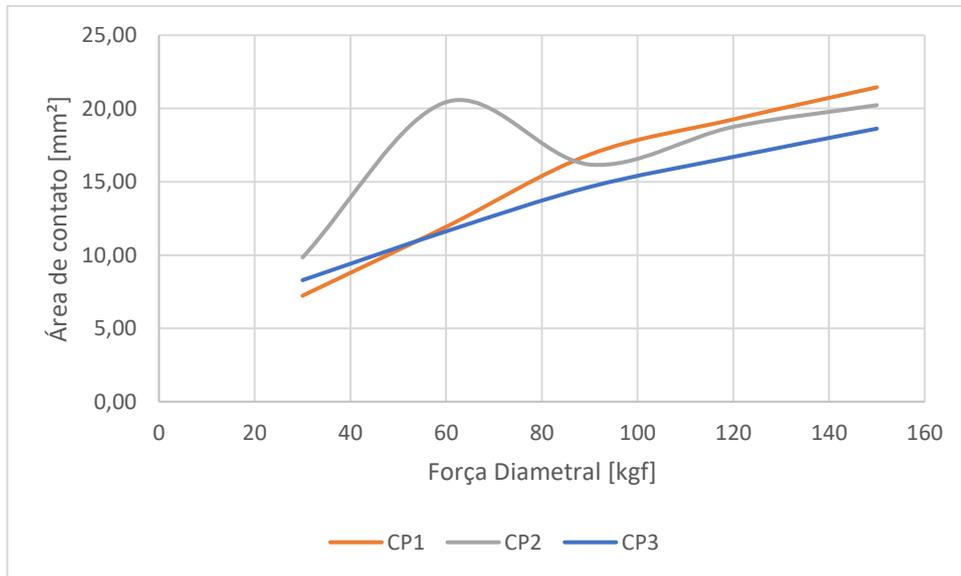
Representação linear da Força diametral F(kgf) aplicada, área de contato A (mm²) correspondente. R² mostra o quão próximo da realidade está nossos dados em relação a linha de tendência, quanto mais próximo do valor 1 mais próxima da realidade.

Figura 38: Gráfico força diametral / Área de contato [mm²] CP3



Fonte: Autoria própria

Figura 39: Gráfico força diametral / Área de contato [mm²] CP's 1, 2, 3



Fonte: Autoria própria

ANOVA (Análise de Variância)

Anova: fator único CP1

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Força	5	450	90	2250
Área	5	76,73	15,346	33,10223
Velocidade	5	1,25	0,25	0

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	23093,62	2,00	11546,81	15,17	0,00	2,81
Dentro dos grupos	9132,41	12,00	761,03			
Total	32226,03	14,00				

O Valor F, ou seja, medida de dispersão mede a dispersão em relação a sua média.

A velocidade foi constante = 0,25

A Variância é uma medida de dispersão e significa o quanto a área variou conforme aumenta a força.

A área variou em média 15,346 conforme a compressão diametral aumentou.

Anova: fator único

CP2

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Força	5	450	90	2250
Área	5	85,44	17,088	19,30707
Velocidade	5	1,25	0,25	0

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	22757,90	2,00	11378,95	15,04	0,00	2,81
Dentro dos grupos	9077,23	12,00	756,44			
Total	31835,13	14,00				

O Valor F, ou seja, medida de dispersão mede a dispersão em relação a sua média.

A velocidade foi constante = 0,25

A Variância é uma medida de dispersão e significa o quanto a área variou conforme aumenta a força.

A área variou em média 17,088 conforme a compressão diametral aumentou.

Anova: fator único CP3

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Força	5	450	90	2250
Área	5	69,89	13,978	16,85387
Velocidade	5	1,25	0,25	0

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	23371,44	2,00	11685,72	15,47	0,00	2,81
Dentro dos grupos	9067,42	12,00	755,62			
Total	32438,86	14,00				

O Valor F, ou seja, medida de dispersão mede a dispersão em relação a sua média.

A velocidade foi constante = 0,25

A Variância é uma medida de dispersão e significa o quanto a área variou conforme aumenta a força.

A área variou em média 13,978 conforme a compressão diametral aumentou.

5 CONCLUSÕES

De acordo com os dados expostos neste trabalho de pesquisa pode-se concluir que: os gráficos e tabelas da relação Força Diametral x Área de contato dos Corpos de prova denominados (modelo Ideal) pelas Técnicas Fotomecânicas – (*Moiré*) e da Técnica da emissão de *Laser* quando comparados com e Técnica da Medição Direta e da Técnica do Carimbo apresentam o aumento da área de contato validando assim Técnicas fotomecânicas em relação ao *Brazilian Test*, desta forma o experimento contribui para as definições das características dos produtos vegetais e subsidia projetos de qualidade bem como na definição de parâmetros associados aos processos de armazenamento, transporte e consumo.

Este estudo obtém a quantificação de tensões e deformações sobre a superfície de contato entre o cilindro e o plano semi-infinito a partir da técnica de *Moiré* de sombra, bem como as constantes elásticas dos corpos de prova vegetativos. A relação entre a Técnica a *Laser* e a Fotomecânica (*Moiré*) utilizaram como suporte o *software IMAGEJ*.

SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS

Pelos dados e resultados obtidos na pesquisa acima descrita, considera-se como sugestão paraos futuros trabalhos:

- 1- Realizar instrumentação mais precisa para a medição as Técnicas Fotomecânicas/*Moiré/Laser* de forma a obter dados nas três dimensões.
- 2- Continuar com a evolução do Módulo DalFabbro com aparelhos de emissão de *Laser* profissional e com lentes de cristal colimadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSAN, A.E. **Resistência dos materiais**. Vol. I. 3ª. Ed. Campinas, SP. 223-300, 2010.
- BOGGIO, A.J. **Estudo Comparativo de Métodos de Dosagem de Concretos de Cimento Portland**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFRGS, Porto Alegre, RS.
- BOULOS, P. & CAMARGO, I.D. **Cônicas**. Geometria Analítica: **Um tratamento vetorial** 3ª Ed. Pearson – São Paulo – SP. 258-270, 1987.
- CAETANO, M. J.L. **Textos preparados para a acção de Formação na empresa Diehl/Enco – Elastómeros, Unipessoal Ltda**, 2008.
- CAETANO, M. J.L. **Módulo de Elasticidade, Módulo de Young, Módulo ao Corte e Módulo de Compressibilidade**:<https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/propriedades-das-borrachas-vulcanizadas/propriedades-fisicas/propriedades-mecanicas/modulos/> acesso em: 29/05/2022
- CALLISTER, W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais**: uma abordagem integrada. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Livros Técnicos e Científicos, c2006. 702 p.
- CARNEIRO, F.L.L.C, 2ª Edição, Rio de Janeiro. 1953.
<http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/lobocarneiro/dosagem.pdf>
- CARDOSO, K. C. **Estudo da deformação em elementos de máquinas agrícolas utilizando técnicas ópticas**. Campinas – SP: [S.N], 2016.
- CLOUD, Gary L. **Optical methods of engineering analysis**. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 1998. 503 p.
- D'AVILLA, Edson. **Sistema imageador infravermelho para classificação de frutas por volume**. 2018. 189 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/332454>. Acesso em: 30 abr. 2021.
- EVANGELISTA, A.C.J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**, 239f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
- FEITOSA, J.R; FERNANDES, H.C; DADALTO, J.P. et al. **Determinação da área de contato entre os pneus de um trator agrícola e o solo em função de diferentes pressões internas dos pneus**. 2014 Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola- CONBEA – Campo Grande – MS.
- GAZZOLA, J. **Análise da técnica óptica de Moiré como método fotomecânico para qualificação e quantificação de tensões**. 2013. 131 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/256786>. Acesso em: 30 abr. 2021.
- LAURENTI, R. **Efeito de esforços vibracionais na estrutura do tecido vegetal**. 2003. 181p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/257565>. Acesso em: 30 abr. 2021.

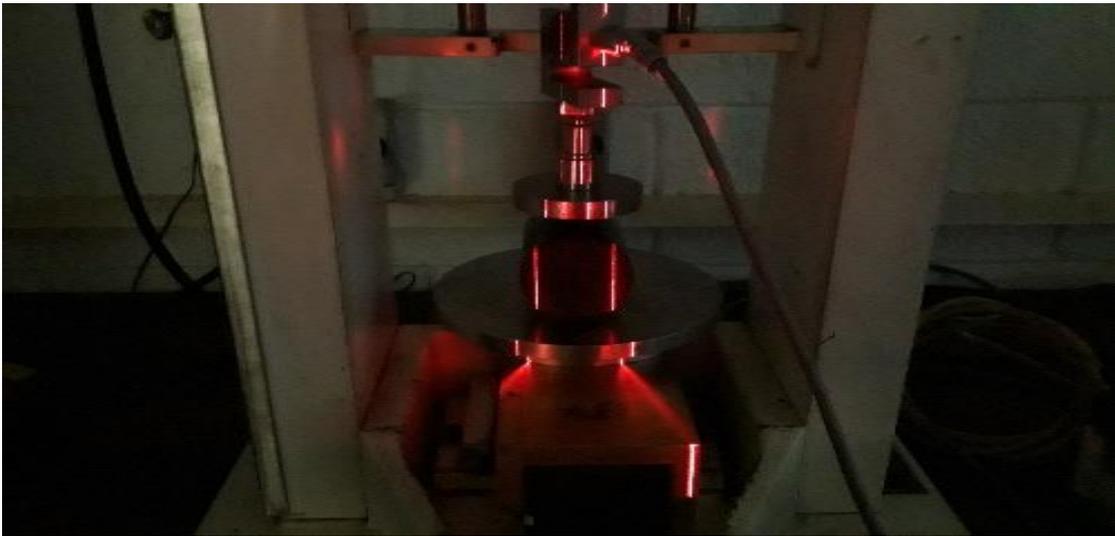
- LINO, A. C. L. **Aplicação de moiré de projeção com deslocamento de fase na geração de modelos digitais topográficos de órgãos vegetais. 2008**
- LINO, A. C. L. Determinação do volume do tomate através da silhueta. **Revista Horticultura Brasileira**, v. 30, n. 2, p. 7536-7543, 2012.
- MARTINS, E. G. M., 2013 **Desvio padrão amostral**, Rev. Ciência Elem., V1(1):022
- QUINAN, M. A. D. **Uma metodologia para determinação do fator de intensidade de tensões causado por tensões térmicas utilizando a fotoelasticidade**. 126 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo, 2005.
- SANTOS, J. C. et. al. Moiré supported flexural tests carried on wooden beams. In: **Proceedings of the 3rd International Congress on Information, Communication Technologies in Agriculture, Food, Forestry and Environment**, ITAFFE'10, v. 1, p. 270-273. Ondokuz Mayıs University, Samsun, Turkey, June, 14-18, 2010.
- SCIAMMARELLA, C. A. Holographic Moiré, An Optical Tool for The Determination Of Displacements, Strains, Contours, And Slopes Of Surfaces. **Optical Engineering**, v. 21, n. 3, 1982.
- SPINELLI, Hione de Aquino. ; SILVA, Fernando de Azevedo. **Aplicação da Fotoelasticidade na Análise Estrutural de uma Junta Rebitada de Uso Aeronáutico**. In: **Anais...** Guaratinguetá, 2003
- SHERIF, S. M. **The quasi-static contact problem for nearly-incompressible agricultural products**. Tese (Doutorado). E. Leasing, MI: Michigan State University, 1976.
- SHERIF, S. M., SEGERLING, L. J., FRAME, T. S. A. M. Equation for the modulus of elasticity of radially compressed cylinder. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, p. 782-785, 1970.
- TIMOSHENKO S, GOODIER JN. "Theory of Elasticity". 3rd ed. McGraw-Hill Book Company, inc. London; 1970

APÊNDICES

APÊNDICE A - Obtenção de dados por laser

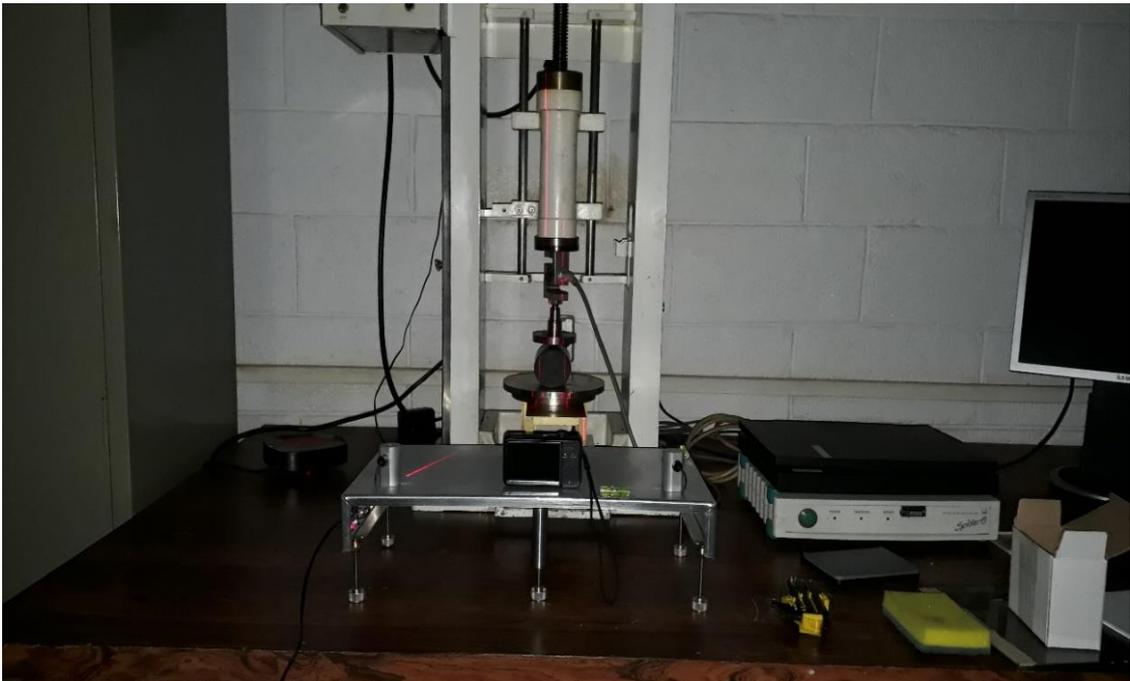
As fotos capturadas da secção transversal durante a compressão diametral foram processadas pelo *software* IMAGEJ gerando a area expandida pela compressão.

Figura 40: Feixe de luz laser de linha a 90° incidindo sob o corpo de prova



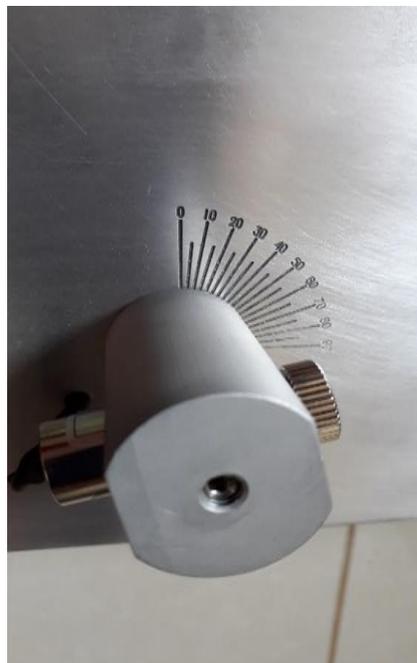
Fonte: Autoria própria

Figura 41: Módulo DalFabbro acoplado a Prensa Kanners



Fonte: Autoria própria

Figura 42: Laser de linha com opção de alterar o ângulo de incidência



Fonte: Autoria própria

APÊNDICE B - Tipos de lasers

Pode-se encontrar no mercado vários tipos de lasers para as mais variadas aplicações, dentre os quais o autor deste trabalho procurou no mercado brasileiro o laser de linha vermelha descrito nesta dissertação com a finalidade de apresentar redução de custos deste experimento.

Figura 43: Laser de linha na cor vermelha



Fonte: <https://www.easytronics.com.br/modulo-laser-cruz-5mw>

Laser de Linha R\$ 21,48 Cotação PTAX em 27-01-2022 1 USD = BRL 5,3812 - Banco Central do Brasil

Segundo (D'Avilla 2018, p. 65). O laser é um feixe de luz sendo composto de fótons os quais tem o comportamento ora como ondas, ora como partículas. O engenheiro norte americano Theodoro Maiman produziu em 1960 o primeiro equipamento com capacidade de emitir um *laser* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), o qual tem a capacidade de concentrar toda sua potência numa área muito pequena. Luz estruturada: linha utilizada neste experimento; a lente cilíndrica pode ser utilizada com a finalidade de gerar uma linha, que passa por uma lente cilíndrica colimada de forma a gerar um perfil de linha homogêneo.

Figura 44: Modelo de laser de linha produzido no Brasil pela Laser Line a ser utilizado no Upgrade do Módulo DalFabbro



Fonte: Empresa LASERLine

Figura 45: LASERLine cotação em R\$

638 nm (R)			
Handy 638 - 50 MM (Multi Mode)	50 mW	R\$	4.689,00
Handy 638 - 50 SM (Single Mode)	50 mW	R\$	4.689,00
Handy 638 - 100 MM (Multi Mode)	100 mW	R\$	5.522,00
Handy 638 - 100 SM (Multi Mode)	100 mW	R\$	5.522,00

Fonte: Empresa LASERLine

Laser de Linha R\$ 21,48 Cotação PTAX em 27-01-2022 1 USD = BRL 5,3812 - Banco Central do Brasil