

**DESENVOLVIMENTO E
VALIDAÇÃO DE UMA
PLATAFORMA
OPENSOURCE DE BAIXO
CUSTO PARA
CARACTERIZAÇÃO
MECÂNICA DA
MUCOADESÃO**

**DEVELOPMENT AND VALIDATION OF A LOW-COST OPEN-SOURCE
PLATFORM FOR THE MECHANICAL CHARACTERIZATION OF
MUCOADHESION**

Engenharias, Ciências da Saúde • 21/08/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/787273634](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/787273634)

Gabriel Vilela Vardiero
Luciana Cláudia Diniz Tavares
Bernardo Dornella Pereira
Raphael Fortes Marcomini
Ana Carolina Moraes Apolônio

RESUMO

A caracterização mecânica da mucoadesão depende de sistemas instrumentais capazes de controlar o deslocamento e medir forças de destacamento com estabilidade e reprodutibilidade. Entretanto, o acesso a equipamentos comerciais pode ser limitado pelo custo e pela arquitetura proprietária. Este estudo teve como objetivo desenvolver e validar uma plataforma *open-source* de baixo custo para ensaios mecânicos de destacamento aplicados à caracterização da mucoadesão. A plataforma integrou um sistema de movimentação linear baseado em motor de passo, uma célula de carga de 100 gf, módulo de aquisição HX711 e microcontrolador Arduino Mega 2560. A cadeia de força foi calibrada em 11 pontos entre 0 e 75 gf, apresentando elevada linearidade ($R^2 = 0,9998$). O sinal obtido com a sonda livre apresentou desvio-padrão de 0,004 gf e limite de detecção estimado em 0,012 gf. A validação cinemática identificou inicialmente uma velocidade efetiva de 3,82 mm/s para uma velocidade programada de 4,0 mm/s, sendo posteriormente corrigida por compensação do tempo de processamento no firmware. A validação funcional foi realizada com glicerina, mel e cola branca à base de poli(acetato de vinila), avaliando força máxima de destacamento e trabalho de adesão. Para a glicerina, a força máxima aumentou com a velocidade de separação, apresentando comportamento consistente com a dependência prevista pelo modelo de Stefan e reprodutibilidade entre dois experimentos independentes. Os ensaios com mel e PVA demonstraram diferentes magnitudes e perfis de força–deslocamento, com coeficientes de variação de 3,9% e 9,3% para a força máxima, respectivamente. Os resultados demonstram que a plataforma apresenta desempenho instrumental e funcional adequado para os ensaios avaliados, combinando baixo custo, arquitetura aberta e possibilidade de adaptação dos parâmetros de controle e aquisição.

A plataforma constitui, assim, uma alternativa acessível e modificável para estudos de caracterização mecânica da mucoadesão, embora sua aplicação a tecidos biológicos e formulações mucoadesivas reais ainda exija validação adicional.

Palavras-chave: mucoadesão; ensaios de destacamento; instrumentação de baixo custo; open-source; validação instrumental; caracterização mecânica.

ABSTRACT

The mechanical characterization of mucoadhesion relies on instrumental systems capable of controlling displacement and measuring detachment forces with stability and reproducibility. However, access to commercial equipment can be limited by cost and proprietary architecture. This study aimed to develop and validate a low-cost, open-source platform for mechanical detachment tests applied to mucoadhesion characterization. The platform integrated a stepper motor-based linear motion system, a 100 gf load cell, an HX711 data acquisition module, and an Arduino Mega 2560 microcontroller. The force measurement chain was calibrated at 11 points between 0 and 75 gf, exhibiting high linearity ($R^2 = 0.9998$). The signal obtained with the probe moving freely showed a standard deviation of 0.004 gf and an estimated detection limit of 0.012 gf. Kinematic validation initially identified an effective speed of 3.82 mm/s for a programmed speed of 4.0 mm/s; this was subsequently corrected by compensating for processing time within the firmware. Functional validation was performed using glycerin, honey, and poly(vinyl acetate)-based white glue, evaluating maximum detachment force and work of adhesion. For glycerin, the maximum force increased with separation speed, displaying behavior consistent with the dependency predicted by the Stefan model and showing reproducibility across two independent

experiments. Tests with honey and PVA demonstrated different force-displacement magnitudes and profiles, with coefficients of variation of 3.9% and 9.3% for maximum force, respectively. The results demonstrate that the platform exhibits instrumental and functional performance suitable for the evaluated tests, combining low cost, open architecture, and the flexibility to adapt control and data acquisition parameters. The platform thus constitutes an accessible and modifiable alternative for studies on the mechanical characterization of mucoadhesion, although its application to biological tissues and actual mucoadhesive formulations still requires further validation.

Keywords: mucoadhesion; detachment tests; low-cost instrumentation; open-source; instrumental validation; mechanical characterization.

1. INTRODUÇÃO

A mucoadesão refere-se à interação adesiva entre um material e uma superfície biológica revestida por muco e constitui uma propriedade de interesse no desenvolvimento de sistemas de liberação de fármacos e biomateriais destinados à administração em superfícies mucosas (Smart, 2005; Bayer, 2022). A permanência prolongada no local de aplicação pode favorecer a retenção do agente terapêutico e a administração localizada, tornando a caracterização da mucoadesão relevante para a avaliação do desempenho desses sistemas (Bayer, 2022; Jawadi *et al.*, 2022). Nesse contexto, métodos experimentais capazes de quantificar a interação entre materiais e superfícies mucosas são importantes para caracterizar e comparar diferentes formulações e biomateriais (Amorós-Galicia *et al.*, 2022).

Entre os métodos empregados para essa caracterização, os ensaios mecânicos de destacamento permitem determinar parâmetros como a força máxima de destacamento (F_{max}) e o trabalho de adesão (W_{ad}), obtidos a partir das curvas de força em função do deslocamento (Amorós-Galicia *et al.*, 2022). Esses parâmetros fornecem informações complementares sobre a resistência da interface adesiva e sobre a energia associada ao processo de separação (Alaei *et al.*, 2021). Entretanto, a confiabilidade dessas medidas depende do controle adequado das condições experimentais, incluindo força aplicada, velocidade de separação, deslocamento e aquisição dos sinais mecânicos (Müller *et al.*, 2022).

Analísadores de textura e outros sistemas instrumentais são amplamente empregados para a realização desses ensaios. Entretanto, o acesso a equipamentos específicos pode ser limitado pelo custo de aquisição, pela disponibilidade de infraestrutura e pela dependência de sistemas comerciais com arquitetura fechada (Tavares *et al.*, 2026). Essa limitação pode restringir a adaptação de protocolos experimentais, a incorporação de diferentes configurações de ensaio e a investigação de novos substratos e condições experimentais, particularmente em grupos de pesquisa com infraestrutura instrumental limitada (Müller *et al.*, 2022; Tavares *et al.*, 2026).

Nesse contexto, plataformas instrumentais construídas a partir de componentes comerciais de ampla disponibilidade, associadas a arquitetura aberta e modular, podem representar uma estratégia para ampliar o acesso à caracterização mecânica da mucoadesão (Wenzel, 2023; Bowman, 2023). A utilização de componentes de baixo custo, entretanto, não garante por si só a adequação do sistema para aplicações científicas. Para que uma plataforma

instrumental seja empregada na pesquisa, é necessário demonstrar a confiabilidade de sua cadeia de medição, incluindo o desempenho do sistema de força, a precisão do deslocamento, a estabilidade do sinal, a repetibilidade das medições e a capacidade de reproduzir respostas fisicamente consistentes (Bowman, 2023).

A validação de sistemas experimentais dessa natureza deve, portanto, ultrapassar a demonstração de funcionamento mecânico e considerar diferentes níveis de desempenho. A caracterização instrumental permite verificar a resposta da cadeia de medição e suas limitações; a validação cinemática permite avaliar a correspondência entre o movimento programado e o movimento efetivamente realizado; e a validação funcional permite verificar se o sistema produz respostas coerentes com fenômenos físicos conhecidos. Essa abordagem é particularmente relevante em ensaios de destacamento, nos quais parâmetros como velocidade de separação e deslocamento influenciam diretamente a resposta medida.

Dessa forma, este estudo teve como objetivo desenvolver e validar uma plataforma *open-source* de baixo custo para a caracterização mecânica da mucoadesão. A plataforma foi desenvolvida integrando um sistema automatizado de movimentação linear, uma cadeia de aquisição de força baseada em célula de carga e um sistema microcontrolado para execução e registro dos ensaios. O desempenho do sistema foi avaliado por meio da calibração da força, caracterização do ruído e da resolução de aquisição, validação do deslocamento e da velocidade de movimentação e ensaios experimentais com substratos-modelo de diferentes comportamentos adesivos. Adicionalmente, a resposta obtida para a glicerina foi avaliada em diferentes velocidades de separação e

comparada ao comportamento previsto pelo modelo de Stefan para a separação de superfícies paralelas por um fluido viscoso.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Arquitetura do Sistema e Instrumentação

A plataforma foi desenvolvida para a realização automatizada de ensaios mecânicos de destacamento destinados à caracterização da mucoadesão. O sistema integra uma estrutura mecânica com movimentação linear vertical, uma cadeia de medição de força, um sistema microcontrolado de controle e aquisição e uma interface computacional para registro dos dados. A estrutura foi construída com perfis modulares de alumínio extrudado e componentes auxiliares produzidos por manufatura aditiva por Fused Deposition Modeling (FDM).

O movimento linear foi obtido por meio de um motor de passo NEMA 17, acionado por um driver DRV8825 e acoplado a um fuso com avanço de 8,0 mm por revolução. O driver foi configurado em micropasso de 1/32, resultando em 6.400 passos por revolução e resolução teórica de 1,25 μm por passo (800 passos/mm). A força axial foi medida por uma célula de carga TAL221 com capacidade nominal de 100 gf, baseada em quatro extensômetros configurados em ponte de Wheatstone completa. O sinal foi condicionado por um módulo HX711, com conversor analógico-digital de 24 bits e ganho de 128. O controle do movimento e a aquisição dos sinais foram realizados por um Arduino Mega 2560.

Tabela 1. Principais componentes da plataforma e respectivas especificações.

Componente	Especificação
Estrutura	Perfis de alumínio extrudado
Componentes auxiliares	Manufatura aditiva FDM
Microcontrolador	Arduino Mega 2560
Motor	NEMA 17
Driver	DRV8825
Fuso	8,0 mm/revolução
Micropasso	1/32
Resolução teórica	1,25 μm /passo
Célula de carga	TAL221, 100 gf
Amplificador/ADC	HX711, 24 bits, ganho 128
Aquisição	Canal A do HX711

A tecnologia desenvolvida é objeto de pedido de patente depositado junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI).

2.2. Controle e Aquisição de Dados

O controle experimental foi implementado em firmware desenvolvido em C++ e executado no Arduino Mega 2560. O sistema foi programado para realizar sequencialmente a aproximação da sonda, estabelecimento do contato, aplicação da condição de adesamento, destacamento e retorno à posição inicial. O deslocamento foi determinado pela contagem de passos do motor, utilizando a relação de 800 passos/mm.

Durante os ensaios, os sinais de força foram adquiridos pelo HX711 e associados à posição correspondente da sonda. Os dados foram transmitidos pela interface serial para posterior geração das curvas força versus deslocamento e cálculo dos parâmetros mecânicos. A força foi expressa em grama-força (gf), considerando $1 \text{ gf} = 9,80665 \text{ mN}$.

2.3. Calibração e Caracterização Instrumental

A cadeia de medição de força foi calibrada por procedimento multiponto utilizando massas de referência entre 0 e 75 gf. Foram avaliados 11 níveis de carga (0, 7, 15, 23, 30, 38, 45, 53, 60, 68 e 75 gf), com três leituras por nível. A relação entre a leitura digital e a massa aplicada foi determinada por regressão linear, e o fator de calibração foi incorporado ao firmware para conversão das leituras brutas em força.

A estabilidade da cadeia de medição foi avaliada com a sonda livre, após estabilização térmica do sistema. A taxa de aquisição foi determinada pelo número de leituras obtidas por unidade de tempo, e o ruído foi caracterizado pelo desvio-padrão das leituras em repouso. O limite de detecção foi estimado como três vezes o desvio-padrão do ruído. A resolução teórica do deslocamento foi determinada a partir da relação entre o número de passos por revolução e o avanço do fuso.

A validação cinemática foi realizada com deslocamento programado de 50,0 mm e velocidade nominal de 4,0 mm/s. O deslocamento foi verificado com paquímetro com resolução de 0,05 mm e o tempo de execução foi determinado com cronômetro. A diferença observada entre a velocidade programada e a velocidade inicial foi utilizada

para estimar e compensar o tempo de processamento associado à geração dos pulsos e às rotinas de controle do microcontrolador.

2.4. Validação Funcional

A validação funcional foi realizada com glicerina, mel comercial e cola branca à base de poli(acetato de vinila) (PVA), selecionados como substratos-modelo com diferentes características reológicas e adesivas. Os ensaios foram realizados utilizando protocolo automatizado de aproximação, contato, adesamento e destacamento, com registro contínuo da força em função do deslocamento.

Para a glicerina, foram utilizadas superfícies de vidro com área de contato de 126 mm², força de compressão de 40 gf e tempo de adesamento de 15 s. A velocidade de separação foi variada entre 0,05, 0,10, 0,20 e 0,40 mm/s, com cinco réplicas por condição em dois experimentos independentes.

Para o mel, foram utilizados área de contato de 126 mm², força de compressão de 40 gf, tempo de adesamento de 15 s e velocidade de separação de 0,10 mm/s, com cinco réplicas. Para a cola PVA, foram utilizados área de contato de 78,5 mm², força de compressão de 40 gf, tempo de adesamento de 60 s e velocidade de separação de 0,10 mm/s, também com cinco réplicas.

Ensaio exploratórios adicionais foram realizados com glicerina, variando-se a força de compressão entre 20 e 60 gf e o tempo de adesamento entre 15 e 30 s, para avaliar a influência dessas condições sobre a resposta de destacamento.

A resposta instrumental da glicerina foi comparada ao comportamento previsto pelo modelo de Stefan para a separação de superfícies paralelas por um fluido viscoso. Essa análise foi utilizada como avaliação funcional da coerência física das medidas obtidas pela plataforma.

2.5. Análise de Dados

A força máxima de destacamento ($F_{\max}$) foi definida como o maior valor de força registrado durante a etapa de separação. O trabalho de adesão (W_{ad}) foi calculado pela integração numérica da curva força versus deslocamento durante o processo de destacamento.

Para a glicerina, a relação entre $F_{\max}$ e a velocidade de separação foi avaliada por regressão linear e comparada ao comportamento previsto pelo modelo de Stefan. Os dois experimentos independentes foram comparados quanto às inclinações das curvas de ajuste.

Para o mel e a cola PVA, foram calculados média, desvio-padrão e coeficiente de variação para $F_{\max}$ e W_{ad} . A dispersão entre réplicas foi utilizada como indicador de repetibilidade das medições.

3. RESULTADOS

3.1. Calibração e Caracterização Instrumental

A calibração multiponto da cadeia de medição apresentou relação linear entre o sinal bruto do conversor e a força aplicada na faixa de 0 a 75 gf. A regressão linear resultou na equação: $\text{leitura} = 17.058 \times m + 264$ em que m corresponde à força aplicada, em gf. O coeficiente de determinação foi $R^2 = 0,9998$, indicando elevada linearidade da

resposta na faixa avaliada. O fator de calibração foi incorporado ao firmware para conversão das leituras brutas em força.

Após a estabilização térmica do sistema, o sinal obtido com a sonda livre apresentou desvio-padrão de 0,004 gf e taxa de aquisição de aproximadamente 10,5 amostras/s. Considerando três desvios-padrão como critério para estimativa do limite de detecção, a menor força distinguível do ruído foi estimada em 0,012 gf (0,12 mN). A resolução teórica do deslocamento foi de 1,25 μm por passo do motor.

3.2. Validação Cinemática

Nas medições iniciais, a velocidade efetiva foi de 3,82 mm/s para uma velocidade nominal de 4,0 mm/s. A análise do ciclo de controle identificou um *overhead* total de 19 μs por ciclo, sendo 5 μs associados à geração do pulso e 14 μs ao processamento das operações de controle.

Após a compensação desse intervalo no programa de controle, novas medições confirmaram a execução de um deslocamento de 50,0 mm à velocidade de 4,0 mm/s. Não foram observadas perdas de passos ou travamentos durante as inversões de sentido.

3.3. Validação Funcional com Glicerina

A glicerina foi utilizada como substrato-modelo principal para a validação funcional, devido ao seu comportamento viscoso e à possibilidade de comparação da resposta experimental com a previsão do modelo de Stefan. Foram avaliadas quatro velocidades de separação (0,05, 0,10, 0,20 e 0,40 mm/s), com cinco réplicas em cada condição, em dois experimentos independentes.

Em ambos os experimentos, a força máxima de destacamento ($F_{\max}$) aumentou progressivamente com a velocidade de separação (Tabela 2). No Experimento 1, $F_{\max}$ aumentou de $3,86 \pm 0,27$ gf, a $0,05$ mm/s, para $9,43 \pm 0,56$ gf, a $0,40$ mm/s. No Experimento 2, os valores correspondentes foram $4,48 \pm 0,34$ e $10,20 \pm 0,54$ gf.

As regressões lineares apresentaram as equações $F = 16,1v + 3,26$ ($R^2 = 0,969$) para o Experimento 1 e $F = 15,3v + 4,21$ ($R^2 = 0,969$) para o Experimento 2, em que F é expressa em gf e v em mm/s. As inclinações diferiram em aproximadamente 5%, indicando comportamento semelhante entre os dois experimentos independentes. Os coeficientes de variação de $F_{\max}$ em cada condição variaram aproximadamente entre 3 e 8%.

Tabela 2. Força máxima de destacamento ($F_{\max}$) e trabalho de adesão (W_{ad}) em função da velocidade de separação nos dois experimentos independentes com glicerina ($n = 5$ por condição).

Velocidade (mm/s)	$F_{\max}$ Exp.1 (gf)	$F_{\max}$ Exp. 2 (gf)	W_{ad} Exp.1(gf·m m)	W_{ad} Exp.2 (gf·mm)
0,05	$3,86 \pm 0,27$	$4,48 \pm 0,34$	$1,00 \pm 0,09$	$0,96 \pm 0,09$
0,10	$4,65 \pm 0,25$	$6,25 \pm 0,42$	$1,07 \pm 0,14$	$1,21 \pm 0,11$
0,20	$7,14 \pm 0,23$	$7,36 \pm 0,31$	$1,30 \pm 0,15$	$1,57 \pm 0,19$
0,40	$9,43 \pm 0,56$	$10,20 \pm 0,54$	$1,98 \pm 0,11$	$1,85 \pm 0,10$

O trabalho de adesão também apresentou tendência de aumento com a velocidade de separação, variando de aproximadamente $1,0$ gf·mm, a $0,05$ mm/s, para aproximadamente $1,9$ gf·mm, a $0,40$ mm/s. Os coeficientes de variação variaram entre 5 e 13%, indicando maior

dispersão do Wad em comparação ao Fmax. Como esse parâmetro resulta da integração de toda a curva força versus deslocamento, sua variabilidade pode incorporar as diferenças observadas ao longo da região de baixa força durante o destacamento.

3.4. Reprodutibilidade em Diferentes Substratos-Modelo

A resposta da plataforma foi posteriormente avaliada com mel e cola branca à base de poli(acetato de vinila) (PVA), selecionados por apresentarem comportamentos adesivos e reológicos distintos.

Nos ensaios com mel, realizados entre superfícies de vidro a 0,10 mm/s, com força de compressão de 40 gf e tempo de adesamento de 15 s, foram obtidas cinco réplicas. A força máxima média foi de $23,97 \pm 0,93$ gf, com coeficiente de variação de 3,9%. As curvas de destacamento apresentaram perfis semelhantes entre as réplicas, com baixa dispersão dos valores de força máxima.

Para a cola branca à base de PVA, foram obtidas cinco réplicas nas mesmas condições de velocidade e força de compressão, com tempo de adesamento de 60 s. A força máxima média foi de $3,19 \pm 0,30$ gf, correspondente a um coeficiente de variação de 9,3%, enquanto o trabalho de adesão foi de $3,27 \pm 0,33$ gf·mm.

As curvas obtidas com PVA apresentaram perfil distinto daquele observado com os fluidos, caracterizado por uma região mais prolongada de resistência à separação, em vez de um pico estreito seguido de uma cauda predominantemente viscosa. Essa diferença demonstra que a plataforma foi capaz de registrar alterações no perfil força versus deslocamento associadas às diferentes características dos substratos avaliados.

3.5. Influência das Condições Experimentais e Limites Operacionais

Nos ensaios exploratórios com glicerina, a variação da força de compressão não produziu comportamento monotônico em F_{max} . Foram obtidos valores médios de 9,59 gf, 4,65 gf e 5,55 gf para forças de compressão de 20, 40 e 60 gf, respectivamente. O aumento do tempo de adesamento de 15 para 30 s produziu alteração relativamente pequena em F_{max} , de 4,65 para 5,81 gf.

Um ensaio exploratório com cola branca utilizando área de contato de 20 × 20 mm produziu força de tração superior à faixa recomendada para a célula de carga de 100 gf. A área de contato foi posteriormente reduzida para manter os ensaios dentro da faixa operacional do sensor. Esse resultado evidenciou a influência da geometria da interface sobre a força desenvolvida durante o destacamento e estabeleceu uma limitação operacional da configuração instrumental avaliada.

Em conjunto, os resultados demonstraram resposta linear da cadeia de força após calibração, baixo nível de ruído do sinal, correspondência entre deslocamento e velocidade programados após correção do sistema de controle e respostas reproduzíveis em diferentes substratos-modelo. A resposta dependente da velocidade observada com a glicerina forneceu a principal evidência de coerência física da plataforma, enquanto os ensaios com mel e PVA demonstraram sua capacidade de registrar comportamentos força-deslocamento distintos.

4. DISCUSSION

Os resultados demonstraram que a plataforma desenvolvida apresentou desempenho instrumental compatível com sua finalidade experimental, combinando uma cadeia de medição de força com resposta linear, baixo nível de ruído, controle automatizado do deslocamento e capacidade de registrar respostas mecânicas distintas em diferentes substratos-modelo. Esses resultados são particularmente relevantes porque demonstram que a utilização de componentes de baixo custo não impediu a obtenção de medições quantitativas com comportamento consistente (Zielińska *et al.*, 2025). Entretanto, a adequação do sistema não deve ser atribuída exclusivamente à resolução nominal dos componentes, mas ao desempenho conjunto da cadeia de medição, do controle de movimento e do processamento dos sinais (Wenzel *et al.*, 2023).

A calibração multiponto apresentou elevada linearidade na faixa de 0 a 75 gf, com $R^2 = 0,9998$. Esse resultado indica que, dentro da faixa avaliada, a relação entre o sinal produzido pela cadeia de aquisição e a força aplicada foi suficientemente previsível para permitir a conversão das leituras em valores de força (Sander, 2019). A utilização de múltiplos pontos de calibração também reduz a dependência de uma única referência e permite caracterizar a resposta do sistema ao longo da faixa operacional empregada nos ensaios. Embora o coeficiente de determinação elevado demonstre linearidade, ele não deve ser interpretado isoladamente como evidência de exatidão metrológica. Aspectos como a incerteza associada à referência, efeitos de histerese, deriva temporal e diferenças entre as respostas durante carregamento e descarregamento também devem ser considerados em uma caracterização metrológica mais abrangente (JCGM, 2008).

O baixo desvio-padrão observado no sinal com a sonda livre (0,004 gf) demonstra baixa variabilidade do sinal da cadeia de aquisição nas condições avaliadas. O limite de detecção estimado em 0,012 gf, correspondente a aproximadamente 0,12 mN, indica que o sistema apresenta capacidade de distinguir forças superiores ao nível de ruído observado. A relação entre o nível de ruído e a magnitude das forças medidas é relevante para a qualidade dos resultados, uma vez que o ruído constitui uma fonte de variabilidade e pode contribuir para a incerteza associada às medições, afetando a resolução efetiva do sistema (Potzick, 1999).

Por outro lado, a taxa de aquisição de aproximadamente 10,5 amostras/s estabelece uma limitação para experimentos que exijam elevada resolução temporal, particularmente em eventos de destacamento muito rápidos. A adequação da taxa de aquisição deve, portanto, ser interpretada em função da duração característica do fenômeno investigado e das velocidades de separação empregadas

A caracterização cinemática demonstrou que a resolução teórica de 1,25 μm por passo não foi suficiente, por si só, para garantir que a velocidade programada fosse reproduzida inicialmente. A diferença entre a velocidade nominal de 4,0 mm/s e a velocidade inicialmente observada de 3,82 mm/s evidenciou a influência do processamento do microcontrolador sobre o movimento efetivo do atuador. A identificação de um *overhead* de 19 μs por ciclo permitiu incorporar uma compensação diretamente ao controle, após a qual o deslocamento de 50,0 mm foi executado à velocidade programada. Esse resultado evidencia que a resolução mecânica nominal e o desempenho cinemático efetivo são propriedades distintas em sistemas de movimentação controlados digitalmente, uma vez que

a velocidade efetiva também depende da temporização do controlador e da frequência de geração dos pulsos (Tavares et al.2026)). A resolução mecânica é determinada pela combinação entre motor, micropasso e fuso, enquanto o desempenho cinemático efetivo depende adicionalmente da temporização do firmware, da frequência de acionamento e da capacidade do controlador de executar as rotinas de controle dentro do intervalo requerido. A validação cinemática, portanto, não apenas confirmou o desempenho do sistema após a correção, mas também permitiu identificar e corrigir uma discrepância entre o movimento nominal e o movimento efetivamente executado.

A correção do tempo de processamento no firmware demonstra, portanto, que a arquitetura aberta permite não apenas a construção do equipamento, mas também a identificação e correção de limitações decorrentes da interação entre hardware e software. Essa possibilidade constitui uma vantagem relevante de sistemas de arquitetura aberta, nos quais os componentes, parâmetros de controle e procedimentos de programação podem ser acessíveis e modificáveis pelo usuário (Wenzel, 2023; Bowman, 2023). Ao mesmo tempo, essa flexibilidade exige procedimentos de validação específicos, uma vez que alterações no firmware, na frequência de acionamento ou nas condições de carga podem modificar o comportamento cinemático do sistema (Bowman, 2023).

A validação funcional com glicerina forneceu evidência adicional de que a plataforma não apenas registra sinais de força, mas é capaz de reproduzir uma relação fisicamente esperada entre a velocidade de separação e a força de destacamento. O aumento progressivo de F_{max} entre 0,05 e 0,40 mm/s foi observado nos dois experimentos independentes, com coeficientes de determinação de 0,969. Esse

comportamento é consistente com a dependência prevista para a força viscosa durante a separação de superfícies paralelas por um fluido, conforme descrito pelo modelo de Stefan (Chopra; Tawashi, 1982; Dias; Miranda, 2012). A proximidade das inclinações obtidas nos dois experimentos, com diferença de aproximadamente 5%, reforça a reprodutibilidade da resposta da plataforma.

A comparação com o modelo de Stefan é particularmente importante porque fornece uma referência baseada em um comportamento físico conhecido, em vez de limitar a validação à repetição de uma mesma medição (Dias; Miranda, 2012). Em sistemas experimentais desenvolvidos com componentes de baixo custo, a demonstração de uma relação consistente entre uma variável controlada e uma resposta física esperada constitui uma estratégia importante para avaliar a coerência funcional do sistema (Tavares *et al.*, 2026). Nesse sentido, a dependência de F_{max} com a velocidade observada neste estudo constitui evidência funcional da capacidade do sistema de responder a alterações controladas nas condições de ensaio

O trabalho de adesão apresentou tendência semelhante à observada para F_{max} , aumentando com a velocidade de separação. Entretanto, sua variabilidade foi maior, com coeficientes de variação de aproximadamente 5 a 13%. Essa diferença é esperada porque W_{ad} não depende de um único ponto da curva, mas da integração de toda a resposta força versus deslocamento. Pequenas variações na linha de base, no deslocamento de ruptura e nas regiões de baixa força podem, portanto, produzir alterações acumulativas no valor integrado (Alaei *et al.*, 2021; Amorós-Galicia *et al.*, 2022). Esse comportamento reforça a necessidade de controle rigoroso das condições experimentais quando parâmetros derivados da área sob

a curva são utilizados para comparar materiais ou formulações (Amorós-Galicia *et al.*, 2022; Müller *et al.*, 2022).

Os ensaios com mel e PVA ampliaram a validação funcional ao demonstrar que a plataforma foi capaz de registrar respostas com magnitudes e perfis distintos. O mel apresentou $F_{\max}$ de $23,97 \pm 0,93$ gf, com coeficiente de variação de 3,9%, enquanto a cola PVA apresentou $F_{\max}$ de $3,19 \pm 0,30$ gf, com coeficiente de variação de 9,3%. Mais importante do que a diferença absoluta entre esses valores foi a diferença no formato das curvas de destacamento. A resposta do PVA apresentou uma região mais prolongada de resistência à separação, enquanto os fluidos avaliados apresentaram comportamento predominantemente associado à dissipação viscosa (Chopra; Tawashi, 1982; Alaei *et al.*, 2021). A capacidade de distinguir esses perfis demonstra que a plataforma preserva informações da curva força–deslocamento que podem ser perdidas quando a caracterização é reduzida exclusivamente a um valor máximo de força (Amorós-Galicia *et al.*, 2022; Müller *et al.*, 2022)

Os resultados exploratórios também evidenciaram que as condições experimentais exercem influência importante sobre a resposta e, conseqüentemente, não podem ser tratadas como parâmetros secundários. A ausência de comportamento monotônico de $F_{\max}$ com o aumento da força de compressão na glicerina indica que, nas condições avaliadas, a resposta de destacamento não apresentou uma relação monotônica com a força de compressão. Da mesma forma, a alteração relativamente pequena observada com o aumento do tempo de adesamento, nas condições avaliadas, indica que a influência desse parâmetro pode depender do material e da configuração experimental. Esses resultados reforçam a necessidade de controle e padronização das condições experimentais, incluindo

força de compressão, tempo de contato, área de contato e velocidade de separação, para permitir comparações adequadas entre diferentes materiais e estudos (Amorós-Galicia *et al.*, 2022)

O ensaio exploratório com cola PVA também revelou uma limitação operacional importante. O aumento da área de contato para 20 × 20 mm produziu uma força de tração superior à faixa recomendada para a célula de carga de 100 gf, levando à redução posterior da área de contato. Esse resultado evidencia que a capacidade nominal do sensor deve ser considerada conjuntamente com a geometria da interface, as propriedades do material e as condições de compressão e separação (Müller *et al.*, 2022). Em aplicações futuras, a substituição por células de carga com diferentes capacidades poderá ampliar a faixa operacional da plataforma sem alterar sua arquitetura fundamental.

Apesar dos resultados favoráveis, algumas limitações devem ser consideradas. A validação foi realizada com substratos-modelo e não com tecidos biológicos ou formulações mucoadesivas reais. Dessa forma, os resultados demonstram o desempenho instrumental e a coerência funcional do sistema, mas não permitem concluir que a plataforma reproduzirá, sem ajustes adicionais, todas as complexidades associadas à mucoadesão em superfícies biológicas. Além disso, a caracterização metrológica realizada neste estudo concentrou-se na linearidade, estabilidade do sinal, ruído e comportamento cinemático, não incluindo uma avaliação completa de incerteza de medição, histerese, deriva de longo prazo ou comparação direta com um equipamento comercial de referência.

Outra limitação está relacionada à taxa de aquisição do sistema. Embora aproximadamente 10,5 amostras/s tenham sido suficientes

para os protocolos empregados, essa frequência pode restringir aplicações envolvendo velocidades de destacamento mais elevadas ou eventos mecânicos de curta duração. A arquitetura aberta do sistema, entretanto, permite modificações no subsistema de aquisição e no firmware, possibilitando futuras melhorias na frequência de amostragem e na sincronização entre força e deslocamento.

A combinação entre arquitetura aberta, componentes de baixo custo e validação instrumental e funcional representa uma característica central da plataforma. Sistemas comerciais de análise de textura oferecem soluções consolidadas para ensaios mecânicos, porém sua arquitetura proprietária pode limitar modificações estruturais e experimentais (Tavares *et al.*, 2026; Müller *et al.*, 2022). Em contraste, a plataforma desenvolvida permite acesso aos componentes, parâmetros de controle e procedimentos de aquisição, possibilitando sua adaptação a diferentes configurações experimentais. Essa característica é particularmente relevante para estudos de mucoadesão, nos quais diferentes superfícies, geometrias, tempos de contato e velocidades de separação podem ser necessários de acordo com o objetivo experimental (Amorós-Galicia *et al.*, 2022).

Até onde se tem conhecimento, este está entre os primeiros sistemas open-source especificamente concebidos para ensaios de mucoadesão a reunir arquitetura aberta, baixo custo e validação metrológica e funcional em uma única plataforma, representando uma alternativa acessível e adaptável aos sistemas comerciais empregados na caracterização de biomateriais mucoadesivos. A relevância dessa característica não reside apenas na redução do custo de aquisição, mas na possibilidade de disponibilizar uma

arquitetura instrumental modificável e transparente, na qual hardware, controle e aquisição podem ser avaliados e aprimorados de forma independente.

Em conjunto, os resultados indicam que a plataforma desenvolvida apresenta desempenho adequado para ensaios mecânicos de destacamento nas condições avaliadas. A linearidade da cadeia de força, o baixo nível de ruído, a correção da velocidade de movimentação, a reprodutibilidade entre experimentos independentes e a resposta coerente com o comportamento previsto para a glicerina sustentam sua utilização como ferramenta experimental para caracterização mecânica da mucoadesão. A plataforma não deve, entretanto, ser entendida como substituta universal de sistemas comerciais, mas como uma alternativa open-source que permite ampliar o acesso à instrumentação e oferece flexibilidade para adaptação a diferentes protocolos experimentais.

5. CONCLUSION

Foi desenvolvida uma plataforma open-source de baixo custo para a realização automatizada de ensaios mecânicos de destacamento aplicados à caracterização da mucoadesão. A avaliação instrumental demonstrou resposta linear da cadeia de medição de força, baixo nível de ruído e capacidade de aquisição compatível com os protocolos experimentais empregados. A validação cinemática permitiu identificar e corrigir uma discrepância inicial entre a velocidade programada e a velocidade efetivamente executada, demonstrando a importância da avaliação integrada dos componentes mecânicos e do sistema de controle.

A validação funcional demonstrou que a plataforma foi capaz de registrar respostas dependentes da velocidade de separação e comportamentos força–deslocamento distintos entre os substratos-modelo avaliados. A resposta da glicerina apresentou comportamento consistente com a dependência prevista pelo modelo de Stefan, enquanto os ensaios com mel e PVA demonstraram a capacidade do sistema de reproduzir diferentes perfis de destacamento e apresentar repetibilidade nas condições avaliadas.

Em conjunto, os resultados indicam que a plataforma apresenta desempenho adequado para a caracterização mecânica da mucoadesão nas condições investigadas. Sua arquitetura open-source permite acesso aos componentes, parâmetros de controle e procedimentos de aquisição, favorecendo a adaptação do sistema a diferentes protocolos experimentais e possibilitando futuras melhorias na instrumentação. Embora a validação com substratos-modelo não substitua a avaliação com tecidos biológicos ou formulações mucoadesivas reais, os resultados estabelecem uma base instrumental para a aplicação e o aprimoramento da plataforma em estudos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alaei S, Omidian H. Mucoadhesion and mechanical assessment of oral films. *Eur J Pharm Sci.* 2021;159:105727. doi:10.1016/j.ejps.2021.105727.

Amorós-Galicia L, Nardi-Ricart A, Verdugo-González C, Arroyo-García CM, García-Montoya E, Pérez-Lozano P, et al. Development of a standardized method for measuring bioadhesion and

mucoadhesion that is applicable to various pharmaceutical dosage forms. *Pharmaceutics*. 2022;14(10):1995. doi:10.3390/pharmaceutics14101995.

Bayer IS. Recent advances in mucoadhesive interface materials, mucoadhesion characterization, and technologies. *Adv Mater Interfaces*. 2022;9(18):2200211. doi:10.1002/admi.202200211.

Bowman RW. Improving instrument reproducibility with open source hardware. *Nat Rev Methods Primers*. 2023;3:27. doi:10.1038/s43586-023-00218-x.

Chopra SK, Tawashi R. Tack behavior of coating solutions I. *J Pharm Sci*. 1982;71(8):907-911. doi:10.1002/jps.2600710817.

Jawadi Z, Yang C, Haidar ZS, Santa Maria PL, Massa S. Bio-inspired muco-adhesive polymers for drug delivery applications. *Polymers (Basel)*. 2022;14(24):5459. doi:10.3390/polym14245459.

JCGM. Evaluation of measurement data: guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM 100:2008. Sèvres: Joint Committee for Guides in Metrology; 2008. doi:10.59161/JCGM100-2008E.

Kinloch AJ. Adhesion and adhesives: science and technology. Dordrecht: Springer; 2012. doi:10.1007/978-94-015-7764-9.

Müller L, Rosenbaum C, Krause J, Weitschies W. Characterization of an *in vitro/ex vivo* mucoadhesiveness measurement method of PVA films. *Polymers (Basel)*. 2022;14(23):5146. doi:10.3390/polym14235146.

Potzick JE. Noise averaging and measurement resolution (or a little noise is a good thing). *Rev Sci Instrum.* 1999;70(4).

Sander LC. Calibration. *J Res Natl Inst Stand Technol.* 2019;124:124027. doi:10.6028/jres.124.027.

Smart JD. The basics and underlying mechanisms of mucoadhesion. *Adv Drug Deliv Rev.* 2005;57(11):1556-1568. doi:10.1016/j.addr.2005.07.001.

Tavares LCD, Souza SL, Marcomini RF, Apolônio ACM. Pressure-sensitive adhesive methodologies as a framework for advancing mucoadhesive testing. *J Drug Deliv Sci Technol.* 2026;119:108150. doi:10.1016/j.jddst.2026.108150.

Wenzel T. Open hardware: From DIY trend to global transformation in access to laboratory equipment. *PLoS Biol.* 2023;21(1):e3001931. doi:10.1371/journal.pbio.3001931.