

Silanização da Superfície do Laminado Cerâmico na Cimentação de Lentes de Contato Dentais

Mecanismo de acoplamento, tipos de silano, efeito do calor pós-silanização e durabilidade da união

Série "Fases da Cimentação dos Laminados Cerâmicos" — Artigo 3

Resumo

A silanização é a etapa química que dá sentido ao condicionamento ácido do laminado cerâmico: o silano é um agente de acoplamento bifuncional que une a sílica exposta pelo ácido fluorídrico (HF) à matriz orgânica do cimento resinoso. Sem ele, a microrretenção criada pelo HF é apenas física e a união tende a ser insuficiente e pouco durável. Este trabalho revisa o mecanismo de ação do silano (hidrólise, condensação e formação de ligações siloxano), os tipos de produto disponíveis (pré-hidrolisados de frasco único, de dois componentes, silanos contendo MDP e primers/adesivos universais), e — sobretudo — a evidência sobre como otimizar a etapa: tempo de reação, secagem, e o efeito do tratamento térmico pós-silanização (jato de ar quente ou estufa) na potencialização e na durabilidade da união. A fundamentação baseia-se em artigos indexados na PubMed. Conclui-se que a silanização não é um gesto acessório, mas um determinante de longevidade: a combinação HF + silano supera cada etapa isolada, o calor pós-silanização tende a aumentar a resistência de união ao favorecer a reação de condensação e evaporar solventes e subprodutos, e a degradação da interface silano/resina no ambiente oral permanece o principal desafio de durabilidade a ser gerenciado pelo protocolo.

Palavras-chave: silano; agente de acoplamento; condicionamento de superfície; ligação siloxano; tratamento térmico; resistência de união; durabilidade.

1. Introdução

Nos dois primeiros artigos desta série, a superfície interna (intaglio) do laminado cerâmico foi condicionada com HF e, em seguida, limpa de precipitados e contaminantes. Chega-se agora ao passo que transforma esse preparo físico em adesão química efetiva: a silanização. É comum subestimá-la, tratando-a como um simples "passar do silano". A evidência, porém, mostra que a forma de aplicar o silano — qual produto, por quanto tempo, com que secagem e a que temperatura — altera de modo relevante a resistência e a durabilidade da união.

O silano cumpre uma função que nenhuma outra etapa substitui: ele é a ponte molecular entre dois mundos quimicamente incompatíveis — a cerâmica inorgânica (rica em sílica) e a resina orgânica do cimento. Por isso, mesmo um condicionamento ácido impecável produz união limitada se a silanização for omitida ou malfeita. Estudos clássicos demonstram que o HF isolado não atinge a resistência máxima; é a associação HF + silano que entrega o melhor desempenho, segundo a PubMed.

Na descrição clínica do projeto, a silanização aparece entre a limpeza pós-HF e a aplicação do cimento resinoso fotopolimerizável (ver Referências). Este artigo detalha o porquê e o como dessa etapa.

Objetivo deste artigo

Explicar o mecanismo de acoplamento do silano; distinguir os tipos de produto e suas implicações clínicas; revisar a evidência sobre tempo, secagem e tratamento térmico pós-silanização; e situar o problema da durabilidade da interface — tudo aplicado às lentes de contato dentais e ancorado na PubMed.

2. Mecanismo de ação do silano

Os silanos usados em odontologia são, em geral, organosilanos bifuncionais — tipicamente o 3-metacriloxipropiltrimetoxissilano (MPS). A molécula tem duas extremidades quimicamente distintas, e é essa dupla natureza que explica sua função de acoplamento.

2.1 As duas extremidades da molécula

- Extremidade silanol (após hidrólise dos grupos metoxi): reage com os grupos hidroxila da sílica exposta na superfície da cerâmica, formando ligações covalentes do tipo siloxano (Si–O–Si).
- Extremidade metacrilato: possui dupla ligação de carbono capaz de copolimerizar com os monômeros do adesivo e do cimento resinoso durante a polimerização.

Assim, uma única molécula amarra quimicamente a cerâmica de um lado e a resina do outro. Lung e Matinlinna, em revisão de referência, descrevem o silano como promotor de adesão eficaz para unir compósito resinoso a cerâmicas à base de sílica, ressaltando que ele não se liga eficazmente a materiais sem sílica — daí a necessidade de outras estratégias (p.ex. silicatização/sílica coating) nesses casos, segundo a PubMed.

2.2 Hidrólise e condensação

Para reagir com a sílica, os grupos metoxi do silano precisam primeiro ser hidrolisados a silanol — reação que depende de água/umidade e meio levemente ácido. Em seguida, ocorre a condensação: os silanóis reagem entre si e com a superfície, liberando água e álcool como subprodutos e consolidando a rede de ligações siloxano. Esse detalhe tem consequência prática direta: a remoção dos subprodutos (água, álcool, oligômeros não ligados) e a maturação da reação de condensação são justamente o que o tratamento térmico pós-silanização favorece, como se verá na Seção 4.

Em uma frase

O HF cria a superfície; o silano cria a química. Uma extremidade do silano agarra a sílica da cerâmica, a outra copolimeriza com a resina — e é essa ponte molecular que converte microrretenção em adesão durável.

3. Tipos de silano e produtos

Nem todos os silanos são iguais, e a forma de apresentação influencia o desempenho e o manuseio.

Tipo	Características e implicações (PubMed)
Pré-hidrolisado (frasco único)	Mais prático; já vem hidrolisado e pronto para uso. Vida útil limitada após aberto — silanóis condensam no frasco com o tempo, reduzindo a reatividade.
Dois componentes (silano + ativador, misturados na hora)	Hidrólise feita no momento do uso, o que pode oferecer maior reatividade e estabilidade. Em estudo com pinos de fibra, o silano de dois componentes superou os pré-hidrolisados à temperatura ambiente.
Silano contendo MDP / primers cerâmicos	Combinam silano com monômero fosfatado (10-MDP), úteis em substratos mistos (vítreos e não vítreos). Ampliam a versatilidade do passo.
Adesivos universais contendo silano	Trazem silano na formulação do adesivo. Em dissilicato de lítio, a silanização adicional após HF ainda melhorou a união de um adesivo universal contendo silano — ou seja, o silano dedicado tende a agregar.
Primer autocondicionante (silano + ácido)	Funde condicionamento e silanização em um passo (ver Artigo 1). Pode igualar HF+silano em cenários específicos, porém com topografia menos pronunciada.

Nota: a escolha do silano deve considerar o substrato, o cimento e o fluxo de trabalho. Independentemente do tipo, a aplicação correta (tempo, secagem, calor) influencia o resultado tanto quanto o produto.

4. O fator decisivo: tratamento térmico pós-silanização

Talvez o achado mais consistente — e clinicamente subaproveitado — sobre silanização seja o efeito do calor aplicado após a aplicação do silano. Aquecer a superfície silanizada (com jato de ar quente ou em estufa) favorece a reação de condensação, evapora água, álcool e subprodutos, e remove oligômeros de silano não ligados, deixando uma camada de silano mais estável e reativa para receber o adesivo/cimento.

4.1 Cerâmica feldspática

Corazza e colaboradores avaliaram tratamentos térmicos pós-silanização em cerâmica feldspática CAD/CAM (VITA Mark II), comparando silanização a 20 °C, secagem em estufa a 77 °C e lavagem com água quente, antes e após ciclagem mecânica. A secagem em estufa a 77 °C produziu a maior resistência de microtração (cerca de 18 MPa), superando tanto o grupo HF de referência quanto a silanização a 20 °C; já a lavagem com água quente reduziu a união e não foi recomendada. O envelhecimento não afetou significativamente os valores, segundo a PubMed.

4.2 Cerâmica reforçada por leucita

Fabianelli e colaboradores, em cerâmica feldspática reforçada por leucita, observaram que os grupos que incluíram secagem do silano com ar quente (100 °C) alcançaram adesão significativamente maior do que os sem aquecimento; o pré-tratamento com HF também elevou a união. Os autores chegaram a sugerir que o reforço da reação de condensação pelo ar quente foi tão expressivo que poderia, em certas condições, reduzir a dependência do passo de HF, segundo a PubMed — um indício forte do peso do calor sobre a química do silano.

4.3 Dissilicato de lítio

Em dissilicato de lítio, Baratto e colaboradores verificaram que o protocolo de silanização afetou a união conforme o cimento: lavar/secar com água e/ou ar quente aumentou a resistência apenas do cimento dual, com a sequência água quente + ar quente entre as melhores condições, segundo a PubMed. Colares e colaboradores, ao reparar dissilicato de lítio com compósito, compararam secagem do silano a temperatura ambiente e com ar morno ($45 \pm 5^\circ\text{C}$) após HF: ambas produziram união elevada e estatisticamente semelhante entre si, e muito superior ao jateamento — reforçando que HF + silano é a via de eleição e que o ar morno é, no mínimo, seguro, segundo a PubMed.

4.4 Síntese e meta-análise

Bourgi e colaboradores, em meta-análise de estudos in vitro sobre o uso de ar quente para evaporação de solventes em odontologia adesiva, concluíram que o jato de ar quente aumentou significativamente o desempenho de união de sistemas adesivos e que efeito semelhante é observado quando um silano é submetido a tratamento térmico antes da cimentação de cerâmicas vítreas, segundo a PubMed. O conjunto da evidência converge: aquecer o silano após a aplicação tende a potencializar a união.

Recomendação prática (calor)

Após aplicar o silano e aguardar a reação, secar com ar aquecido (ou estufa, em laboratório) tende a aumentar a resistência de união ao favorecer a condensação e remover solventes/subprodutos. Lavar a superfície silanizada com água quente, ao contrário, pode prejudicar — não é recomendado.

5. Aplicação correta: tempo, camadas e secagem

Além do tipo de produto e do calor, alguns cuidados operacionais determinam o sucesso da silanização.

- Tempo de reação: o silano precisa de tempo para hidrolisar e reagir com a superfície. Muitos protocolos indicam aguardar cerca de 1 minuto após a aplicação — tempo descrito também no protocolo clínico de referência deste projeto.
- Secagem/volatilização: deve-se evaporar o solvente com ar (preferencialmente aquecido) para deixar uma fina camada reativa; o excesso de silano úmido forma uma camada espessa e fraca.
- Número de camadas: a aplicação de duas camadas finas é descrita em protocolos clínicos para garantir cobertura, desde que cada uma seja adequadamente seca.
- Janela de contaminação: após silanizar, evitar tocar ou contaminar a superfície; qualquer contato reintroduz o problema tratado no Artigo 2 (limpeza pós-HF).
- Validade do frasco: silanos pré-hidrolisados perdem reatividade com o tempo após abertos; frascos antigos ou turvos devem ser descartados.

6. Durabilidade da interface silano/resina

A silanização eleva a união no curto prazo, mas o desafio de longo prazo é a estabilidade dessa interface no ambiente oral. Lung e Matinlinna destacam que o principal problema clínico do uso de silanos é a degradação da união ao longo do tempo na cavidade oral, e que os silanos atuais, embora cumpram os requisitos mínimos da prática, ainda não são ideais quanto à durabilidade — daí o desenvolvimento de novos métodos de condicionamento e de novas formulações, segundo a PubMed.

A degradação ocorre sobretudo por hidrólise das ligações siloxano pela água e por oligômeros de silano não ligados que permanecem na interface. É exatamente aqui que o tratamento térmico pós-silanização mostra seu valor adicional: ao consolidar a condensação e remover material não reagido, ele não só aumenta a resistência inicial como tende a tornar a interface mais resistente à degradação. A combinação de boa técnica (camada fina, calor, ausência de contaminação) com um cimento e uma fotopolimerização adequados — temas dos próximos artigos — é o que sustenta a longevidade observada clinicamente para laminados cerâmicos bem executados.

O elo silencioso da longevidade

A maior parte das descolagens tardias começa numa interface adesiva que foi forte no dia da cimentação, mas se degradou. Uma silanização bem-feita — fina, aquecida, não contaminada — é uma das defesas mais baratas contra essa degradação.

7. Articulação com as etapas vizinhas

7.1 Antes: condicionamento e limpeza

A silanização depende de uma superfície bem condicionada (sílica exposta, Artigo 1) e limpa (livre de precipitados e contaminantes, Artigo 2). Silanizar sobre superfície contaminada por saliva/fosfatos desperdiça a etapa, pois os fosfatos competem pelos sítios que o silano ocuparia. A sequência condicionar → limpar → silanizar é, portanto, indivisível.

7.2 Depois: adesivo e cimento

Sobre a camada silanizada, muitos protocolos aplicam uma fina camada de adesivo (sistema de união) para melhorar o molhamento e a copolimerização com o cimento. Em seguida, o cimento resinoso preenche as microrretenções e copolimeriza com a extremidade metacrilato do silano. A escolha do cimento (foto ou dual) e a qualidade da fotopolimerização — próximos temas da série — fecham a cadeia que a silanização articula quimicamente.

8. Protocolo passo a passo (síntese operacional)

A sequência abaixo posiciona a silanização no fluxo de cimentação. Parâmetros devem seguir o material e o fabricante.

1. Condicionar a superfície interna com HF (ver Artigo 1) e remover precipitados (ver Artigo 2).
2. Após eventual try-in, descontaminar a superfície e secar (ver Artigo 2).

3. Aplicar o silano em camada fina e uniforme (uma a duas camadas, conforme o produto/protocolo).
4. Aguardar o tempo de reação recomendado (frequentemente ~1 minuto).
5. Secar com ar aquecido para volatilizar solventes e favorecer a condensação (evitar lavagem com água quente).
6. Aplicar fina camada de adesivo, se previsto no protocolo (sem fotopolimerizar isoladamente, conforme o sistema).
7. Cimentar com cimento resinoso adequado, sob isolamento, e fotopolimerizar conforme protocolo.

Ponto crítico

Silano em camada espessa, úmido e sem aquecimento é uma das causas ocultas de união fraca. Camada fina + secagem com ar quente + superfície não contaminada é a tríade que faz a silanização entregar o que promete.

9. Correspondência com o protocolo clínico de referência (Borille)

Os trabalhos de Borille que embasam este projeto descrevem, na sequência de cimentação adesiva, a aplicação do silano no interior da peça cerâmica por cerca de 1 minuto e a secagem com ar por alguns segundos, com o objetivo explícito de potencializar a ligação entre o cimento e a peça cerâmica — etapa posicionada entre o condicionamento com HF e a aplicação do sistema adesivo. No relato de caso de substituição de laminados, a sequência clínica das dez lentes inclui a aplicação de duas camadas de silano sobre a superfície interna seca, após o condicionamento com HF e antes do adesivo e do cimento resinoso fotopolimerizável.

Esse protocolo está alinhado com a evidência aqui revisada quanto ao tempo de reação e à aplicação em camadas finas e secas. À luz dos achados sobre tratamento térmico, um refinamento contemporâneo possível — coerente com os estudos de Corazza, Fabianelli e Bourgi — é a secagem do silano com ar aquecido para favorecer a condensação e a durabilidade da interface, mantendo-se o cuidado de não lavar a superfície silanizada com água quente.

10. Conclusão

- A silanização é a etapa química que converte a microrretenção do HF em adesão durável, por meio de um agente bifuncional que une a sílica da cerâmica à resina do cimento.
- A combinação HF + silano supera consistentemente cada etapa isolada; omitir o silano compromete a união mesmo com condicionamento impecável.
- O tipo de silano importa (pré-hidrolisado, dois componentes, com MDP, em adesivos universais), mas a técnica de aplicação pesa tanto quanto o produto.
- O tratamento térmico pós-silanização (ar quente/estufa) tende a aumentar a resistência de união ao favorecer a condensação e remover solventes/subprodutos; lavar com água quente prejudica.
- A durabilidade da interface silano/resina é o principal desafio de longo prazo; camada fina, aquecimento e ausência de contaminação ajudam a preservá-la.

- A silanização só atinge seu potencial integrada ao condicionamento e à limpeza (antes) e ao adesivo/cimento e fotopolimerização (depois) — temas dos demais artigos da série.

Referências

Artigos científicos recuperados da base PubMed (com DOI, quando disponível):

1. Lung CYK, Matinlinna JP. Aspects of silane coupling agents and surface conditioning in dentistry: an overview. *Dent Mater.* 2012;28(5):467-477. DOI: [10.1016/j.dental.2012.02.009](https://doi.org/10.1016/j.dental.2012.02.009)
2. Corazza PH, Cavalcanti SCM, Queiroz JR, Bottino MA, Valandro LF. Effect of post-silanization heat treatments of silanized feldspathic ceramic on adhesion to resin cement. *J Adhes Dent.* 2013;15(5):473-479. DOI: [10.3290/j.jad.a29592](https://doi.org/10.3290/j.jad.a29592)
3. Fabianelli A, Pollington S, Papacchini F, Goracci C, Cantoro A, Ferrari M, van Noort R. The effect of different surface treatments on bond strength between leucite reinforced feldspathic ceramic and composite resin. *J Dent.* 2010;38(1):39-43. DOI: [10.1016/j.jdent.2009.08.010](https://doi.org/10.1016/j.jdent.2009.08.010)
4. Baratto SSP, Spina DRF, Gonzaga CC, Cunha LF, Furuse AY, Baratto Filho F, Correr GM. Silanated Surface Treatment: Effects on the Bond Strength to Lithium Disilicate Glass-Ceramic. *Braz Dent J.* 2015;26(5):474-477. DOI: [10.1590/0103-6440201300354](https://doi.org/10.1590/0103-6440201300354)
5. Colares RCR, Neri JR, Souza AMB, Pontes KMF, Mendonça JS, Santiago SL. Effect of surface pretreatments on the microtensile bond strength of lithium-disilicate ceramic repaired with composite resin. *Braz Dent J.* 2013;24(4):349-352. DOI: [10.1590/0103-6440201301960](https://doi.org/10.1590/0103-6440201301960)
6. Novais VR, Simamoto Júnior PC, Rontani RMP, Correr-Sobrinho L, Soares CJ. Bond strength between fiber posts and composite resin core: influence of temperature on silane coupling agents. *Braz Dent J.* 2012;23(1):8-14. DOI: [10.1590/s0103-64402012000100002](https://doi.org/10.1590/s0103-64402012000100002)
7. Bourgi R, Hardan L, Cuevas-Suárez CE, Scavello F, Mancino D, Kharouf N, Haikel Y. The Use of Warm Air for Solvent Evaporation in Adhesive Dentistry: A Meta-Analysis of In Vitro Studies. *J Funct Biomater.* 2023;14(5):285. DOI: [10.3390/jfb14050285](https://doi.org/10.3390/jfb14050285)
8. Maier E, Bordihn V, Belli R, Taschner M, Petschelt A, Lohbauer U, Zorzin J. New Approaches in Bonding to Glass-Ceramic: Self-Etch Glass-Ceramic Primer and Universal Adhesives. *J Adhes Dent.* 2019;21(3):209-217. DOI: [10.3290/j.jad.a42546](https://doi.org/10.3290/j.jad.a42546)
9. Al-Thagafi R, Al-Zordk W, Saker S. Influence of Surface Conditioning Protocols on Reparability of CAD/CAM Zirconia-reinforced Lithium Silicate Ceramic. *J Adhes Dent.* 2016;18(2):135-141. DOI: [10.3290/j.jad.a35909](https://doi.org/10.3290/j.jad.a35909)

Páginas de referência do projeto (conteúdo clínico correspondente a esta fase):

10. BORILLE, M. Protocolo de cimentação adesiva de laminados cerâmicos. Lente de Contato Dental — Porto Alegre. Disponível em: <https://www.lentedecontatodental.poa.br/protocolo-cimentacao-lente-de-contato-dental/>. Acesso em: jun. 2026.
11. BORILLE, M. Cimentação da lente de contato dental: a etapa decisiva. Lente de Contato Dental — Porto Alegre. Disponível em: <https://www.lentedecontatodental.poa.br/cimentacao-lente-de-contato-dental/>. Acesso em: jun. 2026.

Trabalhos do autor (TCCs — São Leopoldo Mandic, 2021):

- 12.** BORILLE, M. B. Laminados cerâmicos na reabilitação estética conservadora: revisão de literatura. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Odontologia Estética) — Faculdade São Leopoldo Mandic, Porto Alegre, 2021. Disponível em: <https://www.lentedecontatodental.poa.br/wp-content/uploads/2026/06/tcc-laminados-ceramicos-revisao-2021-borille.pdf>. DOI: [10.5281/zenodo.20670402](https://doi.org/10.5281/zenodo.20670402). Acesso em: jun. 2026.
- 13.** BORILLE, M. B. Reabilitação estética conservadora na substituição de laminados cerâmicos: um relato de caso. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Dentística Restauradora) — Faculdade São Leopoldo Mandic, Porto Alegre, 2021. Disponível em: <https://www.lentedecontatodental.poa.br/wp-content/uploads/2026/06/tcc-substituicao-laminados-ceramicos-2021-borille.pdf>. DOI: [10.5281/zenodo.20669726](https://doi.org/10.5281/zenodo.20669726). Acesso em: jun. 2026.

Nota de atribuição: a fundamentação científica deste trabalho baseia-se em artigos recuperados da base PubMed, com os respectivos DOIs indicados nas Referências.