

DESENVOLVIMENTO DE UM ANALISADOR DE TEXTURA DE BAIXO CUSTO PARA AVALIAÇÃO DA VIDA DE PRATELEIRA DE PÃES DE FORMA

DEVELOPMENT OF A LOW-COST TEXTURE ANALYZER FOR ASSESSING THE SHELF LIFE OF LOAF BREADS

DOI: 10.65747/conali2025v1c02

Otávio Aristides Lima¹; Henrique Pavin Pereira²; Mateus Quintino Gama³; Analía Verónica Gómez⁴; Rogerio Issamu Yamamoto⁵

¹ Bacharel em Engenharia de Controle e Automação. – FESA; ²Bacharel em Engenharia de Controle e Automação. – FESA; ³ Bacharel em Engenharia de Controle e Automação. – FESA; ⁴Docente do Depto de Engenharia de Alimentos – FESA; ⁵Docente do Depto de Engenharia de Controle e Automação – FESA.

Contato: otavio.a.lima.7@gmail.com

Resumo: O monitoramento da vida de prateleira é fundamental para garantir a estabilidade, segurança e aceitação dos alimentos. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação de um analisador de textura (texturômetro) de baixo custo, desenvolvido por alunos da Faculdade Engenheiro Salvador Arena (FESA), e projetado para quantificar, de forma precisa, alterações na textura de alimentos ao longo do armazenamento. O equipamento, construído com componentes acessíveis e tecnologia *open source*, foi validado por meio de análises comparativas com um texturômetro comercial certificado (Stable Micro Systems, modelo TA.XTplusC), utilizando o pão de forma comercial como alimento modelo. Os ensaios seguiram parâmetros do método padrão 74-09 da AACC, aplicando o teste de Análise de Perfil de Textura (*Texture Profile Analysis* - TPA) em diferentes tempos e condições de armazenamento. Os resultados mostraram que o equipamento apresentou precisão de leitura compatível com instrumentos de referência, com erro inferior a 4%. As curvas de tendência revelaram deterioração significativa nas propriedades texturais do pão ao longo de 10 dias, especialmente quando armazenado sem vedação. O protótipo demonstrou eficácia na identificação de alterações na dureza, elasticidade, gomosidade e resiliência, fornecendo suporte objetivo à determinação da vida útil de produtos panificados. A aplicação do texturômetro propicia dados robustos para a indústria de alimentos e pode ser expandida para outros produtos sensíveis à textura.

Palavras-chave: análise de textura; pão de forma; texturômetro; vida útil

Abstract: Shelf-life monitoring is essential to ensure the stability, safety, and consumer acceptance of food products. This study presents the development and validation of a low-cost texture analyzer (texturometer), designed by students from Faculdade Engenheiro Salvador Arena (FESA), to accurately quantify changes in food texture during storage. The equipment, built with accessible components and open-source technology, was validated through comparative analyses with a certified commercial texture analyzer (Stable Micro Systems, TA.XTplusC model), using a commercial loaf bread as the model food. The tests followed parameters of the AACC standard method 74-09, applying Texture Profile Analysis (TPA) at different storage times and conditions. The results showed that the device achieved reading accuracy comparable to reference instruments, with an error of less than 4%. Trend curves revealed significant deterioration in the textural properties of bread over 10 days, especially when stored unsealed. The prototype proved effective in identifying changes in hardness, elasticity, cohesiveness, and resilience, offering objective support for determining the shelf life of bakery products. The application of this texturometer provides robust data for the food industry and can be extended to other texture-sensitive products.

Keywords: sliced bread; texture analysis; texturometer; use-by period

INTRODUÇÃO

Antes que um produto alimentício possa ser lançado ao mercado, ele deve atender a rigorosos padrões de qualidade definidos tanto por legislações vigentes — como as da ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária) e do MAPA (Ministério da Agricultura e Pecuária) — quanto por exigências internas das próprias indústrias. Para isso, são utilizadas análises sensoriais e/ou instrumentais, que garantem a conformidade e a aceitação do produto no mercado (1).

Dentre os diversos parâmetros avaliados, a medição da vida de prateleira se destaca como um fator essencial para assegurar a estabilidade, segurança alimentar e aceitabilidade dos alimentos ao longo do tempo. A determinação da vida útil está diretamente relacionada à manutenção das características físico-químicas, sensoriais e microbiológicas, sendo crucial para prevenir perdas econômicas, garantir a satisfação do consumidor e atender exigências regulatórias (2, 3).

A vida de prateleira é definida como o período em que um alimento permanece seguro e aceitável para consumo, sob condições específicas de armazenamento. Esse intervalo pode ser afetado por diversos fatores, como a presença de microrganismos deteriorantes ou patogênicos, alterações sensoriais (cor, sabor, textura), reações físico-químicas, perda de valor nutricional e até mesmo contaminantes migrados da embalagem(4). Portanto, a correta medição da vida de prateleira torna-se uma ferramenta estratégica tanto para a segurança alimentar quanto para a competitividade da indústria (5).

Além dos parâmetros microbiológicos e nutricionais, as características sensoriais — como textura, cor, odor e sabor — são determinantes para a aceitação do consumidor. Essas propriedades são frequentemente utilizadas como critérios subjetivos de julgamento, mas vêm sendo cada vez mais quantificadas por meio de instrumentos metrológicos, que conferem maior confiabilidade e repetibilidade às análises (6).

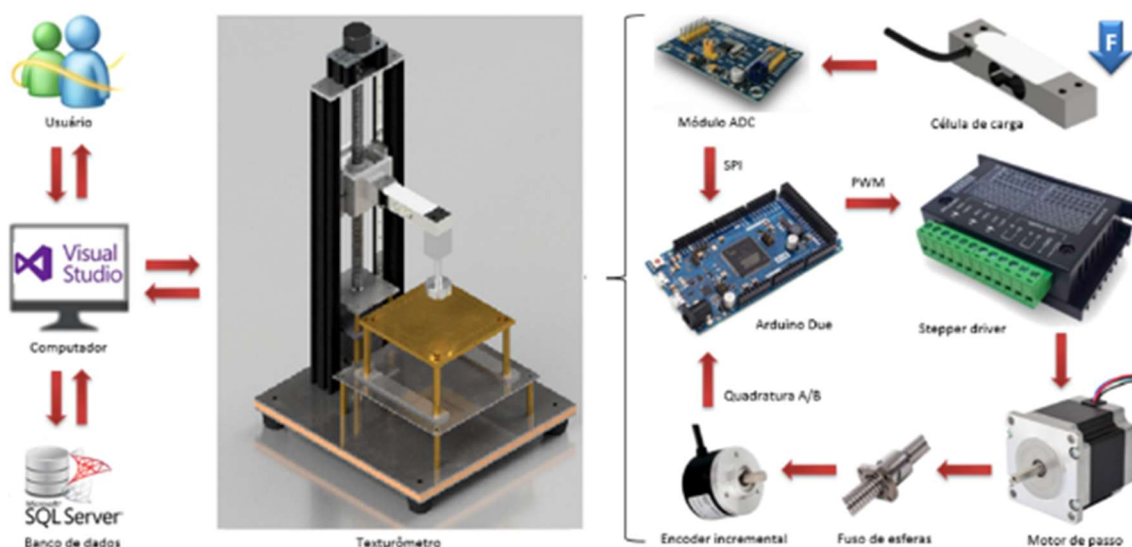
Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um analisador de textura (texturômetro) de baixo custo, capaz de avaliar de forma objetiva a textura de alimentos ao longo de sua vida útil. A proposta visou monitorar alterações físicas em diferentes tempos e condições de armazenamento, oferecendo informações para a determinação da vida de prateleira com base em dados quantitativos. O equipamento foi concebido nas dependências do Centro Educacional da Fundação Salvador Arena (CEFSA), com aplicação inicial nos laboratórios de Engenharia de Alimentos da Faculdade Engenheiro Salvador Arena (FESA). O pão de forma comercial foi selecionado como objeto de estudo, dada sua textura relativamente homogênea em comparação com frutas, carnes e laticínios.

O projeto foi desenvolvido com o objetivo de permitir flexibilidade de ensaios compatível com modelos comerciais, ampliando assim sua aplicabilidade. Além disso, buscou-se garantir facilidade de manutenção tanto de hardware quanto de software, assegurando maior praticidade e eficiência no uso. Outro aspecto considerado foi a limitação do peso do equipamento a, no máximo, 25 kg, em conformidade com as normas de ergonomia. Por fim, foram estabelecidos critérios de desempenho que asseguram precisão e acurácia próximas de 95%, validadas por meio de comparação com equipamento certificado.

MATERIAL E MÉTODOS

De modo geral, o equipamento proposto neste trabalho foi composto por 9 elementos principais, dos quais 7 foram parte do protótipo físico, sendo: Arduino Due, célula de carga do tipo *Single Point*, módulo de conversão Analógico-Digital (ADC) de 24 bits, motor de passo Nema 23, *stepper driver* com ajuste de micropassos, encoder incremental rotativo e fuso de esferas recirculantes. Na Figura 1, é ilustrado seu diagrama funcional, evidenciando os relacionamentos entre componentes e o fluxo de sinais.

Figura 1 – Visão geral sobre o dispositivo e seu funcionamento



Fonte: Autores, 2024

O sistema é iniciado com a parametrização da máquina pelo usuário através de um computador com a solução de software desenvolvida. Em seguida, comandos são enviados ao Arduino via serial para acionar o *stepper driver* e, assim, efetuar os giros no motor, começando a rotina do ensaio. Paralelamente a isso, o microcontrolador passa a registrar o deslocamento da *probe*, usando o encoder; e a força aplicada sobre a amostra de material, por meio da célula de carga que tem sua leitura transformada em dados pelo módulo ADC. Encerrando o fluxo, as

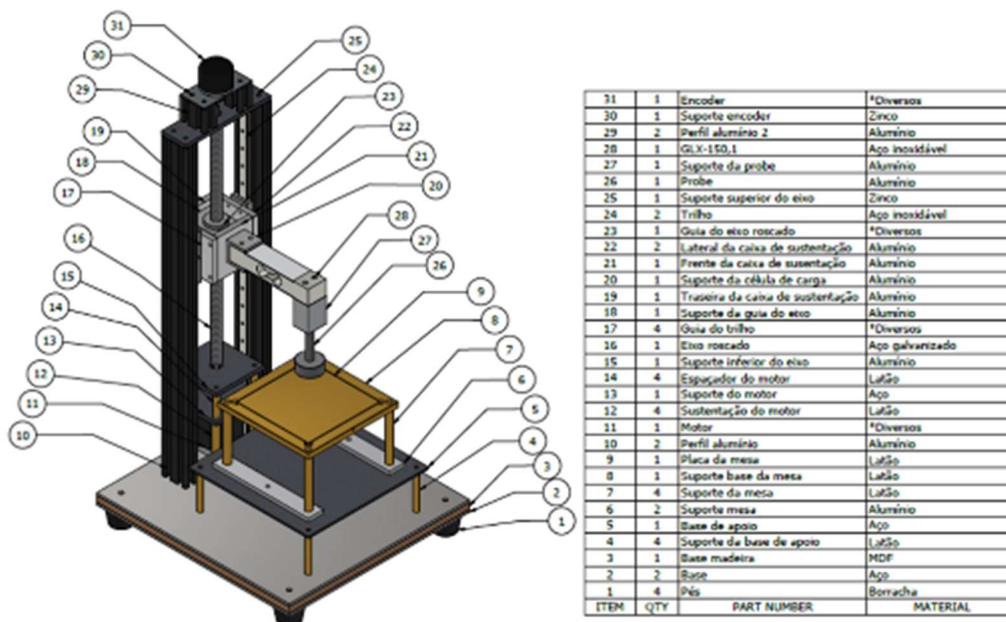
informações coletadas retornam ao software para serem exibidas ao usuário, possibilitando fazer as análises desejadas; assim como serem armazenadas no banco de dados.

Tendo em vista a extensão deste projeto, fez-se necessário dividir o escopo em partes menores, no intuito de melhor gerenciar as atividades que seriam realizadas, definir prioridades e organizar uma cadeia de eventos para sua execução. Nos próximos tópicos, cada uma dessas etapas será mais bem detalhada.

Estrutura mecânica

Baseado no trabalho de Nakazato (7) e visando facilitar os processos de fabricação, montagem e manutenção do equipamento, cada um de seus componentes foi modelado em 3D no software Autodesk Inventor®, o qual possui recursos de CAD/CAM/CAE (Desenho, Manufatura e Engenharia Assistido por Computador). O resultado pode ser visto na Figura 2, onde é apresentado o desenho técnico de montagem do texturômetro. Maiores detalhes do projeto podem ser encontrados no repositório do GitHub (<https://github.com/MattQG13/Texturometro>).

Figura 2 – Vista isométrica do equipamento montado com lista de componentes



Fonte: Autores, 2024

Conforme observado, seu mecanismo de movimentação se resume a uma junta prismática do tipo fuso de esferas, no qual, preso à castanha, há um conjunto mecânico formado pela célula de carga, *probe* cilíndrica e suportes de fixação. Para garantir que não haja desalinhamento, conta com duas guias lineares também de esferas recirculantes fixadas aos perfis de alumínio e paralelas ao eixo. Além disso, a união do motor de passo e do encoder às extremidades do fuso ocorre por

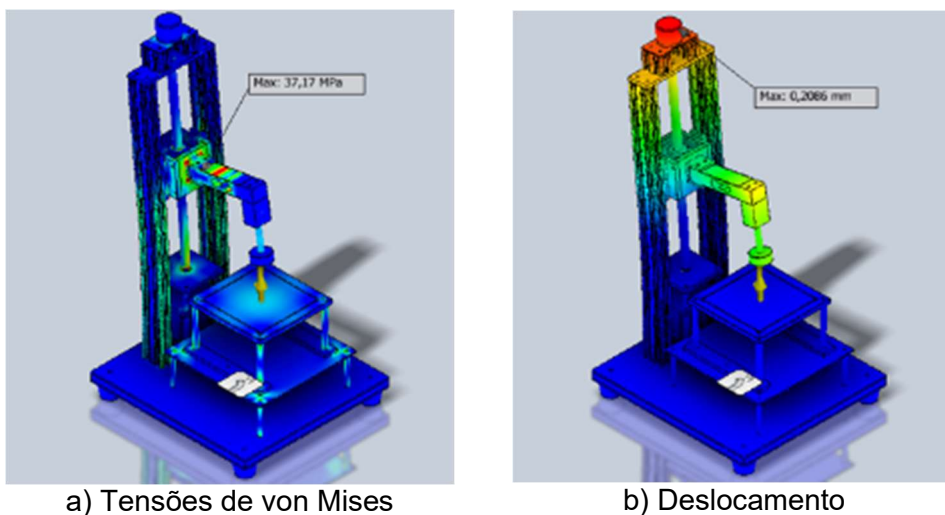
meio de acoplamentos flexíveis de fole, os quais apresentam boa resistência e durabilidade, bem como compensações angulares.

Em relação à sua base, esta foi montada utilizando a “técnica do sanduíche”, na qual uma placa de material fibroso, como madeira, MDF ou compensado; é inserida entre duas chapas de aço para amortecer vibrações do sistema, mas sem perder a rigidez estrutural. O dispositivo eletromecânico também possui uma dupla plataforma, sendo a inferior fixa, reservando um espaço para posicionar os botões e esconder a passagem dos fios; enquanto a superior é removível e com tampa intercambiável, podendo ser trocada por outro tipo a depender do ensaio que se deseja realizar.

Para a fabricação de alguns componentes, foram utilizados recursos cedidos gratuitamente pela Fundação Salvador Arena, como matérias-primas, principalmente tarugos e chapas de alumínio, latão e aço; ferramentas manuais e máquinas operatrizes tanto convencionais quanto a CNC.

Todavia, antes de iniciar todo o processo de usinagem, aproveitou-se dos recursos de simulação do software para validar o projeto e, assim, prevenir potenciais riscos que levariam a sua falha. Deste modo, foi utilizada a Análise de Elementos Finitos (FEA), que é um método que discretiza o material de estudo ao criar uma malha de pontos capaz de replicar o comportamento de suas propriedades físicas, auxiliando na avaliação do protótipo. Na Figura 3, é possível ver parte do relatório gerado pela ferramenta quanto aplicado o esforço mecânico de uma carga de 100 N tanto na *probe* quanto na mesa removível.

Figura 3 – Análise de Elementos Finitos do texturômetro



Fonte: Autores, 2024

Dentre os resultados obtidos com a simulação estática, observa-se que os maiores efeitos se deram na fixação da célula de carga ao fuso, atingindo uma tensão de Von Mises de 37,17 MPa; além de causar uma deformação de quase 0,21 mm no topo da estrutura.

Validado o projeto através das simulações, partiu-se para as etapas de fabricação e montagem, resultando na versão final do equipamento conforme Figura 4, que apresentou uma massa de 23,89 kg.

Figura 4 – Texturômetro montado



Fonte: Autores, 2024.

Circuito elétrico

A parte elétrica do projeto foi desenvolvida no software Proteus Design Suite® com o módulo ISIS, no intuito de esquematizar as ligações entre os controladores (placa Arduino e *stepper driver*), atuadores (motor de passo, botões e chaves fim de curso) e sensores (célula de carga e encoder); bem como verificar a programação inserida no microcontrolador, simulando as interações entre os componentes do circuito. O arquivo final com o diagrama elétrico pode ser visto no repositório previamente citado no tópico de Estrutura mecânica.

Já na montagem física do protótipo, utilizou-se um motor de passo do modelo SM1.8-D12-MN, da Action Technology, que é do tipo Nema 23 com 200 passos/volta ($1,8^\circ/\text{passo}$), 4 bobinas e 8 fios; sendo ligado na configuração bipolar série. É válido mencionar que este motor foi descontinuado pelo fabricante, o que dificultou um pouco a localização de seu *datasheet* e fez necessário testar alguns parâmetros para confirmar as informações presentes no documento.

Com relação ao *stepper driver*, implementou-se um *microstep driver* TB6600, o qual proporciona uma movimentação mais suave ao motor, permitindo ampliar sua resolução de giro até 6400 passos/volta ($0,05625^\circ/\text{passo}$); além de possuir uma corrente de saída ajustável entre 0,5 A e 3,5 A. Para este projeto, a configuração das chaves no driver foi definida para uma relação de 3200 passos/volta ($0,1125^\circ/\text{passo}$) e uma corrente de 1 A.

Quanto às chaves fim de curso, estas foram posicionadas na parte de trás do equipamento em um dos perfis de alumínio, e sendo eletricamente ligadas em configuração *pull-up* com a placa Arduino para que a queda de tensão sinalize o seu acionamento sempre que forem atingidas as alturas de segurança pelo conjunto mecânico.

Por fim, também foram usados dois botões pulsadores, para realizar as ações de JOG (movimento manual); um botão cogumelo, para acionar o modo de Emergência da máquina; e uma chave seletora de 2 posições, para ligar e desligar da rede tanto a fonte chaveada de 12 V e 10 A quanto um sinalizador LED.

Processo de medição

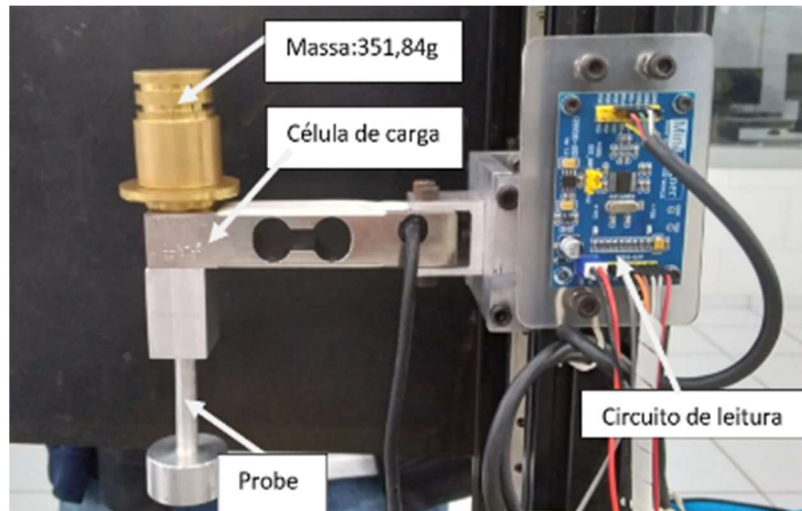
Segundo Kamble, Shinde e Kittur (8), as células de carga são instrumentos projetados de modo que a força atuante em seus corpos seja medida ao longo do seu eixo principal e que não seja afetada por forças em outros eixos. Além disso, a escolha do seu formato depende de alguns fatores, como limitação de tamanho, faixa de medição, performance e custos.

Para validar a prova de conceito, foi utilizada uma célula de carga do modelo GLX15, a qual é de 6 fios para 15 kg e com corpo feito em aço inoxidável; junto a um módulo ADC do modelo CS5530, o qual é de 24 bits e possui uma vasta seleção de taxas de amostragem. A leitura da tensão diferencial nas saídas da ponte de Wheatstone foi configurada em 100 Hz, sendo os dados transmitidos via comunicação SPI entre o módulo ADC e o Arduino Due. Este aplica o método de Média Móvel Aritmética para fazer a filtragem do sinal e, por fim, envia tanto os sinais com quanto sem filtro para o computador através da conexão USB.

A fim de garantir estabilidade durante o ajuste da escala de medição, prendeu-se a célula de carga ao equipamento e, logo após iniciar o Arduino, fez-se tanto a leitura quanto a média de 100 valores para estabelecer a tara do sistema próxima ao zero. Com o uso de uma massa de 351,84 g previamente pesada em uma balança de precisão com 0,01 g de resolução, foi interpolada uma média de 100 valores com o da massa para calibrar sua leitura. A realização desse procedimento é mostrada na Figura 5.

Em seguida, foi removida a massa do ponto de medição da célula de carga e realizada nova leitura do sinal pelo Arduino, restabelecendo-se o valor de tara e dando início tanto à leitura quanto ao envio contínuo dos valores através de comunicação serial. Dessa forma, é adquirido o valor digital da carga e já fazendo sua conversão para gramas de acordo com a escala de calibração.

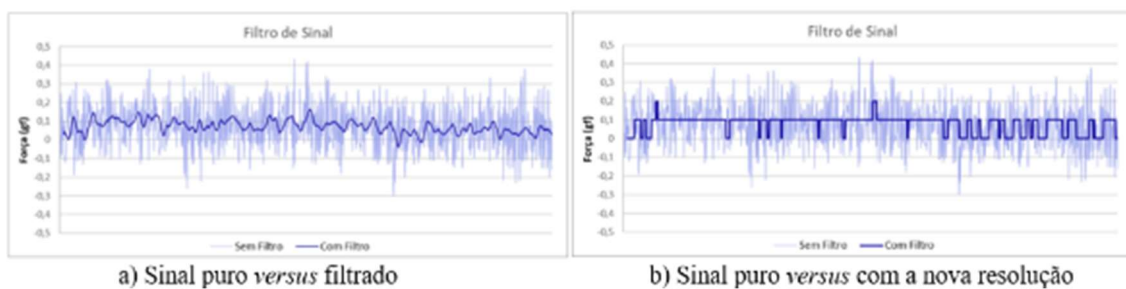
Figura 5 – Ajuste de escala da célula de carga



Fonte: Autores, 2024

Quando analisado um conjunto com cerca de 1000 amostras, foi levantado um desvio padrão de 0,116514 g nos dados sem qualquer tipo de filtro digital. Já fazendo o tratamento deste mesmo sinal ao se aplicar um filtro duplo de média móvel com 8 valores cada, foi possível alcançar um novo desvio padrão de 0,03374 g, representando uma melhoria de 71,04% em comparação ao sinal puro. Com base nisso, utilizou-se um valor de confiança de 99,7% (3σ) para definir uma resolução de 0,1 g para a leitura da célula de carga. Na Figura 6, é possível observar graficamente o contraste entre os sinais puro, filtrado (6a) e com a resolução definida (6b).

Figura 6 – Comparativo entre leitura do sinal com e sem aplicação de filtro digital



Fonte: Autores, 2024

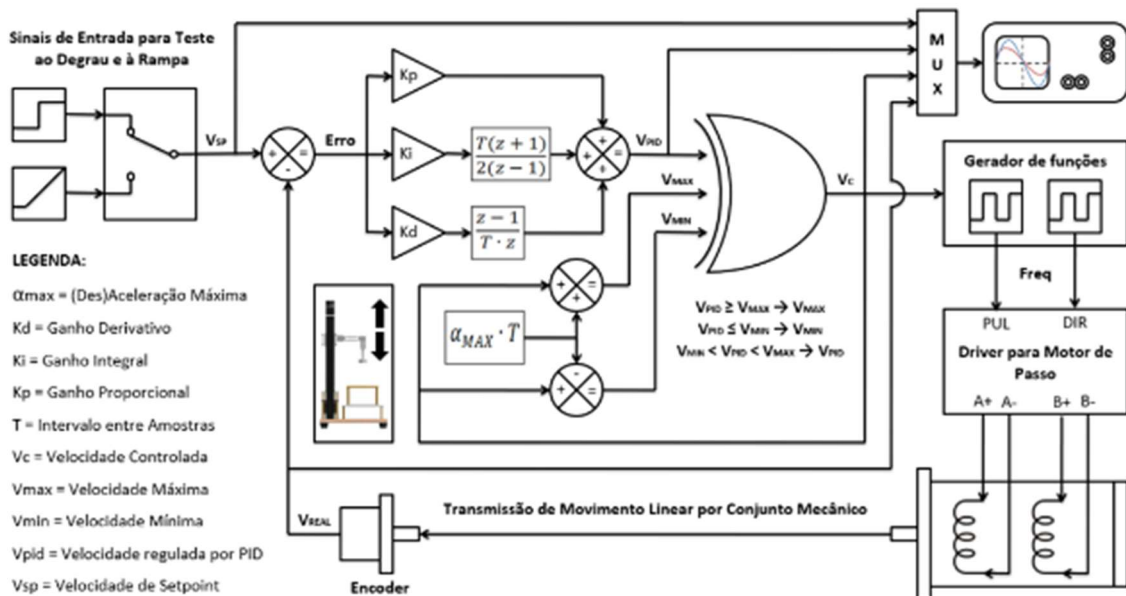
A programação tanto para ajuste da escala de medição quanto para aplicação dos filtros digitais foi escrita em linguagem C++ e pode ser encontrada no repositório apresentado no tópico de Estrutura mecânica.

Controle do sistema

Tendo em vista que o texturômetro só possui 1 grau de liberdade em movimento vertical e que é importante garantir uma velocidade constante na maior parte do tempo durante a realização dos ensaios, o uso de uma malha fechada de controle SISO (traduzido do inglês, Uma Entrada, Uma Saída) se torna fortemente recomendado mesmo que se tratando de um motor de passo acoplado a um fuso de esferas, pois existem perturbações intrínsecas no sistema que causam propagação de erro, como folgas e desalinhamentos.

Seguindo as considerações feitas por Cardozo (9), é possível adaptar a lógica empregada para atender as exigências do projeto, redesenhando a malha de controle assim como mostrada na Figura 7.

Figura 7 – Proposta de malha de controle para o mecanismo de deslocamento linear com motor de passo

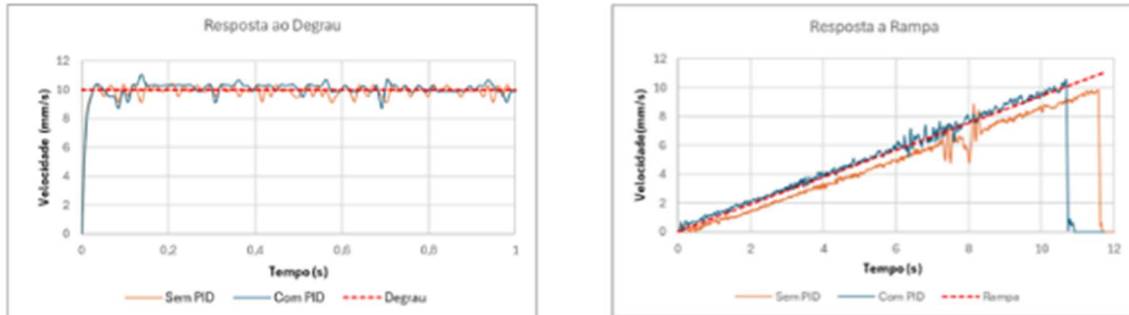


Fonte: Autores, 2024

Desse modo, foi implementado em linguagem C++ no microcontrolador da placa Arduino, um controlador discreto do tipo PID (Proporcional-Integral-Derivativo), cujo *feedback* seria dado através de um encoder incremental rotativo de 600 PPR (pulsos por rotação) acoplado ao fuso na extremidade oposta à do motor. Utilizando a configuração de leitura para sinal de quadratura A/B, foi possível alcançar uma resolução de 1200 PPR com o mesmo encoder. Além disso, também foi feito o ajuste quanto ao passo da rosca para 5,08 mm ao invés de 5 mm na programação, a qual também foi disponibilizada no repositório apresentado no tópico de Estrutura mecânica.

Os valores de ganho do controlador do foram adquiridos de forma empírica, através da observação da curva de resposta de velocidade. Na Figura 8, é demonstrado o comparativo de curva com e sem a aplicação do PID para ambos os sinais de teste.

Figura 8 – Gráficos de resposta da velocidade



Fonte: Autores, 2024

Após a aplicação do PID, houve uma melhora na estabilidade da velocidade na resposta ao degrau de 13,4%. Já na resposta a rampa, nota-se que houve uma diminuição do erro estacionário, e uma maior estabilidade quando a máquina atingiu seus valores de ressonância.

Supervisão e IHM

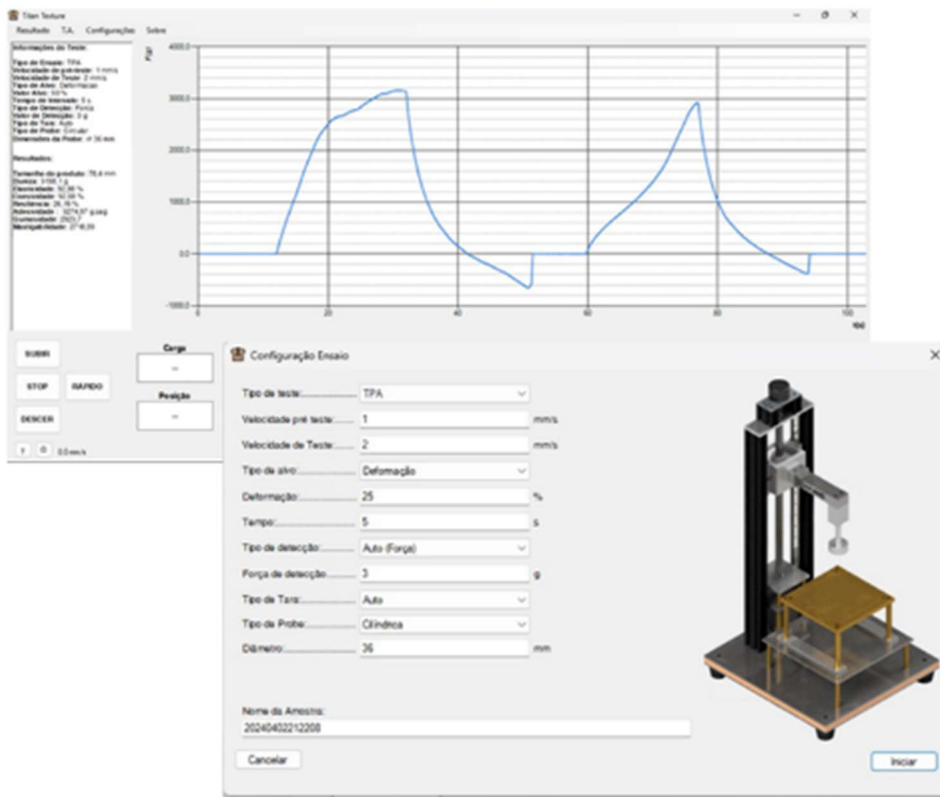
O software de supervisão foi elaborado em linguagem C#, utilizando a biblioteca Windows Forms da plataforma .NET versão 4.7.3 através do Microsoft Visual Studio®. Sua estruturação foi baseada no conceito de objetos e classes, sendo criado um elemento de classe para cada elemento do texturômetro, como corpo de prova, dados do ensaio, célula de carga, motor, encoder, além dos elementos internos de apoio, como o gerenciador dos dados seriais. A criação dos objetos das classes estabelece a interrelação entre eles.

As classes foram desenvolvidas integradas com o conceito de programação orientada a eventos, onde os eventos são disparados conforme ações do usuário ou do sistema que desencadeiam funções específicas para cada tipo. Eventos personalizados foram criados para atender as necessidades do projeto, tais como a mudança dos valores dos sensores, detecção de carga, alteração de velocidade, chegada de informação de algum sensor específico, entre outros.

Com relação à interação entre o usuário e a solução, foi elaborada uma Interface Homem-Máquina (IHM) de layout simples, o qual foi baseado em softwares comerciais. A aplicação desenvolvida possui 7 telas para navegar ao todo, abrangendo desde a configuração da porta de comunicação com o Arduino até a visualização dos dados. Na Figura 9, são mostradas a tela principal, onde é possível monitorar de forma síncrona o andamento do ensaio; e a tela de

configuração do ensaio, onde se parametrizam as variáveis do teste como, por exemplo, o tipo que se deseja realizar (tração, compressão e TPA).

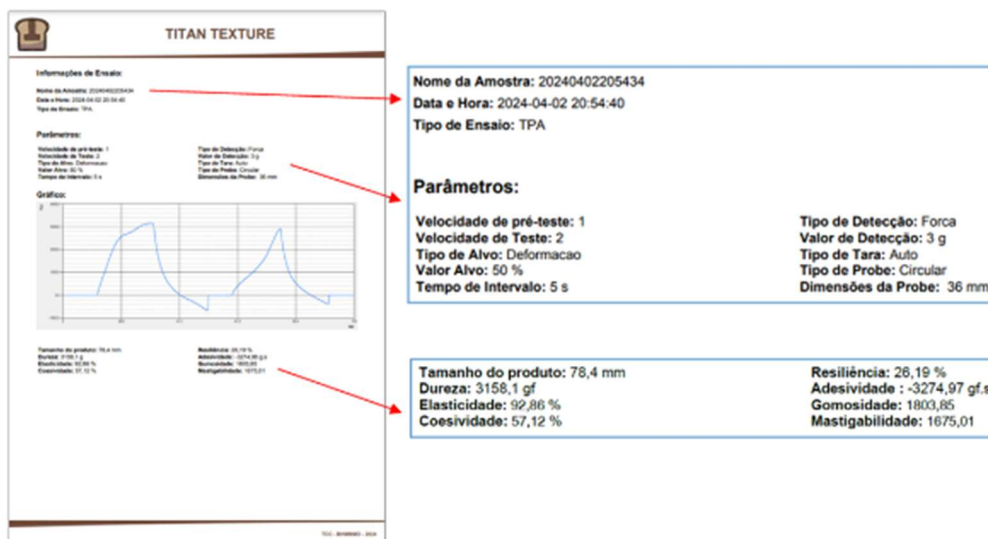
Figura 9 – Interfaces gráficas do software Titan Texture



Fonte: Autores, 2024

Além disso, também conta com o recurso de exportar os dados gerados nos formatos CSV, XLSX (Planilha Excel®) e PDF, sendo o relatório do último mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Relatório PDF gerado ao final do ensaio



Fonte: Autores, 2024

mesa da máquina diretamente abaixo da *probe* de compressão de 36 mm de diâmetro, conforme mostra a Figura 11a; e foi realizado um ensaio de TPA, o qual resultou na curva ilustrada na Figura 11b. O procedimento permitiu a observação do comportamento do corpo sob compressão, bem como sua recuperação elástica, uma vez que se trata de um elastômero.

Figura 11 – Ensaio do bloco de silicone



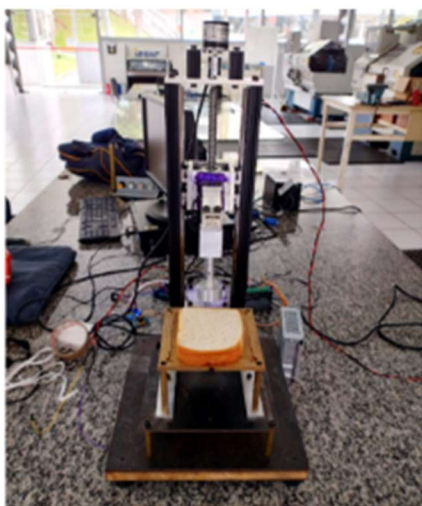
Fonte: Autores, 2024

Posteriormente foram realizados outros testes práticos para verificar as variações da curva gerada, utilizando corpos de prova como, por exemplo, mola, fita adesiva, pão francês, bolo recheado, carne de hambúrguer e geleia.

Comparativo com dispositivo calibrado

Para garantir uma boa acuracidade no dispositivo, foram conduzidos ensaios de Análise de Perfil de Textura (*Texture profile Analysis* - TPA) com fatias de pães de forma adquiridas no mercado local, a fim de se comparar os resultados com os dados obtidos em testes no Instituto Mauá de Tecnologia (IMT), conforme mostra a Figura 12. No IMT, foi utilizado um texturômetro comercial modelo TA.XTplusC calibrado (Stable Micro Systems, Reino Unido), sendo ensaiadas duas amostras de pão de forma tradicional (branco) da marca PANCO (modelo pão de forma premium) e uma de pão integral da marca Wickbold (38% integral).

Figura 12 – Ensaio com pães de forma



a) Ensaios na FESA



b) Ensaios no IMT

Fonte: Autores, 2024

O ensaio de TPA foi conduzido em ambas as instituições ao longo de três dias consecutivos, no mesmo horário e nas mesmas condições, sendo as amostras de pães armazenadas em armário a temperatura de 25 °C durante todo o período de estudo. Os dados foram analisados e revelaram alterações significativas nos parâmetros, conforme mostra a Tabela 1. Aumentos de dureza, elasticidade, resiliência e gomosidade foram observados em todos os testes comparativos realizados. Estes resultados mostram uma influência significativa de determinados parâmetros nas características texturais dos pães estudados, fornecendo informações importantes para melhorar a qualidade destes produtos.

Tabela 1 – Dados obtidos durante os ensaios com pão de forma

Pão Branco	Dureza (g)	Elasticidade (%)	Coesividade (%)	Resiliência (%)	Adesividade (g.sec)	Gomosidade	Mastigabilidade
Amostra 1 ^a	499,6	89,71%	68,06%	31,81%	0,00	340,04	305,05
Amostra 2 ^b	339,1	87,02%	71,72%	28,39%	0,00	286,25	249,09
Amostra 3 ^c	380,5	95,20%	71,10%	26,00%	0,00	270,66	257,51
Amostra 4 ^c	389,9	97,90%	77,80%	29,30%	-0,10	303,42	297,05
Amostra 5 ^d	500,7	91,03%	74,89%	40,69%	0,00	374,95	341,32
Amostra 6 ^d	531,9	89,45%	72,00%	38,30%	-0,21	382,98	342,58
Amostra 7 ^d	538,8	91,28%	79,60%	49,80%	0,00	425,72	388,60
Amostra 8 ^e	903,4	86,19%	78,15%	46,92%	0,00	706,01	608,51
Pão Integral							
Amostra 1 ^c	407,9	97,50%	75,60%	27,20%	-0,36	308,33	300,58
Amostra 2 ^d	659,2	91,28%	74,52%	44,57%	0,00	491,23	448,39
Amostra 3 ^d	1261,6	90,47%	73,44%	46,35%	-0,99	926,55	838,25
Amostra 4 ^e	1155,7	89,54%	73,16%	40,06%	-0,25	845,47	757,03

(^a) Ensaio realizado na FESA com velocidade de 5 mm/s e 50% de compressão (dia 1)

(^b) Ensaio realizado na FESA com velocidade de 1 mm/s e 50% de compressão (dia 1)

(^c) Ensaios realizados no IMT seguindo o método-padrão 74-09 da AACCC (dia 1)

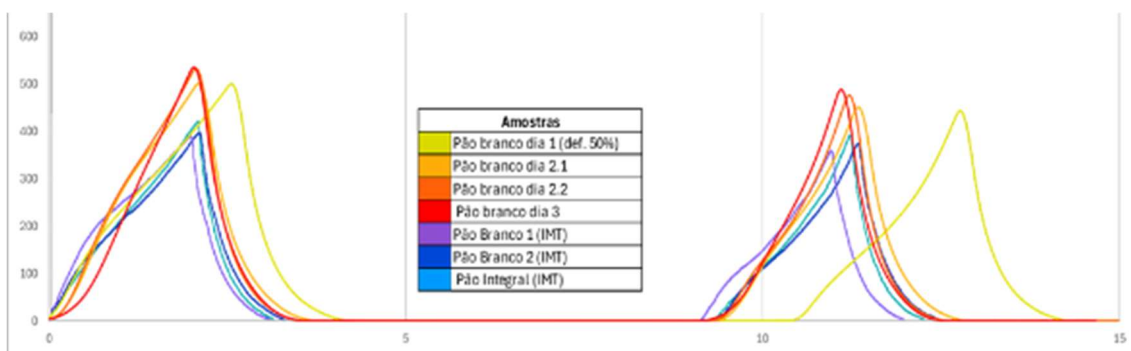
(^d) Ensaios realizados na FESA com os mesmos parâmetros do IMT (dias 2 e 3)

(^e) Ensaios realizados na FESA igual ao item (d), mas com a primeira e a última fatia do filão de pão (dia 3)

Fonte: Autores, 2024

Para uma análise comparativa mais detalhada com as curvas geradas no IMT, foram selecionados especificamente os gráficos das amostras de pão tradicional do tipo D. Ao sobrepor esses gráficos, é possível observar as semelhanças em suas características na Figura 13. Notavelmente, os picos da primeira compressão em nossos ensaios apresentaram resultados ligeiramente superiores aos picos observados na primeira compressão do IMT.

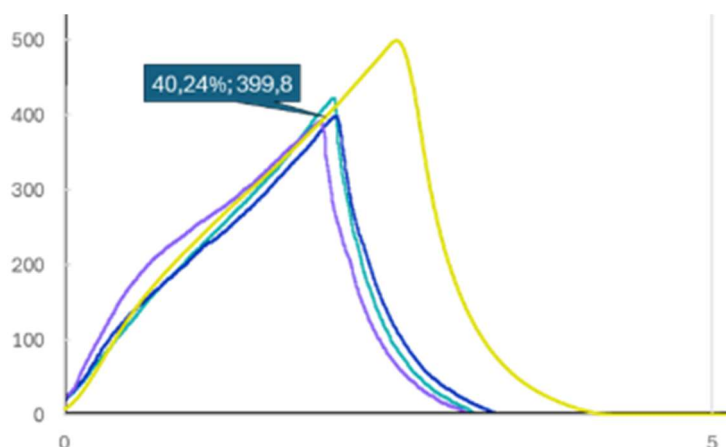
Figura 13 - Gráficos de curvas sobrepostas.



Fonte: Autores, 2024

Contudo, em análise comparativa feita no pão tradicional ensaiado no primeiro dia com taxa de deformação de 50%, a amostra alcançou um valor de 399,8 g ao ser atingido o valor de deformação de 40%, próximo a média dos valores obtidos no IMT (385,2 g), atingindo um erro de aproximadamente 3,8%, como mostrado na Figura 14. Isso indica que a diferença encontrada nos demais dias vêm pela degradação do próprio grupo de amostras.

Figura 14 – Gráfico comparativo de deformação

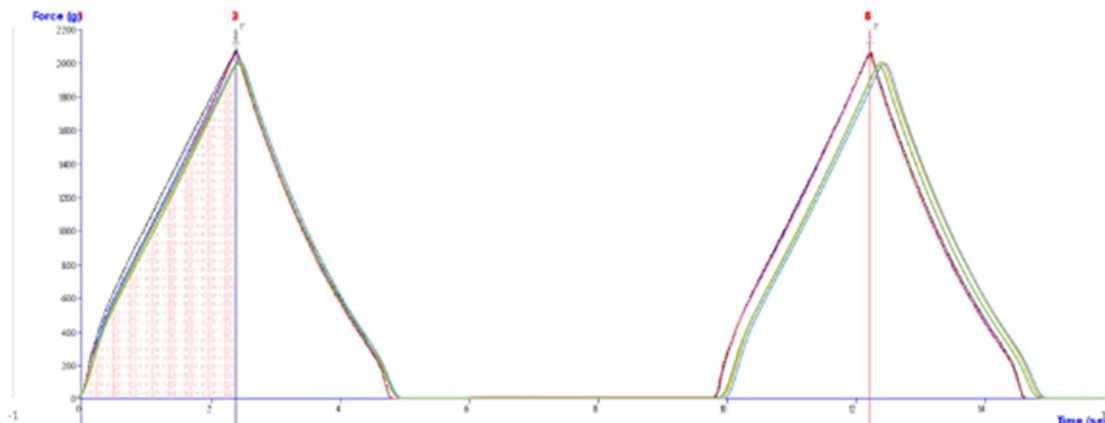


Fonte: Autores, 2024

Também como prova comparativa, foram realizados ensaios em ambos os instrumentos com uma esponja de melamina, que é um corpo de prova mais padronizado, onde foi adquirido sua curva

e valores de pico, podendo-se observar uma pequena variação temporal e do valor de pico proveniente da aplicação do filtro de média móvel, assim como mostra a Figura 15.

Figura 15 – Gráficos sobrepostos

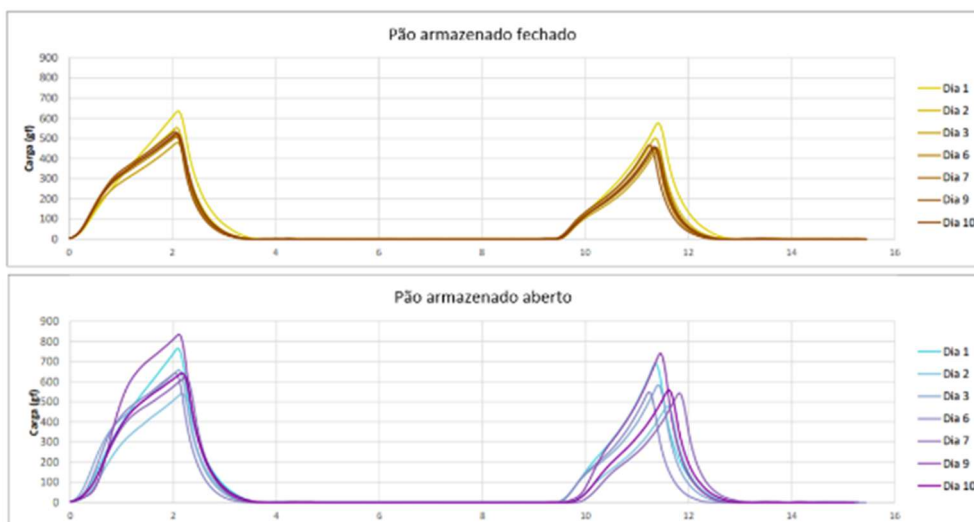


Fonte: Autores, 2024

Identificação de tendências sobre os pães ao longo dos ensaios

Visando proporcionar uma análise mais abrangente e fundamentada dos resultados obtidos e contribuindo para uma melhor compreensão dos fenômenos investigados no âmbito deste estudo, foi realizada uma sequência de ensaios durante um período de 10 dias corridos em dois conjuntos de amostras de pão tradicional sobre duas diferentes condições de armazenamento. Um dos sacos foi selado com o amarrilho original da embalagem, enquanto o outro permaneceu em armazenagem incorreta, estando aberto. É possível observar os efeitos adversos das duas formas de armazenamento na Figura 16.

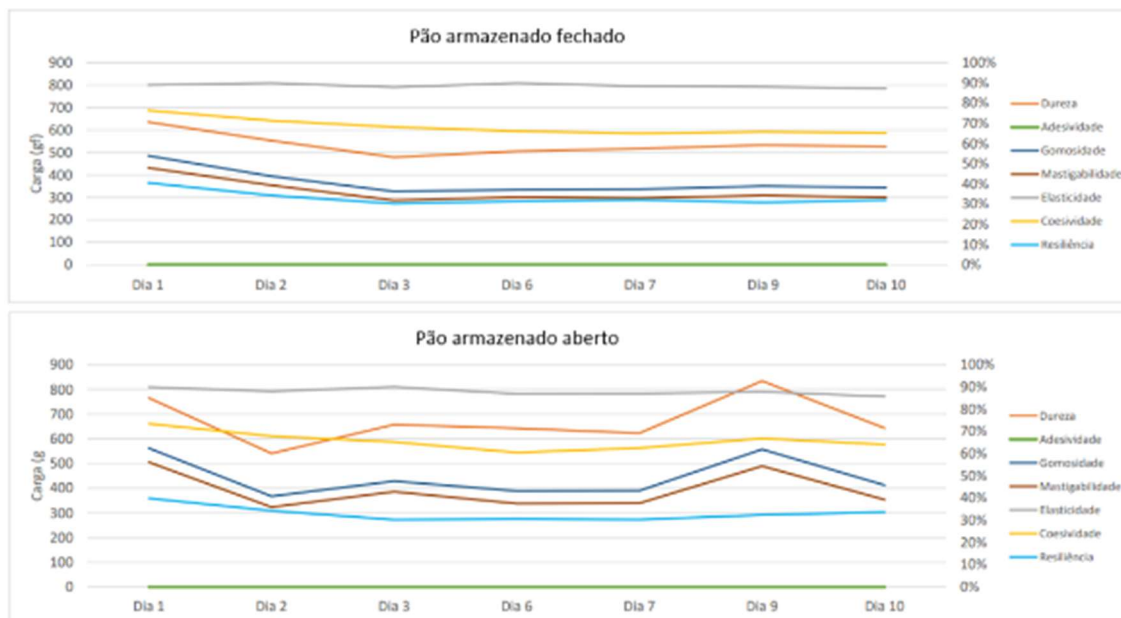
Figura 16 – Gráficos de sobreposição dos dias



Fonte: Autores, 2024

Para uma melhor visualização e compreensão dos dados apresentados, há também um gráfico de tendência das principais características do ensaio de TPA dos dois grupos de amostras na Figura 17.

Figura 17 – Gráficos de tendências.



Fonte: Autores, 2024

Ao analisar os gráficos, percebe-se que os pães apresentam alterações nas características e propriedades ao longo do tempo, com ambos os grupos apresentando significativas mudanças durante o primeiro dia de avaliação. Contudo, é notável a diferença de estabilidade entre as amostras conforme cada forma de armazenamento, onde o pacote de pão que ficou aberto, que ficou exposto ao ambiente, apresenta uma variação muito maior que o pacote que foi fechado conforme padrão de embalagem original. Vale ressaltar que em determinada fase do processo do armazenamento da embalagem fechada observa-se uma tendência à diminuição contínua dessas estruturas, o que indica a fragilidade do produto.

Estas descobertas destacam a importância de compreender a dinâmica das mudanças estruturais do pão durante o armazenamento. Tal compreensão é importante não apenas para melhorar os processos de fabricação, mas também para garantir a qualidade e a satisfação do cliente. Esses resultados podem orientar estratégias de fabricação e armazenamento visando manter as propriedades desejadas do produto ao longo de sua vida útil.

CONCLUSÕES

O presente estudo demonstrou a viabilidade técnica e econômica do desenvolvimento de um texturômetro de baixo custo como ferramenta para monitoramento da vida de prateleira de

alimentos. O equipamento apresentou resultados compatíveis com texturômetros comerciais, validando sua precisão e reprodutibilidade por meio da análise de pães de forma em diferentes tempos e condições de armazenamento. As variações nos parâmetros texturais — especialmente dureza, elasticidade e gomosidade — evidenciaram a degradação progressiva do produto, reforçando a importância do controle da embalagem para manutenção da qualidade sensorial. Dessa forma, o protótipo se mostrou eficaz para aplicações acadêmicas e industriais, contribuindo para o controle da qualidade e a determinação da vida útil de produtos panificados. Como perspectivas futuras, recomenda-se a expansão da metodologia para outros alimentos e a integração com sistemas de análise automatizada de dados, ampliando o escopo de uso da tecnologia proposta.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às professoras Dr^a. Lilian de Cassia Santos Victorino e Dr^a. Tatiana Guinoza Matuda Masaoka do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT), pelo auxílio e disponibilidade na realização das análises de textura no IMT.

REFERÊNCIAS

- (1) CHEN, L.; OPARA, U. L. **Texture measurement approaches in fresh and processed foods: a review**. Food Research International, [s. l.] v. 51, n. 2, p. 823-835, maio 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963996913000732>. Acesso em: 21 maio 2024.
- (2) OBARA, T. R. A. **Qualidade na indústria de alimentos: contexto atual e oportunidades**. 2018. 25f. Monografia (Especialista em Engenharia da Qualidade) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2018. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/23214>. Acesso em: 15 set. 2023.
- (3) QUEIROZ, A. M. P. de. **Efeitos do tripolifosfato de sódio sobre as características microbiológicas, físico-químicas e vida-de-prateleira em linguiça frescal de frango**. 2006. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Veterinárias) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/6758>. Acesso em 21 maio 2024.
- (4) MARTINS, G. A. de S. **Determinação da vida-de-prateleira por testes acelerados de doce em massa de banana cv. Prata**. 2009. 103f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/2991>. Acesso em: 21 maio 2024.
- (5) GIMÉNEZ, A.; ARES, F.; ARES, G. **Sensory shelf-life estimation: a review of current methodological approaches**. Food Research International, [s. l.], v. 49, n. 1, p. 311-325, nov. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963996912002517>. Acesso em: 21 maio 2024.
- (6) FREITAS, M. A.; COSTA, J. C. **Shelf life determination using sensory evaluation scores: A general Weibull modeling approach**. Computers And Industrial Engineering, Belo Horizonte, v. 51, p.652-670, maio 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835206000520>. Acesso em: 21 maio 2024.

- (7) NAKAZATO, A. Z. **Desenvolvimento de máquina universal de ensaios mecânicos portátil de baixo custo para fins didáticos utilizando o conceito *open-source***. 2019. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Guaratinguetá, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/2c730638-8585-4500-a979-f36994b1edbb>. Acesso em: 21 maio 2024.
- (8) KAMBLE, V. A.; SHINDE, V. D.; KITTUR, J. K. **Overview of Load Cells**. Journal of Mechanical and Mechanics Engineering, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 22-29, nov. 2020. Disponível em: <https://matjournals.co.in/index.php/JOMME/article/view/2739>. Acesso em: 21 maio 2024.
- (9) CARDOZO, W. S. **Controle de motores de passo aplicado a um manipulador robótico**. 2012. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=20783@1>. Acesso em: 21 maio 2024.
- (10) CEREAL & GRAINS ASSOCIATION. **AACC Method 74-09: measurement of bread firmness by universal testing machine**. The Association: St. Paul, MN, 1999, 4 p.