



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Agrícola

CLÁUDIO ROBERTO SOLDERA

**ANÁLISE PREDITIVA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CORPOS
ESFÉRICOS DE SILICONE SOB TENSÕES DE HERTZ UTILIZANDO
TÉCNICAS DE MACHINE LEARNING E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.**

**PREDICTIVE ANALYSIS OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF SPHERICAL
SILICONE BODIES UNDER HERTZ VOLTAGES USING MACHINE
LEARNING AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES.**

CAMPINAS
2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Agrícola

CLÁUDIO ROBERTO SOLDERA

**ANÁLISE PREDITIVA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CORPOS
ESFERÍCOS DE SILICONE SOB TENSÕES DE HERTZ UTILIZANDO
TÉCNICAS DE MACHINE LEARNING E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.**

**PREDICTIVE ANALYSIS OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF SPHERICAL
SILICONE BODIES UNDER HERTZ VOLTAGES USING MACHINE
LEARNING AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES.**

*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 Concentração Máquinas Agrícolas.*

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

Orientador: Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabbro

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

Campinas
2024

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

So42a Soldera, Cláudio Roberto, 1966-
Análise preditiva do comportamento mecânico de corpos esféricos de silicone sob tensão de Hertz utilizando técnicas de machine learning e inteligência artificial / Cláudio Roberto Soldera. – Campinas, SP : [s.n.], 2024.

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

1. Análise de dados. 2. Esfera. 3. Aprendizado de máquina. 4. Inteligência artificial. I. Dal Fabbro, Inácio Maria, 1944-. II. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: Predictive analysis of the mechanical behavior of spherical silicone bodies under Hertz voltage using machine learning and artificial intelligence techniques

Palavras-chave em inglês:

Data analytics

Beads

Machine learning

Artificial intelligence

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: 03-05-2024

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

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

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-8621-6512>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.orq.br/5839463162103344>

Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Dissertação de Mestrado** defendida por **Cláudio Roberto Soldera**, aprovada pela Comissão Julgadora em 03 de maio de 2024, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

Prof. Dr. Inácio Maria Del Fabbro – Presidente e Orientador

Dr. Jonathan Gazzola – Membro Titular

Dra. Kelen Cristiane Cardoso – Membro Titular

A Ata da Defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, consta no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Dedico à minha esposa Mônica Ferreira Cardoso Soldera, aos meus pais Alcides Soldera (in memoriam) e Overcia Aparecida Quaiatti Soldera. Em especial aos meus sogros Maria Aparecida Ferreira Cardoso (in memoriam) e Sérgio Guimarães Cardoso (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

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

À minha esposa Dra. Mônica Ferreira Cardoso Soldera (OAB) 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. Daniel Albiero

As Professoras, Professores e funcionárias/os da FEAGRI especialmente a Valéria F. Altmann Ferreira e a Amanda Brenelli da Secretaria da Pós-graduação por todo apoio incondicional.

Ao Dr. Antônio Carlos Loureiro Lino do IAC - Jundiaí.

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

Ao colega doutorando, Ângelo Roberto Biasi, por todo apoio e contribuição no desenvolvimento do projeto.

RESUMO

Atualmente, a ciência, em seu constante desenvolvimento tecnológico, na busca de soluções para a geometria simétrica quanto na assimétrica, utilizando a reconstituição das formas como abordagem. Os resultados desses levantamentos e estudos abrangem diversos campos científicos, tal como medicina, engenharia, indústria, matemática, mecânica, tecnologia da computação e máquinas, permeando todos os ambientes de conhecimento.

O maior problema na Engenharia Agrícola é fazer projetos de máquinas. Uma vez que a distribuição de tensão de produtos vegetais se se defrontam com as tensões de Hertz.

Para aprimorar ainda mais esses estudos, introduzem-se as técnicas inovadoras de Inteligência Artificial (IA), *Machine Learning* (ML) e Análise de Dados (AD). Ao focalizar exclusivamente em plantas vegetais, avalia-se como essas abordagens modernas podem complementar e aperfeiçoar as tradicionais técnicas de *Hertz*. Através de modelos matemáticos, investigam-se as possibilidades de melhorias nas interações entre esferas e placas rígidas e paralelas, visando contribuir significativamente para o avanço nesse campo específico da Engenharia Agrícola.

Palavras chaves: Análise de Dados, Esfera, Machine Learning, Inteligência Artificial

ABSTRACT

Currently, science, in its constant technological development, is searching for solutions for symmetrical and asymmetrical geometry, using the reconstitution of shapes as an approach. The results of these surveys and studies cover various scientific fields, such as medicine, engineering, industry, mathematics, mechanics, computer technology and machines, permeating all knowledge environments.

The biggest problem in Agricultural Engineering is designing machines. Since the voltage distribution of plant products is faced with Hertz voltages.

To further improve these studies, innovative Artificial Intelligence (AI), Machine Learning (ML) and Data Analysis (AD) techniques are introduced. By focusing exclusively on plant life, we evaluate how these modern approaches can complement and improve traditional Hertz techniques. Using mathematical models, the possibilities for improving the interactions between spheres and rigid, parallel plates are investigated, aiming to significantly contribute to advancement in this specific field of Agricultural Engineering.

Keywords: Data Analytics, Sphere, Machine Learning, Artificial Intelligence

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Classificação das Técnicas para aquisição da superfície de contorno. Fonte: CURLESS (2001)	20
Figura 2: Classificação das Técnicas óticas para aquisição da superfície de contorno. Fonte: CURLESS (2001)	21
Figura 3: Definição dos termos de grade com relação a: a) Linha de grade e b) Passo de grade. Fonte: (GAZZOLA, 2011)	23
Figura 4: Grades óticas para a geração das franjas de moiré. a) linhas paralelas; b) pontos equidistantes; c) círculos equidistantes; d) linhas radiais. Fonte: (DURELLI e PARKS, 1970, citado por MAZZETI Filho, 2004)	24
Figura 5: Sobreposição de grades e a formação de franjas claras e escuras. Fonte: DAL FABBRO, 2004	25
Figura 6: Sobreposição de grades e formação de franjas de moiré. Fonte: (BUYTAERT e DIRCKX, 2008)	25
Figura 7: Grades de linhas paralelas para moiré por phase-shifting por retículos, deslocadas de 90° entre si. Fonte: (LINO, 2008)	30
Figura 8: Grade sinusoidal para moiré por phase-shifting deslocadas de 90° entre si.	30
Figura 9: Esfera em contato com superfície plana (TIMOSHENKO, S, 1980)	31
Figura 10: Caso genérico para pressão entre dois corpos em contato. Fonte: (TIMOSHENKO, S, 1980).	32
Figura 11: Esquema de criação das matrizes, injeção das esferas, dos ensaios mecânicos e o processamento dos dados, com IA, ML e AP, levados a cabo em esferas de silicone. Fonte: o Autor	34
Figura 12: Setup da Técnica de moiré de sombra. Fonte: Lino (2008)	36
Figura 13: Corpos de prova confeccionados em silicone, por injeção em matrizes também de silicone desenvolvida pelo discente e suas respectivas dimensões e pesos em tamanho real. Fonte: o Autor	37
Figura 14: Arranjo Experimental = moiré. Fonte: Gazzola (2013).	38
Figura 15: Representação do comportamento da deformação diametral do CP de borracha. Área da Secção Transversal Elíptica (mm).	38
Figura 16: Compressão Diametral de um Corpo de Prova (CP). Esfera de Silicone, onde, F representa a força diametral aplicada e U representa a deformação da esfera.	38
Figura 17: Equipamento de compressão para deformação da Esfera de Silicone. Fonte: o Autor	40
Figura 18: Processo atual para captura e desenvolvimento das análises. Fonte: O Autor	41
Figura 19: Processo desenvolvido pelo pesquisador para simular o processo atual. Fonte: O Autor	41
Figura 20: Exemplo de Dados da compressão da Esfera 7. Fonte: O Autor	42
Figura 21: Esfera 7 de Silicone com 0 Kgf de Deformação - Fonte: o Autor	43

Figura 22: Esfera 7 de Silicone com variação de 0 Kgf a 5 Kgf de Deformação. Fonte: O Autor	44
Figura 23: Gráfico da Deformação em relação a força de 0 Kgf a 5 Kgf. Fonte: o Autor	44
Figura 24: Gráfico da Deformação em relação a força de 0 Kgf a 10 Kgf. Fonte: o Autor	45
Figura 25: Esfera com moiré, e aplicação da Força de 5 Kg e área de contato. Fonte: o Autor	45
Figura 26: Gráfico da Deformação em relação a força de 0 Kgf a 15 Kgf, moiré e área de contato. Fonte: o Autor	46
Figura 27: Gráfico da Deformação em relação a força de 0 Kgf a 20 Kgf, moiré e área de contato. Fonte: o Autor	46
Figura 28: Gráfico da Deformação em relação a força de 0 Kgf a 25 Kgf, moiré e área de contato. Fonte: o Autor	47
Figura 29: Gráfico da Deformação em relação a força de 0 Kgf a 30 Kgf, moiré e área de contato. Fonte: o Autor	47
Figura 30: Gráfico da correlação de Pearson.	50
Figura 31: Esfera Gerada por IA, apenas com o parâmetro passado do diâmetro. Fonte: o Autor	50
Figura 32: Esfera Gerada por injeção em uma matriz criada pelo Autor.	51
Figura 33: Dados Gerados pelo Código em IA a partir dos parâmetros passados. Fonte: o Autor	51
Figura 34: Dados Gerados pelo Código em IA a partir dos parâmetros inseridos. Fonte: o Autor	52
Figura 35: Gráficos elaborados pelo processo normal e por IA com Machine Learning.	53
Figura 36: Esfera no processo mecânico com a força em 0 Kgf e a simulação com IA. Fonte: O Autor	55
Figura 37: Dados gerados por código elaborado com IA em Python com 0 Kgf. Fonte: O Autor	56
Figura 38: Dados gerados por código elaborado com IA em Python com 0 Kgf. Fonte: O Autor	56
Figura 39: Esfera no processo mecânico com a força de 0 Kgf à 15 Kgf e a simulação com IA. Fonte: O Autor	57
Figura 40: Esfera no processo mecânico com a força de 0 Kgf à 20 Kgf e a simulação com IA	58
Figura 41: Esfera no processo mecânico com a força de 0 Kgf à 25 Kgf e a simulação com IA.	58
Figura 42: Dados gerados por código elaborado com IA em Python de 0 Kgf à 30 Kgf	59
Figura 43: Criação da Matriz para criação das esferas - Modelo Esfera 7. Fonte: O Autor	68
Figura 44: Matriz da Esfera 7 - concluída. Fonte: O Autor	68

Figura 45: Matriz pronta para ser injetado o silicone - Matriz Esfera 7. Fonte: O Autor

69

Figura 46: Esferas injetadas - Esfera 7 à Esfera 1. Fonte: O Autor

69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dimensões dos corpos de prova esféricos. Medição manual pelo paquímetro e cálculos pelo Excel.	33
Tabela 2: Area de contato a partir de cada uma das forças de deformação aplicadas. Fonte: o Autor	48
Tabela 3: Dimensões dos corpos de prova esféricos, calculados totalmente por IA. Fonte: o Autor	48
Tabela 4: Análise de Correlação entre as duas tabelas – Medida Manual e a Calculada com IA. Fonte: O Autor	49
Tabela 5: Dados gerados manualmente pelo paquímetro e Excel e dados gerados com IA. Fonte: o Autor	51
Tabela 6: Dados gerados pelo código gerado por IA para o Machine Learning. Fonte: O Autor	54
Tabela 7: Parâmetros passados pelo pesquisador ao código gerado com IA	55
Tabela 8: Dados gerados por código elaborado com IA em Python com 0 Kgf. Fonte: O Autor	56
Tabela 9: Dados gerados por código elaborado com IA em Python de 0 Kgf a 5 Kgf. Fonte: O Autor	56
Tabela 10: Dados gerados por código elaborado com IA em Python de 0 Kgf à 10Kgf. Fonte: O Autor	57
Tabela 11: Dados gerados por código elaborado com IA em Python de 0 Kgf à 15 Kgf. Fonte: O Autor	57
Tabela 12: Dados gerados por código elaborado com IA em Python de 0 Kgf à 20 Kgf.	58
Tabela 13: Dados gerados por código elaborado com IA em Python de 0 Kgf à 25 Kgf.	58
Tabela 14: Dados gerados por código elaborado com IA em Python de 0 Kgf à 30 Kgf	59
Tabela 15: Áreas de contato fornecida pelo código Gerado com IA. Fonte: O Autor	59
Tabela 16: Comparação da Área de Contato processo mecânico com a IA. Fonte: O Autor	60

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Equação de Ensaio de Hertz. Fonte: TIMOSHENKO – 1980	31
Equação 2: Caso genérico para pressão entre dois corpos em contato. Fonte: (TIMOSHENKO, S, 1980).	32
Equação 3: Raio da área de Contato. Fonte: Hertz.	32
Equação 4: Deformação de Hertz. Fonte: Hertz	32
Equação 5: Pressão máxima na superfície de contato. Fonte: Hertz	32
Equação 6: Fórmula de equação da Elipse generalizada	39
Equação 7: Equação de Elipses ovais	39
Equação 8: Equação de Cassini para elipses ovais	40
Equação 9: Equação de Booth	40

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. JUSTIFICATIVA.....	17
1.2. OBJETIVO.....	17
1.3. OBJETIVO GERAL	18
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
1.5. HIPÓTESE E PESQUISA	18
1.6. PROBLEMATIZAÇÃO	19
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	20
2.1. TÉCNICAS PERFILOMÉTRICAS	20
2.2. O FENÔMENO DE <i>MOIRÉ</i>	21
2.3. TÉCNICAS DE <i>MOIRÉ</i> (TM).....	27
2.4 TEORIA DE CONTATO DE HERTZ.....	31
3. MATERIAS E MÉTODOS.....	33
3.2. ENSAIOS DE HERTZ	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1. Considerações Preliminares.....	42
4.1.1. Medições Manuais.....	42
4.1.2. Inteligência Artificial (IA).....	48
5. CONCLUSÕES	61
6. REFERÊNCIAS BIOGRÁFICAS.....	62
7. APÊNDICES	65
7.1. APÊNDICE A – Código Python – IA.....	65
7.2. APÊNDICÊ B - Matriz para criação das esferas	68
7.3. APÊNDICÊ C - Sugestões para estudos futuros	70

1. INTRODUÇÃO

O manuseio mecânico de órgãos vegetais geralmente inclui uma série de operações físicas passíveis de gerar danos mecânicos no tecido. O dano mecânico é identificado como ruptura do tecido vegetal o qual é regida pelas teorias de ruptura do meio contínuo, ou seja do tecido vegetal em pauta. Uma importante ressalva deve ser observada quando o objetivo da operação é romper o tecido, como ocorre no processamento pós-colheita e na própria operação de colheita. Em sequência, considerar um fruto como aproximadamente um esferoide ou um elipsoide de revolução, estar-se-ia negligenciando a possibilidade de se identificar a distribuição de tensão (*stress*), bem como a da deformação relativa (*strain*) mais próxima da realidade, minimizando então as possibilidades de perda bem como a otimização energética envolvida no processo. Foi conjecturada a hipótese de que a Técnica de *moiré* (TM) de projeção, empregada com deslocamento de fase, poderia ser aplicada com êxito na reconstrução tridimensional para se obter os dados das deformações de estruturas vegetais usando Inteligência Artificial, tal como é o caso presente. Os ensaios mecânicos incluem compressão diametral de corpos de prova esféricos de silicone com diâmetros variáveis. A teoria de contato de Hertz é identificada para dar suporte teórico ao processo experimental. As cargas (*stress*) são impostas no sentido diametral e a diferentes razões de deformação relativa (*strain rate*). Desta forma, o valor da carga diametral é obtido, o valor da deformação relativa (*strain*) são impostas, bem como o valor das razões de deformação relativa (*strain rate*). Também é obtido o valor da área de contato pela TM. Será utilizado algoritmos de *Machine Learning* (ML), Inteligência Artificial (IA) e Análise Preditiva (AP) a partir dos dados gerados. Será estudado basicamente a correlação entre os valores encontrados a partir da compressão diametral das esferas, visando encontrar semelhanças entre as esferas analisadas de dimensões diferentes. Com o uso da linguagem Python e suas bibliotecas específicas para ML, IA

e AP será possível visualizar nos gráficos a serem gerados o detalhamento e, também com o crescimento das cargas (Kgf) aplicadas.

Arthur Samuel (1959) conceituou *Machine Learning (ML)* como um campo de estudo que confere aos computadores a capacidade de aprender de maneira autônoma, sem a necessidade de programação explícita. Essa definição engloba a construção de algoritmos que têm a capacidade intrínseca de aprender com suas próprias falhas, configurando-se como um marco no âmbito acadêmico, onde a ênfase reside na autonomia do processo de aprendizagem dos sistemas computacionais. Como todos os dados que são armazenados será possível gerar novos dados e quando forem encontrados em outras amostras com dados semelhantes verificaremos a curva e o erro. Gerando assim uma base de conhecimento para novas amostras. Em ML as tarefas de aprendizados, divididas em categorias amplas, que são as seguintes:

- **Aprendizado supervisionado:** refere-se a uma abordagem na qual o computador é exposto a exemplos contendo entradas e suas respectivas saídas desejadas. Nesse contexto, o sistema utiliza esse conjunto de dados rotulado para aprender padrões e relações entre as entradas e as saídas correspondentes. Essa metodologia visa treinar o modelo de forma a capacitar a máquina a fazer previsões ou tomar decisões em situações semelhantes, com base nos padrões identificados durante o treinamento supervisionado.
- **Aprendizado não supervisionado:** nenhum tipo de rótulo ou etiqueta é atribuído ao algoritmo de aprendizado. Nesse cenário, o sistema é livre para explorar e identificar de forma autônoma padrões ou estruturas nas entradas fornecidas. Essa abordagem destaca-se pela capacidade do algoritmo em descobrir relações

intrínsecas nos dados, sem orientação prévia, permitindo uma análise mais aberta e exploratória das informações disponíveis.

- Aprendizado por reforço: o programa estabelece interações contínuas com um ambiente dinâmico, no qual busca alcançar objetivos específicos. Essa abordagem destaca-se pela capacidade do sistema em aprender através da experimentação e da adaptação contínua, sendo recompensado ou penalizado com base nas ações executadas em relação aos objetivos estabelecidos. Essa interação dinâmica permite ao programa aprimorar suas estratégias ao longo do tempo, visando otimizar o desempenho na consecução dos objetivos propostos.

Em IA, que é demonstrada por máquinas ao executar tarefas complexas associadas a serem inteligentes, executando de modo autônomo. Área de estudo começou logo após a Segunda Guerra Mundial, com o artigo “*Computing Machinery and Intelligence*” do matemático inglês Alan Turing (1950).

1.1. JUSTIFICATIVA

O material vegetativo se mostra heterogêneo, exibindo diversas propriedades. Verificar se aplicação da técnica óptica de *moiré* permite a determinação de intensidade e direção das tensões de contato entre uma esfera com planos rígidos e paralelos.

1.2. OBJETIVO

Avaliar se as técnicas de ML e IA tem correlação com a técnica de Hertz para determinar de projeção podem ser utilizadas como ferramenta para a determinação da tensão de contato entre esfera e plano semi-infinito.

1.3. OBJETIVO GERAL

Avaliar se as técnicas de ML e IA também podem ser utilizadas como ferramentas para a determinação da tensão de contato entre esfera e plano semi-infinito em esferas de silicone para simulação da laranja e outros tipos de frutos que possuam similaridade com esferas, podem dar suporte à determinação de tensão em produtos agrícolas de formato esferoide.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Comparar se as técnicas de ML e IA e avaliar:

- correlação da área de contato gerada entre a esfera de silicone e a superfície de acrílico plana;
- TM de projeção e Hertz podem ser utilizadas como ferramenta para a determinação da tensão de contato entre esfera e plano semi-infinito em esferas de silicone podem simular o esforço na laranja.

1.5. HIPÓTESE E PESQUISA

Comparar a aplicabilidade das técnicas de *Machine Learning* (ML) e Inteligência Artificial (IA) em comparação com as abordagens de *moiré* e Hertz para estudos de projeção com deslocamento de fase torna-se fundamental. Essa análise busca determinar se tais técnicas podem ser empregadas com resultados satisfatórios na reconstrução tridimensional de órgãos vegetais a partir dos dados gerados.

1.6. PROBLEMATIZAÇÃO

Os órgãos vegetais de formas aproximadas de esferoides e de elipsoides de revolução devem ser caracterizados de acordo com a distribuição espacial de suas propriedades mecânicas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. TÉCNICAS PERFILOMÉTRICAS

Os métodos empregados para mensuração da superfície de contorno, ou perfilometria, desempenham um papel essencial em diversas áreas, como indústria, biologia, medicina, engenharia civil e robótica. Na indústria, destacam-se como ferramentas poderosas em processos de manufatura, controle de qualidade, engenharia reversa e modelagem de esforços estáticos e dinâmicos aplicados a componentes mecânicos. No campo da medicina e engenharia biomédica, sua aplicação estende-se a diagnósticos, modelagem de movimentos, estudos de materiais utilizados em próteses e previsão de resultados cirúrgicos. Já na engenharia civil, encontram utilidade na inspeção de grandes estruturas como pontes, edifícios, estradas e túneis. Por fim, na área de robótica, especialmente na visão de máquina, tais técnicas desempenham um papel significativo. HU (2001) propõe uma classificação das técnicas destinadas à medição do perfil topográfico de objetos, dividindo-as em dois grupos distintos: técnicas de contato e técnicas sem contato. Por sua vez, CURLESS (2001) apresenta uma classificação mais abrangente dessas técnicas, conforme ilustrado na Figura 1, e detalha especificamente as técnicas óticas, conforme evidenciado na Figura 2.

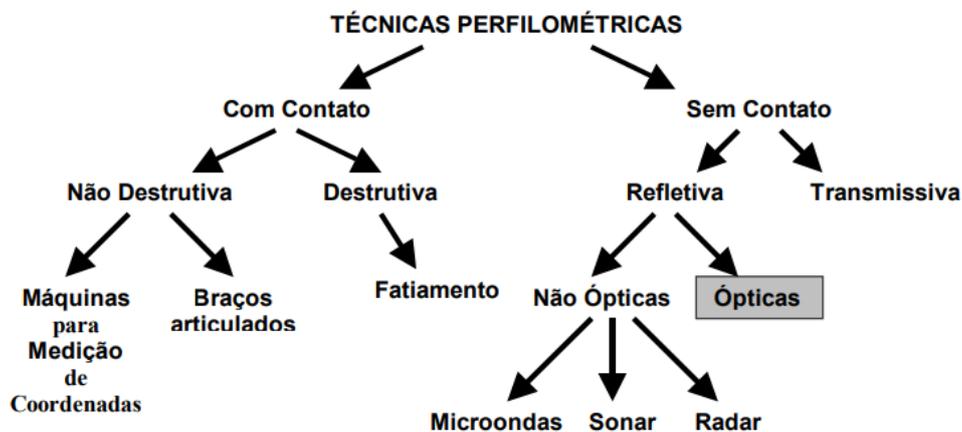


Figura 1: Classificação das Técnicas para aquisição da superfície de contorno. Fonte: CURLESS (2001)

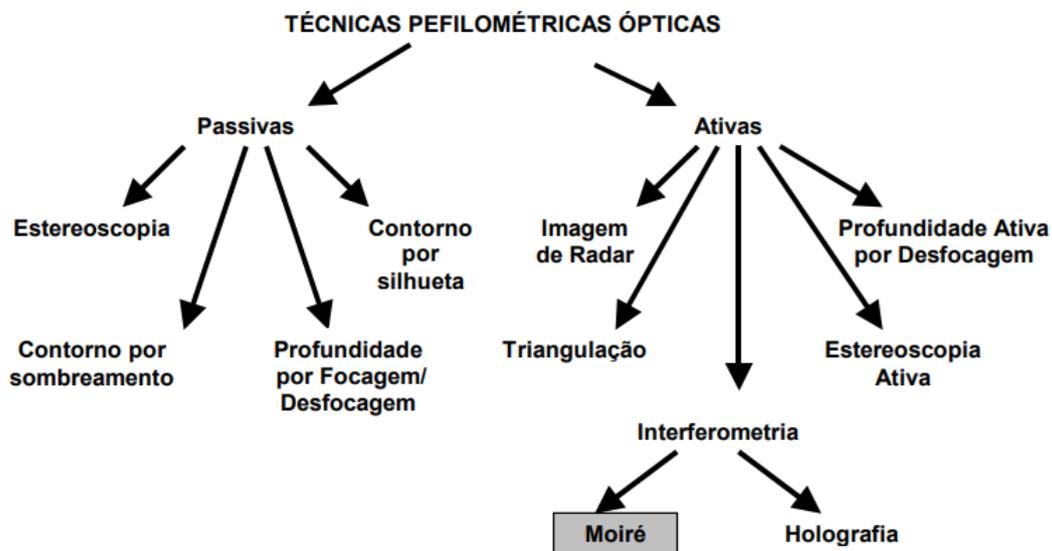


Figura 2: Classificação das Técnicas ópticas para aquisição da superfície de contorno.
Fonte: CURLESS (2001)

HU (2001) diz que as Técnicas de *moiré* (TM), de Sombra e Projeção, são as técnicas perfilométricas mais comumente utilizadas devido, principalmente à sua simplicidade e rapidez de medição, e por isso têm sido alvo de frequentes estudos e vários tipos de aplicações. Nas TM tradicionais muitas informações contidas entre duas franjas vizinhas são perdidas. Por isso a partir dos anos 70, foram desenvolvidas várias técnicas de medição de fase, que aplicados às TM aumentam grandemente a sua resolução, acurácia e repetibilidade. A técnica de medição de fase mais comumente utilizada é a Técnica da Mudança de Fase (*Phase shifting*), onde 3 ou 4 imagens, são projetadas sob a superfície do corpo e com pequenos deslocamentos das franjas entre elas, permite, através de processamento de imagens, obter o mapa de fase e a superfície de contorno dos objetos estudados.

2.2. O FENÔMENO DE *MOIRÉ*

Ao observar-se por meio de duas grades sobrepostas, torna-se evidente a formação de padrões de interferência originados pela combinação das linhas das grades,

caracterizando os denominados padrões ou franjas de *moiré*. A etimologia da palavra *moiré*, conforme destacado por Sciammarella (1982), remonta à origem francesa e significa "molhado", referindo-se a um tecido de seda chinês composto por duas camadas, as quais geravam padrões de *moiré* ao se deslocarem uma em relação à outra.

O fenômeno de *moiré*, primeiramente estudado pelo físico inglês Lord Rayleigh em 1874, como mencionado por Nishijima (1964), foi inicialmente concebido como um meio para testar a perfeição de grades de difração. Sciammarella (1982) acrescenta que uma das primeiras aplicações científicas desse fenômeno envolveu o estudo da deformação da mica por Mulot (1925).

Cloud (1988) relata que, em 1945, D. Tollenar, ao investigar o fenômeno, descobriu que as franjas de *moiré*, na verdade, amplificavam movimentos, conferindo alta sensibilidade a medições de movimentos relativos. Posteriormente, diversos pesquisadores, incluindo Weller & Shepard (1948), Dantu (1954), Riley & Durelli (1962), Theocaris (1969), Durelli & Parks (1970), aprimoraram e aplicaram o método em uma variedade de contextos para estudar deslocamento, deformação e tensão.

Oster et al. (1964) conduziram os primeiros estudos para estabelecer as relações entre grades sobrepostas e as franjas de *moiré* resultantes. Takasaki (1970) e Takasaki (1973) exploraram a sobreposição de uma grade sobre sua própria sombra, conhecida como *moiré* de sombra, para medir o relevo de objetos e pessoas, gerando franjas de *moiré* semelhantes às curvas de nível de mapas topográficos.

A definição do fenômeno de *moiré* refere-se à formação de franjas resultantes da combinação de grades reticulares superpostas com deslocamento relativo, conforme destacado por Lino (2008). Os retículos, ou grades, consistem em faixas claras e escuras alternadas, paralelas e equidistantes, como salientado por Gazzola (2011). Lino (2002)

caracteriza o retículo como "grade Ronchi", onde a distância entre o centro das faixas claras e escuras é denominada linhas de grade (d), e a distância entre os centros de linha de grade de duas faixas escuras (ou claras) contínuas é referida como período ou passo (p) de grade do retículo. Além disso, o inverso do período é a frequência do retículo (f), geralmente expressa em linhas por milímetro. A Figura 3, conforme ilustrada por Lino (2002), apresenta a definição dos termos relacionados à grade.



Figura 3: Definição dos termos de grade com relação a: a) Linha de grade e b) Passo de grade. Fonte: (GAZZOLA, 2011)

Existem diversas apresentações possíveis para os formatos das linhas de grade, conforme delineado por Mazzeti Filho (2004), ao ilustrar os principais retículos empregados na geração de franjas por meio da técnica de *moiré*. Essas grades podem assumir configurações variadas, incluindo linhas paralelas, pontos equidistantes (também conhecidos como "em cruz"), círculos equidistantes e linhas radiais. A escolha do tipo de grade a ser empregado deve estar alinhada com a natureza do estudo a ser conduzido. A Figura 4 apresenta de maneira elucidativa os principais tipos de grades utilizados na geração de franjas de *moiré*.

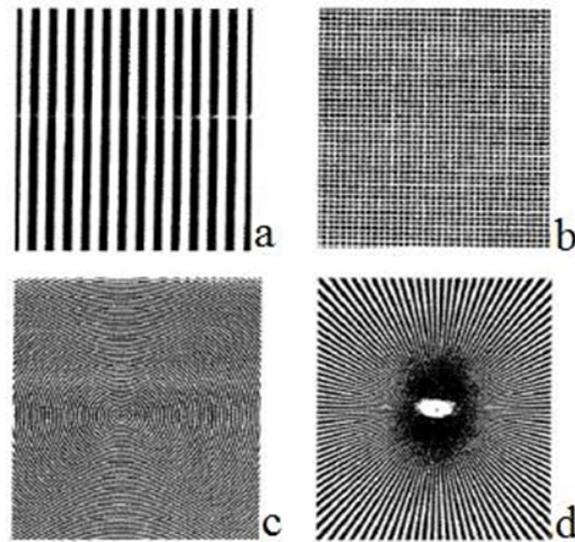


Figura 4: Grades ópticas para a geração das franjas de *moiré*. a) linhas paralelas; b) pontos equidistantes; c) círculos equidistantes; d) linhas radiais. Fonte: (DURELLI e PARKS, 1970, citado por MAZZETI Filho, 2004)

O fenômeno de *moiré* se manifesta quando duas grades de linhas, possuindo uma determinada densidade, são sobrepostas e têm sua posição relativa alterada, resultando na formação de padrões ondulatórios conhecidos como franjas de *moiré*. De maneira simplificada, o movimento relativo entre as duas grades ocasiona a criação de uma terceira faixa, assemelhando-se a ondas, com um ângulo e período distintos em relação às duas telas que originaram o fenômeno. Este terceiro conjunto de faixas é denominado "padrões de *moiré*" ou "franjas padrão" e varia desde uma tonalidade escura (opaca), gerada por ondas de interferência destrutiva, até uma coloração totalmente clara, resultante de ondas de interferência construtiva (Sciamarella, 1982; apud Lino e Dal Fabbro, 2004). A Figura 5 esboça de maneira elucidativa a fenomenologia de *moiré* e a formação das franjas de *moiré* quando as grades são sobrepostas.

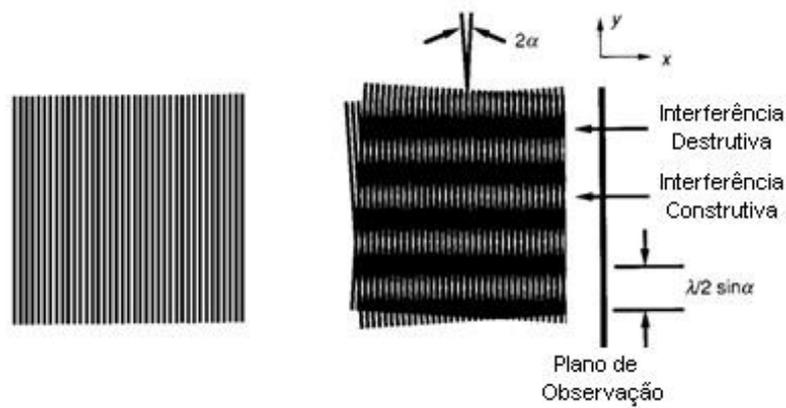


Figura 5: Sobreposição de grades e a formação de franjas claras e escuras. Fonte: DAL FABRO, 2004

Lino (2002) destaca que, ao ocorrer a sobreposição com um pequeno ângulo de interseção entre as linhas dos dois retículos, mesmo deslocamentos mínimos em um dos retículos resultarão em deslocamentos significativos nas franjas de *moiré*. Em outras palavras, observa-se um efeito magnificador no movimento durante a formação das franjas, indicando que o período das franjas será distintivo em relação ao período da grade. O esquema ilustrativo da sobreposição de duas grades e o comportamento na formação das franjas podem ser visualizados na Figura 6.



Figura 6: Sobreposição de grades e formação de franjas de *moiré*. Fonte: (BUYTAERT e DIRCKX, 2008)

No entanto, a geração do fenômeno de *moiré* não se restringe à sobreposição direta de duas grades em contato, resultando na formação de franjas. Chiang (1979) esclarece que,

na fenomenologia do *moiré*, a superposição das grades de referência e do corpo de prova ocorre de maneira indireta, através da sobreposição de imagens, enquadrando esse fenômeno como um caso de interferência óptica. De maneira complementar, Post et al. (1994) afirmam que a interferometria de *moiré* amalgama conceitos e técnicas do *moiré* geométrico e da óptica interferométrica, podendo, portanto, ser tratada como um caso de interferência óptica.

A abordagem metodológica para a formação das franjas oferece uma variedade de técnicas de *moiré*, incluindo *moiré* de sombra, *moiré* por projeção de grades, *moiré* por phase-shifting e de reflexão. Mazzeti Filho (2004) explica que as franjas podem ser geradas por meio da projeção oblíqua do retículo de referência sobre a superfície do objeto, denominado *moiré* por projeção de grades. Nos métodos de *moiré* de reflexão, o retículo do modelo se identifica com a imagem de um retículo visualizado através da imagem reflexiva do objeto. Em ambos os casos, a formação das franjas é realizada por meio de dupla exposição fotográfica ou sobreposição de imagens digitalizadas. Na técnica de *moiré* por phase-shifting, a grade é deslocada em 90° , e as franjas são geradas por meio do processamento das imagens. A técnica de *moiré* de sombra é outro método difundido, onde o retículo do modelo é a própria sombra do retículo de referência, projetada sobre a superfície do objeto em estudo. Neste caso, a visualização direta das franjas dispensa a necessidade de sobreposição de imagens. Importante destacar que, em todos os casos mencionados, as franjas formadas correspondem a levantamentos topográficos. É relevante observar que as franjas para análise do campo de deslocamento são geradas por meio da subtração das imagens antes e após a deformação do objeto.

2.3. TÉCNICAS DE *MOIRÉ* (TM)

Chiang (1979) destaca que os métodos envolvendo a fenomenologia *moiré* constituem um conjunto de técnicas que utilizam esse fenômeno como ferramenta de medição. A Técnica de *Moiré* (TM) consiste na geração de padrões de interferência mediante a projeção de uma grade sobre a superfície de um corpo. Gazzola et al. (2008a) observam que as diversas formas de formação e projeção das grades são responsáveis pela variedade de técnicas de *moiré* atualmente conhecidas.

Lino (2002) menciona que várias tentativas de classificação das Técnicas de *Moiré* foram empreendidas por diferentes autores, levando em consideração o período do retículo, a formação de franjas e o tipo de deformação estudada. Uma das abordagens de classificação das Técnicas de *Moiré* apresentada por Ajovalasit (1998) adota o estudo da deformação como parâmetro central. Essa classificação, baseada no parâmetro do estudo de deformação, se desdobra em cinco grupos, conforme delineado a seguir:

- *Moiré* geométrico plano – este método, conforme discutido por Ajovalasit (1998), representa uma abordagem que proporciona deslocamento bidimensional do objeto, caracterizando-se por sua baixa sensibilidade.
- *Moiré* interferométrico – segundo Post et al. (1994), o *moiré* interferométrico representa uma abordagem que proporciona o deslocamento bidimensional do objeto. Esse método, conforme destacado pelo autor, resulta da combinação dos conceitos do *moiré* geométrico com a óptica interferométrica, conferindo-lhe a capacidade de obter medidas de deslocamento no plano com alta sensibilidade. Assim, a técnica de *moiré* interferométrico é reconhecida como uma abordagem de alta sensibilidade na medição de deslocamentos.

- *Moiré* holográfico – Conforme abordado por Willemann (2002), o *moiré* holográfico encontra-se fundamentado nos princípios da holografia, que se baseia na incidência de luz laser sobre uma superfície. Nesse processo, as ondas refletidas dispersam-se no espaço, e ao atingirem um anteparo específico, configuram um padrão de interferência granular, revelando vários pontos claros e escuros distribuídos de forma aleatória, denominados *speckle*. A interferência das ondas resulta na formação de uma terceira grade com padrões de cores claras e escuras. Devido ao uso do laser, esse método demonstra uma sensibilidade elevada, da ordem de 0,6 μm . É importante salientar que a iluminação do objeto pode ser realizada por meio de uma única fonte de luz (iluminação simples) ou duas fontes distintas (iluminação dupla).
- *Moiré* por reflexão – Empregado em testes de torção, o método de *moiré* por reflexão, conforme delineado por Lino (2002), proporciona informações sobre os ângulos de rotação bidimensional nos eixos X e Y.
- *Moiré* de sombra ou de projeção – Este método, conforme descrito por Lino (2002), é uma abordagem que oferece a linha de nível do componente analisado em relação ao retículo de referência.

Costa (2006) destaca que existem diversas abordagens para reproduzir a fenomenologia *moiré*, sendo notáveis as técnicas de *moiré* de sombra e *moiré* por phase-shifting.

Affonso et al. (2005) corroboram que, para a implementação dessas duas técnicas de *moiré*, é necessário um arranjo experimental composto por câmera digital, fonte de luz e retículo. No caso da técnica de *moiré* de sombra, o retículo assume a forma de uma grade

Ronchi composta por faixas claras e escuras. Hertz et al. (2005) explicam que as franjas de *moiré* resultam da interferência entre um retículo de referência e as sombras geradas por ele sobre o corpo em observação. A física óptica esclarece que, ao atravessar uma tela de interferência, um feixe de luz cria sombras com base na profundidade do alvo, ou seja, a sombra da grade projetada no objeto, ao interagir com a grade de projeção, desencadeia o fenômeno. O método de *moiré* de sombra utiliza apenas uma grade com retículo de referência, perpendicular à direção da câmera fotográfica e inclinada em relação à fonte de luz. Hertz et al. (2005) ressaltam a importância de um ambiente escuro para produzir uma imagem clara, minimizando reflexos. Coelho e Tavares (2003) enfatizam que o retículo deve estar o mais próximo possível do objeto, cobrindo toda a sua extensão. De acordo com Moore e Truax (1979, apud por Mazzeti Filho, 2004), a precisão da técnica de *moiré* de sombra é, no máximo, 1/10 do período da franja de *moiré* gerada, mas esses autores desenvolveram um método chamado "phase-locked", aumentando a precisão para 1/20 do período da franja gerada. Outro método desloca as grades em 90°, projetando-as separadamente sobre o objeto através de um projetor de multimídia, conhecido como *moiré* de Phase-Shifting. Lino (2002) menciona que esse ensaio requer a projeção de 3 ou 4 imagens, com pequenos deslocamentos das franjas entre si, para obter os mapas de fase e a superfície de contorno dos objetos estudados. Essa mudança de fase da grade pode ser realizada com retículos de linhas paralelas ou também por grades sinusoidais, ambas deslocadas de 90° entre si. As Figuras 7 e 8 exibem as grades utilizadas nos testes *moiré* de phase-shifting por retículo e por grades sinusoidais.



Figura 7: Grades de linhas paralelas para *moiré* por phase-shifting por retículos, deslocadas de 90° entre si. Fonte: (LINO, 2008)

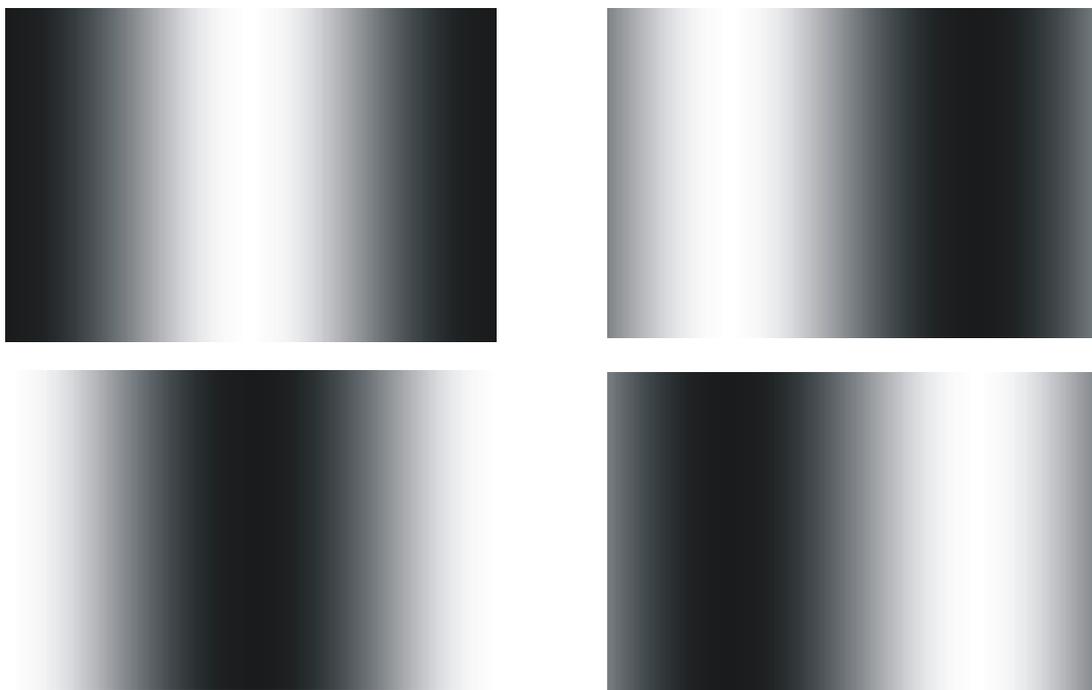


Figura 8: Grade sinusoidal para *moiré* por phase-shifting deslocadas de 90° entre si. Fonte: (GAZZOLA et al., 2008-b)

A abordagem de phase-shifting por projeção de grades reticulares envolve a projeção da grade sobre o objeto por meio de uma fonte de luz. Essa técnica é aplicada em corpos de formas contínuas, como cubos, frutos, entre outros. O retículo projetado exibe um padrão de ondas quadradas, alternando entre cores escuras (preto) e claras (branco). Ao contrário da técnica de *moiré* de sombra, a abordagem de projeção não permite a visualização direta

das franjas, e sua precisão é limitada devido à resolução do projetor e da câmera digital (LINO, 2008).

Por outro lado, a técnica de phase-shifting com grade sinusoidal também envolve a projeção da grade sobre o objeto através de uma fonte de luz. Essa metodologia é mais adequada para corpos com características descontínuas, como plantas e objetos distintos. O retículo projetado segue um padrão de ondas senoidais, apresentando variações em cores escuras.

Ambas as técnicas proporcionam métodos eficazes para a análise de deformações e deslocamentos, cada uma adaptada a diferentes tipos de objetos e formas. A escolha entre essas abordagens dependerá das características específicas do objeto em estudo (LINO, 2008).

2.4 TEORIA DE CONTATO DE HERTZ

Ensaio de Hertz

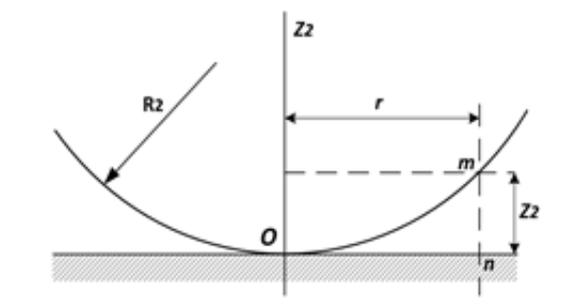


Figura 9: Esfera em contato com superfície plana (TIMOSHENKO, S, 1980)

$$z_2 = \frac{r^2}{2R_2} \quad (1)$$

Equação 1: Equação de Ensaio de Hertz. Fonte: TIMOSHENKO – 1980

Para R_1 e $R_2 \gg r$, se demonstra pela Figura 10 e pela Equação 2

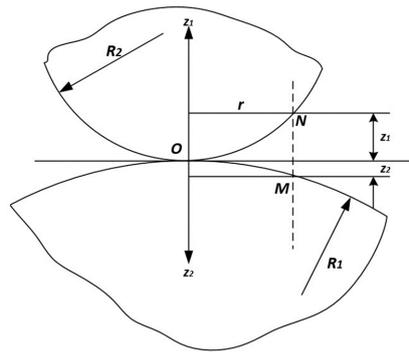


Figura 10: Caso genérico para pressão entre dois corpos em contato. Fonte: (TIMOSHENKO, S, 1980).

$$z_1 + z_2 = r^2 \left(\frac{R_1 + R_2}{2R_1R_2} \right) \quad (2)$$

Equação 2: Caso genérico para pressão entre dois corpos em contato. Fonte: (TIMOSHENKO, S, 1980).

Raio da área de contato (a)

$$a = 1,109 \sqrt[3]{\frac{PR_2}{E}} \quad (3)$$

Equação 3: Raio da área de Contato. Fonte: Hertz.

Deformação (D)

$$D = 1,23 \sqrt[3]{\frac{P^2}{E^2 R_2}} \quad (4)$$

Equação 4: Deformação de Hertz. Fonte: Hertz

Pressão máxima na superfície de contato (q_0)

$$q_0 = 0,388 \sqrt[3]{\frac{PE^2}{R_2^2}} \quad (5)$$

Equação 5: Pressão máxima na superfície de contato. Fonte: Hertz

3. MATERIAS E MÉTODOS

O presente trabalho foi conduzido no Laboratório de Propriedades Mecânicas dos Materiais Biológicos, na Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI - da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, apresentando as principais características físicas dos corpos de prova empregados nos ensaios mecânicos, bem como as características dos equipamentos utilizados nos ensaios ópticos e mecânicos.

No entanto, a interpretação dos resultados será apresentada por três diferentes métodos, a saber: *Hertz*, medição direta, e fotomecânica/*moiré*, conforme está apresentado na revisão da literatura.

A grade explicativa mostrada na Figura 13 detalha o planejamento dos ensaios que foram executados no Laboratório. Dentre os 7 (sete) Corpos de Prova (CP) mostrados na Figura 4 foram selecionados 04 (quatro) aleatoriamente, que apresentaram as melhores condições de utilização para este experimento para um suposto Modelo Ideal. As dimensões dos CP's de Silicone (SL) são apresentados na Tabela 1.

Esfera	Diâmetro	Raio	Circunferência	Área Superfície da Esfera	Volume da Esfera	Peso em Gramas (Balança digital)
	D	mm	mm	mm ²	mm ³	15,70
1	26,06	13,03	81,87	2133,47	9266,36	32,90
2	36,29	18,15	114,01	4137,24	25023,42	32,90
3	45,10	22,55	141,68	6389,84	48030,32	67,30
4	54,91	27,46	172,50	9471,96	86684,24	117,10
5	62,32	31,16	195,78	12200,90	126726,71	195,90
6	64,66	32,33	203,13	13134,35	141544,47	191,60
7	67,16	33,58	210,98	14169,63	158605,27	226,40

Tabela 1: Dimensões dos corpos de prova esféricos. Medição manual pelo paquímetro e cálculos pelo Excel.

As cargas aplicadas de forma diametral no corpo de prova foram quantificadas em diferentes valores, a saber: 5 kgf, 10 kgf, 15 kgf, 20 kgf, 25 kgf e 30 kgf, garantindo que não ocorresse a ruptura do corpo de prova. Ao submeter o corpo de prova a essa força

diametral, observou-se a deformação, resultando em uma forma aproximadamente elíptica. Os raios maiores, representados por (A_i) e (B_i) para i (1,3), juntamente com a área (S_i) , são destacados na Figura 14.

As atividades experimentais realizadas no âmbito deste estudo podem ser analisadas conforme apresentado na Figura 10, a qual esquematiza de maneira abrangente todo o procedimento conduzido.

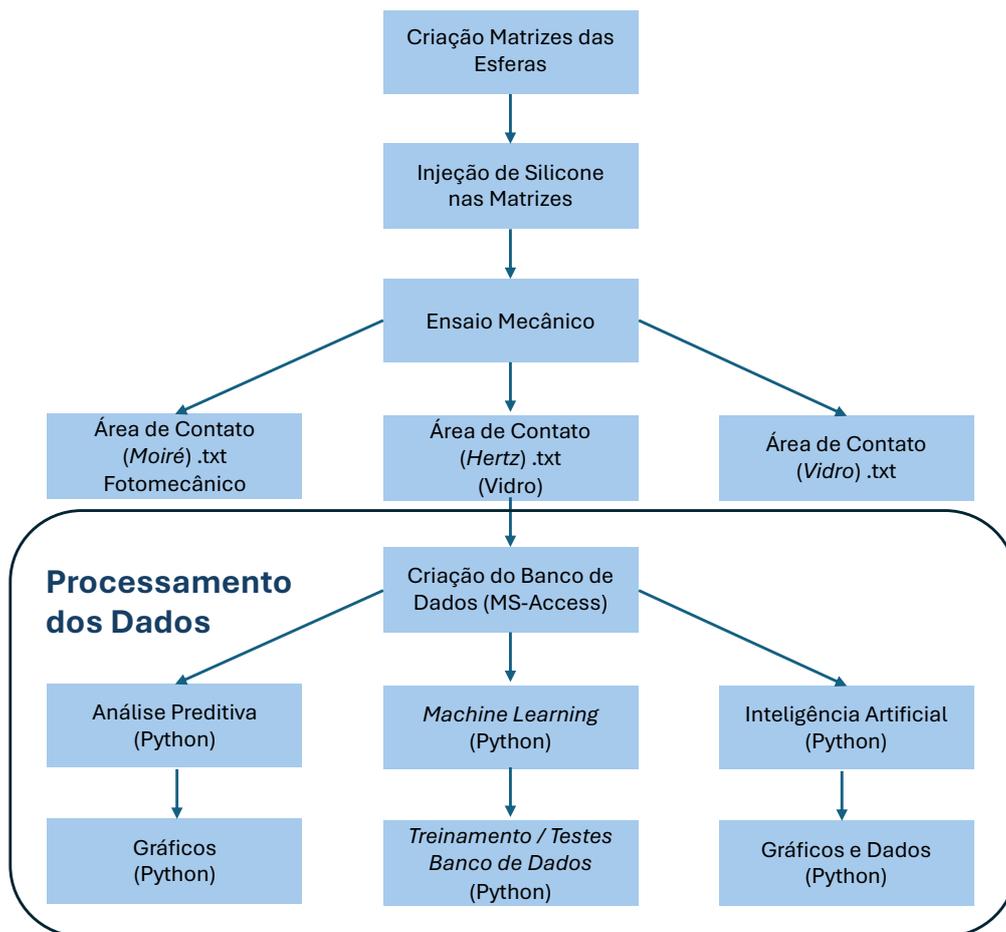


Figura 11: Esquema de criação das matrizes, injeção das esferas, dos ensaios mecânicos e o processamento dos dados, com IA, ML e AP, levados a cabo em esferas de silicone.

Fonte: o Autor

Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Propriedades Mecânicas dos Materiais Biológicos da Faculdade de Engenharia Agrícola da FEAGRI, UNICAMP. Para a realização dos ensaios mecânicos e fotomecânicos será utilizada a máquina universal de ensaio (D.1804.C/ CANNERS MACHINERY LIMITED), com *software*

de aquisição de dados, SPIDER 8, com comando computadorizado. Também foi elaborada as análises de dados com a utilização de Python para a consolidação dos dados levantado. A partir do banco de dados que foi criado com os trabalhos e executados no Laboratório, foram executados para os processos de *Machine Learning*, Inteligência Artificial e Análises Preditivas.

3.1 ENSAIOS DE *MOIRÉ*

Como já foi descrito anteriormente na introdução foram utilizadas nos ensaios ópticos a técnica *moiré* de sombra. Essa técnica consiste na projeção de uma grade Ronchi sobre a superfície do corpo em estudo sob deformação por meio de uma fonte de luz e simultaneamente será feita a captação de imagens por uma câmera digital para posterior processamento. Para a execução do trabalho foram usadas esferas confeccionadas em silicone, em cor branca fosca para propiciar maior contraste entre as franjas de *moiré* e facilitar a obtenção das imagens. O aparato experimental apresentado na Figura 12 será montado para aquisição das imagens, com os seguintes componentes:

- Máquina de ensaio universal.
- Projetor multimídia com lâmpada de 170 W de potência
- Câmara digital
- Placa plana de acrílico
- Paquímetro Digital MTX

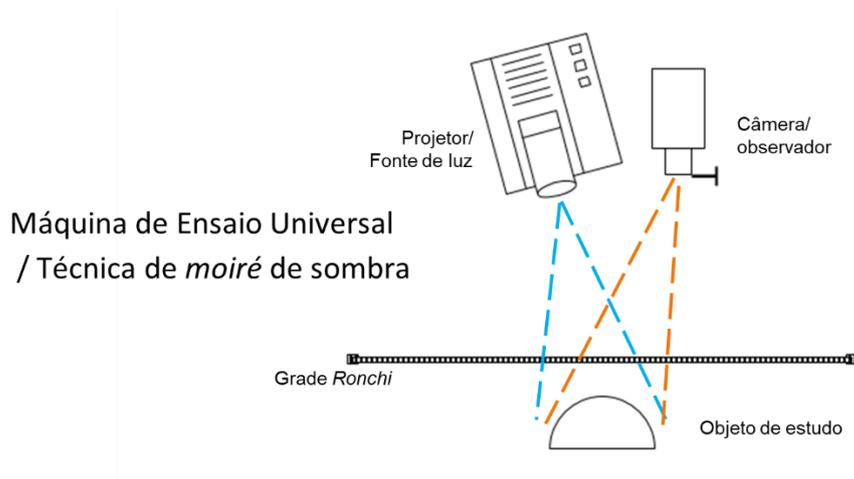


Figura 12: Setup da Técnica de *moiré* de sombra. Fonte: Lino (2008)

3.2. ENSAIOS DE HERTZ

Foram confeccionadas um número total de sete esferas de silicone por injeção em matrizes de plástico. A Figura13 exhibe os corpos de prova esféricos, bem como a Tabela 1 mostra as dimensões dos referidos corpos de prova. O material utilizado se identifica com as características tais como seguem. Borracha de Silicone RX 32 para Moldes de Extrema Resistência (Com Catalisador) - [1,030 Kg]. Descrição detalhada da Borracha de Silicone Elastômero RX – 32, é uma composição de borracha de silicone de cura por poli condensação, que resulta num produto elástico de alto desempenho e alta resistência mecânica, excelente flexibilidade, baixíssima retração linear; recomendada tanto para confecção de moldes técnicos com riqueza de detalhes, como em moldes e matrizes em geral que exijam altíssimas performance, qualidade e reprodutibilidade. As principais propriedades e aspecto - líquido viscoso cor branco a creme, com viscosidade cPs a 25°C: ~ 10.000, densidade g/cm³ a 25°C: 1,4, dureza Shore A 72 horas 06 - 08 - tempo de utilização da mistura a 22°C (*pot life*) : 1 - 2 horas - tempo para desmoldagem: ~ 08 horas. Este tipo de silicone é super macio.



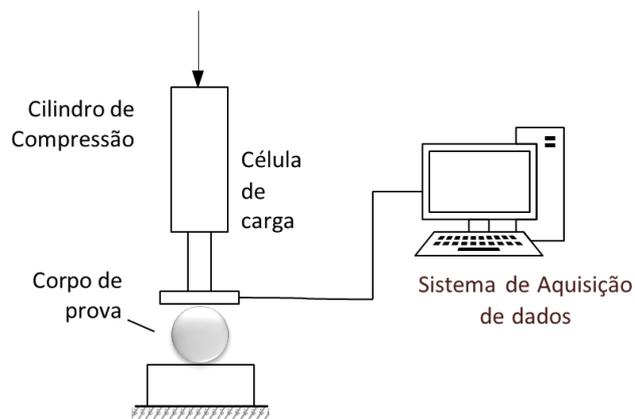
Figura 13: Corpos de prova confeccionados em silicone, por injeção em matrizes também de silicone desenvolvida pelo discente e suas respectivas dimensões e pesos em tamanho real. Fonte: o Autor

3.3 A Fenomenologia *Moiré*

Ensaio de *moiré*.

Como já foi descrito anteriormente na introdução foram utilizadas nos ensaios ópticos a técnica *moiré* de sombra. Essa técnica consiste na projeção de uma grade senoidal sobre a superfície do corpo em estudo sob deformação por meio de uma fonte de luz e simultaneamente será feita a captação de imagens por uma câmera digital para posterior processamento. Para a execução do trabalho se usou esferas confeccionadas em silicone, em cor branca fosca para propiciar maior contraste entre as franjas de *moiré* e facilitar a obtenção das imagens.

O aparato experimental apresentado na Figura 14 se montou para a aquisição das imagens, com os componentes, tais como seguem.



Ensaio de compressão simples e de compressão constricta

Figura 14: Arranjo Experimental = *moiré*. Fonte: Gazzola (2013).

Compressão diametral das esferas

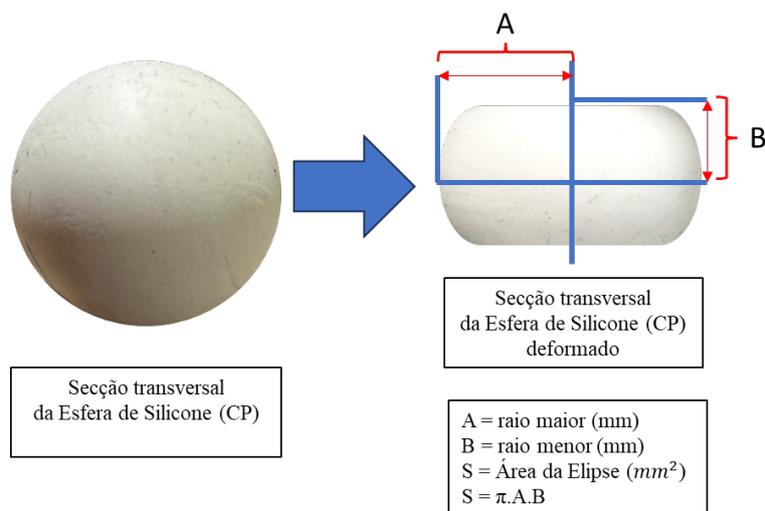


Figura 15: Representação do comportamento da deformação diametral do CP de borracha. Área da Secção Transversal Elíptica (mm).

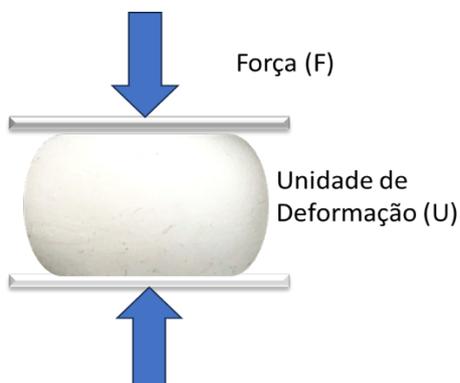


Figura 16: Compressão Diametral de um Corpo de Prova (CP). Esfera de Silicone, onde, F representa a força diametral aplicada e U representa a deformação da esfera.

A figura enviada não é uma elipse perfeita, mas sim uma forma oval. Existem várias equações que podem ser usadas para aproximar a forma de uma oval, mas a mais comum é a equação da elipse generalizada:

$$(x - h)^2 / a^2 + (y - k)^2 / b^2 = 1 \quad (6)$$

Equação 6: Fórmula de equação da Elipse generalizada

Onde:

(h, k) são as coordenadas do centro da oval;

a é o semi-eixo maior;

b é o semi-eixo menor.

No entanto, esta equação só é válida para elipses perfeitas. Para ovais, precisamos usar uma forma modificada da equação:

$$(x - h)^2 / a^2 + (y - k)^2 / b^2 = 1 + k^2 / a^2 \quad (7)$$

Equação 7: Equação de Elipses ovais

Esta equação leva em consideração a distorção do oval, que é representada pelo termo k^2 / a^2 .

Para determinar os valores de **a**, **b**, **h** e **k**, deve seguir os seguintes passos:

Identifique o centro da oval, este é o ponto médio entre os dois pontos mais longes da oval. Determinar o semieixo maior, este é o comprimento da metade da oval ao longo do seu eixo maior. Determine o semieixo menor, este é o comprimento da metade da oval ao longo do seu eixo menor, substitua os valores de **a**, **b**, **h** e **k** na equação da elipse generalizada.

Esta é apenas uma aproximação da forma da oval. A forma real da oval pode ser mais complexa e pode não ser perfeitamente representada por uma única equação.

Outras equações que podem ser usadas para aproximar a forma de uma oval incluem:

A equação de Cassini:

$$(x^2 + y^2)^2 - 2a^2(x^2 + y^2) + a^4 = b^4 \quad (8)$$

Equação 8: Equação de Cassini para elipses ovais

A equação de superfície de Booth:

$$x^2 / a^2 + y^2 / b^2 + z^2 / c^2 = 1 \quad (9)$$

Equação 9: Equação de Booth

A escolha da equação mais adequada dependerá da forma específica oval e da precisão desejada.

O ensaio de compressão diametral é apresentado na Figura 16 onde foram necessários inserir um disco metálico na parte superior e na parte inferior um vidro, para este ensaio nas instalações do Laboratório da FEAGRI. Para verificar a área de contato utilizamos uma base de vidro transparente, e um espelho e assim verificar a área de contato. As esferas de silicone foram cuidadosamente centralizadas no prato de carga de forma a não deslizar durante o ensaio.

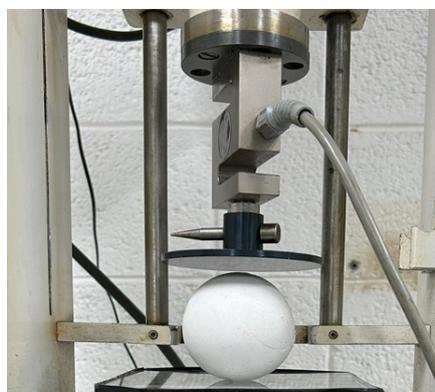


Figura 17: Equipamento de compressão para deformação da Esfera de Silicone. Fonte: o Autor

O processo atual da coleta dos dados e das análises está conforme a Figura 18, sendo necessário alguns dias, com o desenvolvimento ou escolha do corpo de prova adequado ao projeto, passando pela geração dos dados e finalmente a elaboração das análises.

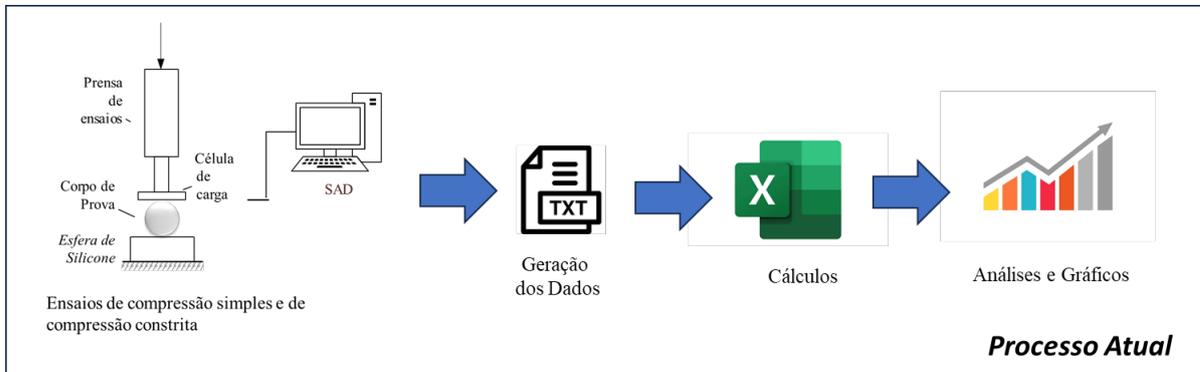


Figura 18: Processo atual para captura e desenvolvimento das análises. Fonte: O Autor

Para o processo de inteligência artificial, usamos bibliotecas nativas do Python para IA. A criação de vários códigos em Python para simular o processo de análise das esferas e comparar com os resultados do equipamento, passado desde o processo de criar uma esfera até a simulação do processo de compressão e verificação da área de contato. O processo desenvolvido totalmente com IA para a elaboração dos códigos e tem como modelo conforme a Figura 19 abaixo.

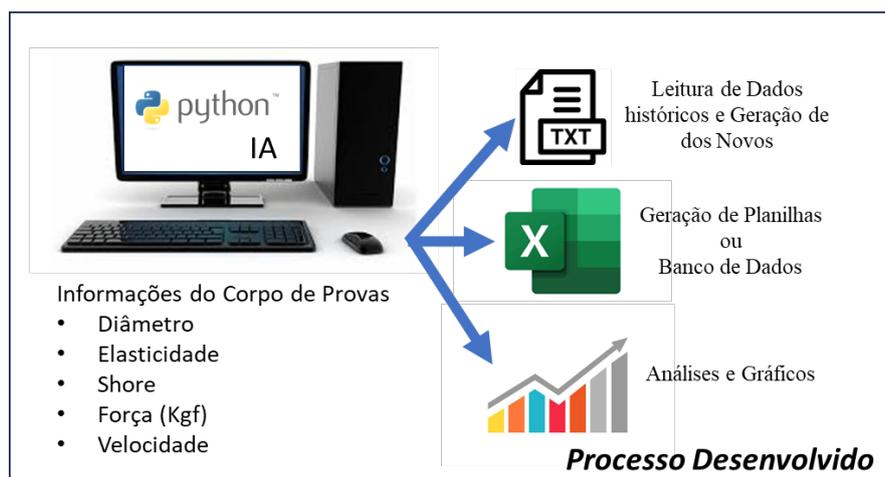


Figura 19: Processo desenvolvido pelo pesquisador para simular o processo atual. Fonte: O Autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Considerações Preliminares

4.1.1. Medições Manuais

Conforme já foi apresentado na Tabela 1 se tem as medições manuais. A criação desses parâmetros e medições iniciais servirá também para comparar com os dados gerados por código Python gerado com a Inteligência Artificial.

Foi utilizado apenas a Esfera 7 para elaborar todos os cálculos e gráficos tem como deformação a força variando de 0 Kgf à 30 Kgf. Todos os dados apresentados a seguir teve a geração executada no Laboratório da FEAGRI e posteriormente inserido no Excel para calcular todos os valores da deformação, como se pode ver um na Figura 20.

HBM_CATMAN12_DATAFILE		Dados Manuais					
07/02/2024		Diâmetro	67,16	mm	6,72	cm	
15:55		g	9,8				
CHANNELS: 2		Velocidade	6	mm/s	0,06		
SEPARATOR: 9							
MAXLINES:							
251							
Cel 250 kg	T(Cel 250 kg)						
kgf	s						
5	5						
0,00000	0,00000						
0,00000	0,10000						
0,01471	0,20000						
0,01471	0,30000						
0,01471	0,40000						
Dados Calculados							
KGF	Tempo	Esfera	Tempo S	Força N	Deformação	Strain	Stress Pa
0,01471	0,00000	EF7	0,00000	0,14	0,00	0	0
0,00000	0,10000	EF7	0,10000	0,00	0,01	0,0672	0,004032
0,01471	0,20000	EF7	0,20000	0,14	0,04	0,2688	0,016128
0,01471	0,30000	EF7	0,30000	0,14	0,09	0,6048	0,036288
0,01471	0,40000	EF7	0,40000	0,14	0,16	1,0752	0,064512

Figura 20: Exemplo de Dados da compressão da Esfera 7. Fonte: O Autor

Com base no processo das imagens geradas, foram calculadas todas as áreas de contato da Esfera 7. Nas Figura 20 até a Figura 28 é apresentado o resultado elaborado para a área de contato para cada uma das forças.

E como base nestes dados foi criado um gráfico de deformação para cada uma das forças aplicadas. É importante notar que a Esfera já possui uma área de contato, sem qualquer força aplicada, como se pode observar na Figura 20, dando um raio de 1,37 cm ou 13,70mm.

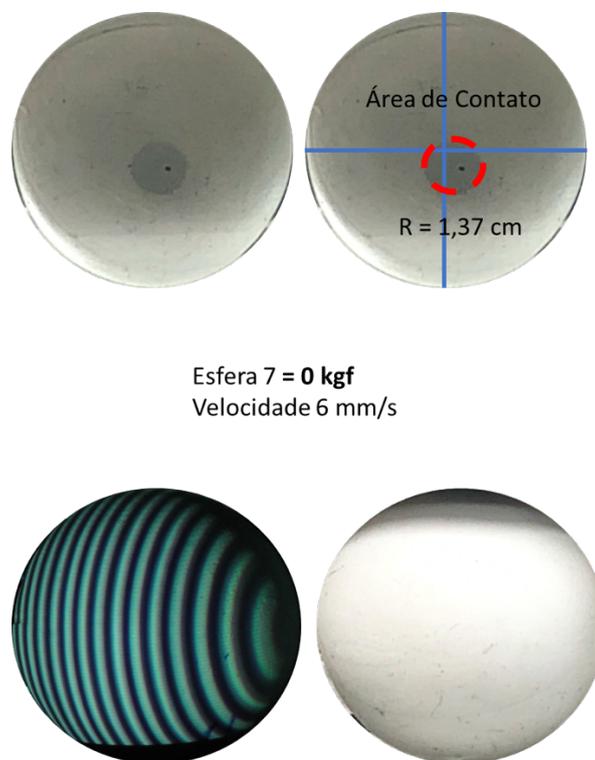
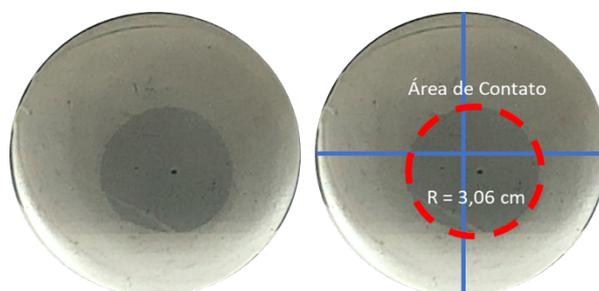


Figura 21: Esfera 7 de Silicone com 0 Kgf de Deformação - Fonte: o Autor

Foi a partir desse instante aplicação de uma variação de 5 em 5 Kgf, gerando a área de contato e os dados mostrados nos gráficos que demonstra a evolução da deformação da esfera, e foi possível calcular a área de contato através do raio da circunferência gerada na deformação da esfera. Centralizamos a esfera, mas se pode observar que a área de contato não está no centro da esfera.

Com a força aplicada de 5 Kgf se tem uma área de contato de 3,06 cm como se pode observar na Figura 21. Como no caso sem força se pode observar que a área de contato não está exatamente no centro.



Esfera 7 = 5 kgf
Velocidade 6 mm/s

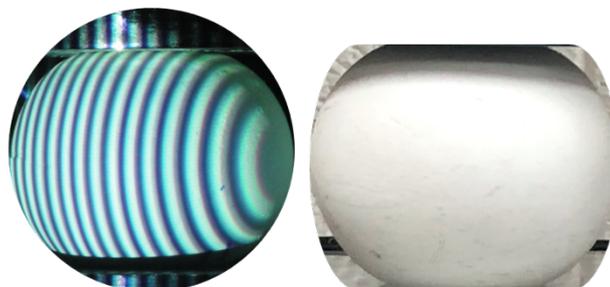


Figura 22: Esfera 7 de Silicone com variação de 0 Kgf a 5 Kgf de Deformação. Fonte: O Autor

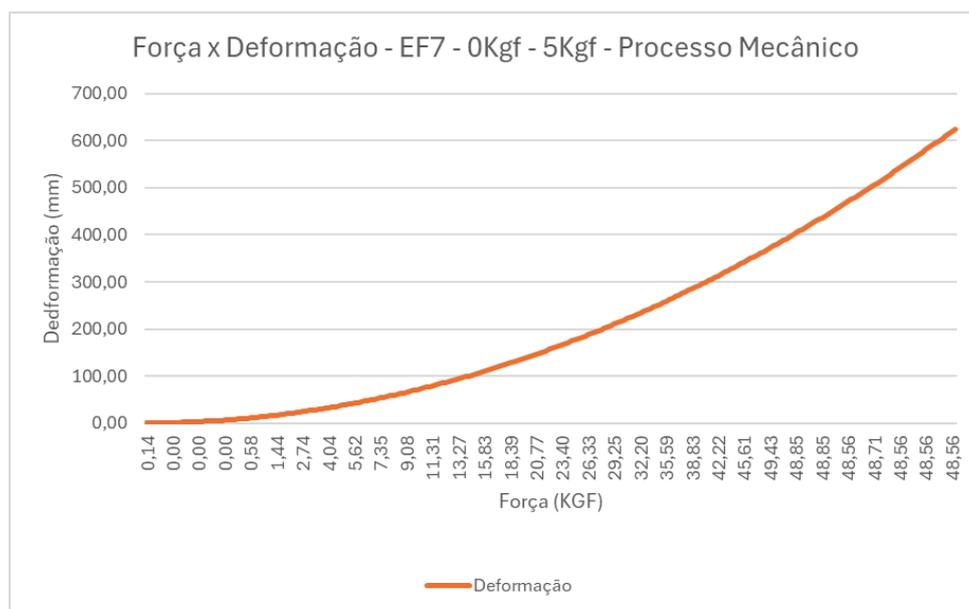


Figura 23: Gráfico da Deformação em relação a força de 0 Kgf a 5 Kgf. Fonte: o Autor

Ao ser aplicado a força de 0 Kgf à 10 Kgf, obtivemos uma área de contato de 3,68 cm, conforme evidenciado na Figura 24. Como no caso da força de 5 Kgf se pode observar que a área de contato não está no centro, mas tendendo mais ao centro.

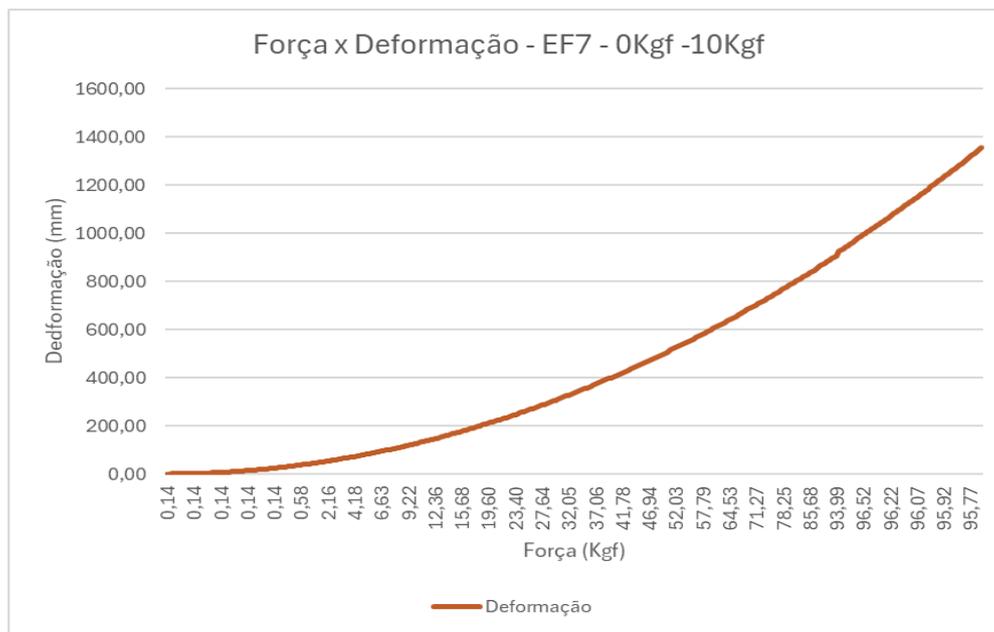


Figura 24: Gráfico da Deformação em relação a força de 0 Kgf a 10 Kgf. Fonte: o Autor

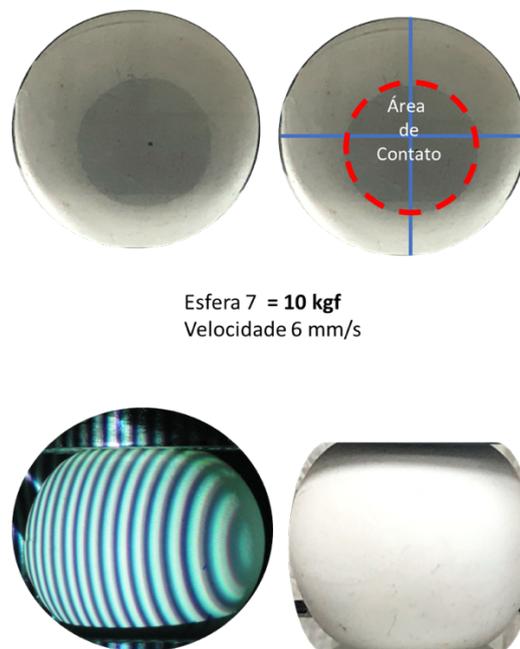


Figura 25: Esfera com *moiré*, e aplicação da Força de 5 Kg e área de contato. Fonte: o Autor

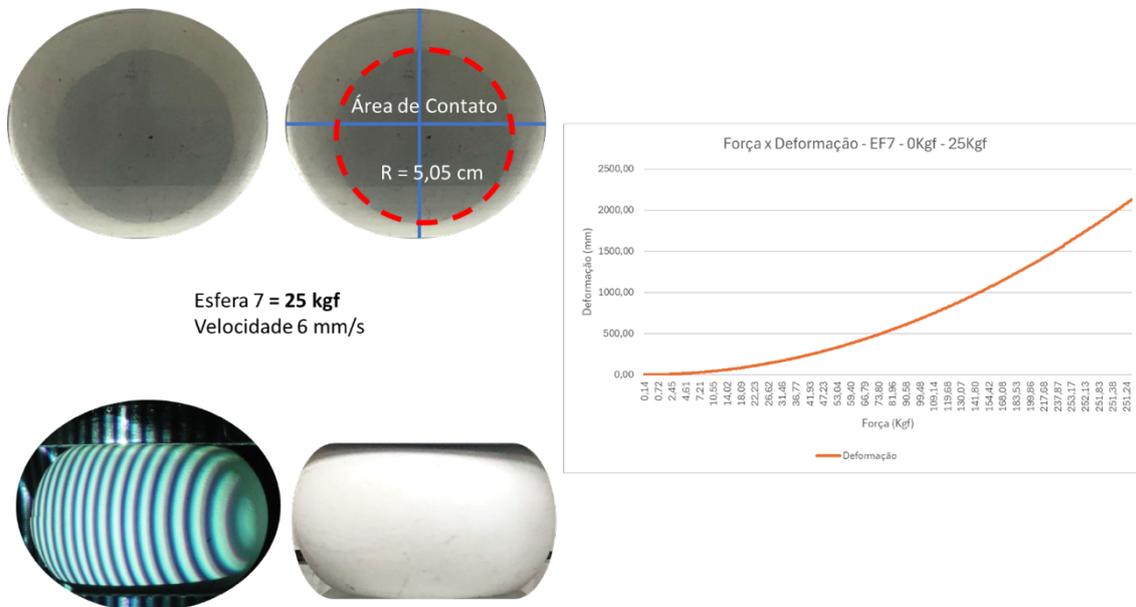


Figura 28: Gráfico da Deformação em relação a força de 0 Kgf a 25 Kgf, *moiré* e área de contato. Fonte: o Autor

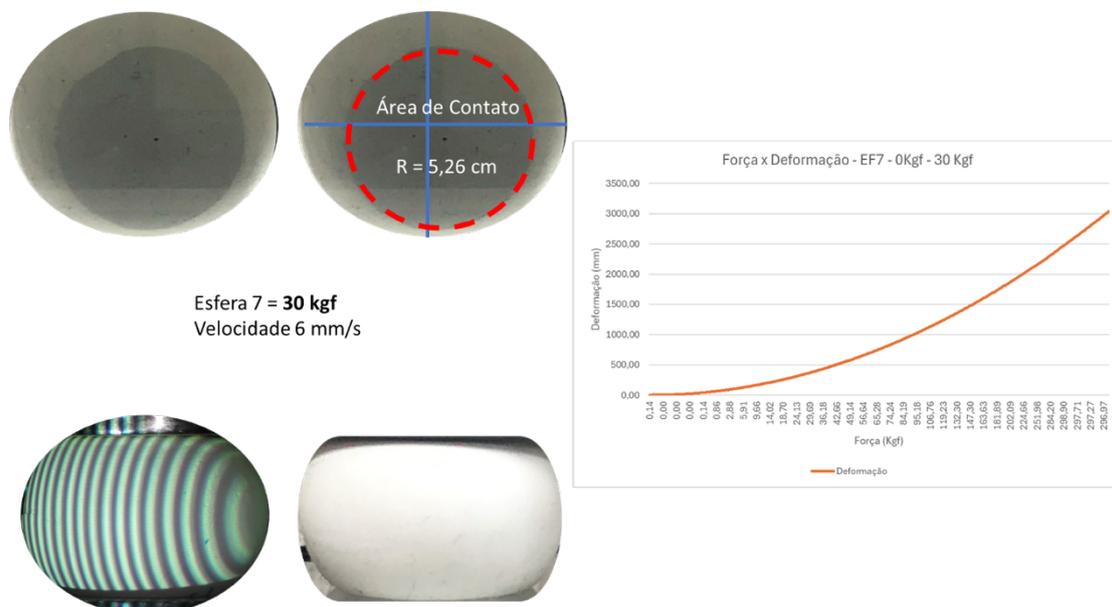


Figura 29: Gráfico da Deformação em relação a força de 0 Kgf a 30 Kgf, *moiré* e área de contato. Fonte: o Autor

Abaixo se tem o resultado das áreas de contato resultante de cada uma das forças de deformação aplicada.

Esfera	Diâmetro	Raio	Circunferência
	mm	mm	mm
EF7	67,16	35,58	210,98
Area de Contato			
0 Kgf	1,37	0,69	4,30
5 Kgf	3,06	1,53	9,61
10 Kgf	3,68	1,84	11,56
15 Kgf	4,27	2,14	13,41
20 Kgf	4,36	2,18	13,70
25 kgf	5,05	2,53	15,86
30kgf	5,26	2,63	16,52

Tabela 2: Area de contato a partir de cada uma das forças de deformação aplicadas.
Fonte: o Autor

4.1.2. Inteligência Artificial (IA)

Foi elaborado um código através da IA para criar as esferas de forma representar as esferas reais de Silicone. Para cada uma das esferas calculadas pelo código, apenas o diâmetro foi necessário para calcular as outras informações contidas na Tabela 3.

Cálculos por IA						
Esfera	Diâmetro	Raio	Circunferência	Área Superfície da Esfera	Volume da Esfera	Peso em Gramas
	D	mm	mm	mm ²	mm ³	Gramas
EF1	26,06	13,03	81,87	2133,47	9266,36	15,7
EF2	36,29	18,15	114,01	4137,24	25023,42	32,9
EF3	45,1	22,55	141,68	6389,84	48030,32	67,3
EF4	54,91	27,46	172,5	9471,96	86684,24	117,1
EF5	62,32	31,16	195,78	12200,9	126726,71	195,9
EF6	64,66	32,33	203,13	13134,35	141544,47	191,6
EF7	67,16	35,58	210,98	14169,63	158605,27	226,4

Tabela 3: Dimensões dos corpos de prova esféricos, calculados totalmente por IA.
Fonte: o Autor

Acima na Tabela 3, estão demonstrados os valores calculados para cada uma das esferas através da IA e a seguir é apresentada a Tabela com a Correlação calculada, onde foi obtido o índice 1, ou seja, totalmente correlacionadas.

Esfera	Diâmetro	Índice de Correlação
EF1	26,06	1
EF2	36,29	
EF3	45,1	
EF4	54,91	
EF5	62,32	
EF6	64,66	
EF7	67,16	

Tabela 4: Análise de Correlação entre as duas tabelas – Medida Manual e a Calculada com IA. Fonte: O Autor

A análise de correlação visa compreender como uma variável se modifica em resposta às variações de outra, buscando identificar possíveis relações entre as duas. Embora não estabeleça causalidade, o coeficiente de correlação quantifica numericamente essa associação, proporcionando uma medida concreta da relação entre as variáveis. A aplicação de coeficientes de correlação desempenha um papel crucial ao delinear cenários em estudos com múltiplas variáveis inter-relacionadas, permitindo uma compreensão mais profunda de como a variabilidade de uma influencia a outra. Neste contexto, optou-se pela utilização do Coeficiente de Correlação de Pearson.

O coeficiente de correlação de Pearson (r), também conhecido como correlação linear, é uma medida que avalia a relação entre duas variáveis quantitativas, expressando essa relação por meio de valores que variam entre -1 e 1.

Quando o coeficiente de correlação se aproxima de 1, indica que há um aumento no valor de uma variável à medida que a outra também aumenta, revelando uma relação linear

positiva entre elas. Da mesma forma, quando o coeficiente se aproxima de -1, denota que as variáveis estão correlacionadas, mas nesse cenário, o aumento no valor de uma variável está associado a uma diminuição no valor da outra. Esse tipo de relação é denominado de correlação negativa ou inversa.

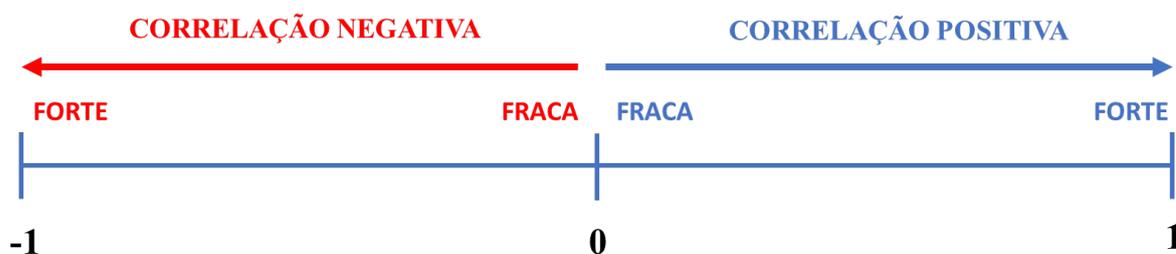


Figura 30: Gráfico da correlação de Pearson.

Fonte: <https://statplace.com.br/blog/coeficientes-de-correlacao/>

Na Tabela 5 apresentamos os resultados gerados pelo código, assim como a criação de uma esfera 3D, apresentada na Figura

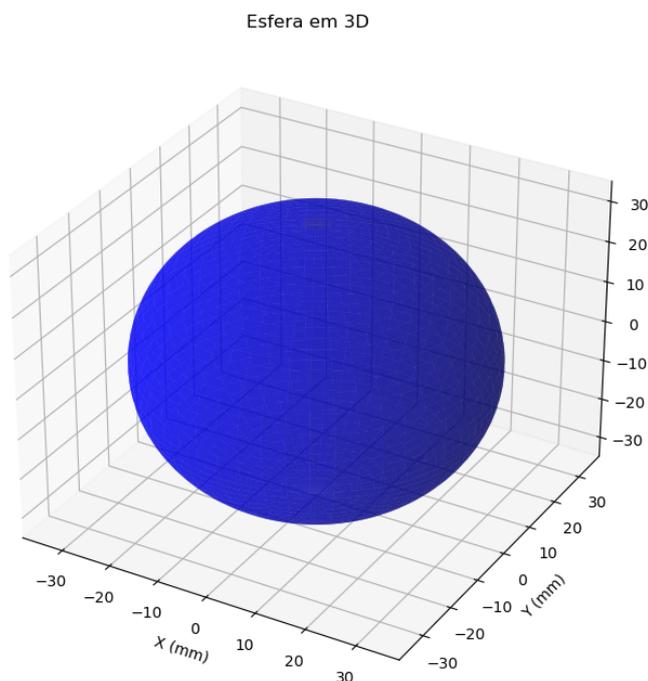


Figura 31: Esfera Gerada por IA, apenas com o parâmetro passado do diâmetro. Fonte: o Autor



Figura 32: Esfera Gerada por injeção em uma matriz criada pelo Autor.

Esfera	Diâmetro	Raio	Circunferência	Área de Superfície da esfera mm ²	Volume	Peso	Forma dos Dados
EF7	67,16	35,58	210,98	14169,63	158605,27	226,4	Manual
EF7	67,16	35,58	210,98	14169,63	158605,27	226,4	IA

Tabela 5: Dados gerados manualmente pelo paquímetro e Excel e dados gerados com IA. Fonte: o Autor

Abaixo as informações calculadas por IA da esfera. As informações marcadas com azul são os únicos parâmetros passados ao código para calcular as outras informações.

Digite o diâmetro da esfera em milímetros: 67.16
Digite o peso da esfera em unidades: 226.4
Digite a elasticidade da esfera em unidades: .9
Diâmetro da esfera: 67.16 mm
Raio da esfera: 33.58 mm
Circunferência da esfera: 210.99 mm
Área de superfície da esfera: 14170.05 mm ²
Volume da esfera: 158610.04 mm ³
Peso da esfera: 226.40 gramas
Elasticidade da esfera: 0.90

Figura 33: Dados Gerados pelo Código em IA a partir dos parâmetros passados. Fonte: o Autor

Este foi o primeiro passo para criar uma esfera para ter os mesmos parâmetros das esferas de silicone. O próximo passo, criou-se através da Inteligência Artificial o processo de deformação para verificar a correlação da área de contato e os dados para criar o gráfico da deformação e foi verificar a correlação entre as duas informações. Sendo gerado as informações para as mesmas forças de 0 Kgf até 30 Kgf.

Conforme mostrado na Figura 33 a nova proposta usando a IA para gerar os dados e as análises, foi criado código em Python com o uso de IA para gerar todos os dados para simular a esfera de silicone conforme foi apresentado anteriormente.

O primeiro passo foi criar um código para criar uma esfera em 2D, conforme a Figura 34.

O código gerado com IA (APÊNDICES – APÊNDICES A – Python – IACOD01).

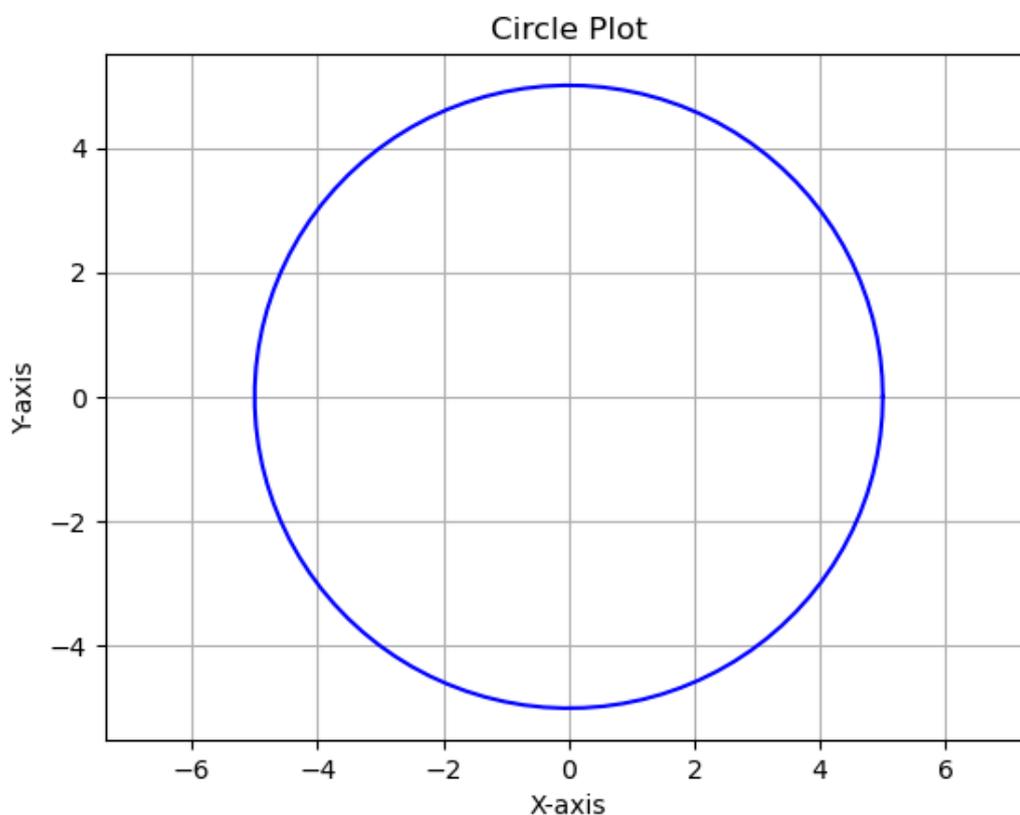


Figura 34: Dados Gerados pelo Código em IA a partir dos parâmetros inseridos. Fonte: o Autor

Como já foi demonstrado na Figura 30 se tem também a criação da esfera em formato 3D, para termos a verdadeira dimensão de uma esfera de silicone, sendo que as medidas informadas foram da Esfera 7, que está apresentada na Tabela 1 e na Tabela 5.

O primeiro passo foi criar uma estrutura de ML para que a Inteligência a partir dos parâmetros passados gerar as informações de forma automática, criou-se códigos com IA para criar este processo. Obtivemos os dados para treino e a partir dos parâmetros inseridos gerar as informações da esfera. O resultado foi bem próximo do real, como se pode ver na Figura 35, com a resultado mecânico e com IA e *Machine Learning*.

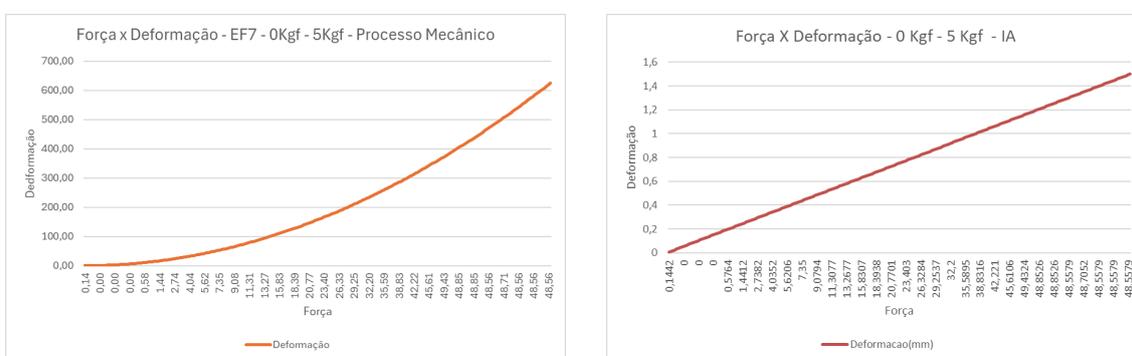


Figura 35: Gráficos elaborados pelo processo normal e por IA com Machine Learning.

Usamos uma base de treinamento para que o processo de *Machine Learning* tenha uma base, e o gráfico gerado a direta se deu de forma linear e se apresenta na Tabela 6, parte das informações geradas pelo processo de *Machine Learning*.

KGf	Tempo	Tempo S	Força N
0,0147	0,0000	0,0000	0,1442
0,0000	0,1000	0,1000	0,0000
0,0147	0,2000	0,2000	0,1442
0,0147	0,3000	0,3000	0,1442
0,0147	0,4000	0,4000	0,1442
0,0147	0,5000	0,5000	0,1442
0,0147	0,6000	0,6000	0,1442
0,0147	0,7000	0,7000	0,1442
0,0000	0,8000	0,8000	0,0000
0,0000	0,9000	0,9000	0,0000
0,0000	1,0000	1,0000	0,0000
0,0000	1,1000	1,1000	0,0000
0,0000	1,2000	1,2000	0,0000
0,0147	1,3000	1,3000	0,1442
0,0147	1,4000	1,4000	0,1442
0,0147	1,5000	1,5000	0,1442
0,0000	1,6000	1,6000	0,0000
0,0000	1,7000	1,7000	0,0000

Tabela 6: Dados gerados pelo código gerado por IA para o *Machine Learning*. Fonte: O Autor

A partir desse passo foi gerado com a IA um código em Python para simular a compressão das esferas.

Os parâmetros passados são os seguintes:

- Diâmetro da Esfera
- Elasticidade da Esfera – Material Silicone
- Área do contato inicial
- Velocidade da Compressão
- Inserimos também a força variando de 0 Kgf à 30 Kgf, objeto do nosso estudo
- Shore (Dureza) da borracha de silicone, informação primordial para o processo.

Com os parâmetros inseridos ao código em Python, gerou-se a área de contato para cada uma das forças descritas acima, variando de 5 kgf para cada medida. Na Figura 36 se tem o processo mecânico e o resultado pela IA para a área de contato inicial, e

0 Kgf de força aplicada. A informação da área de contato inicial foi inserido nos parâmetros do código Python.

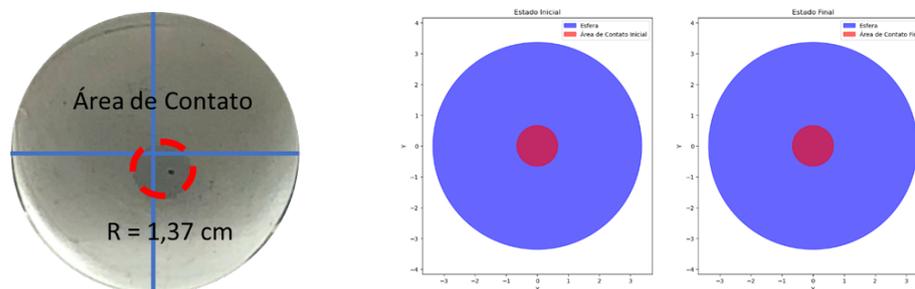


Figura 36: Esfera no processo mecânico com a força em 0 Kgf e a simulação com IA.
Fonte: O Autor

No processo executado em IA sempre se tem a inserção da área de contato inicial em 0Kgf e a força final. Pode se observar os dados gerados pelo código gerado com a IA, na Figura 36, onde tem os parâmetros inseridos da Tabela 6, em amarelo, estes parâmetros são inseridos apenas no início da execução do código Python, com resultados representados na Tabela 8 à Tabela 13, em azul.

Digite o diâmetro da esfera em centímetros (use ponto para casas decimais): 6.716
Digite a elasticidade da esfera (valor entre 0 e 1): .65
Digite a área de contato inicial em cm ² : 1.37
Digite a velocidade constante aplicada em mm/s: 0.06
Digite a dureza da esfera (valor entre 6 e 8): 7

Tabela 7: Parâmetros passados pelo pesquisador ao código gerado com IA

Raio da esfera: 3.36 cm
Circunferência da esfera: 21.10 cm
Área de superfície da esfera: 141.70 cm ²
Volume da esfera: 158.61 cm ³
Força de contato aplicada: 0.00 KGF
Velocidade aplicada: 0.06 mm/s
Área de contato inicial: 1.37 cm ²
Área de contato da esfera: 1.37 cm²

Tabela 8: Dados gerados por código elaborado com IA em Python com 0 Kgf. Fonte: O Autor

Na Figura 35 se tem o resultado com a força de 0 Kgf a 5 Kgf, e o mesmo com IA, onde se obteve a área de contato de **3,01 cm** conforme se pode ver na Tabela 8. Com uma correlação de **0,98** entre a área calculada de forma mecânica com o de IA.

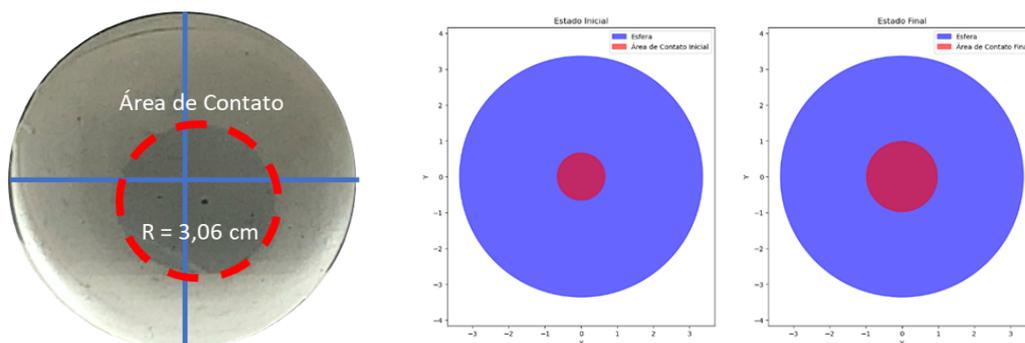


Figura 37: Dados gerados por código elaborado com IA em Python com 0 Kgf. Fonte: O Autor

Força de contato aplicada: 5.00 KGF
Velocidade aplicada: 0.06 mm/s
Área de contato inicial: 1.37 cm ²
Área de contato da esfera: 3.01 cm²

Tabela 9: Dados gerados por código elaborado com IA em Python de 0 Kgf a 5 Kgf. Fonte: O Autor

Na Figura 38 se tem o resultado com a força de 0 Kgf a 10 Kgf, e o mesmo com IA, onde se obteve o a área de contato em **3,36 cm** conforme se pode ver na Tabela 9. Com uma correlação de **0,99** entre a área calculada de forma mecânica com o de IA.

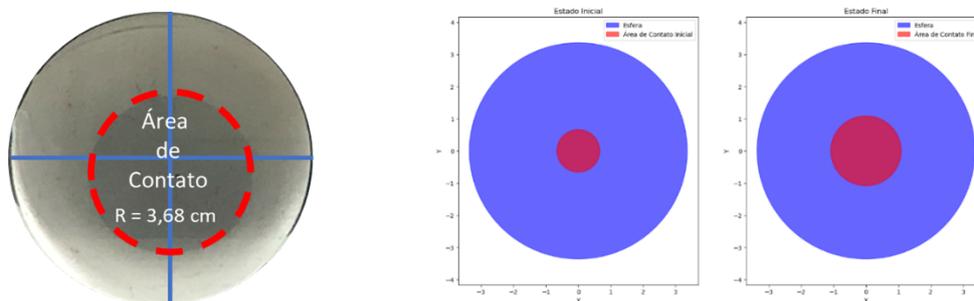


Figura 38: Dados gerados por código elaborado com IA em Python com 0 Kgf. Fonte: O Autor

Força de contato aplicada: 10.00 KGF
Velocidade aplicada: 0.06 mm/s
Área de contato inicial: 1.37 cm ²
Área de contato da esfera: 3.70 cm²

Tabela 10: Dados gerados por código elaborado com IA em Python de 0 Kgf à 10Kgf.
Fonte: O Autor

Na Figura 39 se tem o resultado com a força de 0 Kgf a 15 Kgf, e o mesmo com IA, onde se obteve o a área de contato em **4,22** cm conforme se pode ver na Tabela 10. Com uma correlação de **0,99** entre a área calculada de forma mecânica com o de IA.

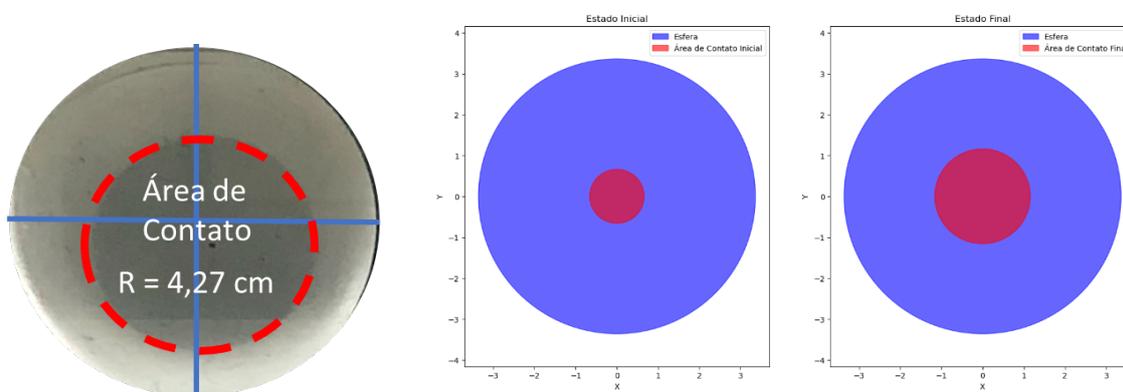


Figura 39: Esfera no processo mecânico com a força de 0 Kgf à 15 Kgf e a simulação com IA. Fonte: O Autor

Força de contato aplicada: 15.00 KGF
Velocidade aplicada: 0.06 mm/s
Área de contato inicial: 1.37 cm ²
Área de contato da esfera: 4.22 cm²

Tabela 11: Dados gerados por código elaborado com IA em Python de 0 Kgf à 15 Kgf.
Fonte: O Autor

Na Figura 40 se tem o resultado com a força de 0 Kgf a 20 Kgf, e o mesmo com IA, onde se obteve o a área de contato em **4,66** cm conforme se pode ver na Tabela 11. Com uma correlação de **0,94** entre a área calculada de forma mecânica com o de IA.

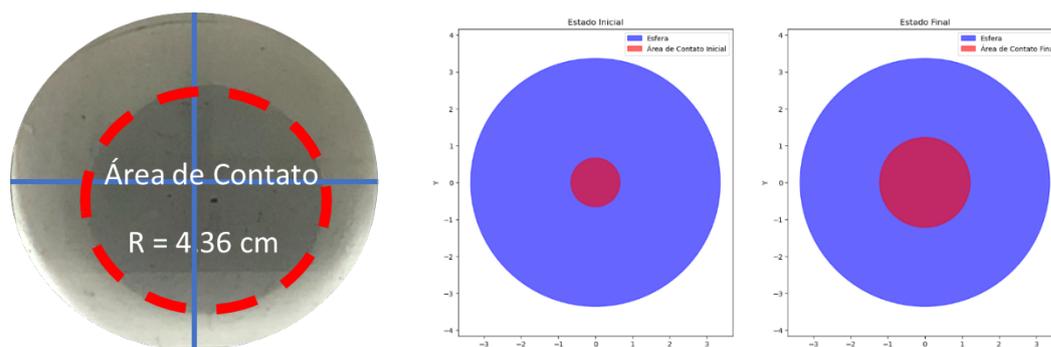


Figura 40: Esfera no processo mecânico com a força de 0 Kgf à 20 Kgf e a simulação com IA

Força de contato aplicada: 20.00 KGF
Velocidade aplicada: 0.06 mm/s
Área de contato inicial: 1.37 cm ²
Área de contato da esfera: 4.66 cm²

Tabela 12: Dados gerados por código elaborado com IA em Python de 0 Kgf à 20 Kgf.

Na Figura 41 se tem o resultado com a força de 0 Kgf a 25 Kgf, e o mesmo com IA, onde se obteve o a área de contato em **5,05** cm conforme se pode ver na Tabela 12. Com uma correlação de **1** entre a área calculada de forma mecânica com o de IA.

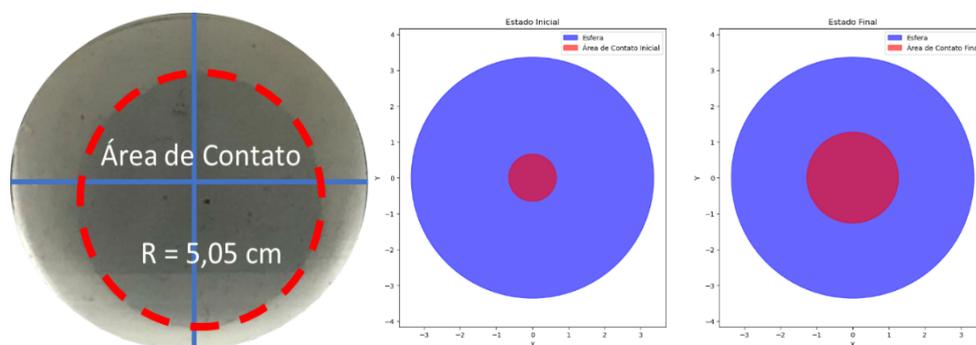


Figura 41: Esfera no processo mecânico com a força de 0 Kgf à 25 Kgf e a simulação com IA.

Força de contato aplicada: 25.00 KGF
Velocidade aplicada: 0.06 mm/s
Área de contato inicial: 1.37 cm ²
Área de contato da esfera: 5.05 cm²

Tabela 13: Dados gerados por código elaborado com IA em Python de 0 Kgf à 25 Kgf.

Na Figura 42 se tem o resultado com a força de 0 Kgf a 30 Kgf, e o mesmo com IA, onde se obteve o a área de contato em **5,40** cm conforme se pode ver na Tabela 13. Com uma correlação de 0,97 entre a área calculada de forma mecânica com o de IA.

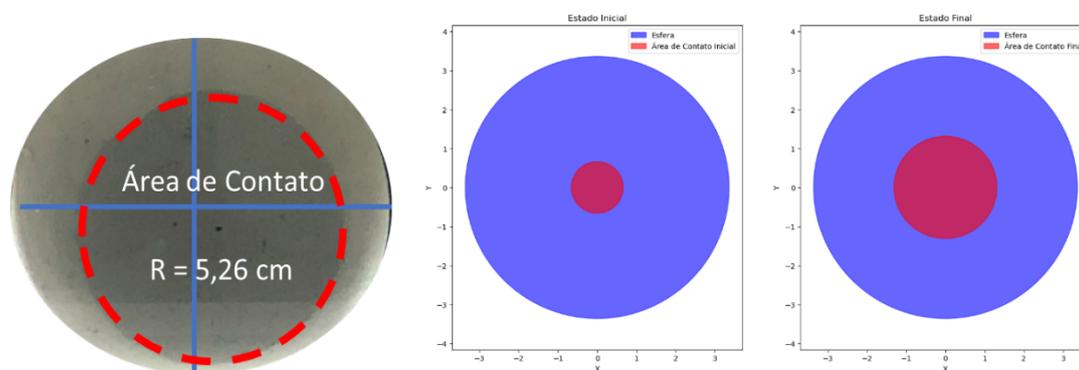


Figura 42: Dados gerados por código elaborado com IA em Python de 0 Kgf à 30 Kgf

Força de contato aplicada: 30.00 KGF
Velocidade aplicada: 0.06 mm/s
Área de contato inicial: 1.37 cm ²
Área de contato da esfera: 5.40 cm²

Tabela 14: Dados gerados por código elaborado com IA em Python de 0 Kgf à 30 Kgf

Esfera	Diâmetro	Raio	Circuferência
	mm	mm	mm
EF7	67,16	35,58	210,98
Area de Contato			
0 Kgf	1,37	0,69	4,30
5 Kgf	3,01	1,51	9,46
10 Kgf	3,70	1,85	11,62
15 Kgf	4,22	2,11	13,26
20 Kgf	4,66	2,33	14,64
25 kgf	5,05	2,53	15,86
30kgf	5,40	2,70	16,96

Tabela 15: Áreas de contato fornecida pelo código Gerado com IA. Fonte: O Autor

Ao se comparar os resultados obtidos pelo processo normal descritos na Tabela 2 com a Tabela 14 gerada por IA, podemos observar uma correlação de 0,9 de média como se pode verificar na Tabela 15, o que demonstra uma correlação muito forte.

Esfera	Diâmetro	Raio	Circunferência	Esfera	Diâmetro	Raio	Circunferência	% Manual x IA	Correlação
	mm	mm	mm		mm	mm	mm		
EF7	67,16	35,58	210,98	EF7	67,16	35,58	210,98		
Area de Contato				Area de Contato					
0 Kgf	1,37	0,69	4,30	0 Kgf	1,37	0,69	4,30	100%	0,99632
5 Kgf	3,06	1,53	9,61	5 Kgf	3,01	1,51	9,46	98%	
10 Kgf	3,68	1,84	11,56	10 Kgf	3,70	1,85	11,62	99%	
15 Kgf	4,27	2,14	13,41	15 Kgf	4,22	2,11	13,26	99%	
20 Kgf	4,36	2,18	13,70	20 Kgf	4,66	2,33	14,64	94%	
25 kgf	5,05	2,53	15,86	25 kgf	5,05	2,53	15,86	100%	
30kgf	5,26	2,63	16,52	30kgf	5,40	2,70	16,96	97%	

Tabela 16: Comparação da Área de Contato processo mecânico com a IA. Fonte: O Autor

5. CONCLUSÕES

De acordo com os dados expostos neste trabalho de pesquisa pode-se concluir que: A presente pesquisa buscou analisar e comparar os processos de *moiré* e compressão de esferas em contextos mecânicos, contrastando-os com a inovadora abordagem de geração de código por meio de Inteligência Artificial. Durante a investigação, foi possível estabelecer uma correlação notável entre esses processos, evidenciada por um coeficiente de correlação de 0,99.

Os resultados obtidos revelam que a implementação de um processo de geração de código através de IA apresenta uma afinidade significativa com os procedimentos tradicionais de *moiré* e compressão de esferas, indicando a eficácia da inteligência artificial na reprodução e otimização de atividades mecânicas complexas.

Essa alta correlação observada entre os métodos tradicionais e a abordagem baseada em IA sugere que a geração de código automatizada pode ser uma alternativa promissora e eficiente nos processos mecânicos, oferecendo vantagens notáveis em termos de precisão, velocidade e flexibilidade. O potencial desta pesquisa transcende as fronteiras dos métodos convencionais, apontando para um futuro em que a inteligência artificial desempenha um papel crucial na evolução e aprimoramento contínuo dos processos mecânicos.

6. REFERÊNCIAS BIOGRÁFICAS

ABRÀMOFF, Michael David; MAGALHÃES, Paulo. J.; RAM, Sunanda. J. Image processing with ImageJ. *Biophotonics International*, Berkshire Common, v.11, n.7, jul., 2004.

ASSUNDI, Anandi K.; YUNG, Kung-Hing. Logical *moiré* and its application. *Experimental Mechanics*, Boston, v.31, n.3, p.236-242, set, 1991.

ASUNDI, Anandi K.; CHAN, C.S.; SAJAN, M.R. 360-deg profilometry: new techniques for display and acquisition. *Optical Engineering*, Bellingham, v. 33, n. 8. p. 2760-2769, ago, 1994.

AZEVEDO, Teresa C. S.; TAVARES, João Manuel R. S.; VAZ; Mário A. P. Obtenção da forma tridimensional de estruturas anatómicas externas a partir de imagens. In: Encontro Nacional De Biomecânica, 2, 2007, Évora.

<http://paginas.fe.up.pt/~tavares/downloads/publications/artigos/TA_Biomecânica2007_ap.pdf>, 05/05/2007.

CREATH, Katherine. Phase-Measurement Interferometry Techniques, in: WOLF, Emil *Progress in Optics XXVI*, ed. Amsterdam: North Holland Publ., p. 349-393, 1988.

DURELLI, A. J.; PARKS, V. J. *Moiré* analysis of strain. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1970 apud CLOUD, G. *Optical methods of engineering analysis*. Cambridge, Cambridge University Press, 1998.

ELETRONIC PACKAGING SERVICES. Shadow *moiré*.

<<http://www.warpfinder/shadowmoire.html>>, 12/03/2000.

EASTMAN, J.R. IDRISI 32: Guide to GIS and image processing, v.1., Worcester, Clark University, 1999.

EASTMAN KODAK COMPANY. Kodak Digital Science DC120 Zoom Digital Camera:

User's guide for camera and software. Rochester, Eastman Kodak Company, 1997.

FUNNELL, W. R. J., DECRAEMER, W. F. *Moiré* shape measurements in eardrum models.

<<http://funsn.biomed.mcgill.ca/~funnell/AudiLab/drumsh.html>>, 10/04/2000.

GASVIK, K. J. *Moiré* techniques by means of digital image processing. Applied Optics.

Washington. v.22, n.23, p.3543-48, set., 1983.

GOLDEN SOFTWARE, INC. SURFER 32 user's guide. Golden, Golden Software, Inc, 1995.

HU, Q. 3-D Shape measurement techniques.

<<http://www.sinc.sunysb.edu/Stu/qhu/Chapter1.htm>>, 06/09/2001.

KATSUKI, T.; GOTO, M.; KAWANO, Y.; TASHIRO, H. Quantification of symmetry of the nose using an analysis of *Moiré* photographs of a face. In: Optical in Biomedical Sciences: Spring Series in Optical Science. ed. VON BALLY, G.; GREGUSS, P. v. 20, p. 267-269, 1982.

KERATRON CORNEL, *Moiré* fringe: Comparing *moiré* fringes to Placido based topography. 1999. <http://209.155.2.106/keratron.html>. Última atualização em 5 de maio de 2000. Sherif, S.M. 1976. The Quase – Static Contact problem for nearly incompressible agricultural products. PhD Thesis. MSU. Sherif, S.M., L.J. Segerlind, and T.S. Frame, 1976. An Equation for the modulus of elasticity of radially compressed cylinder. Transaction of the ASAE. 1976.

Jansle Rocha Vieira. Comportamento Mecânico de mini fardos de Feno de Soja Perene, Submetidos a Ensaio de Relaxação com Cargas Uniaxiais. 1988. 0 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, . Orientador: Inácio Maria Dal Fabbro.

LINARES, A. W. Estudo do comportamento viscoelástico de frutos esféricos. 1996. 134f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, SP

LINO, C. A. L. Técnica óptica de *moiré* visando a aplicação no estudo de superfícies irregulares. 2002. 86f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, SP

LIU, Z. et al. A novel nano-*Moiré* method with scanning tunneling microscope (STM). Journal of Materials Processing Technology, v. 148, n. 1, p. 77–82, maio 2004.

MOHSENIN, N. N. Physical properties of plant and animal materials : structure, physical characteristics and mechanical properties. 2. ed. rev ed. New York, NY: Gordon and Breach, 1986. p. 891p., il

OLIVEIRA, S. A. G. Desenvolvimento de materiais para fotoelasticidade de reflexão. 1988. 93f. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, 1988.

POST, D.; HAN, B.; IFJU, P. High sensitivity moiré: experimental analysis for mechanics and materials. New York, NY: Springer, 1994. v. 21p. 444

SANTOS, J. C. et al. *Moiré* supported flexural tests carried on wooden beams. Proceedings of the 3rd International Congress on Information, Communication Technologies in Agriculture, Food, Forestry and Environment, ITAFFE'10. Anais...Samsun, Turkey: Ondokuz Mayıs University, 2010

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BROWN JR, T. H. Standard handbook of machine design. 3th. ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2004. p. 1288

TIMOSHENKO, S.; GOODIER, J. N. Teoria da elasticidade. 3 ed. ed. Rio de Janeiro, RJ: Guanabara Dois, 1980. p. 545

WALKER, C. A. HANDBOOK of *moiré* measurement (Series in optics and optoelectronics). Bristol; Philadelphia, PA: Institute of Physics Publishing, 2004. p. 501

ZHUPANSKA, O. I. Contact problem for elastic spheres: Applicability of the Hertz theory to non-small contact areas. International Journal of Engineering Science, v. 49, n. 7, p. 576– 588, 2011.

7. APÊNDICES

7.1. APÊNDICE A – Código Python – IA

7.1.1. Códigos em Python para criação da Esfera em 2D.

```
def plot_circle(center, radius, color='b'):
    theta = np.linspace(0, 2*np.pi, 100)
    x = center[0] + radius * np.cos(theta)
    y = center[1] + radius * np.sin(theta)
    plt.plot(x, y, color)

# Example usage:
circle_center = (0, 0)
circle_radius = 5

plot_circle(circle_center, circle_radius)

plt.axis('equal') # Equal scaling ensures that circles look like circles
plt.title('Circle Plot')
plt.xlabel('X-axis')
plt.ylabel('Y-axis')
plt.grid(True)
plt.show()
```

7.1.2. Código em Python para criação da esfera para simular a criação da mesma em 3D.

```
def plotar_esfera(diametro):
    raio = diametro / 2.0
    centro = [0, 0, 0]

    # Criar pontos em uma esfera 3D
    phi, theta = np.mgrid[0.0:2.0*np.pi:100j, 0.0:np.pi:50j]

    # Plotar em 3D
    fig = plt.figure(figsize=(8, 8))
    ax3d = fig.add_subplot(111, projection='3d')
    ax3d.plot_surface(x, y, z, color='b', alpha=0.6)
    ax3d.set_title('Esfera em 3D')
    ax3d.set_xlabel('X')
    ax3d.set_ylabel('Y')
    ax3d.set_zlabel('Z')

    # Plotar em 2D
    plt.figure(figsize=(6, 6))
    plt.gca().add_patch(plt.Circle(centro[:2], raio, color='b', alpha=0.6))
    plt.title('Esfera em 2D')
    plt.xlabel('X')
    plt.ylabel('Y')
    plt.axis('equal')

    plt.show()

    # Receber a entrada do usuário
    diametro_esfera = float(input("Digite o diâmetro da esfera em centímetros: "))

    # Chamar a função para plotar a esfera
    plotar_esfera(diametro_esfera)
```

7.3. Código em Python gerado por IA para verificar área de contato, gerando os gráficos de cada uma das forças aplicadas

```
def calcular_propriedades_esfera(diametro, forca_aplicada, elasticidade,
area_contato_inicial, velocidade):
    raio = diametro / 2.0
    circunferencia = 2 * np.pi * raio
    area_superficie = 4 * np.pi * raio**2
    volume = (4/3) * np.pi * raio**3

    # Considerar uma área de contato inicial
    area_contato_total = area_contato_inicial

    # Calcular a força de contato usando a teoria de Hertz para a área restante
    area_restante = np.pi * raio**2 - area_contato_total
    if area_restante > 0:
        forca_contato_hertz = (3 * np.sqrt(elasticidade) * np.sqrt(forca_aplicada) / (2 *
np.sqrt(raio)))**(3/2)
        # Calcular a área de contato usando a força de contato pela teoria de Hertz
        area_contato_hertz = np.pi * ((3 * forca_contato_hertz) / (4 * elasticidade *
raio))**(2/3)
        # Adicionar a área de contato inicial
        area_contato_total += area_contato_hertz

    # Calcular a força de contato usando a velocidade
    forca_contato_velocidade = 6 * np.pi * elasticidade * raio * velocidade

    print(f"Raio da esfera: {raio:.2f} cm")
    print(f"Circunferência da esfera: {circunferencia:.2f} cm")
    print(f"Área de superfície da esfera: {area_superficie:.2f} cm²")
    print(f"Volume da esfera: {volume:.2f} cm³")
    print(f"Força de contato aplicada: {forca_aplicada:.2f} KGF")
    print(f"Velocidade aplicada: {velocidade:.2f} mm/s")
    print(f"Área de contato inicial: {area_contato_inicial:.2f} cm²")
    print(f"Força de contato calculada pela teoria de Hertz: {forca_contato_hertz:.2f}
KGF")
    print(f"Força de contato calculada pela velocidade: {forca_contato_velocidade:.2f}
KGF")
    print(f"Área de contato da esfera: {area_contato_total:.2f} cm² (considerando a teoria
de Hertz)")

    return raio, circunferencia, area_superficie, volume, area_contato_total,
forca_contato_velocidade
```

7.2. APENDICÊ B - Matriz para criação das esferas



Figura 43: Criação da Matriz para criação das esferas - Modelo Esfera 7. Fonte: O Autor



Figura 44: Matriz da Esfera 7 - concluída. Fonte: O Autor



Figura 45: Matriz pronta para ser injetado o silicone - Matriz Esfera 7. Fonte: O Autor



Figura 46: Esferas injetadas - Esfera 7 à Esfera 1. Fonte: O Autor

7.3. APENDICÊ C - Sugestões para estudos futuros

Considerando os resultados promissores desta pesquisa, sugerem-se algumas direções para estudos futuros, visando aprofundar o entendimento e explorar novas fronteiras no campo da inteligência artificial aplicada aos processos mecânicos. Além disso, é recomendável incorporar a viscoelasticidade como variável de interesse para uma análise mais abrangente. Algumas sugestões para futuras pesquisas incluem:

Incorporação da Viscoelasticidade: Explorar como a viscoelasticidade influencia os processos de *moiré*, compressão de esferas e, especialmente, a geração de código por meio de IA. Investigar como as propriedades viscoelásticas dos materiais afetam a precisão e eficácia dos resultados obtidos pela inteligência artificial.

Estudo de Aplicações Específicas: Focar em aplicações específicas dentro da engenharia mecânica em que a geração de código por IA pode ter impacto substancial. Isso poderia incluir análises de resistência de materiais, design estrutural avançado ou otimização de processos de fabricação.

Comparação com Outras Técnicas Avançadas: Comparar a abordagem de geração de código por IA com outras técnicas avançadas, como aprendizado de máquina supervisionado e não supervisionado, para determinar as vantagens específicas da abordagem escolhida.

Estudos Experimentais e Aplicações Práticas: Realizar estudos experimentais para validar os resultados teóricos e explorar aplicações práticas da geração de código por IA em ambientes industriais reais. Isso pode incluir a implementação de protótipos em escala real para avaliar o desempenho em situações do mundo real.

Análise de Custos e Viabilidade Econômica: Investigar a viabilidade econômica da implementação de sistemas baseados em IA em processos mecânicos, levando em consideração não apenas a eficácia técnica, mas também os custos associados à implementação e manutenção dessas tecnologias.

Ao incorporar a viscoelasticidade e explorar essas sugestões, espera-se que futuras pesquisas ampliem ainda mais nosso entendimento sobre a aplicação prática da inteligência artificial em processos mecânicos, contribuindo para avanços significativos na eficiência e inovação nesse campo.