

**MUCOADESÃO E INOVAÇÃO: INSIGHTS E DESAFIOS NA AVALIAÇÃO  
EXPERIMENTAL DE SISTEMAS MUCOADESIVO**

**MUCOADHESION AND INNOVATION: INSIGHTS AND CHALLENGES IN THE  
EXPERIMENTAL EVALUATION OF MUCOADHESIVE SYSTEMS**

**MUCOADHESIÓN E INNOVACIÓN: PERSPECTIVAS Y DESAFÍOS EN LA  
EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE SISTEMAS MUCOADHESIVOS**



10.56238/sevened2026.001-072

**Luciana Cláudia Diniz Tavares**

Mestre em Odontologia, Faculdade de Odontologia  
Instituição: Universidade Federal de Juiz de Fora  
E-mail: lcdiniz1@hotmail.com

**Amanda Marota de Oliveira**

Graduação em Odontologia  
Instituição: Faculdade de Odontologia, Universidade Federal de Juiz de Fora  
E-mail: amanda.marota@estudante.ufjf.br

**Ana Carolina Morais Apolônio**

Doutora em Microbiologia  
Instituição: Universidade de Juiz de Fora  
E-mail: carolina.apolonio@ufjf.br

**Matheus Fernandes Lasneau Moraes**

Mestre em Ciências Aplicadas a Saúde Bucal  
Instituição: Faculdade de Odontologia, Universidade Federal de Juiz de Fora  
E-mail: matheus.flm94@gmail.com

**Mariana Simões de Oliveira**

Mestre em Odontologia  
Instituição: Faculdade de Odontologia, Universidade Federal de Juiz de Fora  
E-mail: dra.marisimoes@gmail.com

**Raphael Fortes Marcomini**

Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais  
Instituição: Universidade Federal de Juiz de Fora  
E-mail: raphael.marcomini@ufjf.br

**Taleessa Vieira Gomes**

Mestre em Odontologia  
Instituição: Faculdade de Odontologia, Universidade Federal de Juiz de Fora  
E-mail: taleesagjf@gmail.com

**Tharcísio Amadeu Tomaz Caetano**

Graduando em Farmácia

Instituição: Faculdade de Farmácia, Universidade Federal de Juiz de Fora

E-mail: tharcisiocaetano067@gmail.com

**Vitória Batista Clemente**

Mestre em Odontologia

Instituição: Faculdade de Odontologia, Universidade Federal de Juiz de Fora

E-mail: v.clemente99@gmail.com

---

## RESUMO

A mucoadesão consolidou-se como estratégia central no desenvolvimento de sistemas de liberação de fármacos, sobretudo em aplicações que demandam permanência prolongada em superfícies mucosas e maior eficiência terapêutica local. No entanto, o avanço desse campo não tem sido acompanhado por igual robustez nas abordagens experimentais utilizadas para sua avaliação. Este capítulo analisa criticamente os principais entraves associados à caracterização de sistemas mucoadesivos, articulando dimensões teóricas, metodológicas, instrumentais e estruturais que condicionam a prática científica contemporânea. Evidencia-se que a heterogeneidade de protocolos, a ausência de padronização e a dependência de equipamentos adaptados comprometem a comparabilidade entre estudos e fragilizam a construção de um corpo de conhecimento integrado. Destaca-se, de forma particular, a centralidade da interface de contato, sobretudo no que se refere à inadequação das sondas utilizadas, cuja variabilidade influencia diretamente os resultados obtidos. Paralelamente, limitações relacionadas ao acesso à infraestrutura, custos operacionais, capacitação técnica e desigualdades regionais ampliam a complexidade do cenário experimental, impactando a reprodutibilidade e o ritmo de produção científica. A convergência desses fatores aponta para o esgotamento do modelo atual de avaliação, sustentado por adaptações incrementais e ausência de soluções tecnológicas dedicadas. Diante desse panorama, defende-se a necessidade de uma reconfiguração estrutural do campo, orientada pelo desenvolvimento de instrumentação específica, incorporação de tecnologias digitais e construção de referências metodológicas compartilhadas. Conclui-se que a superação das limitações atuais exige não apenas avanços técnicos, mas uma mudança paradigmática na forma de conceber, executar e interpretar ensaios de mucoadesão, condição indispensável para a consolidação de resultados mais consistentes, comparáveis e clinicamente relevantes.

**Palavras-chave:** Mucoadesão. Sistemas Mucoadesivos. Liberação de Fármacos. Inovação Tecnológica.

## ABSTRACT

Mucoadhesion has become a central strategy in the development of drug delivery systems, especially in applications that require prolonged retention on mucosal surfaces and greater local therapeutic efficiency. However, the advancement of this field has not been accompanied by equal robustness in the experimental approaches used for its evaluation. This chapter critically analyzes the main obstacles associated with the characterization of mucoadhesive systems, articulating theoretical, methodological, instrumental, and structural dimensions that condition contemporary scientific practice. It is evident that the heterogeneity of protocols, the lack of standardization, and the dependence on adapted equipment compromise the comparability between studies and weaken the construction of an integrated body of knowledge. The centrality of the contact interface is particularly

highlighted, especially regarding the inadequacy of the probes used, whose variability directly influences the results obtained. In parallel, limitations related to access to infrastructure, operational costs, technical training, and regional inequalities increase the complexity of the experimental scenario, impacting reproducibility and the pace of scientific production. The convergence of these factors points to the exhaustion of the current evaluation model, sustained by incremental adaptations and the absence of dedicated technological solutions. Given this scenario, a structural reconfiguration of the field is necessary, guided by the development of specific instrumentation, the incorporation of digital technologies, and the construction of shared methodological references. It is concluded that overcoming current limitations requires not only technical advances but also a paradigmatic shift in the way mucoadhesion assays are conceived, executed, and interpreted—an indispensable condition for consolidating more consistent, comparable, and clinically relevant results.

**Keywords:** Mucoadhesion. Mucoadhesive Systems. Drug Delivery. Technological Innovation.

## RESUMEN

La mucoadhesión se ha convertido en una estrategia fundamental en el desarrollo de sistemas de administración de fármacos, especialmente en aplicaciones que requieren una retención prolongada en superficies mucosas y una mayor eficacia terapéutica local. Sin embargo, el avance de este campo no ha ido acompañado de la misma solidez en los enfoques experimentales utilizados para su evaluación. Este capítulo analiza críticamente los principales obstáculos asociados a la caracterización de sistemas mucoadhesivos, articulando las dimensiones teóricas, metodológicas, instrumentales y estructurales que condicionan la práctica científica contemporánea. Es evidente que la heterogeneidad de los protocolos, la falta de estandarización y la dependencia de equipos adaptados comprometen la comparabilidad entre estudios y debilitan la construcción de un cuerpo de conocimiento integrado. Se destaca particularmente la centralidad de la interfaz de contacto, especialmente en lo que respecta a la inadecuación de las sondas utilizadas, cuya variabilidad influye directamente en los resultados obtenidos. Paralelamente, las limitaciones relacionadas con el acceso a la infraestructura, los costos operativos, la capacitación técnica y las desigualdades regionales aumentan la complejidad del escenario experimental, impactando la reproducibilidad y el ritmo de la producción científica. La convergencia de estos factores apunta al agotamiento del modelo de evaluación actual, sustentado en adaptaciones incrementales y la ausencia de soluciones tecnológicas específicas. Ante este panorama, se requiere una reconfiguración estructural del campo, guiada por el desarrollo de instrumentación específica, la incorporación de tecnologías digitales y la construcción de referencias metodológicas compartidas. Se concluye que superar las limitaciones actuales exige no solo avances técnicos, sino también un cambio de paradigma en la concepción, ejecución e interpretación de los ensayos de mucoadhesión, condición indispensable para consolidar resultados más consistentes, comparables y clínicamente relevantes.

**Palabras clave:** Mucoadhesión. Sistemas Mucoadhesivos. Administración de Fármacos. Innovación Tecnológica.

## 1 INTRODUÇÃO

A mucoadesão tem se consolidado, nas últimas décadas, como uma estratégia relevante no desenvolvimento de sistemas de liberação de fármacos, especialmente em contextos nos quais a permanência prolongada do agente terapêutico em superfícies mucosas pode potencializar a eficácia clínica e reduzir efeitos sistêmicos indesejáveis. Esse avanço tem impulsionado investigações em múltiplos campos do conhecimento, como odontologia, ciências farmacêuticas, engenharia de materiais e biotecnologia, evidenciando o caráter transversal do tema. À medida que esse campo se expande, torna-se evidente que o progresso científico não depende exclusivamente da criação de novas formulações, mas também da consistência das abordagens empregadas para sua caracterização.

Diante desse contexto, a mucoadesão pode ser compreendida como o fenômeno de interação entre um material e uma superfície mucosa, mediado por um conjunto de forças físico-químicas e processos interfaciais que resultam na adesão temporária do sistema ao tecido. Essa interação envolve etapas sucessivas, que incluem o contato inicial, a umidificação, a interpenetração de cadeias poliméricas e a formação de ligações intermoleculares, sendo influenciada tanto pelas propriedades do biomaterial quanto pelas características dinâmicas do muco e do ambiente fisiológico. Trata-se, portanto, de um fenômeno intrinsecamente complexo, no qual múltiplos mecanismos atuam de maneira simultânea e interdependente.

É justamente essa complexidade que torna sua avaliação um desafio. Os ensaios de mucoadesão assumem papel central nesse processo, mas, apesar da diversidade de estratégias descritas na literatura, incluindo testes com analisadores de textura, abordagens reológicas e modelos *ex vivo* com tecidos biológicos, observa-se ampla variação nos protocolos adotados, o que compromete a comparabilidade entre estudos e dificulta a consolidação de evidências robustas. Mais do que uma heterogeneidade metodológica esperada em um campo em desenvolvimento, esse cenário revela uma fragilidade mais profunda: a dificuldade em garantir que diferentes abordagens estejam, de fato, mensurando fenômenos equivalentes sob condições comparáveis.

Essa limitação não decorre apenas de decisões experimentais distintas, mas reflete condicionantes estruturais que atravessam a prática científica. A ausência de instrumentação concebida especificamente para a avaliação da mucoadesão tem levado à adaptação de equipamentos originalmente destinados a outras aplicações. Embora tais ajustes viabilizem a execução dos ensaios, frequentemente implicam no uso de sondas com geometrias não padronizadas e superfícies que não reproduzem adequadamente as características do tecido mucoso, introduzindo variáveis adicionais que comprometem a confiabilidade dos resultados e, em última instância, a própria interpretação do fenômeno.

Como consequência, diferentes grupos de pesquisa operam sob condições pouco comparáveis, o que fragiliza a construção de um corpo de conhecimento integrado e consistente. A variabilidade

observada deixa de ser apenas uma expressão da complexidade biológica e passa a refletir limitações técnicas e instrumentais ainda não resolvidas. Nesse contexto, o desafio não reside apenas em medir melhor, mas em compreender o que, de fato, está sendo medido em cada abordagem adotada.

A esse cenário somam-se fatores de ordem econômica e organizacional, como os custos associados à aquisição e manutenção de equipamentos, as limitações de acesso à infraestrutura laboratorial e a necessidade recorrente de colaboração interinstitucional para viabilizar os ensaios. Em muitos casos, o tempo necessário para execução das análises torna-se prolongado, refletindo não apenas a disponibilidade restrita de recursos, mas também um descompasso entre a demanda científica e a capacidade operacional dos laboratórios, o que impacta diretamente o ritmo de produção de evidências.

Diante desse panorama, impõe-se a necessidade de uma reflexão mais profunda sobre a natureza dessas limitações. Mais do que entraves pontuais, os elementos aqui discutidos apontam para a existência de lacunas tecnológicas e metodológicas que ainda não foram plenamente enfrentadas pelo campo. Ignorá-las implica manter um modelo de investigação no qual a sofisticação das formulações não é acompanhada por igual rigor na sua avaliação.

Nesse sentido, este capítulo propõe uma análise integrada dos desafios contemporâneos relacionados à avaliação de sistemas mucoadesivos, articulando diferentes dimensões que atravessam a prática experimental. Ao examinar limitações estruturais, metodológicas e tecnológicas, busca-se não apenas descrever o estado atual do campo, mas também delinear caminhos para seu aprimoramento, com ênfase no desenvolvimento de instrumentação dedicada e na consolidação de abordagens mais consistentes

## **2 FUNDAMENTOS E DESAFIOS NA AVALIAÇÃO DA MUCOADESÃO**

A compreensão da mucoadesão exige a articulação entre fenômenos físico-químicos, propriedades dos biomateriais e características biológicas dos tecidos mucosos, configurando um sistema de elevada complexidade. Interações como ligações de hidrogênio, forças de van der Waals, interpenetração e entrelaçamento de cadeias poliméricas, além de efeitos eletrostáticos, não atuam de forma isolada, mas emergem de maneira simultânea e dependente do ambiente. Essa natureza interdependente faz com que pequenas variações nas condições experimentais sejam capazes de produzir diferenças relevantes nos resultados, deslocando a avaliação da mucoadesão para um campo em que precisão e contexto tornam-se indissociáveis.

Diversos modelos teóricos foram propostos ao longo do tempo na tentativa de explicar os mecanismos envolvidos na adesão a superfícies mucosas, incluindo abordagens fundamentadas em molhabilidade, difusão, adsorção e fratura. Embora cada uma dessas perspectivas contribua para a compreensão do fenômeno, nenhuma delas, isoladamente, é capaz de capturar sua totalidade. Essa

limitação não representa apenas uma lacuna conceitual, mas sinaliza uma dificuldade mais profunda, a ausência de um referencial unificado capaz de orientar, de maneira consistente, a interpretação dos resultados experimentais.

Essa fragmentação teórica repercute diretamente nas estratégias de avaliação. Os métodos disponíveis tendem a refletir recortes específicos do fenômeno, priorizando determinadas dimensões da interação em detrimento de outras. Ensaio mecânicos baseados em analisadores de textura, por exemplo, concentram-se na mensuração de forças de destacamento e trabalho de adesão, enquanto abordagens reológicas exploram alterações nas propriedades viscoelásticas associadas à interação com mucina. Modelos *ex vivo*, por sua vez, buscam maior proximidade com a realidade fisiológica, incorporando tecidos biológicos às análises. No entanto, essa diversidade metodológica não se traduz, necessariamente, em complementaridade. Na ausência de parâmetros comuns, diferentes técnicas passam a gerar resultados que coexistem, mas nem sempre dialogam.

A variabilidade nos protocolos experimentais intensifica esse cenário. Parâmetros como velocidade de aproximação, força aplicada, tempo de contato e condições ambientais são frequentemente definidos de maneira heterogênea, o que compromete a comparabilidade entre estudos. Mais do que diferenças operacionais, essas variações refletem a inexistência de consensos mínimos sobre como o fenômeno deve ser investigado, reforçando a dificuldade de consolidar evidências de forma integrada.

Nesse contexto, a interface de contato assume um papel decisivo. A escolha da sonda, sua geometria e suas propriedades de superfície não apenas influenciam a distribuição de forças e a área efetiva de contato, mas podem redefinir o próprio fenômeno que está sendo mensurado. Ainda assim, observa-se ampla variabilidade nesses elementos, frequentemente associada à adaptação de acessórios não originalmente concebidos para aplicações em mucoadesão. Essa prática, embora funcional, introduz inconsistências que ultrapassam a esfera técnica, afetando diretamente a interpretação dos resultados e limitando a construção de referências confiáveis.

A variabilidade inerente às superfícies mucosas acrescenta uma camada adicional de complexidade. Fatores como composição do muco, grau de hidratação, atividade enzimática e condições fisiológicas específicas influenciam de maneira significativa o comportamento dos sistemas mucoadesivos. Em modelos *ex vivo*, essas variáveis tornam-se ainda mais difíceis de controlar, sobretudo diante de diferenças na origem, no preparo e na conservação dos tecidos utilizados. Como consequência, ensaios conduzidos sob condições aparentemente semelhantes podem produzir resultados substancialmente distintos, desafiando a reprodutibilidade.

Frente a esse conjunto de condicionantes, torna-se evidente que a avaliação da mucoadesão não pode ser compreendida como a aplicação de um método isolado, mas como um processo que exige coerência entre modelo teórico, protocolo experimental e instrumentação. No entanto, essa integração

raramente é alcançada de forma consistente, o que contribui para a manutenção de um campo fragmentado, no qual a acumulação de dados não necessariamente se traduz em consolidação de conhecimento.

Tal situação impõe a necessidade de uma abordagem mais crítica na análise dos métodos disponíveis. Mais do que selecionar técnicas, torna-se fundamental compreender o que cada abordagem efetivamente captura e quais são seus limites interpretativos. Sem essa reflexão, corre-se o risco de avançar em volume de produção científica sem o correspondente avanço na compreensão do fenômeno. É nesse ponto que a discussão sobre padronização e inovação deixa de ser uma escolha metodológica e passa a configurar uma exigência para o amadurecimento do campo.

### **3 LIMITAÇÕES ESTRUTURAIS E DESAFIOS NA PRÁTICA EXPERIMENTAL**

À medida que se examinam com maior profundidade as práticas associadas à avaliação da mucoadesão, evidencia-se um conjunto de condicionantes que não se manifestam de forma isolada, mas como parte de uma engrenagem interdependente que orienta a condução dos ensaios. Esses fatores atravessam diferentes esferas da atividade científica, abrangendo desde a infraestrutura disponível até a organização dos laboratórios, o nível de qualificação técnica e a disponibilidade de recursos, compondo um cenário que repercute diretamente na qualidade e na reprodutibilidade dos dados obtidos.

Entre os aspectos mais evidentes, destaca-se a limitação no acesso a equipamentos específicos, o que frequentemente obriga pesquisadores a recorrerem a estruturas externas para viabilizar suas análises. Ainda que essa dependência seja, em parte, contornada por colaborações institucionais, ela introduz complexidades adicionais ao fluxo experimental, incluindo a necessidade de agendamento, o transporte de amostras e a adaptação a rotinas operacionais distintas. Como desdobramento, o tempo necessário para a execução dos ensaios tende a se estender, gerando intervalos que nem sempre se alinham ao ritmo esperado de desenvolvimento científico.

Esse alongamento não deve ser interpretado apenas como uma questão logística, mas como expressão de um descompasso entre demanda e capacidade instalada. Em muitos contextos, a realização de testes depende de condições que não estão prontamente disponíveis, resultando em acúmulo de demandas e na priorização de determinados projetos. Tal dinâmica, além de comprometer a produtividade, pode influenciar escolhas metodológicas, levando à simplificação de protocolos ou à redução do número de análises realizadas, com impacto direto na robustez dos achados.

A dimensão econômica intensifica esse quadro. Os custos relacionados à aquisição, manutenção e operação de equipamentos constituem uma barreira significativa, sobretudo em instituições com recursos limitados. Essa restrição não apenas dificulta o acesso à infraestrutura, mas

também interfere na frequência e na continuidade das análises, contribuindo para um ambiente experimental marcado por interrupções e ajustes constantes.

No que se refere à capacitação técnica, observa-se que o domínio das metodologias nem sempre acompanha a complexidade dos ensaios realizados. A ausência de programas estruturados de treinamento e a limitada difusão de protocolos consolidados favorecem variações na execução das técnicas, o que repercute na consistência dos dados gerados. Esse aspecto assume relevância ainda maior quando se considera que a precisão experimental depende de ajustes finos em parâmetros operacionais e da interpretação adequada dos resultados.

A forma de atualização metodológica também revela fragilidades. Embora os artigos científicos representem fonte essencial de conhecimento, sua predominância como meio quase exclusivo de aprendizado nem sempre supre as demandas práticas associadas à execução dos ensaios. A escassez de iniciativas voltadas à formação técnica aplicada, como cursos especializados e treinamentos direcionados, contribui para a manutenção de diferenças no domínio das técnicas entre grupos de pesquisa.

Nessa perspectiva, a colaboração interinstitucional emerge como estratégia de compensação, permitindo o compartilhamento de recursos e expertise. Contudo, sua ocorrência não se distribui de maneira uniforme, resultando em contextos nos quais alguns grupos se beneficiam de redes mais consolidadas, enquanto outros permanecem limitados às condições locais. Essa assimetria reforça a compreensão de que os desafios associados à avaliação da mucoadesão não são homogêneos, mas refletem desigualdades mais amplas no ambiente científico.

Considerados em conjunto, esses elementos delineiam um panorama no qual a prática experimental é continuamente condicionada por fatores que extrapolam o domínio técnico. A condução dos ensaios passa a depender não apenas do conhecimento científico, mas também da capacidade de contornar restrições institucionais, financeiras e operacionais. Compreender essas condicionantes torna-se, portanto, indispensável para a interpretação adequada dos resultados e para o avanço em direção a abordagens mais consistentes, reprodutíveis e alinhadas às demandas do campo.

#### **4 A CENTRALIDADE DA INTERFACE DE CONTATO: O PROBLEMA DAS SONDAS NA AVALIAÇÃO DA MUCOADESÃO**

Entre os diversos fatores que condicionam a avaliação da mucoadesão, a interface de contato se impõe como um dos elementos mais sensíveis e, ao mesmo tempo, menos explorados de forma estruturada. Em ensaios baseados em analisadores de textura ou em abordagens reológicas, a interação entre formulação e superfície de teste não se restringe às propriedades intrínsecas do material, sendo profundamente modulada pela geometria, composição e comportamento mecânico da sonda

empregada. Nessa perspectiva, a sonda deixa de ocupar um papel secundário e passa a atuar como determinante direto dos resultados obtidos.

Apesar dessa centralidade, a seleção e a padronização desses dispositivos permanecem marcadas por ampla heterogeneidade. É recorrente a utilização de acessórios originalmente concebidos para outras finalidades, frequentemente sem correspondência adequada com as características biomecânicas e bioquímicas das superfícies mucosas. Ainda que essa adaptação viabilize a execução dos ensaios, ela introduz um nível de inconsistência que compromete a interpretação dos dados, uma vez que variações discretas na área efetiva de contato, na topografia superficial ou na distribuição de tensões podem produzir diferenças substanciais nos valores mensurados.

A inexistência de sondas concebidas especificamente para aplicações em mucoadesão evidencia uma lacuna que ultrapassa o âmbito operacional. Trata-se de uma limitação com implicações diretas na construção do conhecimento, na medida em que dificulta a comparabilidade entre estudos conduzidos sob condições distintas. Quando diferentes geometrias, materiais e comportamentos de superfície são empregados, torna-se praticamente inviável estabelecer parâmetros de referência consistentes ou integrar resultados em uma base interpretativa comum.

Além disso, a necessidade contínua de adaptação tende a induzir modificações nos próprios protocolos experimentais, incluindo ajustes na força aplicada, no tempo de contato e na velocidade de separação. Tais modificações, frequentemente conduzidas de forma empírica, ampliam a variabilidade metodológica e aprofundam a fragmentação do campo. Como consequência, os resultados passam a refletir não apenas o desempenho do sistema mucoadesivo, mas também as condições específicas impostas pelo arranjo experimental adotado.

Esse panorama revela uma dimensão frequentemente subestimada nas discussões sobre mucoadesão. As dificuldades associadas à padronização não derivam exclusivamente da complexidade do fenômeno biológico, mas também da inadequação das ferramentas utilizadas para investigá-lo. Nesse contexto, a limitação desloca-se do método em si para a interface material que viabiliza sua execução.

Reconhecer a centralidade desse elemento implica revisar criticamente a forma como os ensaios são concebidos, conduzidos e interpretados. Mais do que adaptar dispositivos disponíveis, torna-se necessário avançar no desenvolvimento de soluções instrumentais projetadas para reproduzir, com maior fidelidade, as condições das superfícies mucosas. Esse movimento não representa apenas um aprimoramento técnico, mas um passo decisivo para a consolidação de práticas experimentais mais robustas, comparáveis e alinhadas às exigências contemporâneas da área.

## 5 DESIGUALDADES REGIONAIS E ENTRAVES ESTRUTURAIS NA PESQUISA EM MUCOADESÃO

As limitações associadas à avaliação da mucoadesão não se manifestam de forma homogênea, mas acompanham a distribuição desigual de recursos que caracteriza o sistema científico. No contexto brasileiro, essas diferenças tornam-se particularmente evidentes diante da concentração de infraestrutura, financiamento e produção acadêmica nas regiões Sul e Sudeste, em contraste com as condições enfrentadas por instituições situadas em outras áreas do país.

Essa assimetria repercute diretamente no acesso a equipamentos especializados, na disponibilidade de suporte técnico e na inserção em redes colaborativas. Em centros mais consolidados, a presença de infraestrutura robusta favorece a realização de ensaios com maior regularidade, controle de variáveis e refinamento metodológico. Em contrapartida, em contextos com menor suporte estrutural, a execução de análises frequentemente depende de articulações externas, deslocamento de amostras ou adaptações metodológicas, o que introduz camadas adicionais de variabilidade e incerteza.

A concentração geográfica de recursos também exerce influência decisiva na formação de pesquisadores. Ambientes com maior densidade de grupos de pesquisa e oferta contínua de treinamento tendem a acelerar a consolidação de competências técnicas e o domínio de metodologias específicas. Por outro lado, contextos menos estruturados enfrentam dificuldades na construção de expertise local, o que impacta não apenas a execução dos ensaios, mas a própria capacidade de problematizar e inovar dentro do campo.

Esse desequilíbrio se estende à dinâmica das colaborações científicas. Embora redes interinstitucionais desempenhem papel central no avanço do conhecimento, seu acesso não ocorre de maneira equitativa. Grupos já inseridos em circuitos consolidados tendem a ampliar suas conexões e oportunidades, enquanto núcleos emergentes permanecem à margem desses fluxos, com menor acesso a infraestrutura compartilhada e menor visibilidade científica. Como consequência, a produção tende a se concentrar em polos estabelecidos, reforçando um ciclo cumulativo de desigualdade.

Quando articuladas às limitações metodológicas previamente discutidas, essas disparidades não apenas ampliam os desafios operacionais, mas influenciam a própria natureza do conhecimento produzido. Resultados passam a refletir não apenas fenômenos biológicos ou desempenho de materiais, mas também as condições estruturais sob as quais foram gerados. Nesse sentido, a heterogeneidade observada na literatura não pode ser interpretada exclusivamente como variação experimental, mas também como expressão de um campo atravessado por desigualdades persistentes.

Dessa maneira, a superação dos entraves na avaliação da mucoadesão exige uma abordagem que vá além do aprimoramento técnico. Torna-se necessário promover estratégias que ampliem o acesso à infraestrutura, fortaleçam a formação especializada e favoreçam a integração de grupos em

diferentes estágios de desenvolvimento. Sem esse movimento, qualquer avanço metodológico tende a permanecer restrito a contextos específicos, limitando seu impacto e perpetuando a fragmentação do campo.

## **6 CONVERGÊNCIA DOS ENTRAVERES E LIMITES DO MODELO ATUAL DE AVALIAÇÃO**

A análise dos diferentes aspectos que envolvem a avaliação da mucoadesão revela um padrão que transcende a soma de limitações isoladas. O que se delineia não é apenas um conjunto de dificuldades técnicas, instrumentais ou estruturais, mas a existência de um modelo experimental que, embora amplamente utilizado, apresenta sinais consistentes de esgotamento em sua capacidade de responder às demandas contemporâneas do campo.

As variabilidades observadas nos protocolos, a inadequação das interfaces de contato, a dependência de adaptações instrumentais e as desigualdades no acesso à infraestrutura não devem ser interpretadas como falhas independentes. Ao contrário, esses elementos convergem para um mesmo ponto crítico: a ausência de uma base metodológica e tecnológica concebida especificamente para a complexidade da mucoadesão. Nesse sentido, o que se observa é a utilização recorrente de soluções derivadas, frequentemente adaptadas de outros contextos, que não conseguem capturar de forma consistente a natureza multifatorial do fenômeno.

Essa condição produz um efeito cumulativo, onde a heterogeneidade metodológica compromete a comparabilidade dos resultados; a limitação instrumental restringe a precisão das medições; as assimetrias estruturais condicionam a forma como os ensaios são conduzidos. Como consequência, o conhecimento gerado tende a se organizar de maneira fragmentada, dificultando a consolidação de parâmetros robustos e a construção de referências amplamente aceitas.

Além disso, a dependência de ajustes empíricos nos protocolos experimentais reforça um ciclo no qual a reprodutibilidade se torna um objetivo difícil de alcançar. Pequenas variações nas condições de ensaio podem resultar em diferenças significativas nos dados obtidos, o que desloca a interpretação dos resultados para um terreno marcado por incertezas. Desse modo, a dificuldade não reside apenas na mensuração da mucoadesão, mas na própria definição do que está sendo, de fato, medido em cada abordagem.

Outro aspecto relevante refere-se ao distanciamento entre as condições experimentais e a realidade fisiológica das superfícies mucosas. Embora modelos *ex vivo* e adaptações instrumentais busquem aproximar esses cenários, a ausência de dispositivos e protocolos desenhados especificamente para esse fim limita a capacidade de reproduzir, de maneira integrada, as múltiplas variáveis envolvidas no processo adesivo. Essa lacuna compromete não apenas a validade externa dos resultados, mas também sua aplicabilidade em contextos clínicos.

Assim, diante desse conjunto de evidências, torna-se difícil sustentar a ideia de que o avanço na área possa ocorrer por meio de ajustes incrementais em métodos já estabelecidos. O que se impõe é o reconhecimento de que o modelo atual, embora funcional em determinados contextos, não oferece suporte suficiente para a consolidação de um campo que demanda maior precisão, comparabilidade e relevância aplicada.

Esse reconhecimento marca um ponto de inflexão. Ao invés de tratar as limitações como obstáculos pontuais a serem contornados, torna-se necessário compreendê-las como indicadores de uma necessidade mais profunda de reorganização. A convergência dos entraves evidencia que os desafios enfrentados não se restringem ao domínio experimental, mas refletem a ausência de integração entre teoria, método e instrumentação.

É nesse contexto que a inovação deixa de ser uma possibilidade e passa a se configurar como uma exigência. Não como resposta imediata a problemas isolados, mas como estratégia estruturante capaz de redefinir as bases sobre as quais a avaliação da mucoadesão é conduzida.

## **7 PERSPECTIVAS FUTURAS E INOVAÇÃO NA AVALIAÇÃO DA MUCOADESÃO**

Diante das limitações previamente discutidas, torna-se evidente que os avanços na área de mucoadesão não poderão ser sustentados apenas pelo aprimoramento de formulações ou pela ampliação incremental do repertório metodológico. O conjunto de inconsistências observadas, associado à ausência de soluções instrumentais específicas e às assimetrias estruturais que atravessam o campo, aponta para a necessidade de uma reconfiguração mais profunda das bases experimentais que orientam a avaliação desses sistemas.

Sob essa perspectiva, a inovação deixa de ocupar uma posição complementar e passa a constituir o eixo estruturante do desenvolvimento científico. A criação de dispositivos dedicados à análise da mucoadesão, concebidos a partir das particularidades físicas e biológicas das superfícies mucosas, configura-se como um passo decisivo para a superação das limitações atuais. Mais do que mensurar força ou tempo de contato, tais dispositivos devem incorporar parâmetros que reflitam a dinâmica real dos tecidos, incluindo aspectos relacionados à hidratação, à viscoelasticidade e à heterogeneidade superficial, aproximando o ambiente experimental das condições fisiológicas.

A incorporação de tecnologias digitais tende a intensificar essa transformação. Sistemas capazes de monitorar, em tempo contínuo, a evolução das interações entre material e mucosa podem redefinir a forma como os ensaios são conduzidos e interpretados. A possibilidade de integração de múltiplos parâmetros em uma mesma análise reduz a dependência de inferências indiretas e amplia a robustez dos dados, ao mesmo tempo em que favorece a construção de bases comparáveis em diferentes contextos experimentais.

No entanto, qualquer avanço tecnológico perde consistência na ausência de referências compartilhadas. A padronização, nesse sentido, deve ser compreendida como um processo de construção coletiva, orientado não pela rigidez, mas pela definição de critérios mínimos que permitam a interpretação cruzada de resultados. A validação de métodos, a definição de parâmetros operacionais e a consolidação de guias técnicos constituem etapas fundamentais para reduzir a fragmentação atualmente observada, sem comprometer a capacidade de adaptação a diferentes realidades experimentais.

Paralelamente, a ampliação do acesso à infraestrutura e à capacitação técnica permanece como condição indispensável para que esses avanços não se restrinjam a centros isolados. A construção de redes colaborativas mais equilibradas, o compartilhamento de recursos e o fortalecimento de iniciativas de formação especializada são elementos centrais para mitigar desigualdades e promover maior integração entre grupos de pesquisa.

À medida que esses eixos se articulam, delinea-se a transição para um novo estágio na investigação da mucoadesão, caracterizado pela convergência entre desenvolvimento tecnológico, consistência metodológica e aplicabilidade clínica. Essa transição, no entanto, não ocorrerá de forma espontânea. Ela depende de um reposicionamento crítico da comunidade científica, capaz de reconhecer que as limitações atuais não representam falhas pontuais, mas indícios de um modelo que demanda revisão.

Mais do que propor soluções isoladas, impõe-se a construção de uma agenda orientada ao desenvolvimento de ferramentas, protocolos e abordagens que consigam refletir, com maior fidelidade, a complexidade dos sistemas mucoadesivos. Somente a partir dessa reorganização será possível avançar em direção a resultados que não apenas sejam reprodutíveis e comparáveis, mas que também apresentem relevância clínica efetiva.

## **8 PARA ONDE CAMINHA A AVALIAÇÃO DA MUCOADESÃO**

A análise desenvolvida ao longo deste capítulo permite compreender que os desafios associados à mucoadesão não se limitam a aspectos técnicos ou operacionais, mas refletem uma condição mais ampla de fragmentação metodológica e insuficiência instrumental. A coexistência de múltiplas abordagens, aliada à ausência de referências consolidadas, evidencia um campo que ainda se encontra em processo de estruturação, no qual diferentes estratégias convivem sem plena convergência.

Assim, a variabilidade observada na realização de ensaios mucoadesivos, não pode ser atribuída exclusivamente às características dos sistemas mucoadesivos, mas deve ser interpretada à luz das condições em que os testes são conduzidos. A influência da interface de contato, as adaptações instrumentais, as limitações de infraestrutura e as desigualdades no acesso a recursos configuram um cenário no qual a produção de conhecimento é indissociável das condições materiais que a sustentam.

Vale ressaltar que o avanço na área deixa de depender apenas da otimização de formulações e passa a exigir uma revisão crítica das bases experimentais que orientam sua avaliação. A persistência de métodos adaptados, aliada à ausência de soluções tecnológicas dedicadas, limita a capacidade de gerar dados comparáveis e de consolidar parâmetros com relevância aplicada.

Ao mesmo tempo, a convergência dos entraves discutidos aponta para uma direção clara. A necessidade de integração entre teoria, metodologia e instrumentação não se apresenta como uma escolha, mas como condição para a maturidade do campo. A construção de abordagens mais consistentes depende da capacidade de articular esses elementos de forma coerente, reduzindo a distância entre o fenômeno biológico e sua representação experimental.

Nessa ótica, a inovação assume um papel estruturante, não apenas como vetor de avanço tecnológico, mas como mecanismo de reorganização do próprio modo de produzir conhecimento. O desenvolvimento de dispositivos específicos, a incorporação de tecnologias digitais e a construção de referências compartilhadas configuram caminhos complementares para a superação das limitações atuais.

Assim, mais do que encerrar uma discussão, este capítulo aponta para um movimento em curso. A avaliação da mucoadesão encontra-se em um momento de transição, no qual as limitações existentes deixam de ser apenas obstáculos e passam a atuar como catalisadores de transformação. O modo como essas demandas serão respondidas definirá não apenas a evolução metodológica da área, mas também sua capacidade de gerar impacto clínico e translacional.

## REFERÊNCIAS

1. Ahuja A, Lee R, Joshi YM. Advances and challenges in the high-pressure rheology of complex fluids. *Adv Colloid Interface Sci.* 2021;294:102472. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102472>
2. Alaei S, Omid Y, Omidian H. In vitro evaluation of adhesion and mechanical properties of oral thin films. *Eur J Pharm Sci.* 2021;166:105965. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2021.105965>
3. Al-Smadi K, Ali M, Zhu J, et al. Advances in characterization of transdermal and topical products using texture analyzer systems. *AAPS PharmSciTech.* 2025;26:157. <https://doi.org/10.1208/s12249-025-03148-x>
4. Back JH, Kwon Y, Roldão JC, Yu Y, Kim HJ, Gierschner J, et al. Synthesis of solvent-free acrylic pressure-sensitive adhesives via visible-light-driven photocatalytic radical polymerization without additives. *Green Chem.* 2020;22:8289–8297. <https://doi.org/10.1039/D0GC02807J>
5. Chen J, Li S, Wang X, Fang L, Huang D, Ke L, et al. Synthesis and characterization of pressure-sensitive adhesives based on a naphthyl curing agent. *Polymers.* 2023;15:4516. <https://doi.org/10.3390/polym15234516>
6. Fitzgerald DM, Colson YL, Grinstaff MW. Synthetic pressure-sensitive adhesives for biomedical applications. *Prog Polym Sci.* 2023;142:101692. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2023.101692>
7. Jawadi Z, Yang C, Haidar ZS, Santa Maria PL, Massa S. Bio-inspired mucoadhesive polymers for drug delivery applications. *Polymers.* 2022;14:5459. <https://doi.org/10.3390/polym14245459>
8. Kinloch AJ. *Adhesion and adhesives: science and technology.* Dordrecht: Springer Science & Business Media; 2012. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-7764-9>
9. Mapari S, Mestry S, Mhaske ST. Developments in pressure-sensitive adhesives: a review. *Polym Bull.* 2021;78:4075–4108. <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03305-1>
10. Mozelewska K, Antosik AK. Influence of silicone additives on the properties of pressure-sensitive adhesives. *Materials.* 2022;15:5713. <https://doi.org/10.3390/ma15165713>
11. Pandey V, Fleury A, Villey R, Creton C, Ciccotti M. Linking peel and tack performances of pressure-sensitive adhesives. *Soft Matter.* 2020;16:3267–3275. <https://doi.org/10.1039/C9SM02172H>
12. Patel VF, Liu F, Brown MB. Advances in oral transmucosal drug delivery. *J Control Release.* 2011;153:106–116. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2011.01.027>
13. Smart JD. The basics and underlying mechanisms of mucoadhesion. *Adv Drug Deliv Rev.* 2005;57:1556–1568.
14. 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.

15. Vanukuru S, Steele F, Porfiryeva NN, Sosnik A, Khutoryanskiy VV. Functionalisation of chitosan with methacryloyl and crotonoyl groups as a strategy to enhance its mucoadhesive properties. *Eur J Pharm Biopharm.* 2024;205:114575. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2024.114575>