

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ODONTOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ODONTOLOGIA

Elisa Gomes de Albuquerque

**Influência da estratégia de silanização e do condicionamento do esmalte na
resistência de união e estabilidade cromática de facetas de dissilicato de lítio**

Juiz de Fora
2026

Elisa Gomes de Albuquerque

Influência da estratégia de silanização e do condicionamento do esmalte na resistência de união e estabilidade cromática de facetas de dissilicato de lítio

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Odontologia da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Clínica Odontológica. Área de concentração: Clínica odontológica

Orientador: Prof. Dr. Bruno Salles Sotto-Maior

Coorientador: Prof. Dr. Marcos de Oliveira Barceleiro

Juiz de Fora

2026

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Albuquerque, Elisa Gomes de .

Influência da estratégia de silanização e do condicionamento do esmalte na resistência de união e estabilidade cromática de facetas de dissilicato de lítio : Adesão e estabilidade cromática de facetas de dissilicato de lítio / Elisa Gomes de Albuquerque. -- 2026.
96 f.

Orientador: Bruno Salles Sotto-Maior

Coorientador: Marcos de Oliveira Barceiro

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Odontologia. Programa de Pós-Graduação em Odontologia, 2026.

1. Adesão. 2. Cimentos resinosos . 3. Silanos. 4. Laminados cerâmicos. 5. Estabilidade cromática. I. Sotto-Maior, Bruno Salles, orient. II. Barceiro, Marcos de Oliveira, coorient. III. Título.

Elisa Gomes de Albuquerque

Influência da estratégia de sinalização e do condicionamento do esmalte na resistência de união e estabilidade cromática de facetas de dissilicato de lítio

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Odontologia da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Odontologia. Área de concentração: Clínica Odontológica.

Aprovada em 30 de setembro de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Bruno Salles Sotto Maior - Orientador e Presidente da banca
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

Prof. Dr. Marcos de Oliveira Barceleiro - Coorientador
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. Ronaldo Luis Almeida de Carvalho - Membro titular interno
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

Prof.^a Dr.^a Laísa Araujo Cortines Laxe - Membro titular interno
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

Prof. Dr. Luiz Augusto da Costa Poubel - Membro titular externo
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof.ª Dr.ª Larissa Maria Assad Cavalcante - Membro titular externo

Universidade Federal Fluminense - UFF

Juiz de Fora, 18/09/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Salles Sotto Maior, Professor(a)**, em 30/09/2026, às 18:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ronaldo Luis Almeida de Carvalho, Professor(a)**, em 30/09/2026, às 19:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Augusto da Costa Poubel, Usuário Externo**, em 30/09/2026, às 19:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Laisa Araujo Cortines Laxe, Professor(a)**, em 30/09/2026, às 19:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcos de Oliveira Barcelheiro, Usuário Externo**, em 01/10/2026, às 15:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Larissa Maria Assad Cavalcante, Usuário Externo**, em 01/10/2026, às 16:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **3230792** e o código CRC **068908DA**.

DEDICATÓRIA

Ao meu marido, **Bernardo**, por ter sido quem primeiro me mostrou os caminhos da docência e da pesquisa e, sobretudo, a seriedade e o compromisso que eles exigem. Professor que admiro profundamente e que me enche de orgulho, foi através de você que compreendi o quanto o conhecimento é capaz de abrir portas, atravessar fronteiras e nos levar a lugares que antes pareciam distantes. Sua competência, humildade e dedicação são, para mim, referências que ultrapassam a vida acadêmica. Obrigada por caminhar ao meu lado e por me inspirar, tantas vezes, pelo exemplo.

Às minhas filhas, **Olívia e Alice**, que nasceram durante este doutorado e, sem saber, transformaram completamente o significado desta caminhada. Com vocês, aprendi sobre o verdadeiro valor do tempo e descobri que somos capazes de ser muito mais do que imaginamos. Vocês me fizeram conhecer em mim uma força que eu ainda não sabia que tinha e me ensinaram sobre coragem, fé e sobre seguir em frente mesmo diante dos nossos medos e obstáculos. No fim de tudo, entre tantos títulos e conquistas, talvez uma das coisas que eu mais deseje seja que, um dia, ao olharem para a minha trajetória, vocês sintam orgulho da mulher e da mãe que escolhi ser.

Aos meus pais, **Salvador e Vania**, por serem minhas primeiras e mais importantes referências de vida. Pela fé, pela simplicidade e pela força com que sempre conduziram seus caminhos. Por nunca medirem esforços para estar ao meu lado e por me fazerem ter a certeza de que, independentemente da direção que eu escolha seguir, sempre terei onde encontrar apoio, amor e segurança. Muito do que sou e da forma como escolho viver vem de vocês.

Ao meu coorientador, **Marcos Barceleiro**, que há tantos anos faz parte da minha trajetória e que me ensinou grande parte do que sei sobre o mundo acadêmico. Ao longo desse caminho, além de professor e referência profissional, tornou-se um amigo querido, daqueles que sabemos que estarão por perto quando precisarmos. Obrigada por me incentivar a acreditar mais em mim, a ter coragem, ambição e determinação para perseguir aquilo que desejo; por me mostrar que desistir não deve ser a primeira opção diante das dificuldades e, principalmente, que a vida merece ser vivida com

entusiasmo, dedicação e propósito, fazendo aquilo que amamos e buscando o que verdadeiramente nos faz felizes.

Ao meu orientador, **Bruno Sotto Maior**, pela paciência e pelo acolhimento ao longo desta trajetória. Pela seriedade com que conduziu este trabalho e pela firmeza sempre na medida certa, fundamentais para que eu pudesse crescer, amadurecer e chegar até aqui.

A vocês, dedico não apenas esta tese, mas tudo o que precisei me tornar para concluí-la.

AGRADECIMENTOS

À minha equipe de pesquisa da **Universidade Federal Fluminense – UFF, campus Nova Friburgo**, liderada pelo professor **Barceleiro**, e da qual fazem parte **Guto, Fernanda Calazans, Rafael e Chane**, além de tantos colegas e amigos que tive a felicidade de encontrar ao longo dessa trajetória, iniciada ainda no mestrado. Minha gratidão por contribuírem de maneira tão significativa para a minha formação e por ajudarem a lapidar, ao longo dos anos, o meu desenvolvimento como docente e pesquisadora. Obrigada pelo incentivo constante, pela disponibilidade em ajudar sempre que precisei, pela força, pelo carinho, pelas conversas e por todos os ensinamentos compartilhados. Fazer parte deste grupo, que tanto contribuiu para quem me tornei profissionalmente, é, sem dúvida, motivo de grande orgulho para mim.

Ao **Programa de Pós-Graduação em Odontologia da Universidade Federal de Juiz de Fora**, por todo o conhecimento e pelas oportunidades proporcionadas ao longo desta caminhada. Em especial, aos professores **Márcio e Robert**, que, desde a graduação, contribuíram para despertar em mim o interesse pela pesquisa e me ensinaram, pelo exemplo, a importância da seriedade e do compromisso com a ciência. Obrigada pelas ideias, pelo conhecimento generosamente compartilhado e por fazerem parte de diferentes momentos da minha formação acadêmica.

Aos amigos que estiveram presentes e tornaram essa caminhada mais leve e possível, em especial **Lucas e Mateus**, que não mediram esforços para me ajudar durante a pesquisa e estiveram ao meu lado também nas disciplinas, atividades e desafios da pós-graduação. Obrigada pela disponibilidade, pela parceria e pela generosidade ao longo desse percurso. Ter pessoas com quem dividir não apenas o trabalho, mas também as dúvidas, dificuldades e conquistas, fez toda a diferença.

Aos funcionários do **Programa de Pós-Graduação em Odontologia da UFJF**, pela atenção, disponibilidade e gentileza em todos os momentos em que precisei de auxílio. Em especial, à **Valéria**, pela forma sempre prestativa e atenciosa com que me recebeu e me ajudou ao longo desta trajetória.

A todos que, de alguma forma, estiveram presentes nesses anos e contribuíram para que este trabalho se tornasse possível, deixo aqui a minha sincera gratidão.

*“Caminhante, não há caminho, faz-se o
caminho ao andar.” — Antonio Machado*

RESUMO

A cimentação adesiva de facetas de dissilicato de lítio depende de duas interfaces, cerâmica–cimento e cimento–esmalte. Os sistemas resinosos universais propõem simplificá-la ao incorporar o silano ao adesivo e ao dispensar o ácido fosfórico no esmalte, mas não se sabe se essa simplificação preserva a resistência de união e a estabilidade de cor. Esta tese avaliou a influência do condicionamento do esmalte e da estratégia de silanização sobre esses dois desfechos em facetas cimentadas com sistema resinoso universal. Foram realizados dois experimentos *in vitro* randomizados e cegados. No mecânico, 40 conjuntos esmalte bovino–cerâmica foram distribuídos em quatro grupos ($n = 10$), em delineamento fatorial 2×2 : esmalte sem condicionamento (E–) ou condicionado com ácido fosfórico a 37% (E+), e cerâmica tratada apenas com o adesivo universal contendo silano (SI; Scotchbond Universal Plus) ou com aplicação prévia de primer cerâmico separado (SS; RelyX Ceramic Primer). Após a cimentação com RelyX Universal e 10.000 ciclos térmicos, avaliaram-se resistência ao cisalhamento e modos de falha. No cromático, 20 conjuntos com esmalte condicionado foram distribuídos entre SI e SS ($n = 10$) e armazenados em água por 90 dias, com cálculo das alterações de cor (ΔL^* , Δa^* , Δb^* , ΔE_{ab} e ΔE_{00}). O condicionamento do esmalte ($\eta^2 p = 0,841$) e o primer separado ($\eta^2 p = 0,631$) aumentaram a resistência de união ($p < 0,001$), sem interação significativa ($p = 0,162$). As médias variaram de $5,95 \pm 1,08$ MPa (E–/SI) a $25,82 \pm 4,58$ MPa (E+/SS). Os modos de falha diferiram entre os grupos ($p = 0,001$), predominando a interface esmalte–cimento sem condicionamento e a cimento–cerâmica com ácido fosfórico. Na avaliação de cor, observaram-se diferenças nominais exploratórias em ΔL^* ($p = 0,042$) e Δa^* ($p = 0,008$), sem diferença em Δb^* , ΔE_{ab} ($p = 0,363$) ou ΔE_{00} ($p = 0,277$), e o TOST exploratório foi compatível com equivalência global de cor. Conclui-se que, para os materiais testados, o adesivo universal isolado não reproduziu o desempenho mecânico do primer cerâmico separado e que omitir o condicionamento do esmalte reduziu marcadamente a resistência de união, enquanto a alteração global de cor foi semelhante. Manter o ácido fosfórico no esmalte e o primer separado maximiza a resistência de união em laboratório.

Palavras-chave: Facetas dentárias. Dissilicato de lítio. Cimentos de resina. Silanos. Estabilidade de cor.

ABSTRACT

Adhesive cementation of lithium disilicate veneers depends on two interfaces, ceramic–cement and cement–enamel. Universal resin systems aim to simplify it by incorporating silane into the adhesive and dispensing with phosphoric acid etching of enamel, but it is unclear whether this simplification preserves bond strength and color stability. This thesis evaluated the influence of enamel etching and silanization strategy on these two outcomes in veneers cemented with a universal resin system. Two randomized in vitro experiments were conducted with blinded outcome assessment. In the mechanical experiment, 40 bovine enamel–lithium disilicate assemblies were allocated to four groups ($n = 10$) in a 2×2 factorial design: non-etched enamel (E–) or enamel etched with 37% phosphoric acid (E+), and ceramic treated only with the silane-containing universal adhesive (SI; Scotchbond Universal Plus) or with prior application of a separate ceramic primer (SS; RelyX Ceramic Primer). After cementation with RelyX Universal and 10,000 thermal cycles, shear bond strength and failure modes were evaluated. In the color experiment, 20 assemblies, all with etched enamel, were allocated to SI or SS ($n = 10$) and stored in water for 90 days, and color changes (ΔL^* , Δa^* , Δb^* , ΔE_{ab} , and ΔE_{00}) were calculated. Both enamel etching ($p < 0.001$; $\eta^2 p = 0.841$) and the separate primer ($p < 0.001$; $\eta^2 p = 0.631$) increased bond strength, with no significant interaction between the factors ($p = 0.162$). Mean values ranged from 5.95 ± 1.08 MPa (E–/SI) to 25.82 ± 4.58 MPa (E+/SS). Failure modes differed among groups ($p = 0.001$): without etching, failures at the enamel–cement interface predominated; with phosphoric acid, failures occurred mainly at the cement–ceramic interface. In the color evaluation, nominal exploratory differences were observed in ΔL^* ($p = 0.042$) and Δa^* ($p = 0.008$), with no difference in Δb^* , ΔE_{ab} ($p = 0.363$), or ΔE_{00} ($p = 0.277$); an exploratory equivalence analysis (TOST) was compatible with global equivalence between the strategies. In conclusion, for the materials tested, the universal adhesive used alone did not reproduce the mechanical performance of the separate ceramic primer, and omitting enamel etching markedly reduced bond strength, whereas the global color change was similar between the strategies. In the laboratory setting, maintaining phosphoric acid etching of enamel and the separate ceramic primer maximizes bond strength.

Keywords: Dental veneers. Lithium disilicate. Resin cements. Silanes. Color stability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Interfaces adesivas na cimentação de facetas.....	15
Figura 2 – Interface adesiva no esmalte sem e com condicionamento	24
Figura 3 – Limiares de perceptibilidade e de aceitabilidade de cor	29
Figura 4 – Visão geral dos experimentos	35
Figura 5 – Preparo dos espécimes dentários	37
Figura 6 – Obtenção dos espécimes cerâmicos.....	38
Figura 7 – Grupos experimentais dos dois experimentos.....	39
Figura 8 – Sequência de tratamento das superfícies e cimentação	41
Figura 9 – Envelhecimento por termociclagem.....	42
Figura 10 – Ensaio de resistência de união ao cisalhamento.....	42
Figura 11 – Avaliação instrumental da cor.....	44
Figura 12 – Fluxo do experimento de estabilidade cromática	45
Figura 13 – Médias da resistência de união	47
Figura 14 – Valores individuais da resistência de união.....	48
Figura 15 – Magnitude dos efeitos e médias marginais	49
Figura 16 – Interação entre condicionamento do esmalte e silanização	50
Figura 17 – Distribuição dos modos de falha.....	51
Figura 18 – Alterações nos parâmetros CIELAB	53
Figura 19 – Análise exploratória de equivalência (TOST)	53

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 1 – Comparação entre as fórmulas CIELAB e CIEDE2000	30
Quadro 2 – Materiais utilizados nos experimentos	36
Quadro 3 – Distribuição dos grupos do experimento de resistência de união.....	38
Quadro 4 – Distribuição dos grupos do experimento de estabilidade cromática.....	43
Quadro 5 – Síntese interpretativa dos principais achados	54
Quadro 6 – Convergência com estudos independentes.....	56
Tabela 1 – Estatística descritiva da resistência de união	47
Tabela 2 – Análise de variância de dois fatores	48
Tabela 3 – Médias marginais da resistência de união.....	49
Tabela 4 – Distribuição dos modos de falha.....	50
Tabela 5 – Alterações nos parâmetros CIELAB	51
Tabela 6 – Diferenças entre as estratégias e magnitude dos efeitos	52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1 Restaurações cerâmicas e indicações do dissilicato de lítio	14
2.2 Cimentação adesiva de cerâmicas vítreas	15
2.3 Tratamento da superfície do dissilicato de lítio.....	15
2.4 Fundamentos químicos do silano	16
2.5 Fatores que afetam o desempenho do silano	17
2.6 Silanos de um e dois frascos	17
2.7 Primers cerâmicos convencionais e autocondicionantes	18
2.8 Adesivos universais	19
2.9 Estabilidade do silano integrado ao adesivo universal	19
2.10 Cimentos resinosos	20
2.11 Conceito de cimento resinoso universal	21
2.12 Associação entre cimento resinoso universal e adesivo universal.....	21
2.13 Silano integrado versus silano aplicado separadamente	22
2.14 Adesão ao esmalte na cimentação de facetas	24
2.15 Interação entre o tratamento da cerâmica e do esmalte	25
2.16 Polimerização através do dissilicato de lítio	25
2.17 Envelhecimento da interface adesiva	26
2.18 Termociclagem como método de envelhecimento artificial	26
2.19 Métodos de avaliação da resistência de união	27
2.20 Propriedades ópticas do dissilicato de lítio	28
2.21 Influência do cimento na cor de facetas	28
2.22 Sistema CIELAB e avaliação de ΔE_{ab}	29
2.23 Possível influência do silano sobre a cor.....	30
2.24 Evidências clínicas e laboratoriais	30
2.25 Síntese crítica e lacunas do conhecimento	31
3 PROPOSIÇÃO	33
3.1 Proposição geral	33
3.2 Proposições específicas	33
3.3 Hipóteses nulas	34
4 MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	35

4.2 CÁLCULO AMOSTRAL	35
4.3 MATERIAIS EMPREGADOS.....	36
4.4 EXPERIMENTO 1 – RESISTÊNCIA DE UNIÃO	36
4.4.1 Seleção e preparo dos dentes.....	36
4.4.2 Confecção dos espécimes cerâmicos	37
4.4.3 Randomização e grupos experimentais	38
4.4.4 Tratamento das superfícies	39
4.4.5 Cimentação e fotoativação	40
4.4.6 Envelhecimento por termociclagem.....	41
4.4.7 Ensaio de resistência de união.....	42
4.4.8 Análise dos modos de falha.....	42
4.5 EXPERIMENTO 2 – ESTABILIDADE CROMÁTICA	43
4.5.1 Delineamento e grupos.....	43
4.5.2 Mensuração da cor	43
4.5.3 Envelhecimento e cálculo da alteração cromática.....	44
4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	45
5 RESULTADOS.....	47
5.1 Resistência de união	47
5.1.1 Análise descritiva.....	47
5.1.2 Verificação dos pressupostos e análise fatorial.....	48
5.1.3 Magnitude dos efeitos e médias marginais	48
5.2 Modos de falha	50
5.3 Estabilidade cromática.....	51
6 DISCUSSÃO	54
7 CONCLUSÕES	60
REFERÊNCIAS	61
APÊNDICE A – ARTIGO CIENTÍFICO	68

1 INTRODUÇÃO

As facetas cerâmicas consolidaram-se como uma alternativa conservadora para a reabilitação estética de dentes anteriores, especialmente quando há necessidade de modificar forma, proporção, alinhamento e cor com preservação da estrutura dental. Entre os materiais disponíveis, o dissilicato de lítio apresenta combinação favorável de resistência mecânica, translucidez e capacidade de reprodução óptica, além de resultados clínicos satisfatórios quando corretamente indicado e submetido a protocolos adesivos adequados (Aslan et al., 2019; Imburgia et al., 2021; Klein et al., 2025). Essas características permitem a confecção de facetas delgadas, mas também tornam o resultado mais dependente do substrato, do cimento e da integridade das interfaces adesivas.

A cimentação representa, portanto, uma etapa determinante do tratamento. Diferentemente de restaurações que contam com retenção macromecânica expressiva, facetas dependem predominantemente da união entre a cerâmica, o cimento resinoso e o esmalte. O sucesso do conjunto não decorre de uma única superfície, mas da continuidade de duas interfaces: cerâmica–cimento e cimento–esmalte. Deficiências em qualquer uma delas podem favorecer concentração de tensões, degradação hidrolítica, alteração marginal ou fratura. A perda de adesão ao material cerâmico, por exemplo, compromete o comportamento à fadiga de restaurações de dissilicato de lítio, demonstrando que a qualidade da cimentação participa do desempenho estrutural da restauração (Pilecco et al., 2023).

Na superfície do dissilicato de lítio, o protocolo convencional associa condicionamento com ácido fluorídrico e aplicação de silano. O ácido dissolve seletivamente a matriz vítrea, aumenta a área de contato e produz retenções micromecânicas; o silano promove molhabilidade e atua como agente bifuncional entre a fase inorgânica rica em sílica e os metacrilatos do material resinoso. A estabilidade dessa ligação depende da composição do silano, de sua hidrólise, da evaporação do solvente e da formação de ligações siloxano. Embora o mecanismo seja bem estabelecido, a etapa adicional aumenta o número de procedimentos, o tempo clínico e a possibilidade de variações operatórias (Maruo et al., 2017; Prochnow et al., 2018; Porto et al., 2024).

Na interface com o esmalte, o condicionamento com ácido fosfórico permanece uma estratégia previsível para produzir microporosidades, elevar a energia superficial e favorecer a penetração da resina. Adesivos universais podem ser utilizados em modo autocondicionante, mas sua acidez geralmente não produz no esmalte o mesmo padrão obtido pelo ácido fosfórico. Estudos laboratoriais demonstraram melhora da resistência e da durabilidade de união quando o esmalte é previamente condicionado (Tsujiimoto et al., 2016; Beltrami et al., 2016; Suda et al., 2018). A supressão dessa etapa, embora torne o protocolo mais simples, pode reduzir a segurança da interface justamente em restaurações cuja retenção depende majoritariamente do esmalte.

A busca por procedimentos mais rápidos e menos sensíveis à técnica impulsionou o desenvolvimento de adesivos e cimentos denominados universais. Esses materiais reúnem monômeros funcionais, solventes, água e diferentes componentes destinados a ampliar sua aplicação a substratos dentários e restauradores. Em alguns adesivos, o silano foi incorporado ao mesmo frasco, criando a expectativa de que o primer cerâmico separado pudesse ser eliminado. Paralelamente, os cimentos resinosos universais passaram a oferecer modalidades autoadesiva e adesiva, sendo esta

última realizada em associação com o adesivo indicado pelo fabricante. Essa versatilidade é clinicamente atraente, mas o termo “universal” descreve possibilidades de uso e não comprova equivalência entre todas as estratégias (Maravić et al., 2023; Andrews et al., 2023; Benkeser et al., 2024)

A integração do silano em um adesivo universal envolve um desafio químico. Em um único frasco, o agente de união convive com água, solventes e monômeros ácidos, ambiente que pode favorecer hidrólise prematura e autocondensação durante o armazenamento. Como consequência, a fração de silano disponível para reagir com a cerâmica pode ser reduzida. Estudos demonstraram limitações da estabilidade e da efetividade do silano incorporado e observaram melhora da união a cerâmicas vítreas após a aplicação prévia de um primer separado (Yoshihara et al., 2016; Cardenas et al., 2017; Yao et al., 2018; Chen et al., 2019). Entretanto, o comportamento varia entre formulações e tecnologias, impedindo que os resultados de um produto sejam automaticamente extrapolados para outro.

O RelyX Universal foi desenvolvido para utilização isolada ou em associação com o Scotchbond Universal Plus. O adesivo contém silano e integra uma proposta de sistema simplificado para diferentes substratos. Sob a perspectiva clínica, a questão relevante não é apenas se os produtos podem ser utilizados em conjunto, mas se o silano incorporado ao adesivo reproduz o desempenho obtido com o RelyX Ceramic Primer quando o sistema é empregado na cimentação de facetas de dissilicato de lítio. Informações técnicas do fabricante descrevem a lógica química e as indicações do sistema, mas a decisão de eliminar uma etapa consolidada requer evidência experimental independente e específica para a combinação de materiais.

Além da retenção, o desempenho estético precisa ser considerado. Facetas delgadas permitem que a cor do substrato, do cimento e das interfaces participe intensamente do resultado visual. Alterações na matriz resinosa podem decorrer do grau de conversão, dos sistemas iniciadores, da sorção de água e da degradação dos componentes orgânicos. A marca, a tonalidade e a composição do cimento influenciam a cor final e sua estabilidade após o envelhecimento (Dede et al., 2017; Lee e Choi, 2018; Elkhishen et al., 2022). No caso do RelyX Universal, evidências independentes apontaram sorção de água superior à de alguns cimentos comparadores e associação entre sorção e alteração de cor, reforçando a necessidade de avaliar seu comportamento óptico (Benkeser et al., 2024).

A estratégia de silanização também pode participar indiretamente desse processo. Uma interface mais contínua e adequadamente acoplada pode reduzir microespaços e limitar a penetração de água; em sentido oposto, regiões hidrofílicas ou incompletamente unidas podem favorecer plastificação, hidrólise e mudanças no índice de refração. O silano não deve ser interpretado como pigmento, mas como um componente capaz de modificar molhabilidade, homogeneidade e estabilidade da interface. Apesar da plausibilidade desse mecanismo, a possível relação entre silano integrado ou separado e estabilidade cromática tem recebido atenção muito menor do que a resistência de união.

A avaliação de cor deve considerar tanto a magnitude total quanto a direção da mudança. O sistema CIELAB permite registrar variações de luminosidade e dos eixos cromáticos por ΔL^* , Δa^* e Δb^* , enquanto ΔE_{ab} resume a distância global entre duas medidas. O CIEDE2000 incorpora correções de luminosidade, croma e matiz para se

aproximar da percepção visual humana (Sharma et al., 2005). A apresentação conjunta de ΔE_{ab} , ΔE_{00} e dos componentes individuais oferece interpretação mais completa, pois alterações totais de magnitude semelhante podem resultar de trajetórias cromáticas diferentes. Os valores devem ainda ser interpretados à luz de limiares de perceptibilidade e aceitabilidade, sem substituir a inferência estatística entre os grupos (Paravina et al., 2015).

A literatura disponível é predominantemente laboratorial e frequentemente avalia apenas uma das interfaces ou um único desfecho. Estudos sobre silano integrado concentram-se, em geral, na união à cerâmica, enquanto investigações ópticas focalizam espessura e translucidez da cerâmica, tonalidade do cimento ou modo de polimerização. Permanece, assim, uma lacuna na análise integrada de como a simplificação do sistema RelyX Universal–Scotchbond Universal Plus se comporta quando são considerados simultaneamente o tratamento do esmalte, a silanização da cerâmica, a resistência após envelhecimento e a estabilidade cromática.

A inovação desta tese reside no delineamento construído para responder a essa lacuna. No experimento mecânico, a combinação fatorial entre condicionamento ou não do esmalte e silano integrado ou aplicado separadamente permitiu distinguir a contribuição das duas interfaces e testar se seus efeitos interagem. Em experimento óptico complementar, a comparação entre as estratégias de silanização foi acompanhada pelo registro individual das coordenadas CIELAB e pelo cálculo de ΔE_{ab} e ΔE_{00} após envelhecimento em água. A associação desses desfechos amplia a análise além da pergunta restrita sobre resistência imediata e aproxima a investigação das exigências simultaneamente mecânicas e estéticas das facetas.

A relevância científica e clínica do estudo decorre de avaliar criticamente uma simplificação proposta para uma etapa decisiva do tratamento. Reduzir passos pode diminuir tempo e variabilidade operatória, mas somente é justificável quando não compromete propriedades essenciais. Ao comparar a modalidade simplificada com a aplicação adicional do primer e ao considerar as duas interfaces do conjunto, esta tese produz evidência específica para uma decisão clínica frequente: confiar apenas no silano integrado ou preservar a silanização separada e o condicionamento fosfórico do esmalte.

Diante desse contexto, o estudo investigou o desempenho do cimento resinoso RelyX Universal associado ao Scotchbond Universal Plus na cimentação de facetas de dissilicato de lítio ao esmalte bovino. Foram avaliados os efeitos do condicionamento do esmalte e da estratégia de silanização sobre a resistência de união e os modos de falha, bem como a influência do silano separado sobre a estabilidade cromática.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A cimentação de restaurações cerâmicas adesivas constitui uma etapa determinante para seu desempenho mecânico, biológico e estético. Nas cerâmicas vítreas, o resultado depende da formação de duas interfaces diferentes e interdependentes: a união entre cerâmica e cimento resinoso e a união entre cimento e substrato dentário. A simplificação dos materiais restauradores permitiu reunir funções antes distribuídas entre diferentes produtos, dando origem a adesivos e cimentos denominados universais. Entretanto, a redução do número de etapas não garante, por si só, equivalência química ou clínica em relação aos protocolos convencionais.

Nesse contexto, uma questão relevante é saber se o silano incorporado a um adesivo universal, quando utilizado em associação com um cimento resinoso universal, é capaz de substituir a aplicação de um agente silano separado sobre o dissilicato de lítio. A resposta exige compreender a microestrutura da cerâmica, o mecanismo de ação do silano, a composição dos sistemas universais, a adesão ao esmalte, a polimerização do cimento, a degradação hidrolítica e os métodos empregados para avaliar resistência e estabilidade cromática. Este capítulo organiza essas bases até alcançar a lacuna específica investigada na tese.

2.1 Restaurações cerâmicas e indicações do dissilicato de lítio

As cerâmicas odontológicas são utilizadas para restaurar forma, função e aparência por apresentarem estabilidade química, biocompatibilidade e propriedades ópticas próximas às dos tecidos dentários. Sua classificação pode considerar composição, microestrutura e método de processamento. Cerâmicas predominantemente vítreas oferecem elevada translucidez e possibilidade de condicionamento ácido; materiais policristalinos apresentam maior conteúdo cristalino e comportamento distinto diante dos tratamentos de superfície. Essa diferença é fundamental porque o protocolo adesivo deve ser selecionado de acordo com a fase vítrea disponível (Dede et al., 2017; Lee e Choi, 2018; Elkhishen et al., 2022)

O dissilicato de lítio é uma cerâmica vítrea reforçada por cristais alongados dispersos em matriz rica em sílica. Esses cristais desviam ou dificultam a propagação de trincas, enquanto a fase vítrea permite o condicionamento por ácido fluorídrico e a interação com agentes silanos. O equilíbrio entre resistência e translucidez ampliou suas indicações para facetas, inlays, onlays, coroas e outras restaurações unitárias, produzidas por injeção ou por sistemas CAD/CAM (Dede et al., 2017; Lee e Choi, 2018; Elkhishen et al., 2022)

O material é oferecido em diferentes níveis de translucidez, opacidade e saturação de cor. Apresentações mais translúcidas favorecem integração óptica quando o substrato apresenta cor adequada; versões menos translúcidas aumentam a capacidade de mascaramento, mas reduzem a passagem da luz. A seleção depende da espessura disponível, da cor do remanescente, do espaço para o cimento e da intensidade da alteração cromática que precisa ser corrigida (Dede et al., 2017; Lee e Choi, 2018; Elkhishen et al., 2022)

Nas facetas, a pequena espessura possibilita preparos conservadores, porém aumenta a dependência da adesão e torna visível a contribuição óptica do substrato e do cimento. A falha de união pode comprometer retenção e distribuição de tensões,

enquanto diferenças de cor ou degradação do cimento podem alterar o resultado estético; por isso, desempenho mecânico e estabilidade cromática devem ser considerados conjuntamente desde o planejamento da cimentação. (Dede et al., 2017; Lee e Choi, 2018; Elkhishen et al., 2022)

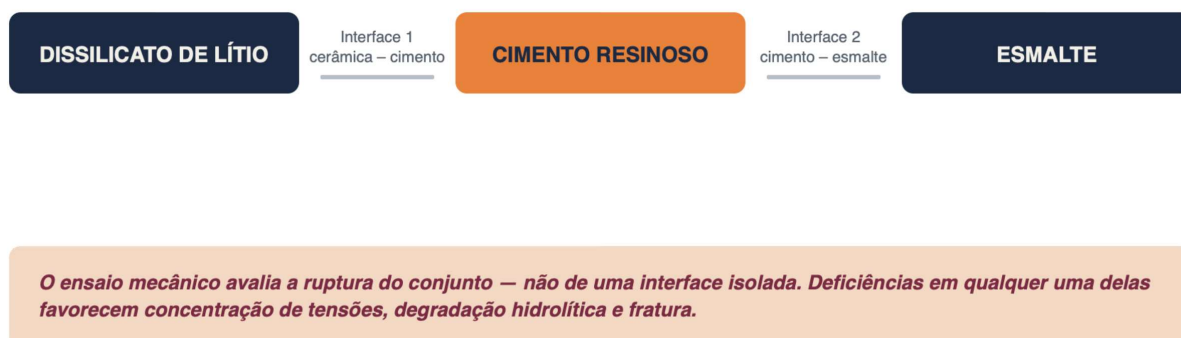
2.2 Cimentação adesiva de cerâmicas vítreas

A cimentação adesiva combina retenção micromecânica, interação química e polimerização do cimento resinoso. Na superfície do dissilicato, a fase vítrea é seletivamente dissolvida para gerar microretenções, às quais se soma a ligação promovida pelo silano. No lado dentário, o sistema adesivo deve infiltrar ou interagir com esmalte e dentina. A restauração une, portanto, materiais com composição, módulo de elasticidade, coeficiente de expansão térmica e comportamento hidrofílico diferentes (Hooshmand et al., 2002; Ferracane, 2006)

A qualidade da interface cerâmica-cimento depende da limpeza da superfície, do condicionamento ácido, da silanização e da molhabilidade pelo material resinoso. A interface cimento-dente, por sua vez, é influenciada pelo substrato disponível, pelo padrão de condicionamento, pela umidade, pela espessura da película adesiva e pela compatibilidade entre adesivo e cimento. Uma etapa adequada em apenas um dos lados não compensa necessariamente uma interface deficiente no lado oposto (Heintze et al., 2015) A Figura 1 esquematiza essas duas interfaces.

Figura 1 – Interfaces adesivas envolvidas na cimentação de facetas de dissilicato de lítio

A cimentação adesiva de facetas não conta com retenção macromecânica: o sucesso depende da continuidade entre duas interfaces diferentes e interdependentes.



Fonte: elaboração própria (2026).

Além da retenção, a cimentação contribui para o comportamento estrutural do conjunto. A perda de adesão modifica a distribuição de tensões e pode reduzir a resistência à fadiga de restaurações de dissilicato cimentadas, mostrando que a interface não funciona apenas como meio de retenção, mas como parte do sistema restaurador (Pilecco et al., 2023). Assim, comparações entre protocolos devem controlar simultaneamente cerâmica, cimento, adesivo, substrato e condições de polimerização.

2.3 Tratamento da superfície do dissilicato de lítio

O ácido fluorídrico reage com a fase vítrea rica em sílica e expõe a microestrutura cristalina, aumentando a área superficial e a energia disponível para o contato com o primer e o cimento. O padrão de condicionamento é determinado pela concentração do ácido, pelo tempo de aplicação, pelo estado de cristalização, pelo acabamento da superfície e pela composição do produto cerâmico. Por isso, não existe um único tempo aplicável indistintamente a todas as cerâmicas vítreas (Heintze et al., 2015)

Concentração e tempo devem produzir retenção suficiente sem causar perda estrutural excessiva. O aumento da rugosidade não é linearmente acompanhado por maior resistência de união. Condicionamento prolongado pode aprofundar defeitos e gerar áreas fragilizadas, enquanto tempos insuficientes podem deixar uma superfície pouco retentiva. Estudos morfológicos confirmam alterações químicas e topográficas após o ácido fluorídrico, ao passo que o ácido fosfórico isolado não exerce o mesmo efeito sobre a matriz vítrea (Maruo et al., 2017). Em modelo de fadiga, concentrações intermediárias apresentaram comportamento mais favorável do que a concentração mais elevada, reforçando que maior agressividade não significa melhor desempenho (Prochnow et al., 2018). (Heintze et al., 2015)

Estudo recente que variou o tempo de aplicação mostrou que rugosidade, energia livre de superfície e resistência adesiva precisam ser interpretadas em conjunto, porque a superfície mais rugosa não necessariamente oferece a melhor união (Porto et al., 2024). O protocolo deve seguir a indicação específica do fabricante da cerâmica e ser relatado com concentração, tempo, forma de lavagem e condição prévia da superfície.

Depois do condicionamento, a lavagem abundante remove o ácido e parte dos produtos de reação. Resíduos cristalinos podem permanecer e interferir na molhabilidade e no acesso do silano à superfície. Métodos de limpeza pós-condicionamento incluem lavagem prolongada, aplicação de ácido fosfórico como agente de limpeza e banho ultrassônico. A evidência não sustenta que todas essas etapas devam ser combinadas indiscriminadamente; o ponto metodológico essencial é padronizar a limpeza para que o efeito atribuído ao silano não seja, na verdade, consequência de resíduos diferentes entre os grupos (Nishiyama et al., 1995; Aoki et al., 2014; Chen et al., 2019)

2.4 Fundamentos químicos do silano

Os agentes silanos são moléculas bifuncionais capazes de estabelecer uma ponte entre a fase inorgânica da cerâmica e a fase orgânica do cimento resinoso. Um silano metacrilato convencional, como o γ -metacriloxipropiltrimetoxissilano, apresenta grupos alcóxi ligados ao silício e um grupo organofuncional metacrilato. Após a hidrólise, os grupos alcóxi originam silanóis capazes de interagir com grupos hidroxila da superfície rica em sílica; o grupo metacrilato permanece disponível para copolimerizar com os monômeros do material resinoso (Nishiyama et al., 1995; Aoki et al., 2014; Chen et al., 2019)

A hidrólise transforma o silano em uma espécie reativa, mas a reação deve ocorrer em extensão e momento adequados. Os silanóis podem condensar com a cerâmica e formar ligações siloxano, ou condensar entre si, originando oligômeros. Uma quantidade controlada de condensação contribui para a formação da película,

enquanto autocondensação excessiva antes da aplicação reduz moléculas disponíveis para reagir diretamente com a superfície (Nishiyama et al., 1995; Aoki et al., 2014; Chen et al., 2019)

A camada formada não é uniforme. Estudos de interface descrevem uma região interna mais fortemente adsorvida ou quimicamente ligada e camadas externas com maior proporção de moléculas fracamente adsorvidas. Essas camadas externas são mais suscetíveis à remoção pela água, enquanto uma região interna fina e adequadamente condensada tende a ser mais estável (Nishiyama et al., 1995; Hooshmand et al., 2002). Dessa forma, o benefício do silano depende menos de produzir uma película espessa e mais de obter uma interface fina, contínua e reativa.

Após a aplicação, o tempo de espera favorece interação e evaporação do solvente. A secagem com ar auxilia a remover água, álcool e excesso de material, evitando uma camada espessa que possa atuar como região mecanicamente fraca. A seguir, o grupo metacrilato participa da polimerização do adesivo ou do cimento, completando a ligação entre cerâmica e matriz resinosa (Hooshmand et al., 2002; Ferracane, 2006).

2.5 Fatores que afetam o desempenho do silano

A efetividade do silano é influenciada por pH, teor de água, solvente, concentração, temperatura, tempo decorrido desde a ativação, armazenamento e modo de aplicação. O meio ácido favorece a hidrólise inicial, mas também pode acelerar reações de autocondensação. O grau de dissociação do ácido modifica a velocidade de hidrólise e a molhabilidade do primer, demonstrando que acidez não deve ser interpretada simplesmente como benéfica ou prejudicial (Aoki et al., 2014).

Água é necessária para a hidrólise, mas o excesso pode aumentar a instabilidade durante o armazenamento e favorecer degradação da interface. Solventes alcoólicos melhoram o espalhamento e facilitam a evaporação; sua proporção altera a viscosidade e a espessura da película. A exposição repetida do frasco ao ambiente, variações de temperatura e armazenamento inadequado também podem modificar a composição efetiva do produto antes do término formal da validade (Hooshmand et al., 2002; Ferracane, 2006)

O tempo de aplicação deve permitir cobertura completa e interação com a superfície. Secagem insuficiente pode deixar solvente e água aprisionados; ar excessivamente intenso ou aplicado precocemente pode deslocar o primer antes da formação da camada. Reaplicações não previstas podem aumentar a espessura e incorporar frações fracamente adsorvidas. Assim, os tempos de espera e secagem não são detalhes operacionais, mas parte do mecanismo químico (Hooshmand et al., 2002; Ferracane, 2006)

Contaminação por saliva, resíduos de prova, silicone ou produtos do condicionamento reduz o contato do silano com a cerâmica. Quando a restauração é contaminada após a prova, o protocolo de descontaminação deve ser compatível com o material. Em estudos comparativos, validade, armazenamento, limpeza e técnica precisam permanecer constantes para que diferenças sejam atribuídas à composição do primer (Nishiyama et al., 1995; Aoki et al., 2014; Chen et al., 2019)

2.6 Silanos de um e dois frascos

Nos silanos de um frasco, os componentes necessários à ativação permanecem reunidos durante o armazenamento. A principal vantagem é a simplicidade clínica, pois o produto pode ser aplicado diretamente. Entretanto, a hidrólise e a autocondensação continuam ocorrendo no frasco, e a quantidade de moléculas reativas pode mudar com o tempo, a temperatura, o conteúdo de água e a exposição ao ambiente (Nishiyama et al., 1995; Aoki et al., 2014; Chen et al., 2019)

Nos sistemas de dois frascos, o silano não hidrolisado e a solução ativadora são mantidos separados e misturados imediatamente antes do uso. Essa estratégia reduz o período entre a ativação e a aplicação, oferecendo maior controle sobre a reatividade. A desvantagem é a inclusão de uma etapa adicional, sujeita a variação de proporção, mistura e tempo de utilização (Nishiyama et al., 1995; Aoki et al., 2014; Chen et al., 2019)

A separação dos componentes fornece uma justificativa química para maior estabilidade de armazenamento, mas não prova superioridade clínica universal dos sistemas de dois frascos. Produtos de um frasco dentro da validade, corretamente armazenados e validados para a combinação restauradora podem apresentar desempenho adequado. Da mesma forma, um sistema de dois frascos mal proporcionado ou aplicado incorretamente não garante uma interface ideal para esta tese, a distinção contextualiza a estabilidade do silano, sem substituir a comparação central entre silano separado e silano integrado ao adesivo universal. (Yoshihara et al., 2016; Yao et al., 2018; Yao et al., 2021)

2.7 Primers cerâmicos convencionais e autocondicionantes

O protocolo convencional para o tratamento da superfície do dissilicato de lítio associa ácido fluorídrico e silano aplicado em etapas distintas. Essa sequência permite controlar o condicionamento, lavar seus produtos e aplicar um primer especificamente formulado para o acoplamento químico. Sua principal limitação é a sensibilidade técnica e a necessidade de manusear o ácido fluorídrico fora da cavidade bucal. (Brunetto et al., 2024; Lima et al., 2024a)

Primers cerâmicos autocondicionantes combinam agentes capazes de modificar a superfície e promover silanização em uma única etapa. A simplificação reduz manipulações e elimina uma sequência separada de aplicação, lavagem do ácido fluorídrico e silano. Entretanto, esses materiais não devem ser confundidos com adesivos universais contendo silano: o primer autocondicionante foi desenvolvido especificamente para a cerâmica, enquanto o adesivo universal precisa atender simultaneamente diferentes substratos (Yoshihara et al., 2016; Yao et al., 2018; Yao et al., 2021)

Estudos individuais apresentam resultados variados. Alguns encontraram maior resistência para o protocolo convencional, enquanto outros observaram desempenho semelhante após armazenamento prolongado e ausência de benefício ao acrescentar, de maneira indiscriminada, ácido fluorídrico ou silano ao primer autocondicionante (Lopes et al., 2019; Siqueira et al., 2019). Revisões sistemáticas e meta-análises indicaram desempenho médio comparável entre primers autocondicionantes específicos e ácido fluorídrico seguido de silano, mas também destacaram heterogeneidade de produtos, métodos e envelhecimento (Lima et al., 2024a; Brunetto et al., 2024).

Essas evidências sustentam os primers autocondicionantes como alternativa quando a combinação produto-cimento é validada. Contudo, não respondem diretamente se o silano integrado a um adesivo universal substitui um agente dedicado, porque concentração, pH, finalidade e componentes adicionais são diferentes. (Brunetto et al., 2024; Lima et al., 2024a)

2.8 Adesivos universais

Adesivos universais foram desenvolvidos para permitir estratégias convencional, autocondicionante ou de condicionamento seletivo e para interagir com diferentes materiais restauradores. Em geral, reúnem monômeros funcionais, metacrilatos, água, solventes orgânicos, iniciadores e partículas ou agentes de acoplamento. Muitas formulações contêm 10-MDP, capaz de interagir com cálcio e óxidos metálicos; algumas incorporam silano para ampliar a indicação às cerâmicas vítreas (Nishiyama et al., 1995; Aoki et al., 2014; Chen et al., 2019)

A versatilidade concentra em um único frasco componentes com necessidades químicas distintas. Água é necessária para ionizar monômeros ácidos, solventes precisam manter a mistura e evaporar durante a aplicação, e o silano deve conservar reatividade. O pH adequado para o condicionamento e a interação com substratos dentários pode não ser o meio mais favorável à estabilidade de um silano convencional durante o armazenamento (Yoshihara et al., 2016; Yao et al., 2018; Yao et al., 2021)

A compatibilidade com cimentos duais também merece atenção. Adesivos mais ácidos podem interferir na polimerização química de determinados cimentos quando componentes ácidos permanecem em contato com aminas do sistema iniciador. Fabricantes podem incluir co-iniciadores ou recomendar um ativador específico. Por isso, a associação entre adesivo e cimento deve ser avaliada como sistema e seguir instruções da combinação, evitando extrapolação entre marcas. (Heintze et al., 2015)

O termo universal descreve amplitude de aplicação e não igualdade de composição. Resultados obtidos com uma formulação não devem ser generalizados para todas as demais, nem para versões anteriores e posteriores do mesmo produto. Mudanças na tecnologia do silano, no solvente ou nos iniciadores podem alterar seu comportamento mesmo quando o nome comercial permanece semelhante (Nishiyama et al., 1995; Aoki et al., 2014; Chen et al., 2019)

2.9 Estabilidade do silano integrado ao adesivo universal

A incorporação do silano elimina um frasco e reduz o tempo clínico, mas expõe a molécula a um meio ácido, aquoso e multicomponente durante todo o armazenamento. Estudos laboratoriais demonstraram que o pH ácido pode enfraquecer a efetividade de união do silano presente em adesivos universais, favorecendo hidrólise seguida de autocondensação antes de o material alcançar a cerâmica (Yao et al., 2018). Yoshihara et al. (2016) também identificaram limitações na efetividade e estabilidade de silano convencional incorporado a determinadas formulações universais.

Monômeros ácidos podem ainda interagir com grupos silanol, reduzindo a fração disponível para condensar com a superfície cerâmica. Água e solvente influenciam o

equilíbrio entre ativação e estabilidade, enquanto a evaporação após a aplicação determina a qualidade da película. Desse modo, a mera presença de silano na composição não informa sua concentração efetiva, estado de hidrólise ou capacidade de formar uma camada comparável à de um primer dedicado (Yoshihara et al., 2016; Yao et al., 2018; Yao et al., 2021)

Novas combinações de silanos procuram superar essas limitações. Formulação experimental baseada em tecnologia diferente manteve união à cerâmica sem pré-silanização e apresentou desempenho compatível com o uso de silano separado em algumas condições (Yao et al., 2021). Esses resultados demonstram que o problema não é intrínseco a todo silano integrado, mas dependente da molécula e do meio em que ela é armazenada.

A interpretação deve, portanto, ser específica ao produto e considerar tempo de armazenamento, envelhecimento do espécime e cimento associado. Dados de uma formulação antiga não devem ser usados automaticamente para descrever uma versão atualizada, mas a alegação de melhora química também precisa ser confirmada por estudos independentes do sistema comercial. (Yoshihara et al., 2016; Yao et al., 2018; Tannen et al., 2025)

2.10 Cimentos resinosos

Cimentos resinosos são materiais compostos por matriz orgânica, partículas de carga, pigmentos, iniciadores e componentes funcionais. Podem ser fotoativados, químicos ou duais e podem depender de um adesivo previamente aplicado ou conter monômeros capazes de interagir diretamente com o substrato. Viscosidade e espessura de película afetam assentamento e adaptação; carga e grau de conversão influenciam módulo, resistência, desgaste, sorção e solubilidade (Scotti et al., 2016; Borges et al., 2021; Lima et al., 2024b)

Cimentos fotoativados permitem maior controle do tempo de trabalho e são frequentemente escolhidos para facetas delgadas por sua estabilidade cromática. Sua limitação é a dependência da luz transmitida através da restauração. Cimentos duais combinam ativação luminosa e química, ampliando a conversão em áreas de menor acesso à luz, mas a formulação do componente químico pode repercutir na cor. O uso de aminas aromáticas foi associado ao amarelecimento em algumas formulações; sistemas amina-free foram desenvolvidos para reduzir esse risco, embora o comportamento continue dependente do produto (Yang et al., 2022). (Scotti et al., 2016; Borges et al., 2021; Lima et al., 2024b)

Cimentos autoadesivos contêm monômeros ácidos que interagem diretamente com o dente e simplificam o procedimento. Em comparação laboratorial, cimentos convencionais associados a adesivo podem apresentar união superior à dentina em determinadas condições (Miotti et al., 2020). Entretanto, estudos clínicos de restaurações indiretas não permitem reduzir o resultado ao tipo de cimento, porque desenho do preparo, substrato, restauração e acompanhamento interferem nas taxas de falha (Alvarenga et al., 2024).

A classificação contemporânea precisa reconhecer materiais que oferecem mais de uma estratégia de uso. Maravic et al. (2023) destacaram a inconsistência da terminologia e propuseram organizar os cimentos segundo mecanismo de união e

modo de aplicação. Essa distinção é particularmente relevante para os cimentos universais, que podem operar de maneira autoadesiva ou ser associados a um adesivo.

2.11 Conceito de cimento resinoso universal

O cimento universal procura reunir versatilidade de substrato e de estratégia adesiva. Em situações com retenção favorável, pode ser empregado no modo autoadesivo; quando maior adesão é necessária, pode ser combinado com um adesivo universal e, quando indicado, com primers específicos. A denominação não significa que o cimento contenha todos os agentes necessários para cada material nem que etapas de tratamento superficial sejam dispensáveis (Maravić et al., 2023; Andrews et al., 2023; Benkeser et al., 2024)

Formulações universais variam quanto aos monômeros funcionais, sistema iniciador, teor e tamanho de carga, viscosidade e mecanismos de interação com cerâmicas. Alguns cimentos incorporam monômeros capazes de interagir com materiais à base de sílica; em outros sistemas, a função de silanização é atribuída ao adesivo associado. Resultados de cimentação sem primer mostram que o comportamento após envelhecimento depende da química do produto, impedindo generalizações para a categoria (Awad et al., 2024).

A modalidade adesiva e a autoadesiva devem ser tratadas como protocolos diferentes do mesmo material. A adição do adesivo modifica a interação com esmalte e dentina, a espessura interfacial e a compatibilidade de polimerização. Na cerâmica, o uso de primer ou adesivo também altera a química da superfície. Portanto, indicar apenas o nome do cimento é insuficiente; estudos precisam relatar todos os componentes e etapas. (3M, 2020; Andrews et al., 2023; Rohr et al., 2022)

2.12 Associação entre cimento resinoso universal e adesivo universal

A associação entre cimento e adesivo universais correspondentes forma um sistema destinado a simplificar a cimentação em diferentes substratos. O adesivo pode intensificar a união ao esmalte e à dentina, atuar como primer para materiais restauradores e fornecer compatibilidade com a cura dual. Quando contém silano, pretende também tratar a superfície de cerâmicas vítreas após o condicionamento ácido. (3M, 2020; Rohr et al., 2022)

Essa lógica é atraente porque reduz trocas de produto e a possibilidade de omitir etapas. Entretanto, o desempenho deve ser avaliado no conjunto específico. Concentração e estabilidade do silano, acidez do adesivo, compatibilidade entre iniciadores, evaporação do solvente e composição do cimento podem produzir comportamentos diferentes entre sistemas aparentemente semelhantes (Nishiyama et al., 1995; Aoki et al., 2014; Chen et al., 2019)

Informações do fabricante são necessárias para definir o protocolo, os tempos e as combinações autorizadas, mas não equivalem a evidência comparativa independente. Estudos independentes devem verificar se a simplificação mantém resistência imediata, durabilidade e comportamento óptico, além de declarar doação de materiais

ou financiamento. Também é necessário distinguir versões do adesivo, pois resultados obtidos com uma formulação anterior não comprovam o desempenho de uma versão que utilize tecnologia de silano modificada (Dede et al., 2017; Lee e Choi, 2018; Elkhishen et al., 2022)

Em relação ao conjunto RelyX Universal Resin Cement e Scotchbond Universal Plus, a pergunta não é apenas se os produtos podem ser utilizados juntos, mas se o silano presente no adesivo produz uma interface equivalente àquela formada por um silano puro. Essa comparação deve manter constante o ácido fluorídrico, o cimento, a cerâmica, a fotoativação e o envelhecimento, modificando apenas a aplicação do silano separado (Maravić et al., 2023; Andrews et al., 2023; Benkeser et al., 2024)

2.13 Silano integrado versus silano aplicado separadamente

A pré-silanização consiste em aplicar um agente dedicado sobre a cerâmica condicionada antes do adesivo ou cimento. A etapa procura formar uma interface cerâmica-resina em condições químicas mais controladas, sem exigir que o silano permaneça estável em uma mistura ácida e aquosa contendo diversos monômeros. Em contrapartida, o silano integrado reduz etapas e pode apresentar desempenho adequado quando a formulação foi desenvolvida e validada para essa finalidade.

Estudos com adesivos universais contendo silano frequentemente observaram aumento da resistência de união quando foi acrescentado silano separado. Cardenas et al. (2017), Chen et al. (2019), Kim et al. (2021) e Almaskin et al. (2022) relataram benefícios da pré-silanização em diferentes protocolos. Em alguns estudos, a vantagem permaneceu após armazenamento ou termociclagem, indicando que a diferença não se limita ao estágio imediato.

Lee et al. (2017) ilustraram esse padrão ao comparar cinco protocolos em dissilicato de lítio: adesivo sem silano isoladamente; silano seguido do mesmo adesivo; ácido fluorídrico associado a silano e adesivo; adesivo multimodo contendo silano isoladamente; e ácido fluorídrico associado ao adesivo multimodo. O grupo tratado com ácido fluorídrico, silano dedicado e adesivo atingiu a maior resistência imediata ($27,1 \pm 6,9$ MPa), superando o adesivo multimodo isolado. Após a termociclagem, os autores concluíram que o silano incorporado ao adesivo não foi suficiente para manter uma união durável, mesmo quando precedido de condicionamento ácido. Esse desenho é relevante por permitir distinguir o papel do silano daquele desempenhado pelo condicionamento ácido, fatores que nem sempre são separados nos estudos da área.

Awad et al. (2023) forneceram uma comparação direta com a formulação de interesse desta tese. Os autores testaram o Scotchbond Universal Plus como agente único de silanização do dissilicato de lítio, comparando-o a um primer cerâmico dedicado (Monobond N), a um adesivo universal de geração anterior (Single Bond Universal) e a um controle sem silanização. O Scotchbond Universal Plus isolado atingiu $20,41 \pm 6,26$ MPa, valor superior ao controle ($8,47 \pm 3,11$ MPa) e ao adesivo de geração anterior ($10,65 \pm 3,50$ MPa), mas inferior ao primer dedicado ($32,21 \pm 4,49$ MPa; $p = 0,004$). Os autores concluíram que a associação dos silanos γ MPTES/APTES representa melhoria em relação à formulação anterior, embora não tenha alcançado

o desempenho da silanização separada. O resultado sustenta a distinção entre o silano integrado como categoria abstrata e o desempenho específico de cada formulação.

Estudos de durabilidade acrescentam outra dimensão à comparação. Silva et al. (2019) avaliaram a estabilidade da união resina-cerâmica após três meses de armazenamento em saliva artificial e 5.000 ciclos térmicos. Os resultados indicaram que o armazenamento reduziu a resistência e que o condicionamento com ácido fluorídrico foi necessário para a estabilidade da união; a presença de monômeros funcionais ácidos nos silanos, por si só, não determinou maior estabilidade. Outros estudos demonstraram que primer, adesivo e cimento podem responder de maneira diferente ao envelhecimento (Murakami et al., 2022; Yazigi et al., 2025). A comparação deve, portanto, considerar onde o silano é fornecido, sua química e os demais materiais integrantes do protocolo, pois um cimento contendo monômero silano funcional não equivale a um sistema no qual o silano está presente apenas no adesivo.

A revisão sistemática com metanálise de Lima et al. (2024), que reuniu estudos in vitro sobre adesivos universais e primers autocondicionantes em cerâmicas vítreas, sintetizou essa evidência: de forma agregada, primers cerâmicos dedicados produziram resistência de união superior à de adesivos universais contendo silano, independentemente do fabricante avaliado. Essa síntese quantitativa reforça, no conjunto dos estudos, a tendência observada em comparações individuais e reduz o risco de fundamentar a conclusão em uma seleção arbitrária de resultados favoráveis.

Comparações mais recentes confirmam que o efeito é frequente, mas não uniforme. Tannen et al. (2025) observaram melhora significativa para a maioria dos adesivos avaliados quando foi aplicado silano separado, embora uma formulação tenha constituído exceção. Pulido et al. (2026) também encontraram desempenho elevado de sistemas com silanos de duas etapas e de alguns sistemas simplificados, antes e após 10.000 ciclos térmicos. Essas exceções impedem classificar todos os adesivos apenas pela presença ou ausência declarada de silano e reforçam a necessidade de considerar a formulação completa e o protocolo de envelhecimento.

Bernardi et al. (2026) avaliaram exatamente a combinação Scotchbond Universal Plus–RelyX Ceramic Primer em dissilicato de lítio prensado, por microcisalhamento, imediatamente e após 10.000 ciclos térmicos. O adesivo isolado alcançou $23,9 \pm 2,5$ MPa no período imediato e $18,4 \pm 2,9$ MPa após a termociclagem; com o primer separado, os valores foram $26,1 \pm 3,3$ MPa e $21,5 \pm 2,5$ MPa. As diferenças foram estatisticamente significativas, embora proporcionalmente moderadas (aproximadamente 9% e 17%), e houve interação entre protocolo e tempo ($p = 0,015$). Mesmo com dissilicato prensado e geometria de ensaio distinta, o estudo chegou à mesma direção desta tese: o silano incorporado ao Scotchbond Universal Plus não reproduziu integralmente o desempenho da silanização separada. A estabilidade cromática não foi investigada.

A síntese mais defensável, diante desse conjunto de evidências, é que o silano integrado não deve ser presumido como substituto universal do silano separado. A aplicação dedicada apresenta o sinal laboratorial mais consistente entre estudos independentes, desde comparações diretas de protocolos (Lee et al., 2017; Awad et al., 2023) até a síntese quantitativa de Lima et al. (2024), sobretudo após

envelhecimento. Contudo, a necessidade clínica deve ser definida para a combinação exata de produtos, e as exceções documentadas por Tannen et al. (2025) e Pulido et al. (2026) mostram que essa conclusão não pode ser generalizada para toda formulação comercial sem verificação direta.

2.14 Adesão ao esmalte na cimentação de facetas

O esmalte é um substrato predominantemente mineral, constituído por cristais de hidroxiapatita organizados em prismas. O ácido fosfórico dissolve seletivamente regiões minerais, cria microporosidades e aumenta a energia superficial. O adesivo infiltra esse padrão e, após polimerização, forma prolongamentos resinosos responsáveis por retenção micromecânica estável (Beltrami et al., 2016; Tsujimoto et al., 2016; Suda et al., 2018)

Adesivos universais podem ser aplicados no modo autocondicionante, mas a acidez de muitas formulações produz padrão menos pronunciado no esmalte do que o ácido fosfórico. Estudos laboratoriais demonstraram melhora da resistência e da durabilidade após condicionamento prévio do esmalte (Beltrami et al., 2016; Suda et al., 2018). Em cimentação, materiais autoadesivos também podem se beneficiar do condicionamento seletivo quando há margens em esmalte. A Figura 2 ilustra a diferença entre os dois padrões de superfície.

Figura 2 – Representação esquemática da interface adesiva sobre o esmalte sem condicionamento (E-) e condicionado com ácido fosfórico a 37% (E+)



Fonte: elaboração própria (2026).

Revisão sobre restaurações indiretas cimentadas com materiais autoadesivos analisou a influência do condicionamento seletivo sobre longevidade e indicou que a estratégia deve ser considerada dentro do contexto clínico e do substrato (Solon-de-Mello et al., 2019). A evidência clínica específica para adesivos universais continua heterogênea, mas o conjunto de dados sustenta a preservação de esmalte e seu condicionamento adequado como fatores favoráveis.

Em facetas, a exposição de dentina aumenta a complexidade da adesão e pode afetar sobrevivência. Estudos clínicos de longo prazo identificam substrato e vitalidade dental entre os fatores associados ao desempenho, reforçando a importância de preparos conservadores e da documentação da extensão de dentina exposta (Etienne et al., 2025).

2.15 Interação entre o tratamento da cerâmica e do esmalte

A retenção de uma faceta resulta do sistema completo. Aumentar a resistência na interface cerâmica-cimento pode não produzir o mesmo benefício quando a união ao esmalte é limitada; de forma semelhante, uma interface dentária resistente não compensa tratamento inadequado da cerâmica. A associação entre condicionamento do esmalte e silanização deve ser entendida como combinação de fatores e não como etapas independentes em todas as circunstâncias (Beltrami et al., 2016; Tsujimoto et al., 2016; Suda et al., 2018)

Um delineamento com quatro combinações — esmalte condicionado ou não condicionado e silano separado presente ou ausente — permite estimar o efeito principal de cada fator e verificar interação. Se o benefício do silano for maior quando o esmalte também é condicionado, existe evidência de que a resposta do conjunto depende das duas interfaces. Se os efeitos forem aditivos e independentes, cada etapa contribui de maneira relativamente constante. (Rohr et al., 2022; Pilecco et al., 2023)

Essa lógica também orienta a interpretação dos modos de falha. Falhas localizadas no lado cerâmico podem indicar limitação da silanização; falhas no esmalte podem refletir o condicionamento; falhas mistas ou coesivas sugerem que a carga se distribuiu por diferentes componentes, mas não provam uniformidade da interface. A análise deve combinar resistência, padrão de falha e desenho experimental (Beltrami et al., 2016; Tsujimoto et al., 2016; Suda et al., 2018)

2.16 Polimerização através do dissilicato de lítio

A conversão de monômeros em polímero determina resistência mecânica, módulo, sorção, solubilidade e estabilidade cromática do cimento. A luz que alcança a interface é atenuada pela absorção e pelo espalhamento na cerâmica. Espessura, translucidez, opacidade, cor e microestrutura alteram a irradiância transmitida, de modo que o valor medido na ponta do aparelho não corresponde à energia efetivamente recebida pelo cimento (Scotti et al., 2016; Borges et al., 2021; Lima et al., 2024b)

Estudos demonstraram redução da irradiância e da microdureza sob dissilicato mais espesso, saturado ou opaco (Borges et al., 2021). Espessura e translucidez também influenciam o grau de conversão de cimentos com iniciadores diferentes, inclusive materiais duais (Lima et al., 2024b). Comparações entre cimentos fotoativados e duais sob discos de diferentes espessuras confirmam que o comportamento depende da formulação e que a ativação química não elimina a contribuição da luz (Scotti et al., 2016; Costa Neto et al., 2017).

Revisão sistemática e meta-análise confirmou a redução da luz transmitida com o aumento da espessura, além de heterogeneidade entre aparelhos e materiais (Martins et al., 2019). Por isso, estudos devem relatar irradiância, espectro, tempo de

exposição, distância e diâmetro da ponteira, espessura e translucidez cerâmicas. O posicionamento deve ser padronizado, e o aparelho precisa ser verificado antes do ensaio.

A conversão insuficiente pode reduzir resistência de união e aumentar água residual, lixiviação e alteração de cor. Assim, diferenças mecânicas ou ópticas atribuídas à silanização podem ser confundidas por condições de fotoativação inadequadas. Em facetas delgadas, a passagem de luz costuma ser favorável, mas deve ser confirmada para a combinação de cerâmica e cimento estudada (Scotti et al., 2016; Borges et al., 2021; Lima et al., 2024b)

2.17 Envelhecimento da interface adesiva

A resistência imediata representa apenas o estágio inicial da interface. A água difunde-se pela matriz resinosa, promove plastificação e facilita hidrólise de componentes suscetíveis. Monômeros hidrofílicos e solvente residual aumentam a absorção, enquanto baixa conversão deixa maior quantidade de espécies não reagidas. A interface silanizada também contém regiões com diferentes graus de condensação e resistência à água (Scotti et al., 2016; Borges et al., 2021; Lima et al., 2024b)

As camadas externas de silano fracamente adsorvidas podem ser removidas; ligações siloxano suscetíveis podem sofrer hidrólise; falhas e poros permitem maior acesso da água. Contudo, uma camada interna adequadamente formada pode apresentar estabilidade considerável. Portanto, não é correto descrever o envelhecimento como dissolução uniforme de todo o silano: a degradação é seletiva e dependente da qualidade inicial da interface (Nishiyama et al., 1995; Aoki et al., 2014; Chen et al., 2019)

A diferença entre coeficientes de expansão térmica da cerâmica, cimento e substrato acrescenta tensões durante variações de temperatura. Cargas mastigatórias repetidas podem ampliar defeitos e promover fadiga. O envelhecimento real resulta da interação entre processos químicos e mecânicos, enquanto os estudos laboratoriais geralmente isolam apenas parte deles. (Hooshmand et al., 2002; Ferracane, 2006)

A aplicação de silano separado frequentemente preservou melhor a união após envelhecimento de adesivos universais, mas resultados variaram entre materiais (Chen et al., 2019; Almaskin et al., 2022; Tannen et al., 2025; Pulido et al., 2026). Por isso, a estabilidade deve ser descrita para o protocolo completo e não atribuída exclusivamente à categoria do produto.

2.18 Termociclagem como método de envelhecimento artificial

A termociclagem submete os espécimes alternadamente a banhos em diferentes temperaturas para simular mudanças térmicas da cavidade bucal. O método combina exposição à água com expansão e contração repetidas dos materiais. Temperaturas extremas, tempo de permanência, intervalo de transferência, número de ciclos e meio utilizado determinam a intensidade do desafio (Hooshmand et al., 2002; Ferracane, 2006)

A literatura apresenta protocolos muito diferentes, incluindo centenas a dezenas de milhares de ciclos. O número de ciclos não pode ser convertido diretamente em anos de serviço porque frequência e amplitude térmica clínicas variam e porque muitos ensaios não incorporam carga mecânica, alterações de pH ou contaminação. A termociclagem deve ser interpretada como comparação relativa entre grupos submetidos ao mesmo desafio (Hooshmand et al., 2002; Ferracane, 2006)

O tempo de permanência nos banhos é particularmente relevante: períodos mais longos permitem maior equilíbrio térmico do espécime, enquanto períodos curtos podem aquecer ou resfriar apenas parcialmente o conjunto. A temperatura intermediária, quando utilizada, aproxima o protocolo de transições adicionais, mas dificulta a comparação com estudos de dois banhos. Relatos devem informar todas essas condições (Heintze et al., 2015)

Resultados obtidos após 500, 5.000 ou 10.000 ciclos não podem ser ordenados como se representassem uma escala clínica padronizada. Diferenças de superfície, cimento, armazenamento inicial, geometria e teste podem ser mais importantes que a contagem isolada. A conclusão adequada é que determinado protocolo resistiu melhor ao envelhecimento aplicado, e não que corresponde a um número específico de anos (Hooshmand et al., 2002; Ferracane, 2006)

2.19 Métodos de avaliação da resistência de união

Ensaio de cisalhamento, microcisalhamento e microtração são utilizados para comparar sistemas adesivos. A resistência nominal é calculada dividindo a força de falha, em newtons, pela área aderida, em milímetros quadrados, resultando em megapascal. Apesar da simplicidade do cálculo, o valor é influenciado por geometria, módulo dos materiais, espessura da camada, alinhamento e posição de aplicação da carga (Placido et al., 2007; Armstrong et al., 2010; Barcellos et al., 2013)

No cisalhamento e microcisalhamento, a carga aplicada paralelamente à interface gera distribuição não uniforme, com concentrações nas bordas e componentes de tração. Análises por elementos finitos demonstraram diferenças importantes entre configurações e mostraram que distância de aplicação da carga e espessura relativa do adesivo alteram o resultado (Placido et al., 2007). Revisões metodológicas recomendam padronização detalhada e associação com métodos morfológicos ou espectroscópicos (Armstrong et al., 2010).

A microtração permite obter múltiplos espécimes pequenos de um bloco, mas introduz desafios de corte, alinhamento e falhas pré-teste. A unidade experimental deve ser o bloco, dente ou unidade originalmente randomizada, e não cada palito como observação inteiramente independente. Perdas precisam ser relatadas e seu tratamento estatístico explicitado, pois a exclusão silenciosa pode superestimar a resistência (Barcellos et al., 2013).

A análise do modo de falha complementa os valores. Falha adesiva sugere separação predominante na interface; falha mista envolve diferentes regiões; falha coesiva ocorre no cimento, cerâmica ou substrato. Uma falha coesiva indica apenas que o componente falhou antes da interface e não fornece sua resistência verdadeira. Classificação visual deve ser padronizada e, quando possível, confirmada por microscopia (Placido et al., 2007; Armstrong et al., 2010; Barcellos et al., 2013)

Meta-análise de testes adesivos encontrou alta variabilidade e correlação limitada com desfechos clínicos (Heintze et al., 2015). Portanto, a redação deve afirmar que um protocolo apresentou maior resistência nas condições testadas, sem concluir automaticamente que produzirá maior sobrevivência clínica.

2.20 Propriedades ópticas do dissilicato de lítio

A aparência de uma restauração depende da interação entre luz, cerâmica, cimento e substrato. Cor descreve a percepção resultante da distribuição espectral; translucidez expressa a passagem parcial da luz; opacidade representa a capacidade de impedir transmissão; fluorescência corresponde à emissão de luz após excitação. Espalhamento e absorção são determinados pela microestrutura, pigmentos, poros, acabamento e espessura (Dede et al., 2017; Lee e Choi, 2018; Elkhishen et al., 2022)

O aumento da espessura tende a reduzir a influência do substrato e aumentar a capacidade de mascaramento, mas também diminui a transmissão luminosa. Cerâmicas mais translúcidas permitem maior contribuição da cor subjacente; versões opacas mascaram melhor, porém podem exigir caracterização para evitar aparência artificial. Essas relações não são lineares e dependem da diferença de cor entre cerâmica, cimento e remanescente (Dede et al., 2017; Lee e Choi, 2018; Elkhishen et al., 2022)

Em facetas de 0,3 a 1,0 mm, pequenas mudanças no cimento ou no substrato podem ser perceptíveis. A seleção deve ser realizada com pastas de prova compatíveis, controle de umidade e iluminação padronizada. A cor medida antes da cimentação pode mudar após polimerização e envelhecimento, tornando importante distinguir alteração imediata de estabilidade ao longo do tempo (Dede et al., 2017; Lee e Choi, 2018; Elkhishen et al., 2022)

2.21 Influência do cimento na cor de facetas

O cimento forma uma camada óptica entre substrato e cerâmica. Sua tonalidade, luminosidade, opacidade, espessura de película, tipo e quantidade de pigmentos e índice de refração das cargas influenciam a cor final. Estudos demonstraram diferenças entre marcas e tonalidades sob dissilicato, com maior influência quando a cerâmica é fina e translúcida (Dede et al., 2017; Lee e Choi, 2018; Elkhishen et al., 2022).

A espessura do cimento depende do espaço interno, viscosidade, carga de assentamento e adaptação. Uma camada mais espessa aumenta a contribuição da tonalidade do cimento, mas também pode alterar a adaptação e a distribuição de tensões. A padronização é essencial em estudos de cor, pois variações micrométricas podem produzir diferenças comparáveis às atribuídas ao material. (Dede et al., 2017; Lee e Choi, 2018; Elkhishen et al., 2022)

A composição do sistema iniciador participa da estabilidade. Aminas aromáticas podem oxidar e contribuir para amarelecimento; alternativas amina-free procuram reduzir essa alteração. Entretanto, denominar um cimento fotoativado ou dual não prediz sozinho sua cor, porque matriz, iniciadores, inibidores, conversão e sorção variam entre produtos. Yang et al. (2022) observaram diferenças após termociclagem entre cimentos duais com sistemas iniciadores distintos.

Envelhecimento em água, termociclagem, exposição a pigmentos e radiação submetem o cimento a mecanismos diferentes. Estudos devem separar mudança causada por água daquela produzida por soluções corantes. O efeito do protocolo de cimentação sobre cor e resistência à fratura também depende do conjunto restaurador e não pode ser atribuído a uma única etapa sem controle adequado (Oz, 2020; Kotb e El Banna, 2025).

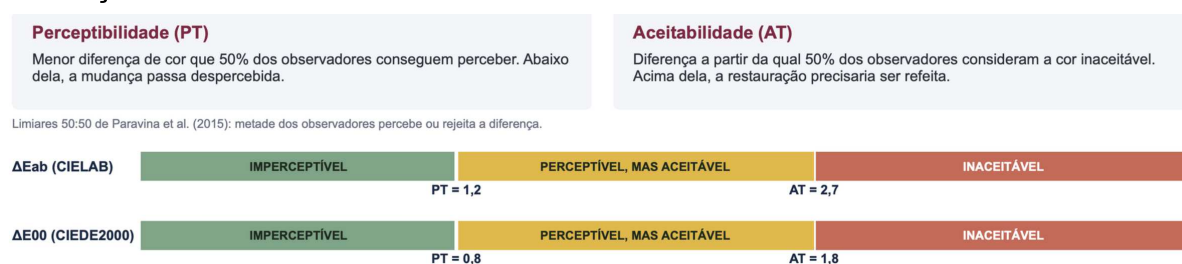
2.22 Sistema CIELAB e avaliação de ΔE_{ab}

O sistema CIELAB representa a cor por três coordenadas: L^* corresponde à luminosidade, variando do preto ao branco; a^* descreve o eixo verde-vermelho; b^* descreve o eixo azul-amarelo. A alteração de cada coordenada entre dois momentos é expressa por ΔL^* , Δa^* e Δb^* . Valores negativos de ΔL^* indicam escurecimento e positivos indicam aumento da luminosidade; mudanças em b^* ajudam a identificar amarelecimento ou deslocamento para o azul (Sharma et al., 2005; Paravina et al., 2015)

A diferença total ΔE_{ab} é calculada pela raiz quadrada da soma dos quadrados das mudanças nas três coordenadas. Esse índice resume a distância de cor, porém perde informação direcional. Dois espécimes podem apresentar ΔE_{ab} semelhante por combinações completamente diferentes de escurecimento, amarelecimento ou alteração no eixo vermelho-verde. Por isso, ΔE_{ab} deve ser interpretado juntamente com seus componentes (Sharma et al., 2005; Paravina et al., 2015)

Os limiares de perceptibilidade e aceitabilidade relacionam valores instrumentais à avaliação humana. Paravina et al. (2015) propuseram, para ΔE_{ab} , limiares de 50:50% de aproximadamente 1,2 para perceptibilidade e 2,7 para aceitabilidade. Esses valores são referências populacionais, não fronteiras absolutas, e dependem das condições de observação e do material. Estudos sobre cerâmicas e modelos mais recentes mostram que matiz e croma podem modificar a percepção (Ghinea et al., 2010; Tejada-Casado et al., 2024). Esses limiares estão representados na Figura 3.

Figura 3 – Limiares de perceptibilidade (PT) e de aceitabilidade (AT) para as diferenças de cor ΔE_{ab} e ΔE_{00}



Fonte: elaboração própria (2026), com base em Paravina et al. (2015).

O CIEDE2000 corrige algumas não uniformidades perceptuais do CIELAB, mas seus valores e limiares não são intercambiáveis com ΔE_{ab} . Quando o estudo foi planejado para ΔE_{ab} , os resultados devem ser apresentados nessa métrica, sem converter ou comparar diretamente com ΔE_{00} . Condições instrumentais, fundo, iluminante, geometria, calibração e repetição das medidas precisam ser padronizadas. (Sharma et al., 2005; Ghinea et al., 2010; Paravina et al., 2015) O Quadro 1 compara as duas fórmulas.

Quadro 1 – Comparação entre as fórmulas de diferença de cor CIELAB (ΔE_{ab}) e CIEDE2000 (ΔE_{00})

Característica	CIELAB (ΔE_{ab})	CIEDE2000 (ΔE_{00})
O que calcula	Distância direta entre duas cores no espaço $L^*a^*b^*$	Mesma distância, corrigida para luminosidade, croma e matiz
Vantagem	Simples; permite comparar com estudos antigos	Mais próxima da percepção visual; recomendada atualmente
Limiares PT / AT	1,2 / 2,7	0,8 / 1,8
Nesta tese	Desfecho principal	Análise complementar

Fonte: elaboração própria (2026), com base em Sharma et al. (2005) e Paravina et al. (2015). PT: limiar de perceptibilidade; AT: limiar de aceitabilidade.

2.23 Possível influência do silano sobre a cor

O papel primário do silano é adesivo, e a literatura sobre seu efeito cromático independente é limitada. O tratamento superficial com ácido fluorídrico e silano pode alterar rugosidade, molhabilidade, translucidez e reflexão da cerâmica antes da cimentação. Pires-de-Souza et al. (2021) observaram mudanças ópticas e de molhabilidade após diferentes tratamentos, mas esse resultado não demonstra que o silano isoladamente determine a descoloração de uma restauração cimentada.

Possíveis mecanismos indiretos incluem resíduos de primer, película excessivamente espessa, alteração do índice de refração na interface, diferenças de molhamento e formação de vazios. Uma interface mais íntegra também pode reduzir infiltração e alterações marginais ao longo do tempo. Entretanto, esses mecanismos são plausíveis e não foram isolados de maneira consistente em estudos clínicos. (Oz, 2020; Pires-de-Souza et al., 2021; Kotb e El Banna, 2025)

Quando o silano separado é comparado ao adesivo universal contendo silano, qualquer diferença de cor pode resultar não apenas do agente de acoplamento, mas da espessura do adesivo, solvente, componentes hidrofílicos ou conversão do cimento. O desenho experimental deve manter cerâmica, cimento, espessuras, polimerização e envelhecimento constantes. A interpretação adequada é verificar se o protocolo produz alteração cromática diferente, sem afirmar previamente que o silano é a causa direta (Scotti et al., 2016; Borges et al., 2021; Lima et al., 2024b)

Até o momento, a evidência é mais robusta para a influência da tonalidade e composição do cimento, espessura e translucidez cerâmicas, substrato e envelhecimento do que para o silano separado. Essa ausência de evidência direta constitui uma lacuna relevante e justifica a avaliação de ΔE_{ab} e ΔL^* em conjunto com resistência de união. (Oz, 2020; Pires-de-Souza et al., 2021; Kotb e El Banna, 2025)

2.24 Evidências clínicas e laboratoriais

Estudos laboratoriais são essenciais para isolar variáveis e compreender mecanismos, mas simplificam a cavidade bucal. Resistência de união, termociclagem e análise de cor representam componentes do desempenho; não incorporam integralmente fadiga mastigatória, umidade variável, alterações de pH, contaminação,

oclusão, hábitos parafuncionais e diferenças de preparo. (Aslan et al., 2019; Imburgia et al., 2021; Klein et al., 2025)

A evidência clínica sobre facetas de dissilicato demonstra desempenho favorável em acompanhamentos de médio e longo prazo, mas as taxas variam com seleção do caso e critérios de falha. Estudos retrospectivos relataram resultados de cinco a dez anos para facetas produzidas por CAD/CAM ou instaladas por clínicos experientes (Nejatidanesh et al., 2018; Aslan et al., 2019). Uma coorte com mais de mil facetas de dissilicato também forneceu dados sobre complicações em aplicação clínica ampla (Imburgia et al., 2021).

Revisões sistemáticas identificam elevada sobrevivência geral, mas heterogeneidade entre materiais, desenho incisal, substratos e períodos de seguimento (Albanesi et al., 2016; Klein et al., 2025; Leburu et al., 2025). Exposição de dentina e vitalidade dental podem influenciar o desempenho em longo prazo (Etienne et al., 2025), enquanto bruxismo foi associado ao risco de complicações em facetas cerâmicas (Granell-Ruiz et al., 2014).

Esses estudos sustentam a relevância clínica das interfaces, mas não comparam diretamente, em sua maioria, silano integrado e separado. A ausência de descimentação em uma série clínica não permite concluir qual componente químico foi responsável, especialmente quando protocolo, adesivo e cimento variam. Assim, a evidência clínica é usada para contextualizar sobrevida e fatores de risco, enquanto a comparação entre silanização permanece predominantemente laboratorial. (Aslan et al., 2019; Imburgia et al., 2021; Klein et al., 2025)

Futuros ensaios clínicos deveriam registrar tipo de cerâmica, extensão de esmalte e dentina, protocolo de condicionamento, silano, adesivo, cimento, polimerização e eventos como descimentação, fratura, lascamento, alteração marginal, sensibilidade e satisfação. A análise por sobrevivência deve considerar o agrupamento de múltiplas facetas no mesmo paciente. (Aslan et al., 2019; Imburgia et al., 2021; Klein et al., 2025)

2.25 Síntese crítica e lacunas do conhecimento

O dissilicato de lítio combina microestrutura passível de condicionamento ácido, resistência e propriedades ópticas adequadas para facetas. A cimentação depende da criação de retenção micromecânica pelo ácido fluorídrico, do acoplamento químico promovido pelo silano, da união ao substrato dentário e da polimerização do cimento. Qualquer simplificação deve preservar o desempenho das duas interfaces. (Heintze et al., 2015; Lima et al., 2024a; Klein et al., 2025)

A literatura mostra que silanos convencionais incorporados a meios ácidos e aquosos podem perder efetividade por hidrólise e autocondensação durante o armazenamento. A aplicação separada produz, em grande parte dos estudos laboratoriais, resistência mais elevada ou mais estável após envelhecimento. Entretanto, novas moléculas e alguns produtos constituem exceções, tornando inadequado generalizar o comportamento de toda a categoria (Nishiyama et al., 1995; Aoki et al., 2014; Chen et al., 2019)

Permanece necessário avaliar especificamente o conjunto formado por cimento resinoso universal e adesivo universal correspondente contendo silano. O protocolo simplificado recomendado para o sistema deve ser comparado com a adição de um silano dedicado, mantendo constantes condicionamento do dissilicato, cimento, fotoativação e envelhecimento. Informações do fabricante orientam o uso, mas a equivalência deve ser demonstrada por evidência independente e específica ao produto. (Heintze et al., 2015; Lima et al., 2024a; Klein et al., 2025)

Na interface dentária, o condicionamento do esmalte com ácido fosfórico apresenta fundamento e evidência favoráveis, como a restauração depende simultaneamente do esmalte e da cerâmica, um delineamento que combine presença ou ausência de condicionamento ácido e silano separado permite verificar efeitos principais e interação. Essa abordagem prepara a interpretação dos quatro grupos do estudo de resistência de união. (Beltrami et al., 2016; Tsujimoto et al., 2016; Suda et al., 2018)

A estabilidade cromática adiciona uma dimensão ainda pouco explorada. A literatura relaciona cor principalmente a espessura e translucidez da cerâmica, substrato, tonalidade, composição, conversão e envelhecimento do cimento. O efeito independente do silano permanece incerto. Avaliar ΔE_{ab} e seus componentes, especialmente ΔL^* , permite verificar se a simplificação do protocolo produz alteração óptica mensurável sem atribuir causalidade além do desenho experimental. (Sharma et al., 2005; Paravina et al., 2015)

Dessa forma, a tese aborda duas lacunas complementares: se o adesivo universal contendo silano, associado ao cimento resinoso universal, substitui a aplicação de silano separado em termos de resistência de união; e se essa escolha interfere na estabilidade de cor do conjunto de dissilicato de lítio após envelhecimento. A integração dos desfechos mecânico e óptico oferece base mais completa para julgar a conveniência e os limites do protocolo universal. (Heintze et al., 2015; Lima et al., 2024a; Klein et al., 2025)

3 PROPOSIÇÃO

3.1 Proposição geral

Avaliar a influência do condicionamento do esmalte e da estratégia de silanização sobre a resistência de união e a estabilidade cromática de facetas de dissilicato de lítio cimentadas com um sistema resinoso universal.

3.2 Proposições específicas

1.Determinar e comparar a resistência de união em delineamento fatorial 2x2 constituído pela presença ou ausência do condicionamento do esmalte com ácido fosfórico a 37% e a estratégia de silanização após 10.000 ciclos de termociclagem.

2.Analisar a distribuição dos modos de falha adesiva, mista e coesiva e sua associação com os diferentes protocolos de condicionamento do esmalte e de silanização da cerâmica.

3.Mensurar e comparar, em carácter exploratório, a estabilidade cromática de facetas de dissilicato de lítio cimentadas com cimento resinoso universal, expressa pelas variações ΔL^* , Δa^* e Δb^* e pelas diferenças totais de cor ΔE_{ab} e ΔE_{00} , em função do emprego isolado do adesivo universal contendo silano ou de sua associação à aplicação adicional de silano separado, após 90 dias de armazenamento em água, mantendo-se o esmalte condicionado em ambos os grupos para isolar o efeito da estratégia de silanização.

3.3 Hipóteses nulas

H01 – O condicionamento do esmalte com ácido fosfórico a 37% não influencia a resistência de união de facetas de dissilicato de lítio cimentadas com o sistema resinoso universal avaliado.

H02 – A aplicação adicional do primer cerâmico separado não influencia a resistência de união, em comparação ao emprego isolado do silano integrado ao adesivo universal.

H03 – Não existe interação entre o condicionamento ácido do esmalte e a estratégia de silanização da cerâmica sobre a resistência de união.

H04 – A distribuição dos modos de falha não difere entre os protocolos de condicionamento do esmalte e de silanização da cerâmica.

H05- Para a estabilidade cromática, a hipótese H05 foi subdividida de acordo com cada desfecho: H05a – a estratégia de silanização não influencia ΔL^* ; H05b – não influencia Δa^* ; H05c – não influencia Δb^* ; H05d – não influencia ΔE_{ab} ; e H05e – não influencia ΔE_{00} , após 90 dias de armazenamento em água.

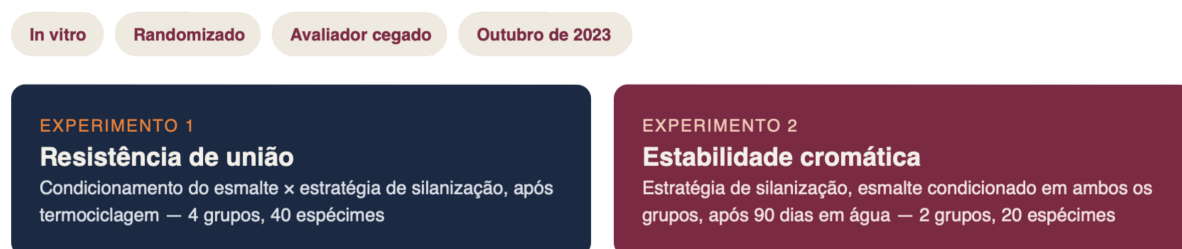
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Foi realizado um estudo laboratorial *in vitro*, com delineamento randomizado e avaliador dos desfechos cegado quanto à alocação dos espécimes. A investigação foi composta por dois experimentos complementares (Figura 4). O primeiro avaliou a influência do condicionamento ácido do esmalte e da estratégia de silanização da cerâmica sobre a resistência de união de facetas de dissilicato de lítio cimentadas com um cimento resinoso universal. O segundo avaliou a estabilidade cromática em função da estratégia de silanização, mantendo o esmalte condicionado em todos os espécimes. Essa opção reduziu o número de grupos e isolou o contraste SI versus SS, mas não permitiu estimar o efeito do condicionamento do esmalte nem sua interação com a silanização sobre a cor.

Os experimentos foram conduzidos em outubro de 2023. Em ambos, os espécimes foram distribuídos por randomização simples, e as análises foram realizadas sem conhecimento prévio da estratégia de tratamento atribuída a cada grupo. A unidade experimental foi o conjunto constituído pelo substrato dentário, pela peça de dissilicato de lítio e pelo sistema de cimentação.

Figura 4 – Visão geral dos dois experimentos que compuseram a investigação



Fonte: elaboração própria (2026), com base no delineamento do estudo.

4.2 CÁLCULO AMOSTRAL

O tamanho amostral do experimento de resistência de união foi estimado a priori no programa G*Power (Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Düsseldorf, Alemanha), com base na variabilidade observada em estudo-piloto conduzido com cinco espécimes por grupo e em dados de estudos laboratoriais com delineamento semelhante (Kim et al., 2021). Para a análise de variância, adotou-se tamanho de efeito f de Cohen de 0,60, nível de significância de 5% e poder estatístico de 80%. O cálculo indicou a necessidade mínima de nove espécimes por grupo. Para compensar possíveis perdas durante o preparo e o envelhecimento, foram incluídos dez espécimes em cada grupo, totalizando 40 unidades experimentais. O cálculo foi orientado para os efeitos principais. No experimento de estabilidade cromática, foram empregados 20 espécimes, igualmente distribuídos em dois grupos independentes ($n = 10$); em razão do caráter exploratório desse experimento, suas análises foram interpretadas com cautela. Não houve perda amostral nos experimentos (Faul et al., 2007).

4.3 MATERIAIS EMPREGADOS

Os principais materiais utilizados, bem como os respectivos fabricantes, lotes e datas de validade disponíveis nos registros do estudo, estão apresentados no Quadro 2. Todos os materiais identificados encontravam-se dentro do prazo de validade no período de realização dos experimentos.

Quadro 2 – Materiais utilizados nos experimentos

Material	Fabricante	Lote	Validade
IPS e.max CAD HT, cor A1, bloco C14	Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein	YB552S	17/03/2024
Scotchbond Universal Plus Adhesive	Solventum, St. Paul, MN, EUA	9952917	02/05/2026
RelyX Universal Resin Cement, cor A1	Solventum, St. Paul, MN, EUA	10765160	17/09/2025
RelyX Ceramic Primer	Solventum, St. Paul, MN, EUA	10475182	16/12/2024
Porcelain Etch, ácido fluorídrico a 9%	Ultradent Products, South Jordan, UT, EUA	D018H	30/09/2024
Ultra-Etch, ácido fosfórico a 37%	Ultradent Products, South Jordan, UT, EUA	H802T	01/2025

Fonte: elaboração própria (2026), com base nos registros e nas fotografias dos materiais utilizados.

4.4 EXPERIMENTO 1 – RESISTÊNCIA DE UNIÃO

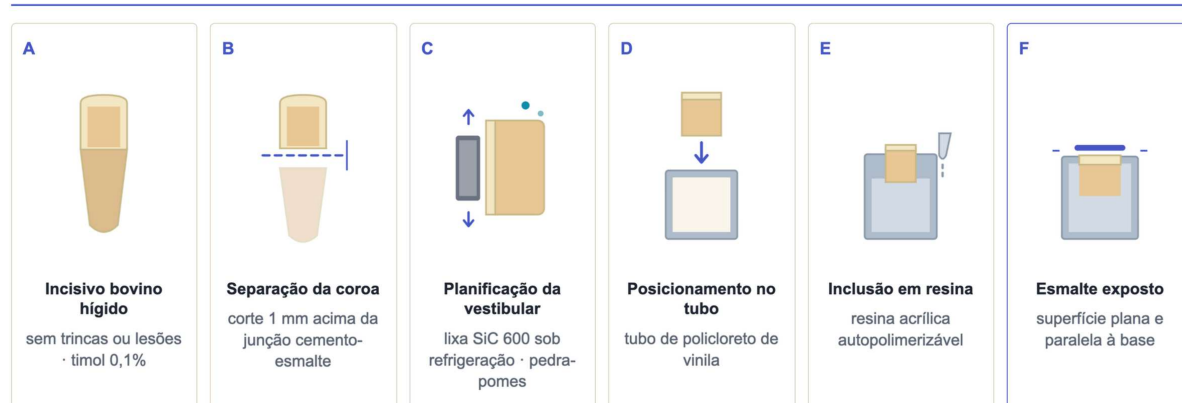
4.4.1 Seleção e preparo dos dentes

Foram selecionados 40 incisivos bovinos hígidos, previamente extraídos e provenientes de banco de dentes disponível para pesquisas laboratoriais, sem trincas, fraturas, lesões ou defeitos visíveis na superfície vestibular. Não houve utilização de animais vivos para a obtenção dos espécimes. Até o preparo, os dentes foram armazenados em solução de timol a 0,1%. As coroas foram separadas das raízes por meio de corte realizado aproximadamente 1 mm acima da junção cimento-esmalte. A superfície vestibular foi planificada sob refrigeração com lixa de carbetto de silício de granulação 600, seguida de limpeza com pasta de pedra-pomes e água, a fim de produzir uma área plana de esmalte adequada à cimentação. O esmalte bovino foi empregado como substituto do esmalte humano por sua disponibilidade e pela facilidade de padronização, opção frequente em ensaios laboratoriais de adesão; as diferenças morfológicas e químicas em relação ao substrato humano devem, contudo, ser consideradas na interpretação dos resultados (Yassen et al., 2011).

As coroas foram incluídas em tubos de policloreto de vinila preenchidos com resina acrílica autopolimerizável, mantendo-se a superfície vestibular exposta e paralela à base do dispositivo. Após a inclusão, as superfícies foram novamente inspecionadas, limpas e mantidas úmidas até a realização dos procedimentos adesivos. A inclusão

fixa o dente e mantém a superfície de adesão plana e paralela à direção de aplicação da carga, em atenção às recomendações de padronização do alinhamento dos espécimes em ensaios de resistência de união (Placido et al., 2007; Armstrong et al., 2010). A Figura 5 ilustra a sequência de preparo.

Figura 5 – Preparo dos espécimes dentários: (A) incisivo bovino hígido; (B) separação da coroa aproximadamente 1 mm acima da junção cimento-esmalte; (C) planificação da superfície vestibular sob refrigeração; (D) posicionamento da coroa no tubo de PVC; (E) inclusão com resina acrílica autopolimerizável; (F) espécime incluído com a superfície de esmalte exposta

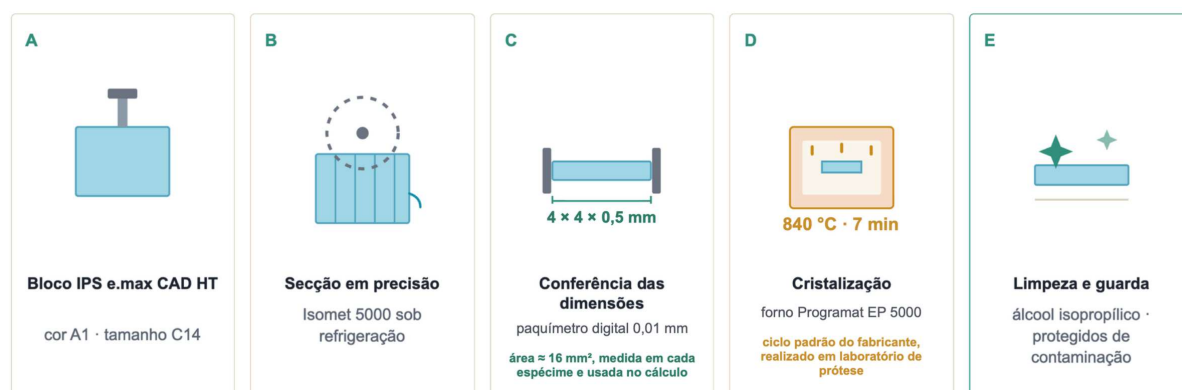


Fonte: elaboração própria (2026).

4.4.2 Confeção dos espécimes cerâmicos

Blocos de dissilicato de lítio IPS e.max CAD HT (Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein), na cor A1 e tamanho C14, foram seccionados em máquina de corte de precisão Isomet 5000 (Buehler, Lake Bluff, IL, EUA), sob refrigeração, para a obtenção de espécimes cerâmicos com dimensões aproximadas de 4 mm × 4 mm × 0,5 mm. As dimensões foram conferidas com paquímetro digital com resolução de 0,01 mm; a área de aproximadamente 16 mm² foi medida em cada espécime e utilizada no cálculo da resistência de união. Os espécimes foram submetidos ao ciclo de cristalização em forno Programat EP 5000 (Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein), a 840 °C, durante 7 minutos, conforme o ciclo padrão do fabricante, realizado em laboratório de prótese. Após a cristalização, as peças foram limpas com álcool isopropílico e mantidas protegidas de contaminação até o tratamento de superfície. A Figura 6 resume as etapas de obtenção dos espécimes cerâmicos.

Figura 6 – Obtenção dos espécimes cerâmicos: (A) bloco IPS e.max CAD HT; (B) secção em máquina de corte de precisão; (C) conferência das dimensões; (D) cristalização; (E) limpeza e armazenamento



Fonte: elaboração própria (2026).

4.4.3 Randomização e grupos experimentais

Os 40 conjuntos foram distribuídos por randomização simples em quatro grupos ($n = 10$), de acordo com dois fatores: condicionamento do esmalte com ácido fosfórico a 37% (Ultra-Etch; Ultradent Products, South Jordan, UT, EUA) (ausente ou presente) e estratégia de silanização da cerâmica (silano integrado ao adesivo universal ou primer cerâmico aplicado separadamente). A sigla E- indica ausência de condicionamento ácido do esmalte; E+ indica condicionamento com ácido fosfórico; SI indica o uso do silano incorporado ao Scotchbond Universal Plus (Solventum, St. Paul, MN, EUA); e SS indica a aplicação separada do RelyX Ceramic Primer (Solventum, St. Paul, MN, EUA), seguida do Scotchbond Universal Plus. O Quadro 3 e a Figura 7 apresentam a distribuição dos grupos.

Quadro 3 – Distribuição dos grupos do experimento de resistência de união

Grupo	n	Tratamento do esmalte	Tratamento da cerâmica
E-/SI	10	Sem ácido fosfórico	Scotchbond Universal Plus (silano integrado)
E-/SS	10	Sem ácido fosfórico	RelyX Ceramic Primer + Scotchbond Universal Plus
E+/SI	10	Ácido fosfórico a 37%	Scotchbond Universal Plus (silano integrado)
E+/SS	10	Ácido fosfórico a 37%	RelyX Ceramic Primer + Scotchbond Universal Plus

Figura 7 – Grupos experimentais dos experimentos de resistência de união (E-/SI, E-/SS, E+/SI e E+/SS) e de estabilidade cromática (SI e SS)

E-/SI n = 10 Sem ácido fosfórico Adesivo universal com silano integrado resistência de união	E-/SS n = 10 Sem ácido fosfórico Primer cerâmico antes do adesivo resistência de união	E+/SI n = 10 Ácido fosfórico a 37% Adesivo universal com silano integrado resistência de união	E+/SS Ácido fosfórico a 37% Primer cerâmico antes do adesivo resistência de união
SI n = 10 Ácido fosfórico a 37% Adesivo universal com silano integrado 4.5 estabilidade cromática	SS n = 10 Ácido fosfórico a 37% Primer cerâmico antes do adesivo 4.5 estabilidade cromática		

E-: sem condicionamento do esmalte; E+: condicionamento com ácido fosfórico a 37%; SI: silano integrado ao adesivo universal; SS: primer cerâmico aplicado separadamente. Fonte: elaboração própria (2026).

4.4.4 Tratamento das superfícies

A superfície interna de todos os espécimes cerâmicos foi condicionada com ácido fluorídrico a 9% (Porcelain Etch; Ultradent Products, South Jordan, UT, EUA) durante 20 segundos, uma vez que o condicionamento com ácido fluorídrico seguido de silanização constitui o protocolo convencional de tratamento do dissilicato de lítio (Maruo et al., 2017; Porto et al., 2024). Em seguida, as peças foram lavadas abundantemente, tratadas com ácido fosfórico a 37% por 20 segundos para a remoção dos resíduos do ácido fluorídrico, novamente lavadas e secas com jato de ar. Nos grupos SI, o Scotchbond Universal Plus foi aplicado diretamente sobre a cerâmica condicionada, friccionado por 20 segundos e submetido à secagem com jato de ar. Nos grupos SS, o RelyX Ceramic Primer foi aplicado sobre a cerâmica condicionada durante 5 segundos e, em seguida, seco com jato de ar pelo mesmo período. Posteriormente, o Scotchbond Universal Plus foi friccionado por 20 segundos e submetido à secagem com jato de ar. A sequência e os tempos de aplicação do primer, do adesivo e do cimento seguiram as orientações do fabricante para o sistema (3M, 2020).

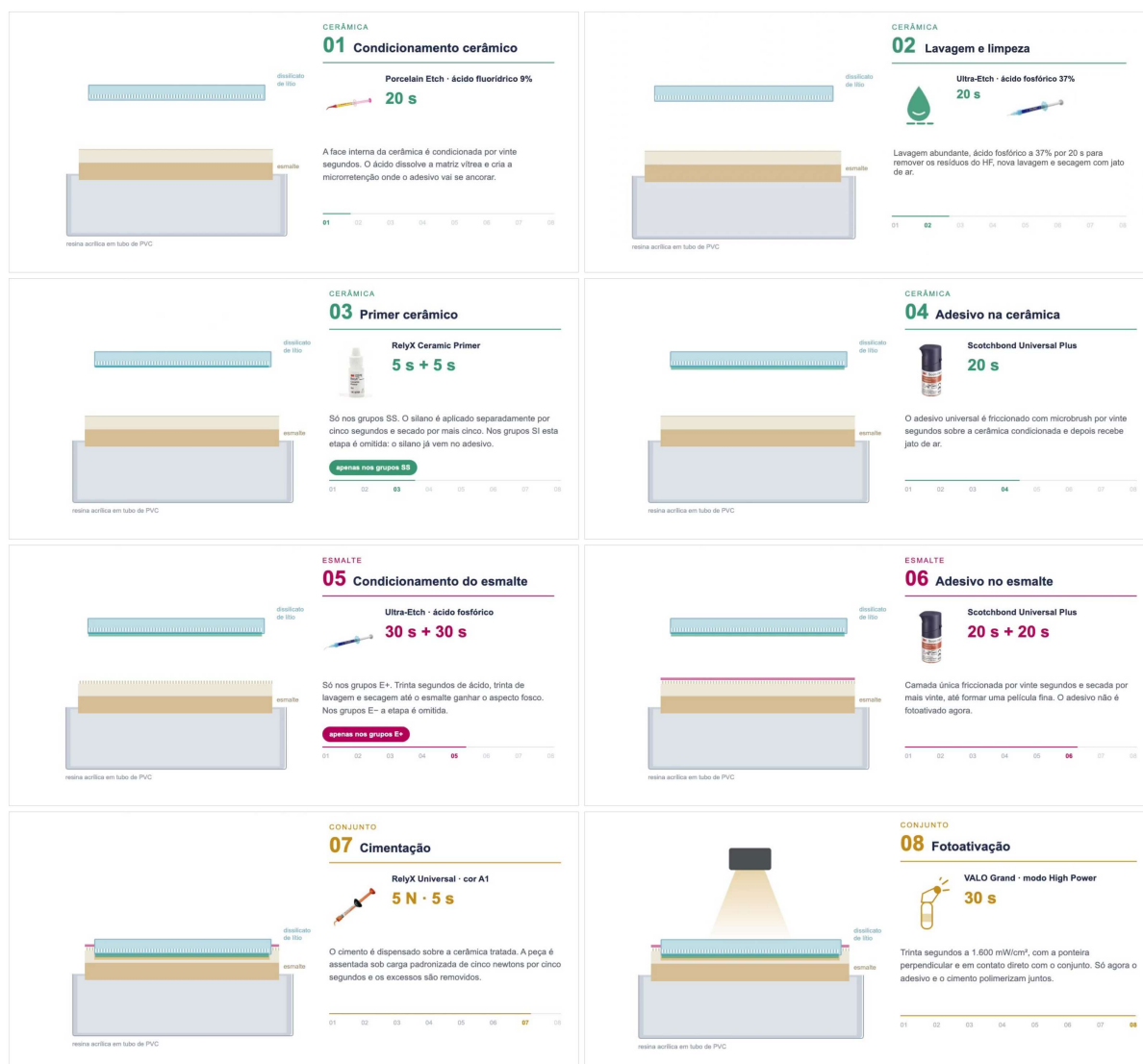
Nos grupos E+, a superfície de esmalte foi condicionada com ácido fosfórico a 37% durante 30 segundos, lavada pelo mesmo período e seca até a obtenção de aspecto fosco. Nos grupos E-, essa etapa foi omitida. O condicionamento prévio com ácido fosfórico foi adotado como fator experimental porque estudos laboratoriais indicam maior resistência e durabilidade da união de adesivos universais ao esmalte condicionado (Beltrami et al., 2016; Tsujimoto et al., 2016; Suda et al., 2018). Em todos os grupos, uma única camada de Scotchbond Universal Plus foi aplicada ativamente sobre o esmalte, com fricção durante 20 segundos, seguida de secagem com jato de ar por 20 segundos, até a obtenção de película fina e uniforme. O adesivo não foi fotoativado separadamente antes do assentamento, a fim de evitar aumento da espessura da película adesiva e possível interferência na adaptação da peça cerâmica; sua fotoativação ocorreu após o posicionamento e a cimentação do espécime.

4.4.5 Cimentação e fotoativação

O cimento resinoso universal RelyX Universal (Solventum, St. Paul, MN, EUA), na cor A1, foi dispensado sobre a superfície tratada do espécime cerâmico. A peça foi posicionada sobre o esmalte e submetida a carga padronizada de 5 N durante 5 segundos, com o objetivo de uniformizar a espessura da película de cimento. Os excessos foram removidos antes da fotoativação. Todas as etapas de cimentação de todos os espécimes, nos dois experimentos, foram executadas por um único operador.

A fotoativação foi realizada com o aparelho VALO Grand (Ultradent Products, South Jordan, UT, EUA), em modo High Power, com irradiância nominal de 1.600 mW/cm², durante 30 segundos. A ponteira foi posicionada perpendicularmente e em contato direto com o conjunto, sem distância intencional entre a extremidade emissora e a amostra. A sequência completa de tratamento das superfícies, cimentação e fotoativação está ilustrada na Figura 8.

Figura 8 – Sequência de tratamento das superfícies, cimentação e fotoativação dos espécimes, etapa por etapa

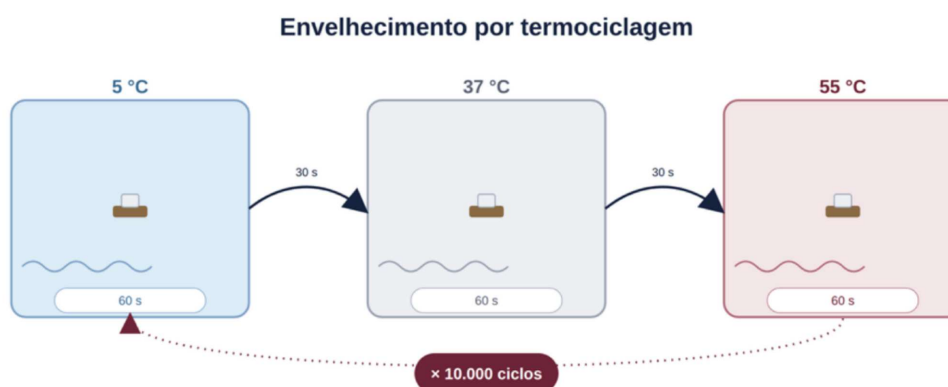


Etapas 01 a 04: tratamento da cerâmica (a etapa 03 foi realizada apenas nos grupos SS); etapas 05 e 06: tratamento do esmalte (a etapa 05 foi realizada apenas nos grupos E+); etapas 07 e 08: cimentação com RelyX Universal e fotoativação. Fonte: elaboração própria (2026).

4.4.6 Envelhecimento por termociclagem

Após a cimentação, os espécimes foram submetidos a 10.000 ciclos térmicos em banhos de água mantidos a 5 °C, 37 °C e 55 °C. O tempo de permanência foi de 60 segundos em cada banho, e o tempo de transferência entre os banhos foi de 30 segundos. Esse procedimento foi empregado como método de envelhecimento artificial das interfaces adesivas antes do ensaio mecânico (Figura 9). O número de 10.000 ciclos é frequentemente empregado em estudos de envelhecimento de interfaces adesivas e foi proposto como aproximação de um ano de função clínica, correspondência que deve ser interpretada com cautela (Gale e Darvell, 1999); o mesmo número de ciclos foi adotado em estudo recente com os mesmos materiais (Bernardi et al., 2026).

Figura 9 – Protocolo de envelhecimento por termociclagem: 10.000 ciclos entre banhos a 5 °C, 37 °C e 55 °C, com 60 segundos de permanência e 30 segundos de transferência



Fonte: elaboração própria (2026).

4.4.7 Ensaio de resistência de união

A área efetivamente cimentada de cada espécime foi determinada com paquímetro digital. Os conjuntos foram posicionados em máquina universal de ensaios Instron 3340 (Instron, Norwood, MA, EUA), de modo que a carga incidisse paralelamente à interface adesiva, à velocidade de 0,5 mm/min, até a falha (Figura 10). A força máxima foi registrada em newtons (N) e convertida em resistência de união, expressa em megapascals (MPa), pela divisão da força pela área aderida em milímetros quadrados ($\text{MPa} = \text{N}/\text{mm}^2$). Todos os 40 espécimes foram incluídos na análise. O ensaio de cisalhamento foi escolhido por sua simplicidade e ampla utilização na comparação de sistemas adesivos, reconhecendo-se a distribuição não uniforme de tensões na interface (Placido et al., 2007; Armstrong et al., 2010; Heintze et al., 2015).

Figura 10 – Representação esquemática do ensaio de resistência de união ao cisalhamento



Fonte: elaboração própria (2026).

4.4.8 Análise dos modos de falha

Após o ensaio, as superfícies fraturadas foram examinadas em estereomicroscópio, sob aumento de 50×, por examinador calibrado e cegado quanto ao grupo experimental. Os modos de falha foram classificados com base na ASTM D5573-99 (ASTM International, 1999) em: falha coesiva em esmalte, falha coesiva no cimento, falha coesiva na cerâmica e falha mista, quando houve envolvimento de mais de uma região do conjunto. Para a análise, as falhas foram agrupadas segundo a interface envolvida: interface esmalte–cimento ou interface cimento–cerâmica, esta última incluindo as falhas no cimento e as mistas.

4.5 EXPERIMENTO 2 – ESTABILIDADE CROMÁTICA

4.5.1 Delineamento e grupos

Foram preparados 20 conjuntos adicionais de esmalte bovino, cerâmica de dissilicato de lítio e cimento resinoso, distribuídos aleatoriamente em dois grupos independentes ($n = 10$). Em ambos os grupos foi empregado o Scotchbond Universal Plus, que contém silano em sua composição, e todo o esmalte foi condicionado com ácido fosfórico. A única diferença entre as estratégias foi a aplicação adicional, ou não, do RelyX Ceramic Primer antes do adesivo universal. A manutenção do esmalte condicionado nos dois grupos foi deliberada para isolar o efeito da estratégia de silanização sobre a cor; portanto, esse experimento não avaliou o fator E–/E+. Os grupos estão descritos no Quadro 4.

Quadro 4 – Distribuição dos grupos do experimento de estabilidade cromática

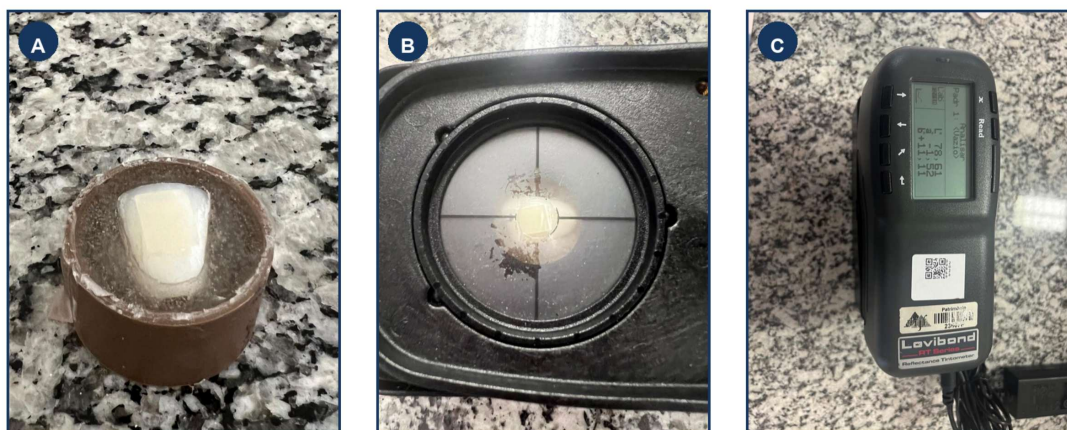
Grupo	n	Estratégia de tratamento cerâmico
SI – silano integrado	10	Scotchbond Universal Plus aplicado isoladamente sobre a cerâmica condicionada
SS – silano separado	10	RelyX Ceramic Primer seguido de Scotchbond Universal Plus

O esmalte foi condicionado com ácido fosfórico a 37% durante 30 segundos, lavado por 30 segundos e seco até apresentar aspecto fosco. O tratamento da superfície cerâmica, a aplicação do adesivo e do primer, quando indicado, a cimentação com RelyX Universal e a fotoativação seguiram os mesmos parâmetros descritos para o experimento de resistência de união.

4.5.2 Mensuração da cor

A avaliação instrumental foi realizada no sistema CIELAB (Sharma et al., 2005; Paravina et al., 2015) com o Lovibond RT Series Reflectance Tintometer (Tintometer GmbH, Dortmund, Alemanha). Os espécimes foram posicionados sobre fundo preto e centralizados em uma abertura de leitura circular com 5 mm de diâmetro, mantendo-se a orientação nas avaliações. Uma camada de glicerina foi interposta entre o conjunto e a área de leitura para favorecer o acoplamento óptico. Um único operador realizou duas leituras de cada espécime, com intervalo de 24 horas entre elas, tanto na avaliação basal quanto após o envelhecimento. O procedimento está ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Procedimento de avaliação instrumental da cor: (A) conjunto formado pelo substrato dentário e pela cerâmica cimentada; (B) posicionamento e centralização da amostra na abertura de leitura; (C) registro das coordenadas L^* , a^* e b^* no sistema CIELAB



Conjunto dente–cerâmica

Centralização da amostra

Registro das coordenadas CIELAB

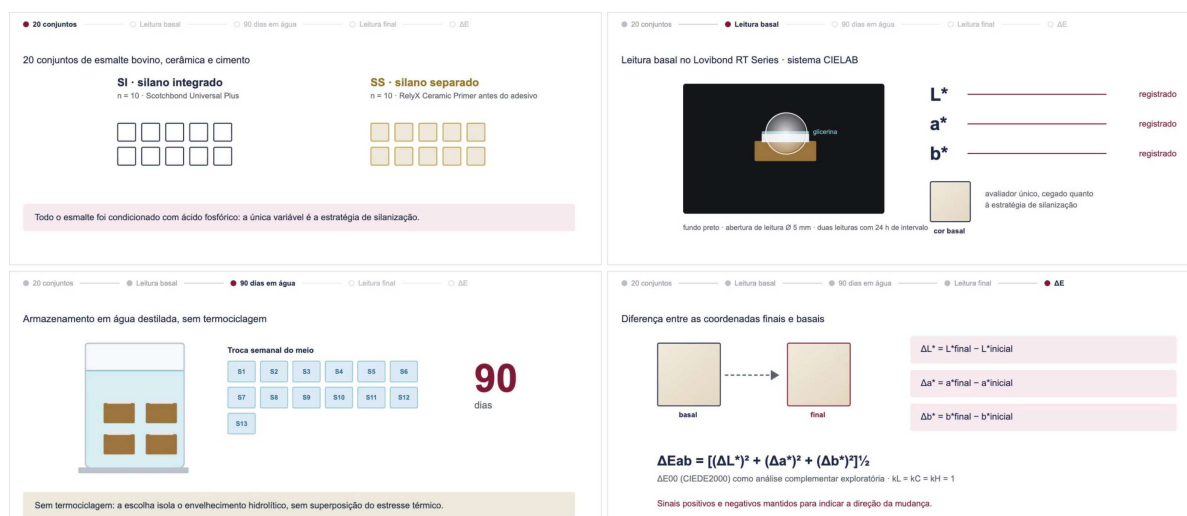
Fonte: acervo da pesquisa.

As leituras foram conduzidas por um único avaliador, cegado quanto à estratégia de silanização.

4.5.3 Envelhecimento e cálculo da alteração cromática

Após a leitura basal, os espécimes foram armazenados em água destilada durante 90 dias, com substituição semanal do meio. Ao término desse período, foram realizadas novas leituras das coordenadas CIELAB. Não foi empregada termociclagem no experimento de cor. Essa escolha buscou isolar o envelhecimento hidrolítico, sem superposição do estresse térmico; consequentemente, os resultados cromáticos não podem ser comparados diretamente, em magnitude, aos resultados mecânicos obtidos após 10.000 ciclos térmicos. O armazenamento em água é empregado para avaliar a degradação hidrolítica e a estabilidade de cor de cimentos resinosos (Ferracane, 2006; Benkeser et al., 2024). O fluxo completo do experimento está representado na Figura 12.

Figura 12 – Fluxo do experimento de estabilidade cromática: distribuição dos grupos, leitura basal, armazenamento em água por 90 dias e cálculo das alterações de cor



SI: silano integrado ao adesivo universal; SS: primer cerâmico aplicado separadamente. Fonte: elaboração própria (2026), com base no delineamento do estudo.

As variações de cada coordenada foram calculadas pela diferença entre os valores finais e basais: $\Delta L^* = L^*_{\text{final}} - L^*_{\text{inicial}}$; $\Delta a^* = a^*_{\text{final}} - a^*_{\text{inicial}}$; e $\Delta b^* = b^*_{\text{final}} - b^*_{\text{inicial}}$. A alteração cromática global foi inicialmente determinada pela fórmula CIELAB: $\Delta E_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$. Como análise complementar exploratória, calculou-se também a diferença de cor CIEDE2000 (ΔE_{00}) a partir das coordenadas individuais L^* , a^* e b^* basais e finais, com os fatores paramétricos k_L , k_C e k_H fixados em 1. A fórmula incorporou as diferenças corrigidas de luminosidade, croma e matiz, os respectivos termos de ponderação e o termo de rotação entre croma e matiz, conforme a implementação de Sharma, Wu e Dalal (2005). O ângulo de matiz (h') e o croma (C') foram derivados matematicamente de a^* e b^* , não constituindo medições adicionais. Valores positivos ou negativos das coordenadas individuais foram mantidos para indicar a direção da mudança.

4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

As análises foram conduzidas considerando nível de significância de 5% e testes bicaudais. Para a resistência de união, inicialmente foram examinadas a distribuição dos resíduos e a homogeneidade das variâncias. Em razão da assimetria à direita e da não normalidade dos resíduos na escala original, os valores foram transformados em logaritmo natural. A homogeneidade das variâncias foi verificada pelo teste de Brown–Forsythe. Em seguida, foi aplicada análise de variância de dois fatores, tendo como fatores fixos o condicionamento ácido do esmalte (E– ou E+) e a estratégia de silanização (SI ou SS), incluindo o termo de interação. Os efeitos foram apresentados por estatística F, graus de liberdade, valor de p e eta quadrado parcial (η^2p). Como a interação não foi estatisticamente significativa, não foram realizadas comparações múltiplas de Tukey. A não significância foi interpretada como ausência de evidência estatística de interação, e não como demonstração de independência entre os fatores.

Os modos de falha foram apresentados como frequências absolutas e relativas. A associação global entre grupo experimental e modo de falha foi avaliada pelo teste exato de Fisher–Freeman–Halton. Também foram examinadas, de forma agrupada,

as associações dos modos de falha com o condicionamento do esmalte e com a estratégia de silanização, por testes exatos apropriados.

No experimento de cor, ΔL^* , Δb^* , ΔE_{ab} e ΔE_{00} foram comparadas entre os grupos pelo teste t de Welch, e Δa^* , pelo teste exato de Mann–Whitney. Foram apresentadas média, desvio-padrão, mediana e intervalo interquartil. A magnitude dos efeitos foi expressa pelo g de Hedges nas comparações paramétricas e pela correlação bisserial de postos para Δa^* . Como análise complementar pós-hoc e exploratória, aplicou-se o procedimento de dois testes unilaterais (TOST) aos desfechos globais, com margens de equivalência de $\pm 1,2$ unidade para ΔE_{ab} e $\pm 0,8$ unidade para ΔE_{00} , correspondentes aos limiares de perceptibilidade 50:50 publicados para odontologia (Paravina et al., 2015). A equivalência foi considerada compatível quando o intervalo de confiança de 90% da diferença SS – SI permaneceu integralmente dentro da margem. As cinco comparações cromáticas convencionais não receberam ajuste de multiplicidade.

5 RESULTADOS

Todos os espécimes previstos foram incluídos nas análises. O experimento de resistência de união compreendeu 40 unidades experimentais, distribuídas igualmente entre quatro grupos ($n = 10$), e o experimento de estabilidade cromática compreendeu 20 unidades experimentais, distribuídas entre duas estratégias de tratamento da cerâmica ($n = 10$).

5.1 Resistência de união

5.1.1 Análise descritiva

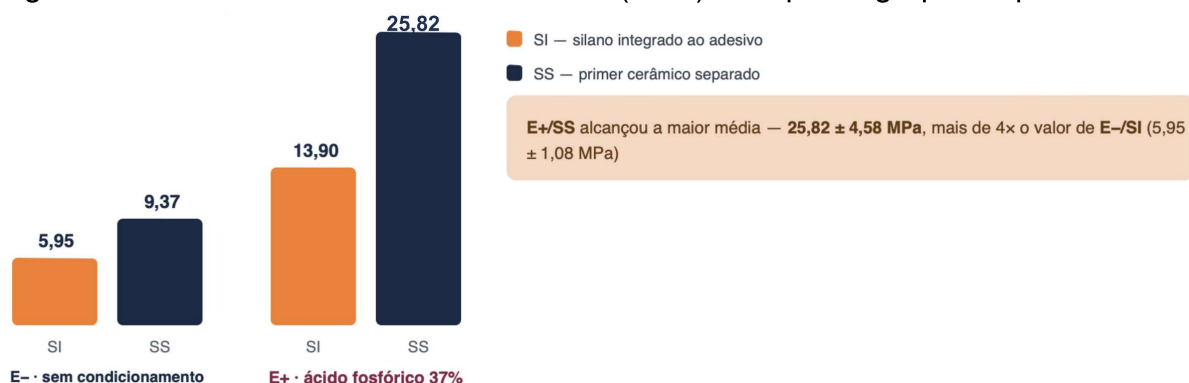
Os valores descritivos da resistência de união estão apresentados na Tabela 1 e na Figura 13. A maior média foi observada no grupo E+/SS ($25,82 \pm 4,58$ MPa), seguido pelos grupos E+/SI ($13,90 \pm 3,12$ MPa), E-/SS ($9,37 \pm 2,56$ MPa) e E-/SI ($5,95 \pm 1,08$ MPa). Os coeficientes de variação variaram de 17,8% a 27,4%, indicando diferenças na dispersão relativa entre os grupos.

Tabela 1 – Estatística descritiva da resistência de união (MPa), segundo o grupo experimental

Grupo	Média $\pm$ DP	Mediana	Q1–Q3	IC95% da média
E-/SI	$5,95 \pm 1,08$	6,19	5,06–6,46	5,18–6,72
E-/SS	$9,37 \pm 2,56$	8,75	7,65–10,75	7,53–11,20
E+/SI	$13,90 \pm 3,12$	13,86	11,95–16,31	11,67–16,13
E+/SS	$25,82 \pm 4,58$	24,39	23,39–26,49	22,54–29,10

Fonte: dados da pesquisa.

Figura 13 – Médias da resistência de união (MPa) nos quatro grupos experimentais

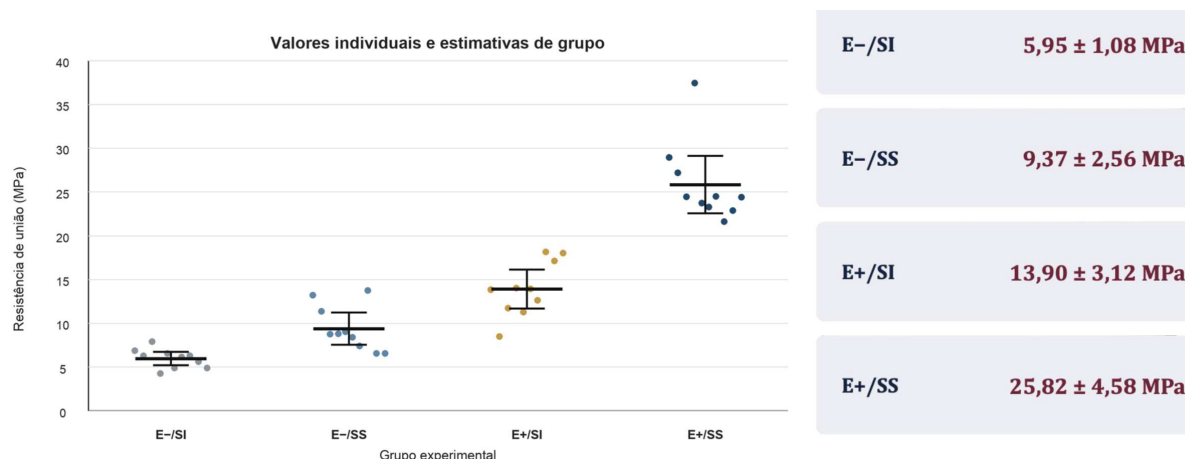


E-: sem condicionamento ácido do esmalte; E+: com condicionamento ácido; SI: silano integrado; SS: primer separado. Fonte: elaboração própria (2026), com base nos dados da pesquisa.

A Figura 14 apresenta os valores individuais de todos os espécimes, juntamente com a média e o intervalo de confiança de 95% de cada grupo. A apresentação dos pontos

individuais permite observar a amplitude, a concentração e a sobreposição dos resultados, sem restringir a leitura às medidas de tendência central.

Figura 14 – Valores individuais da resistência de união, com média e intervalo de confiança de 95%, nos quatro grupos experimentais



Fonte: elaboração própria (2026), com base nos dados da pesquisa.

5.1.2 Verificação dos pressupostos e análise fatorial

A inspeção da distribuição dos dados e dos resíduos indicou assimetria à direita na escala original. Por esse motivo, os valores de resistência de união foram transformados pelo logaritmo natural antes da análise inferencial. Após a transformação, a homogeneidade das variâncias foi considerada adequada pelo teste de Brown–Forsythe ($p = 0,349$). As medidas descritivas permaneceram apresentadas na escala original, em MPa, para preservar sua interpretação clínica e experimental.

A análise de variância de dois fatores demonstrou efeito significativo do condicionamento ácido do esmalte ($p < 0,001$) e da estratégia de silanização da cerâmica ($p < 0,001$). Não foi detectada interação estatisticamente significativa entre os fatores ($p = 0,162$). Esse resultado indica ausência de evidência estatística de interação nas condições avaliadas, mas não demonstra independência entre os efeitos. Os resultados completos da análise estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Análise de variância de dois fatores aplicada aos valores log-transformados de resistência de união

Fonte de variação	gl	F	p	η^2p
Condicionamento do esmalte	1; 36	189,74	< 0,001	0,841
Estratégia de silanização	1; 36	61,65	< 0,001	0,631
Interação	1; 36	2,04	0,162	0,054

Fonte: dados da pesquisa.

5.1.3 Magnitude dos efeitos e médias marginais

O condicionamento ácido do esmalte apresentou elevada magnitude de efeito ($\eta^2p = 0,841$), assim como a estratégia de silanização da cerâmica ($\eta^2p = 0,631$). A interação

apresentou magnitude inferior ($\eta^2p = 0,054$) e não alcançou significância estatística. As médias marginais na escala original são apresentadas na Tabela 3 como apoio descritivo ao delineamento fatorial. A Figura 15 sintetiza graficamente a magnitude dos efeitos e as médias marginais.

Tabela 3 – Médias marginais descritivas da resistência de união (MPa)

Fator	Nível	n	Média $\pm$ DP
Condicionamento do esmalte	E–	20	7,66 $\pm$ 2,60
Condicionamento do esmalte	E+	20	19,86 $\pm$ 7,21
Estratégia de silanização	SI	20	9,93 $\pm$ 4,67
Estratégia de silanização	SS	20	17,59 $\pm$ 9,18

Fonte: dados da pesquisa. Médias marginais apresentadas na escala original apenas para descrição; a inferência foi realizada com os dados log-transformados.

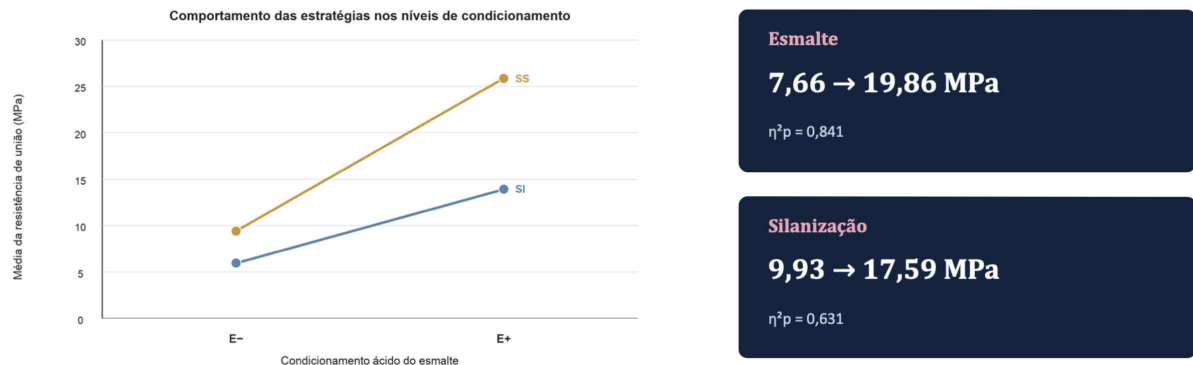
Figura 15 – Magnitude dos efeitos (η^2p) na análise de variância de dois fatores e médias marginais da resistência de união (MPa)



Fonte: elaboração própria (2026), com base nos dados da pesquisa.

O gráfico de interação (Figura 16) mostra o comportamento das estratégias SI e SS nos níveis E– e E+. Embora as linhas apresentem inclinações distintas na escala original, a interação não foi estatisticamente significativa na análise dos dados transformados ($p = 0,162$).

Figura 16 – Gráfico de interação entre o condicionamento ácido do esmalte e a estratégia de silanização da cerâmica



Fonte: elaboração própria (2026), com base nos dados da pesquisa.

5.2 Modos de falha

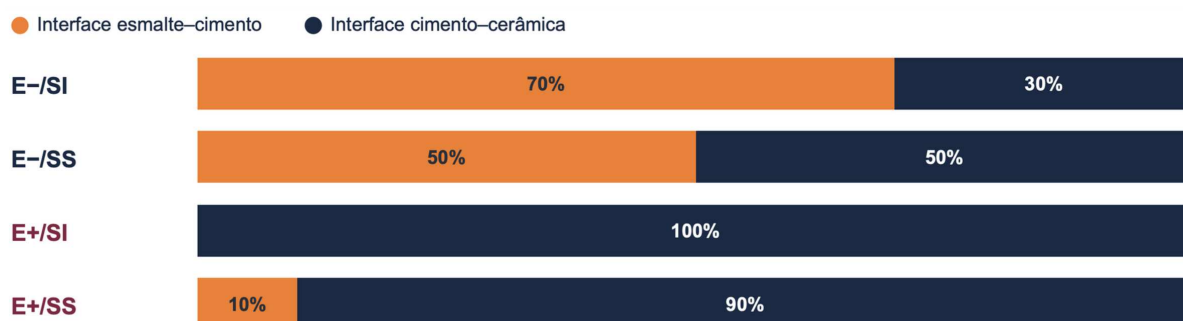
A distribuição dos modos de falha diferiu entre os grupos experimentais (teste exato de Fisher–Freeman–Halton, $p = 0,001$). Nos grupos sem condicionamento do esmalte, predominaram falhas coesivas em esmalte: 70% em E–/SI e 50% em E–/SS. No grupo E+/SS, ocorreram 50% de falhas coesivas em cerâmica, 40% de falhas mistas e 10% de falhas coesivas em esmalte. No grupo E+/SI, todas as falhas foram coesivas em cerâmica. As frequências absolutas e relativas são apresentadas na Tabela 4 e, de forma agrupada por interface, na Figura 17.

Tabela 4 – Distribuição dos modos de falha segundo o grupo experimental

Grupo	Esmalte, n (%)	Cimento, n (%)	Cerâmica, n (%)	Mista, n (%)
E–/SI	7 (70%)	1 (10%)	0 (0%)	2 (20%)
E–/SS	5 (50%)	1 (10%)	0 (0%)	4 (40%)
E+/SI	0 (0%)	0 (0%)	10 (100%)	0 (0%)
E+/SS	1 (10%)	0 (0%)	5 (50%)	4 (40%)

Fonte: dados da pesquisa.

Figura 17 – Distribuição percentual das falhas, agrupadas segundo a interface envolvida, nos grupos experimentais



Interface esmalte-cimento: falhas coesivas em esmalte; interface cimento-cerâmica: falhas coesivas em cerâmica, coesivas no cimento e mistas (Tabela 4). Fonte: elaboração própria (2026), com base nos dados da pesquisa.

Nas análises agrupadas segundo a interface envolvida (Figura 17), a distribuição esteve associada ao condicionamento ácido do esmalte (teste exato, $p < 0,001$), mas não à estratégia de silanização da cerâmica (teste exato, $p = 1,00$). Sem condicionamento, predominaram falhas na interface esmalte-cimento (12/20); com ácido fosfórico, 19 das 20 falhas ocorreram na interface cimento-cerâmica. Descritivamente, o condicionamento do esmalte deslocou o local de ruptura: as falhas coesivas em esmalte predominaram nos grupos E-, enquanto as falhas coesivas em cerâmica foram mais frequentes nos grupos E+, alcançando 100% em E+/SI.

5.3 Estabilidade cromática

Os resultados das alterações nos parâmetros CIELAB e das diferenças totais de cor são apresentados na Tabela 5 e na Figura 18. O grupo SS apresentou maior alteração média de luminosidade ($\Delta L^* = 2,05 \pm 0,83$) do que o grupo SI ($\Delta L^* = 1,20 \pm 0,90$), com diferença estatisticamente significativa ($p = 0,042$). Também houve diferença em Δa^* : o deslocamento no grupo SS foi mais negativo ($-0,27 \pm 0,12$) do que no grupo SI ($-0,09 \pm 0,14$; $p = 0,008$). Não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre as estratégias para Δb^* ($p = 0,190$), ΔE_{ab} ($p = 0,363$) ou ΔE_{00} ($p = 0,277$).

Tabela 5 – Alterações nos parâmetros CIELAB segundo a estratégia de tratamento da cerâmica

Parâmetro	SI Média $\pm$ DP	SS Média $\pm$ DP	Teste estatístico	p
ΔL^*	1,20 $\pm$ 0,90	2,05 $\pm$ 0,83	t de Welch	0,042
Δa^*	-0,09 $\pm$ 0,14	-0,27 $\pm$ 0,12	Mann-Whitney exato	0,008
Δb^*	1,65 $\pm$ 0,44	1,19 $\pm$ 0,96	t de Welch	0,190
ΔE_{ab}	2,22 $\pm$ 0,43	2,53 $\pm$ 0,93	t de Welch	0,363

Parâmetro	SI Média ± DP	SS Média ± DP	Teste estatístico	p
ΔE_{00}	1,52 ± 0,30	1,77 ± 0,62	t de Welch	0,277

Fonte: dados da pesquisa. DP: desvio-padrão. Para Δa^* , média e desvio-padrão são apresentados apenas como medidas descritivas; a inferência foi realizada pelo teste exato de Mann–Whitney.

Tabela 6 – Diferenças entre as estratégias e magnitude dos efeitos para os parâmetros CIELAB

Parâmetro	Diferença SS – SI	Intervalo de confiança	Magnitude do efeito
ΔL^*	0,85	0,03 a 1,67	$g = 0,94$
Δa^*	-0,18	—	$r_n^b = -0,68$
Δb^*	-0,46	-1,19 a 0,26	$g = -0,59$
ΔE_{ab}	0,31	-0,26 a 0,88 (90%)	$g=0,40$ $pTOST = 0,008$
ΔE_{00}	0,25	-0,14 a 0,64 (90%)	$g=0,49$ $pTOST = 0,013$

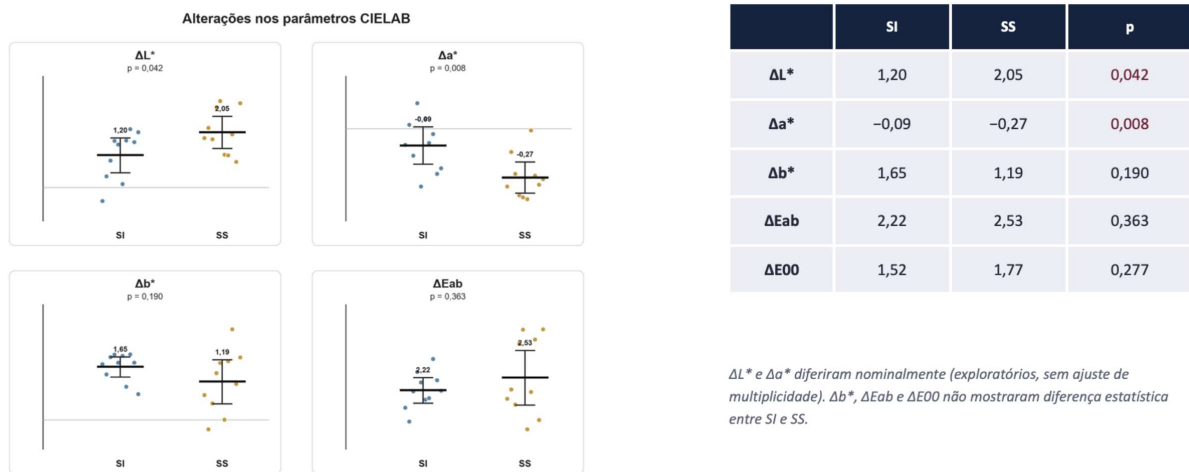
Fonte: dados da pesquisa. Diferenças calculadas como SS – SI. IC 95%: intervalo de confiança das comparações convencionais; IC 90%: intervalo utilizado no TOST exploratório. Para ΔE_{ab} e ΔE_{00} , as margens de equivalência foram, respectivamente, $\pm 1,2$ e $\pm 0,8$. Para ΔL^* , Δb^* , ΔE_{ab} e ΔE_{00} , o efeito foi expresso por g de Hedges. Para Δa^* , utilizou-se a correlação bisserial de postos (r_n^b); o intervalo da diferença média não foi estimado devido à análise não paramétrica.

Em ΔE_{ab} , as medianas foram semelhantes: 2,20 (intervalo interquartil: 2,00–2,45) no grupo SI e 2,21 (1,91–3,42) no grupo SS. Entretanto, o grupo SS exibiu maior dispersão dos valores individuais. As comparações convencionais indicaram diferenças nominais em componentes específicos da cor, sobretudo luminosidade e eixo a^* , mas não detectaram diferença em Δb^* nem na magnitude global da alteração cromática. Como foram examinados cinco desfechos sem ajuste de multiplicidade, os resultados de ΔL^* e Δa^* foram considerados exploratórios.

Pela fórmula CIEDE2000, o grupo SI apresentou ΔE_{00} médio de 1,52 ± 0,30 e mediana de 1,51 (intervalo interquartil: 1,37–1,67); no grupo SS, a média foi 1,77 ± 0,62 e a mediana 1,56 (1,37–2,33). A diferença média SS – SI foi de 0,25 (IC 95%: -0,22 a 0,72; $p = 0,277$). Na análise TOST exploratória, o IC 90% da diferença foi de -0,14 a 0,64 e permaneceu dentro da margem de $\pm 0,8$ ($p = 0,013$). Para ΔE_{ab} , a diferença média foi de 0,31, com IC 90% de -0,26 a 0,88, integralmente contido na margem de $\pm 1,2$ (TOST, $p = 0,008$). Esses resultados são compatíveis com equivalência global de cor dentro das margens adotadas, mas devem ser interpretados como exploratórios em razão do caráter pós-hoc da análise. A Figura 19 representa esses intervalos em relação às margens de equivalência.

Os sinais dos parâmetros indicaram aumento médio da luminosidade nos dois grupos (ΔL^* positivo), deslocamento médio no eixo verde-vermelho em direção ao verde (Δa^* negativo) e deslocamento médio no eixo azul-amarelo em direção ao amarelo (Δb^* positivo). Essa descrição expressa apenas a direção matemática das alterações observadas.

Figura 18 – Valores individuais, médias e intervalos de confiança de 95% das alterações nos parâmetros CIELAB nos grupos SI e SS



Fonte: elaboração própria (2026), com base nos dados da pesquisa.

Figura 19 – Análise exploratória de equivalência (TOST) para ΔEab e $\Delta E00$: intervalos de confiança de 90% da diferença SS – SI em relação às margens de equivalência



Fonte: elaboração própria (2026), com base nos dados da pesquisa.

No experimento de cor, SI correspondeu à aplicação isolada do Scotchbond Universal Plus, que contém silano incorporado, e SS correspondeu à aplicação adicional do RelyX Ceramic Primer antes do mesmo adesivo universal. A alteração cromática global foi expressa pelas fórmulas ΔEab e CIEDE2000 ($\Delta E00$).

6 DISCUSSÃO

Este estudo reuniu duas decisões clínicas que ocorrem em interfaces diferentes do mesmo conjunto restaurador. No experimento mecânico, condicionamento do esmalte e estratégia de silanização foram avaliados em delineamento fatorial após termociclagem. No experimento cromático, o esmalte permaneceu condicionado e apenas SI e SS foram comparados após armazenamento em água. A opção isolou o efeito da estratégia cerâmica e evitou multiplicar grupos, mas também delimitou o alcance da integração entre os desfechos: não se sabe se E-/E+ modifica a estabilidade cromática, nem se podem comparar diretamente as magnitudes mecânicas e ópticas, submetidas a envelhecimentos distintos.

Diante desse delineamento, as hipóteses nulas foram avaliadas de acordo com os respectivos desfechos. H01 e H02 foram rejeitadas: tanto o condicionamento do esmalte com ácido fosfórico quanto a aplicação adicional do primer cerâmico separado aumentaram a resistência de união. H04 também foi rejeitada, pois a distribuição dos modos de falha diferiu entre os protocolos. H03 não foi rejeitada, o que indica ausência de evidência estatística de interação nas condições avaliadas, sem demonstrar independência entre os fatores. Para a cor, H05a e H05b foram rejeitadas com base nas diferenças nominais observadas em ΔL^* e Δa^* ; H05c, H05d e H05e não foram rejeitadas para Δb^* , ΔE_{ab} e ΔE_{00} . Como foram examinados múltiplos desfechos cromáticos sem ajuste de multiplicidade, os resultados das coordenadas específicas devem ser interpretados como exploratórios. O Quadro 5 sintetiza esses achados.

Quadro 5 – Síntese interpretativa dos principais achados

Achado	Interpretação	Decisão sobre a hipótese nula
Condicionamento do esmalte: $p < 0,001$	Maior resistência de união após condicionamento com ácido fosfórico.	H01 rejeitada.
Silano separado: $p < 0,001$	A aplicação do primer dedicado aumentou a resistência em relação ao silano integrado isoladamente.	H02 rejeitada.
Interação: $p = 0,162$	Não foi detectada interação estatisticamente significativa; o resultado não demonstra independência entre os fatores.	H03 não rejeitada.
ΔL^* : $p = 0,042$; Δa^* : $p = 0,008$	Foram observadas diferenças nominais em componentes específicos da cor.	H05a e H05b rejeitadas em caráter exploratório.
Δb^* : $p = 0,190$; ΔE_{ab} : $p = 0,363$; ΔE_{00} : $p = 0,277$	Não houve diferença detectável no eixo b^* nem na magnitude global da alteração cromática.	H05c, H05d e H05e não rejeitadas.

Fonte: elaboração própria (2026), com base nos dados da pesquisa.

Inicialmente, cabe destacar que o condicionamento do esmalte foi o resultado mais forte do estudo. O efeito foi amplo ($\eta^2 p = 0,841$), e a média marginal passou de 7,66 para 19,86 MPa. Nas condições ensaiadas, a interface cimento–esmalte governou o

desempenho do conjunto. O ácido fosfórico criou a microrretenção necessária para que o adesivo infiltrasse uma superfície mais favorável do que aquela produzida pelo modo autocondicionante (Beltrami et al., 2016; Tsujimoto et al., 2016; Suda et al., 2018).

Além disso, o efeito permaneceu depois da termociclagem. Portanto, a versatilidade do adesivo universal não tornou dispensável o condicionamento do esmalte; omiti-lo reduziu de maneira marcada a resistência do complexo adesivo envelhecido. Esse resultado acompanha estudos que mostram padrão morfológico mais retentivo e maior durabilidade quando o esmalte recebe ácido fosfórico antes de adesivos universais (Tsujimoto et al., 2016; Beltrami et al., 2016; Suda et al., 2018).

No caso específico das facetas, esse achado tem peso especial. Essas restaurações oferecem pouca retenção macromecânica e dependem de esmalte preservado. Os valores menores de E- não autorizam prever o fracasso de uma restauração individual, mas revelam perda substancial de margem mecânica. Nesse contexto, o modo universal do adesivo não é razão suficiente para abreviar uma etapa com fundamento morfológico e experimental consistente (Solon-de-Mello et al., 2019; Rohr et al., 2022).

No que se refere à estratégia de silanização, o primer separado também alterou claramente o desempenho: $\eta^2p = 0,631$, com aumento da média marginal de 9,93 para 17,59 MPa. O que se testou, porém, foi uma estratégia completa. SI recebeu Scotchbond Universal Plus sobre a cerâmica condicionada; SS acrescentou RelyX Ceramic Primer antes do mesmo adesivo. Concentração do agente, solvente, estado de hidrólise, evaporação e espessura da camada fazem parte desse contraste. Não se trata de comparar, em abstrato, 'silano' versus 'ausência de silano', pois ambas as estratégias continham uma fonte desse agente.

Nesse sentido, a química ajuda a entender a diferença. Em um primer dedicado, espécies silanólicas reativas chegam à superfície vítrea em ambiente mais simples, condensam-se e formam ligações siloxano; a extremidade organofuncional participa depois da copolimerização com a matriz resinosa. Dentro de um adesivo universal, o silano divide o frasco com água, solventes e monômeros ácidos. Hidrólise e autocondensação passam a ocorrer no mesmo meio, inclusive durante o armazenamento. O presente estudo não analisou essa interface quimicamente, mas o mecanismo é sustentado por evidências independentes (Yoshihara et al., 2016; Yao et al., 2018; Chen et al., 2019).

Em consonância com esse mecanismo, os estudos laboratoriais apontam na mesma direção. A pré-silanização aumentou ou preservou a união a cerâmicas à base de sílica após envelhecimento (Cardenas et al., 2017; Chen et al., 2019; Kim et al., 2021; Almaskin et al., 2022). Ainda assim, o efeito depende do produto. Formulações recentes não se comportam de modo uniforme, e alguns sistemas simplificados alcançaram desempenho satisfatório em condições específicas (Yao et al., 2021; Tannen et al., 2025; Pulido et al., 2026). A conclusão desta tese é, portanto, deliberadamente específica: para RelyX Universal, Scotchbond Universal Plus e RelyX Ceramic Primer, a etapa separada trouxe ganho mecânico.

Nessa mesma linha, o estudo de Bernardi et al. (2026), publicado durante o desenvolvimento desta pesquisa, oferece a comparação mais próxima. Com os

mesmos Scotchbond Universal Plus e RelyX Ceramic Primer, a adição do primer elevou a resistência de 23,9 para 26,1 MPa imediatamente e de 18,4 para 21,5 MPa após 10.000 ciclos térmicos. Os ganhos foram menores que os observados aqui, mas seguiram a mesma direção. A diferença de magnitude é compatível com os desenhos: Bernardi et al. uniram cilindros de resina diretamente a discos de dissilicato prensado; esta tese avaliou o conjunto esmalte–cimento–cerâmica em dissilicato CAD-CAM. A concordância entre geometrias e materiais processados de modo distinto reforça o ganho mecânico do primer separado para essa combinação comercial. O Quadro 6 reúne essa convergência com estudos independentes.

Quadro 6 – Convergência dos resultados de resistência de união com estudos independentes

Estudo	Comparação	Resultado
Lee et al. (2017)	Silano integrado a adesivo multimodo, após termociclagem	Silano integrado insuficiente para união durável
Awad et al. (2023)	Scotchbond Universal Plus isolado versus primer dedicado (Monobond N)	20,41 versus 32,21 MPa ($p = 0,004$)
Bernardi et al. (2026)	Mesmos materiais desta tese, dissilicato prensado, após termociclagem	18,4 para 21,5 MPa com o primer separado

Fonte: elaboração própria (2026), com base em Lee et al. (2017), Awad et al. (2023) e Bernardi et al. (2026).

Por conseguinte, essa constatação também separa versatilidade comercial de equivalência experimental. O fabricante admite diferentes modalidades de aplicação; isso amplia o uso do sistema, mas não garante que todas produzam a mesma resistência. Aqui, simplificar custou resistência após envelhecimento. Se esse ganho se converte em maior sobrevivência clínica é outra pergunta, que um ensaio de união não responde sozinho (Heintze et al., 2015).

Quanto à relação entre os dois fatores, o termo de interação não alcançou significância estatística ($p = 0,162$; $\eta^2p = 0,054$). Assim, os dados não sustentam sinergia nem demonstram independência entre condicionamento e silanização. A média elevada de $E+/SS$ descreve o grupo, mas não prova que os dois procedimentos atuem de forma aditiva.

Cabe ressaltar, ainda, que a inferência foi realizada após transformação logarítmica, necessária para adequar os resíduos, enquanto as médias permaneceram em MPa para facilitar a leitura. Essa diferença de escala não altera a direção dos efeitos. Ela apenas lembra que o ensaio registra a ruptura do conjunto, sensível ao elo mais vulnerável, e não uma soma linear das resistências de cada interface.

De forma complementar, os modos de falha reforçaram o quadro mecânico. Sem condicionamento, as rupturas concentraram-se no esmalte; com ácido fosfórico, migraram para padrões mistos ou coesivos. Em outras palavras, o esmalte deixou de ser o ponto preferencial de ruptura. O teste categórico confirmou essa redistribuição, embora não substitua os valores contínuos de resistência.

Entretanto, falha coesiva não é sinônimo de adesão superior. Ela identifica onde a fratura percorreu aquele espécime sob determinada geometria de carga. Nos grupos

E-, o predomínio em esmalte acompanhou a baixa resistência. Em E+/SI, todas as falhas ocorreram na cerâmica; em E+/SS, 50% foram cerâmicas, 40% mistas e 10% em esmalte. A subclassificação torna o padrão mais informativo, mas não transforma o modo de falha em medida de força interfacial.

De fato, o contraste entre E+/SI e E+/SS deixa isso evidente: o primeiro apresentou 100% de falhas cerâmicas, embora sua média tenha sido menor. Ensaios de cisalhamento concentram tensões nas bordas, e pequenas diferenças de geometria, módulo ou espessura adesiva podem redirecionar a trinca (Placido et al., 2007; Armstrong et al., 2010). Por isso, a resistência deve permanecer como desfecho principal; o mapa de falhas explica a trajetória da ruptura.

No que diz respeito ao envelhecimento, antes do ensaio os espécimes passaram por 10.000 ciclos térmicos, com 60 segundos em cada banho e 30 segundos de transferência. Água e variações repetidas de temperatura favorecem plastificação da matriz, hidrólise de ligações suscetíveis e remoção de silano fracamente adsorvido (Hooshmand et al., 2002; Ferracane, 2006). O ganho proporcionado pelo primer separado sobreviveu a esse desafio.

Contudo, dez mil ciclos não equivalem a um número definido de anos. Protocolos variam e não reproduzem mastigação, biofilme, mudanças de pH ou contaminação. O resultado é comparativo: mostra qual protocolo resistiu melhor ao envelhecimento aplicado, não prevê uma data de falha clínica.

Por outro lado, a pergunta cromática foi diferente. O primer não deveria mudar a cor como um pigmento; a hipótese era interfacial. Molhabilidade, microvazios, espessura da película e ingresso de água podem alterar a passagem da luz por uma faceta delgada. Essa via é coerente com a física do conjunto e com a degradação hidrolítica de materiais resinosos (Ferracane, 2006; Pires-de-Souza et al., 2021).

Todavia, essa via não foi medida diretamente. O estudo não quantificou sorção, solubilidade, nanoinfiltração ou espessura interfacial. Assim, a possível ligação entre continuidade adesiva e comportamento óptico serve para formular o mecanismo e orientar novos ensaios, não para explicar causalmente cada alteração observada.

Em relação aos desfechos globais de cor, depois de 90 dias em água, SI e SS apresentaram ΔE_{ab} de 2,22 e 2,53 ($p = 0,363$) e ΔE_{00} de 1,52 e 1,77 ($p = 0,277$). Como um teste de diferença não demonstra equivalência, acrescentou-se o TOST com margens de $\pm 1,2$ para ΔE_{ab} e $\pm 0,8$ para ΔE_{00} , baseadas nos limiares de perceptibilidade 50:50 (Paravina et al., 2015). Os IC 90% ficaram dentro dessas margens: -0,26 a 0,88 para ΔE_{ab} e -0,14 a 0,64 para ΔE_{00} . O resultado favorece equivalência global nas margens adotadas, mas permanece exploratório em razão do caráter pós-hoc da análise.

Do ponto de vista clínico, as médias de ΔE_{ab} ficaram entre perceptibilidade (1,2) e aceitabilidade (2,7). Trata-se de uma referência clínica descritiva, não de uma nova comparação estatística. Além disso, médias escondem extremos; os pontos individuais e a dispersão mostram melhor quantos espécimes se aproximaram ou ultrapassaram os limiares.

Apesar dessa equivalência global, a cor não percorreu exatamente a mesma trajetória nos dois grupos. SS mostrou maior aumento de luminosidade e deslocamento mais negativo no eixo verde-vermelho; Δb^* não diferiu. ΔE_{ab} e ΔE_{00} condensam essas direções, que podem se compensar matematicamente. Por isso, coordenadas e diferenças globais foram apresentadas juntas.

Nesse ponto, porém, a cautela precisa ser explícita. Cinco desfechos cromáticos foram testados sem ajuste de multiplicidade. ΔL^* ($p = 0,042$) e Δa^* ($p = 0,008$) são sinais nominais, úteis para gerar hipótese, mas ainda não confirmatórios. Uma replicação deve escolher previamente o desfecho primário, controlar multiplicidade e calcular a amostra para a pergunta cromática.

Da mesma forma, o CIEDE2000 chegou à mesma conclusão global: ΔE_{00} de $1,52 \pm 0,30$ em SI e $1,77 \pm 0,62$ em SS, diferença média de 0,25 (IC 95%: -0,22 a 0,72; $p = 0,277$). A fórmula pondera luminosidade, croma e matiz para aproximar a percepção visual (Sharma et al., 2005). As duas médias ficaram abaixo do limiar de aceitabilidade de 1,8 proposto por Paravina et al. (2015), embora SS tenha se aproximado desse valor e apresentado maior variabilidade.

Ainda assim, nada nesses dados demonstra uma ação cromática direta do silano. O protocolo pode alterar molhabilidade, resíduos, distribuição do cimento ou espessura interfacial, enquanto a cor final também depende da cerâmica, da película de cimento, do sistema iniciador, da conversão e da água absorvida (Dede et al., 2017; Lee e Choi, 2018; Elkhishen et al., 2022). Como cimento e cerâmica foram constantes, a interface é uma origem possível para ΔL^* e Δa^* , mas não a única.

Para contextualizar esses achados, convém lembrar que o RelyX Universal é um cimento dual desenvolvido para uso autoadesivo ou combinado ao Scotchbond Universal Plus. Seu perfil técnico descreve dimetacrilatos, monômeros fosforilados, iniciadores e cargas radiopacas, além de componentes anfifílicos associados à versatilidade do sistema (3M, 2020). Essas informações explicam o projeto do produto; o desempenho precisa ser julgado por comparações independentes.

De modo geral, essas comparações mostram dependência do substrato e do protocolo. Andrews et al. (2023) observaram maior união à dentina com agente adesivo, e Rohr et al. (2022) encontraram maior união ao esmalte quando condicionamento e primer foram associados. O cimento é versátil. Não é universalmente superior, pois sua posição relativa muda com a modalidade de aplicação e o material aderido.

Especificamente para a cor, conversão e água são centrais. Benkeser et al. (2024) encontraram maior sorção para RelyX Universal do que para Panavia V5 e Panavia SA Plus, além de associação forte entre sorção e ΔE_{00} ; a fotoativação reduziu a solubilidade, sobretudo no RelyX Universal. O desenho não reproduziu esta cimentação de facetas, mas oferece contexto para a mudança óptica: a resposta depende tanto da formulação quanto da energia entregue através da cerâmica.

Em conjunto, os dois experimentos convergem em uma mensagem, não em uma escala comum. O primer separado aumentou a resistência após termociclagem. Para cor, após água, SI e SS não diferiram em ΔE_{ab} ou ΔE_{00} , e o TOST exploratório

favoreceu equivalência. Como fatores e envelhecimentos foram diferentes, não há base para calcular um balanço direto entre 'custo mecânico' e 'custo cromático'.

Portanto, na prática, os dados apoiam duas etapas para o sistema testado: ácido fosfórico no esmalte e RelyX Ceramic Primer na cerâmica. Essa recomendação é firme no âmbito laboratorial desta combinação de materiais. A confirmação de benefício clínico — sobrevivência, fratura e alteração marginal — depende de acompanhamento longitudinal.

Quanto às limitações deste estudo, a primeira decorre do modelo. Esmalte bovino favorece padronização, mas não reproduz integralmente o humano; o cisalhamento gera tensões não uniformes; e não houve fadiga. Além disso, os espécimes mecânicos passaram por termociclagem, enquanto os cromáticos permaneceram em água. A assimetria isolou desafios distintos, mas impede comparar suas magnitudes. Como todos os espécimes de cor tinham esmalte condicionado, o efeito óptico de E-/E+ continua desconhecido.

Em segundo lugar, a estereomicroscopia permitiu subclassificar as falhas, não reconstruir a origem microscópica da trinca. Na avaliação de cor, faltaram medidas de sorção, solubilidade, espessura de película, molhabilidade, nanoinfiltração e morfologia interfacial. Também não foram testadas outras espessuras, translucidezes, tonalidades de cimento ou durações de envelhecimento. Esses limites restringem a explicação mecanística, sobretudo para os componentes cromáticos.

Além disso, com dez unidades por grupo, o estudo detectou efeitos principais grandes no experimento mecânico. A interação de menor magnitude deve ser interpretada com cautela. No experimento cromático, o tamanho dos grupos limita a precisão para diferenças pequenas e, associado ao caráter pós-hoc do TOST, não permite tratar a equivalência como confirmatória.

Por fim, o cálculo mecânico tornou-se rastreável com a identificação do piloto, do f de Cohen e do G^* Power. Permanecem ausentes um índice numérico de concordância do avaliador e alguns parâmetros instrumentais de cor. Essas lacunas não mudam os valores observados, mas dificultam a reprodução externa do protocolo.

Diante dessas limitações, o próximo passo para pesquisas futuras é testar outros conjuntos de cimento e adesivo sob condições comparáveis. Para integrar resistência e cor, o mesmo desenho E-/E+ $\times$ SI/SS e o mesmo envelhecimento devem ser aplicados aos dois desfechos. Estudos confirmatórios de cor precisam definir, antes da coleta, o desfecho primário, a margem clínica, o controle de multiplicidade e o tamanho amostral para equivalência. Fadiga, pH, pigmentantes e caracterização microscópica ou espectroscópica aproximariam o modelo do ambiente bucal e esclareceriam a interface.

Adicionalmente, convém manter L^* , a^* e b^* individuais e relatar simultaneamente ΔE_{ab} e ΔE_{00} . Espessura e translucidez do dissilicato, tonalidade do cimento e modo de ativação devem entrar como fatores em estudos próprios. Por fim, ensaios clínicos com facetas poderão responder à questão decisiva: se o ganho mecânico do primer separado reduz fraturas ou alterações marginais ao longo do tempo.

7 CONCLUSÕES

Nas condições experimentais avaliadas, o condicionamento do esmalte bovino com ácido fosfórico a 37% e a aplicação adicional do RelyX Ceramic Primer sobre o dissilicato de lítio estiveram associados a maior resistência de união do conjunto cimentado com RelyX Universal e Scotchbond Universal Plus. Não foi detectada interação estatisticamente significativa; esse resultado indica ausência de evidência de interação nas condições avaliadas, mas não demonstra independência entre os fatores. Os modos de falha diferiram entre os protocolos, com predomínio de falhas coesivas em esmalte nos grupos E- e de falhas coesivas em cerâmica nos grupos E+.

Na avaliação óptica, foram observadas diferenças nominais exploratórias em ΔL^* e Δa^* , sem diferença convencional em Δb^* . O TOST exploratório foi compatível com equivalência entre SI e SS para a alteração global expressa por ΔE_{ab} e ΔE_{00} dentro de margens baseadas em perceptibilidade. Em razão do caráter pós-hoc da análise e da avaliação de múltiplos desfechos sem ajuste, esse resultado não deve ser interpretado como confirmação definitiva de equivalência.

A principal contribuição desta investigação consiste em demonstrar que, para a combinação estudada, o Scotchbond Universal Plus empregado isoladamente não reproduziu o desempenho mecânico alcançado com a aplicação adicional do RelyX Ceramic Primer, enquanto a alteração global de cor foi compatível com equivalência exploratória após armazenamento em água. Esses achados sustentam a manutenção do condicionamento fosfórico do esmalte e do primer cerâmico separado quando o objetivo é maximizar a resistência laboratorial. Contudo, os experimentos de resistência e cor utilizaram fatores e envelhecimentos diferentes; por isso, não se pode comparar diretamente a magnitude de seus efeitos nem afirmar que o condicionamento do esmalte seja irrelevante para a cor. A repercussão clínica e a equivalência cromática confirmatória exigem estudos prospectivos especificamente dimensionados.

REFERÊNCIAS

3M. 3M™ RelyX™ Universal Resin Cement: technical product profile. Seefeld: 3M Deutschland GmbH, 2020. Disponível em: https://assets.solventum.com/is/content/mmmspinco/Relyx_Universal_TPP_INTpdf. Acesso em: 22 ago. 2026.

ALBANESI, R. B. et al. Incisal coverage or not in ceramic laminate veneers: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Dentistry*, [S. l.], v. 52, p. 1-7, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2016.06.004>.

ALMASKIN, D. et al. The Bond Strength of a Universal Adhesive System with Silane to Lithium Disilicates in Comparison with an Isolated Silane Coupling Agent. *Journal of Prosthodontics*, [S. l.], v. 31, n. 6, p. 512-520, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/jopr.13442>.

ALVARENGA, M. et al. Self-adhesive resin cement versus conventional cements on the failure rate of indirect single-tooth restorations: A systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, [S. l.], v. 132, n. 5, p. 880.e1-880.e8, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.04.027>.

ANDREWS, E. K.; GEDGE, J. L.; VANDEWALLE, K. S. Bond Strength of a Novel Universal Resin Cement to Dentin with or without an Adhesive Bonding Agent: An In Vitro Study. *The Journal of Contemporary Dental Practice*, [S. l.], v. 24, n. 10, p. 725-728, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10024-3568>.

AOKI, N. et al. Effects of degree of dissociation of acid used on hydrolytic durability of ceramic primer. *Dental Materials Journal*, [S. l.], v. 33, n. 5, p. 614-620, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4012/DMJ.2013-319>.

ARMSTRONG, S. et al. Adhesion to tooth structure: A critical review of “micro” bond strength test methods. *Dental Materials*, [S. l.], v. 26, n. 2, p. e50-e62, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2009.11.155>.

ASLAN, Y. L.; ULUDAMAR, A.; ÖZKAN, Y. Retrospective Analysis of Lithium Disilicate Laminate Veneers Applied by Experienced Dentists: 10-Year Results. *The International Journal of Prosthodontics*, [S. l.], v. 32, n. 6, p. 471-474, 2019. DOI: <https://doi.org/10.11607/ijp.6234>.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D5573-99: standard practice for classifying failure modes in adhesive bonding. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1999.

AWAD, M. M. et al. Silane-Containing Universal Adhesives Influence Resin-Ceramic Microtensile Bond Strength. *Coatings*, [S. l.], v. 13, n. 2, e-location 477, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings13020477>.

AWAD, M. M. et al. ‘No-Primer’ Resin Cementation of Lithium Disilicate Ceramic: A Microtensile Bond Strength Evaluation. *Materials*, [S. l.], v. 17, n. 1, e-location 137, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17010137>.

BARCELLOS, D. C. et al. Microtensile test in dental research. controversial aspects in statistical analysis (experimental unit and premature failures). *Brazilian Dental Science*, [S. l.], v. 16, n. 3, p. 07-17, 2013. DOI: <https://doi.org/10.14295/BDS.2013.V16I3.869>.

BERNARDI, L. G. et al. Influence of silane-containing universal adhesives and separate silanization on lithium disilicate bond strength. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, [S. l.], publicação antecipada on-line, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2026.06.015>.

BELTRAMI, R. et al. Comparison of Shear Bond Strength of Universal Adhesives on Etched and Nonetched Enamel. *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*, [S. l.], v. 14, n. 1, p. 78-83, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5301/jabfm.5000261>.

BENKESER, S. M.; KARLIN, S.; ROHR, N. Effect of curing mode of resin composite cements on water sorption, color stability, and biaxial flexural strength. *Dental Materials*, [S. l.], v. 40, n. 6, p. 897-906, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2024.04.004>.

BORGES, L. P. S. et al. Effect of lithium disilicate ceramic thickness, shade and translucency on transmitted irradiance and knoop microhardness of a light cured luting resin cement. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, [S. l.], v. 32, n. 8, e-location 90, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10856-021-06562-2>.

BRUNETTO, J. et al. Comparison of self-etching and conventional bifunctional coupling agent in lithium disilicate ceramic: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*, [S. l.], v. 16, n. 4, p. e367-e376, 2024. DOI: <https://doi.org/10.4317/jced.61369>.

CARDENAS, A. M. et al. Effect of MDP-containing silane and adhesive used alone or in combination on the long-term bond strength and chemical interaction with lithium disilicate ceramics. *The Journal of Adhesive Dentistry*, [S. l.], v. 19, n. 3, p. 203-212, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3290/j.jad.a38414>.

CHEN, B. et al. Effectiveness of pre-silanization in improving bond performance of universal adhesives or self-adhesive resin cements to silica-based ceramics: Chemical and in vitro evidences. *Dental Materials*, [S. l.], v. 35, n. 4, p. 543-553, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2019.01.010>.

COSTA NETO, D. D. et al. The effect of lithium disilicate opacity on polymerization of a dual-cured resin cement. *European Journal of Prosthodontics and Restorative Dentistry*, [S. l.], v. 25, n. 1, p. 15-19, 2017. DOI: https://doi.org/10.1922/EJPRD_01626daCostaNeto05.

DEDE, D. U. Ö.; CEYLAN, G.; YILMAZ, B. Effect of brand and shade of resin cements on the final color of lithium disilicate ceramic. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, [S. l.], v. 117, n. 4, p. 539-544, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2016.07.014>.

ELKHISHEN, E. A. et al. Effect of ceramic and resin cement type on color stability and translucency of ceramic laminate veneers for diastema closure: an in vitro study.

Scientific Reports, [S. I.], v. 12, n. 1, e-location 22082, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26581-5>.

ETIENNE, O. et al. Survival of Ceramic Veneers: Impact of Dentin Exposure and Tooth Vitality After 1 to 15 Years of Follow-Up. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, [S. I.], v. 37, n. 12, p. 2519-2532, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1111/jerd.70016>.

FERRACANE, J. L. Hygroscopic and hydrolytic effects in dental polymer networks. *Dental Materials*, [S. I.], v. 22, n. 3, p. 211-222, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2005.05.005>.

GALE, M. S.; DARVELL, B. W. Thermal cycling procedures for laboratory testing of dental restorations. *Journal of Dentistry*, [S. I.], v. 27, n. 2, p. 89-99, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0300-5712\(98\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0300-5712(98)00037-2).

GHINEA, R. et al. Color difference thresholds in dental ceramics. *Journal of Dentistry*, [S. I.], v. 38, p. e57-e64, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2010.07.008>.

GRANELL-RUIZ, M. et al. Influence of bruxism on survival of porcelain laminate veneers. *Medicina Oral, Patología Oral y Cirugía Bucal*, [S. I.], v. 19, n. 5, p. e426-e432, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4317/medoral.19097>.

HEINTZE, S. D.; ROUSSON, V.; MAHN, E. Bond strength tests of dental adhesive systems and their correlation with clinical results – A meta-analysis. *Dental Materials*, [S. I.], v. 31, n. 4, p. 423-434, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.01.011>.

HOOSMAND, T.; VAN NOORT, R.; KESHVAD, A. Bond durability of the resin-bonded and silane treated ceramic surface. *Dental Materials*, [S. I.], v. 18, n. 2, p. 179-188, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0109-5641\(01\)00047-1](https://doi.org/10.1016/S0109-5641(01)00047-1).

IMBURGIA, M.; LERNER, H.; MANGANO, F. A retrospective clinical study on 1075 lithium disilicate CAD/CAM veneers with feather-edge margins cemented on 105 patients. *European Journal of Prosthodontics and Restorative Dentistry*, [S. I.], v. 29, n. 1, p. 54-63, 2021. DOI: https://doi.org/10.1922/EJPRD_2248Mangano10.

KIM, Y. R. et al. Effect of Silane-Containing Universal Adhesives on the Bonding Strength of Lithium Disilicate. *Materials*, [S. I.], v. 14, n. 14, e-location 3976, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14143976>.

KLEIN, P. et al. Survival and Complication Rates of Feldspathic, Leucite-Reinforced, Lithium Disilicate and Zirconia Ceramic Laminate Veneers: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, [S. I.], v. 37, n. 3, p. 601-619, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1111/jerd.13351>.

KOTB, S. N.; EL BANNA, H. I. M. Influence of Cementation Protocol on Color Change and Fracture Resistance of Lithium Disilicate and Ultra-Translucent Zirconia Laminate Veneers (In-Vitro Study). *Egyptian Dental Journal*, [S. I.], v. 71, n. 4, p. 3191-3206, 2025. DOI: <https://doi.org/10.21608/edj.2025.396162.3518>.

LEBURU, A. et al. Survival and Failure Rates of Lithium Disilicate Veneers: A Systematic Review. *International Journal of Prosthodontics and Restorative Dentistry*, [S. I.], v. 15, n. 1, p. 60-66, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10019-1489>.

LEE, S. M.; CHOI, Y. S. Effect of ceramic material and resin cement systems on the color stability of laminate veneers after accelerated aging. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, [S. l.], v. 120, n. 1, p. 99-106, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2017.09.014>.

LEE, H. et al. Bonding of the silane containing multi-mode universal adhesive for lithium disilicate ceramics. *Restorative Dentistry & Endodontics*, [S. l.], v. 42, n. 2, p. 95-104, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5395/rde.2017.42.2.95>.

LIMA, R. B. W. et al. Effect of universal adhesives and self-etch ceramic primers on bond strength to glass-ceramics: A systematic review and meta-analysis of in vitro studies. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, [S. l.], v. 131, n. 3, p. 392-402, 2024a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2022.01.011>.

LIMA, S. C. et al. Influence of thickness and translucency of lithium disilicate ceramic on the degree of conversion of resin cements with different initiators. *European Journal of Prosthodontics and Restorative Dentistry*, [S. l.], v. 32, n. 1, p. 83-90, 2024b. DOI: https://doi.org/10.1922/EJPRD_2552Lima08.

LOPES, G. et al. Does a Self-etching Ceramic Primer Improve Bonding to Lithium Disilicate Ceramics? Bond Strengths and FESEM Analyses. *Operative Dentistry*, [S. l.], v. 44, n. 2, p. 210-218, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2341/17-355-L>.

MARAVIĆ, T. et al. Resin composite cements: Current status and a novel classification proposal. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, [S. l.], v. 35, n. 7, p. 1085-1097, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1111/jerd.13036>.

MARTINS, F. V.; VASQUES, W. F.; FONSECA, E. M. How the Variations of the Thickness in Ceramic Restorations of Lithium Disilicate and the Use of Different Photopolymerizers Influence the Degree of Conversion of the Resin Cements: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Prosthodontics*, [S. l.], v. 28, n. 1, p. e395-e403, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/jopr.12920>.

MARUO, Y. et al. Does Acid Etching Morphologically and Chemically Affect Lithium Disilicate Glass Ceramic Surfaces? *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*, [S. l.], v. 15, n. 1, p. e93-e100, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5301/jabfm.5000303>.

MIOTTI, L. et al. Is Conventional Resin Cement Adhesive Performance to Dentin Better Than Self-adhesive? A Systematic Review and Meta-Analysis of Laboratory Studies. *Operative Dentistry*, [S. l.], v. 45, n. 5, p. 484-495, 2020. DOI: <https://doi.org/10.2341/19-153-l>.

MURAKAMI, S.; HIRANO, K.; FUSEJIMA, F. Bonding Durability of Resin Cement to Lithium Disilicate Glass Ceramics. *Dental Materials*, [S. l.], v. 38, e-location e31, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2021.12.081>.

NEJATIDANESH, F. et al. Five year clinical outcomes and survival of chairside CAD/CAM ceramic laminate veneers — a retrospective study. *Journal of Prosthodontic Research*, [S. l.], v. 62, n. 4, p. 462-467, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpor.2018.05.004>.

NISHIYAMA, N. et al. Influence of adsorption characteristics of silane on the hydrolytic stability of silane at the silica-matrix interface. *Composites*, [S. I.], v. 26, n. 4, p. 309-313, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(95\)93674-9](https://doi.org/10.1016/0010-4361(95)93674-9).

OZ, O. Effects of adhesive system, thermal aging and ceramic shade on the final color and bond strength of monolithic lithium disilicate ceramics. *Annals of Medical Research*, [S. I.], v. 27, n. 10, e-location 2610, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5455/annalsmedres.2020.05.536>.

PARAVINA, R. D. et al. Color Difference Thresholds in Dentistry. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, [S. I.], v. 27, n. S1, p. S1-S9, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/jerd.12149>.

PILECCO, R. O. et al. The loss of resin cement adhesion to ceramic influences the fatigue behavior of bonded lithium disilicate restorations. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, [S. I.], v. 148, e-location 106169, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.106169>.

PIRES-DE-SOUZA, F. D. C. P. et al. Color Stability, Translucency, and Wettability of a Lithium Disilicate Dental Ceramics Submitted to Different Surface Treatments. *International Journal of Prosthodontics and Restorative Dentistry*, [S. I.], v. 11, n. 1, p. 4-8, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10019-1304>.

PLACIDO, E. et al. Shear versus micro-shear bond strength test: A finite element stress analysis. *Dental Materials*, [S. I.], v. 23, n. 9, p. 1086-1092, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.DENTAL.2006.10.002>.

PORTO, T. et al. Optimal Hydrofluoric Acid Etching Duration and Impact of Silane/Adhesive on Profilometric Properties and Bonding to Lithium Disilicate Glass Ceramics. *Operative Dentistry*, [S. I.], v. 49, n. 5, p. 617-626, 2024. DOI: <https://doi.org/10.2341/24-015-L>.

PROCHNOW, C. et al. How does hydrofluoric acid etching affect the cyclic load-to-failure of lithium disilicate restorations. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, [S. I.], v. 87, p. 306-311, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.07.040>.

PULIDO, C. et al. Influence of Universal Adhesives With or Without Silane Compared to One-Step and Two-Step Silane Agents on Bond Strength to Lithium Disilicate. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, [S. I.], publicação antecipada on-line, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1111/jerd.70240>.

ROHR, N. et al. A comprehensive in vitro study on the performance of two different strategies to simplify adhesive bonding. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, [S. I.], v. 34, n. 5, p. 833-842, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/jerd.12903>.

SCOTTI, N. et al. Effect of Lithium Disilicate Veneers of Different Thickness on the Degree of Conversion and Microhardness of a Light-Curing and a Dual-Curing Cement. *The International Journal of Prosthodontics*, [S. I.], v. 29, n. 4, p. 384-388, 2016. DOI: <https://doi.org/10.11607/ijp.4811>.

SHARMA, G.; WU, W.; DALAL, E. N. The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. *Color Research & Application*, [S. l.], v. 30, n. 1, p. 21-30, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1002/col.20070>.

SIQUEIRA, F. S. F. D. et al. Effect of Self-Etching Primer Associated to Hydrofluoric acid or Silane on Bonding to Lithium Disilicate. *Brazilian Dental Journal*, [S. l.], v. 30, n. 2, p. 171-178, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-6440201902366>.

SOLON-DE-MELLO, M. et al. Longevity of indirect restorations cemented with self-adhesive resin luting with and without selective enamel etching. A Systematic review and meta-analysis. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, [S. l.], v. 31, n. 4, p. 327-337, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/jerd.12504>.

SUDA, S. et al. Comparison of enamel bond fatigue durability between universal adhesives and two-step self-etch adhesives: Effect of phosphoric acid pre-etching. *Dental Materials Journal*, [S. l.], v. 37, n. 2, p. 244-255, 2018. DOI: <https://doi.org/10.4012/dmj.2017-059>.

SILVA, D. B. et al. Influence of silanes on the stability of resin-ceramic bond strength. *American Journal of Dentistry*, [S. l.], v. 32, n. 2, p. 89-93, 2019.

TANNEN, D. et al. Bond Strength of Silane-Containing Universal Bonding Agents to Lithium Disilicate. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*, [S. l.], v. 17, n. 4, p. e358-e365, 2025. DOI: <https://doi.org/10.4317/jced.62011>.

TEJADA-CASADO, M. et al. Chroma-dependence of CIEDE2000 acceptability thresholds for dentistry. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, [S. l.], v. 36, n. 3, p. 469-476, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/jerd.13153>.

TSUJIMOTO, A. et al. Influence of duration of phosphoric acid pre-etching on bond durability of universal adhesives and surface free-energy characteristics of enamel. *European Journal of Oral Sciences*, [S. l.], v. 124, n. 4, p. 377-386, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/eos.12284>.

YANG, Y. et al. Effect of aging on color stability and bond strength of dual-cured resin cement with amine or amine-free self-initiators. *Dental Materials Journal*, [S. l.], v. 41, n. 1, p. 17-26, 2022. DOI: <https://doi.org/10.4012/dmj.2020-306>.

YAO, C. et al. Acidic pH weakens the bonding effectiveness of silane contained in universal adhesives. *Dental Materials*, [S. l.], v. 34, n. 5, p. 809-818, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2018.02.004>.

YAO, C. et al. Optimizing glass-ceramic bonding incorporating new silane technology in an experimental universal adhesive formulation. *Dental Materials*, [S. l.], v. 37, n. 5, p. 894-904, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2021.02.021>.

YASSEN, G. H.; PLATT, J. A.; HARA, A. T. Bovine teeth as substitute for human teeth in dental research: a review of literature. *Journal of Oral Science*, [S. l.], v. 53, n. 3, p. 273-282, 2011. DOI: <https://doi.org/10.2334/josnurd.53.273>.

YAZIGI, C. et al. Influence of different primers and adhesive system combinations on the durability of resin bonding to lithium disilicate. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, [S. l.], v. 134, n. 3, p. 749-757, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.03.019>.

YOSHIHARA, K. et al. Effectiveness and stability of silane coupling agent incorporated in 'universal' adhesives. *Dental Materials*, [S. l.], v. 32, n. 10, p. 1218-1225, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2016.07.002>.

FAUL, F. et al. G*Power 3: a flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, [S. l.], v. 39, n. 2, p. 175-191, 2007. DOI: <https://doi.org/10.3758/BF03193146>.

APÊNDICE A – ARTIGO CIENTÍFICO

Title Page

Manuscript type

Original article

Title Page:

Effect of Separate Silane Application on Bond Strength and Color Stability of Lithium Disilicate Cemented with a Universal Resin Cement

Running title:

Silane Application and Bond Strength

Authors:

Elisa Gomes de Albuquerque

Juiz de Fora Federal University (UFJF), School of Dentistry, Operative Dentistry Department, Juiz de Fora, MG, Brazil

elisagalbuquerque@gmail.com

Lucas Lactim Ferrarez

Juiz de Fora Federal University (UFJF), School of Dentistry, Operative Dentistry Department, Juiz de Fora, MG, Brazil

lucaslactim@yahoo.com.br

Fernanda Signorelli Calazans

Fluminense Federal University (UFF), Nova Friburgo Health Institute, Operative Dentistry Department, Nova Friburgo, RJ, Brazil

fecalazans@yahoo.com.br

Marcos de Oliveira Barceleiro

Fluminense Federal University (UFF), Nova Friburgo Health Institute, Operative Dentistry Department, Nova Friburgo, RJ, Brazil

marcosbarceleiro@gmail.com

Bruno Salles Sotto-Maior

Juiz de Fora Federal University (UFJF), School of Dentistry, Operative Dentistry Department, Juiz de Fora, MG, Brazil

bruno.sotto@ufjf.br

Corresponding

Elisa Gomes de

Author:

Albuquerque

School of Dentistry, Federal University of Juiz de Fora, Rua José Lourenço Kelmer, s/n, São Pedro, Juiz de Fora, MG, 36036-900, Brazil

email: elisagalbuquerque@gmail.com

Title

Influence of Separate Silane Application and Enamel Etching on Bond Strength and Color Stability of Lithium Disilicate Veneers

Abstract

Aim: To evaluate whether the silane incorporated into Scotchbond Universal Plus can replace a separately applied ceramic primer when lithium disilicate veneers are luted to enamel with RelyX Universal, considering bond strength, failure mode, and color stability.

Subjects and Methods: Two randomized in vitro experiments with blinded outcome assessment were performed. In the bond-strength experiment, 40 bovine-enamel/lithium-disilicate assemblies were allocated to four groups ($n = 10$) according to enamel etching (E- or E+) and silanization strategy (SI or SS), then subjected to 10,000 thermal cycles. In the color experiment, 20 additional assemblies, all with etched enamel, were allocated to SI or SS ($n = 10$) to isolate silanization strategy and were stored in water for 90 days without thermocycling. CIELAB coordinates, ΔE_{ab} , and ΔE_{00} were calculated. Bond strength was analyzed by two-way ANOVA; color outcomes were analyzed conventionally and with exploratory TOST for ΔE_{ab} and ΔE_{00} using perceptibility-based margins. The study was not specifically powered for interaction or color equivalence.

Results: Enamel etching [$F(1,36) = 189.74$, $p < 0.001$, partial $\eta^2 = 0.841$] and separate primer application [$F(1,36) = 61.65$, $p < 0.001$, partial $\eta^2 = 0.631$] were associated with higher bond strength; no interaction was detected ($p = 0.162$), although interaction-specific power was not established. Mean bond strengths were 5.95 ± 1.08 MPa (E-/SI), 9.37 ± 2.56 MPa (E-/SS), 13.90 ± 3.12 MPa (E+/SI), and 25.82 ± 4.58 MPa

(E+/SS). Failure modes differed among groups ($p < 0.001$). Nominal exploratory differences occurred in ΔL^* ($p = 0.042$) and Δa^* ($p = 0.008$). Exploratory TOST was compatible with equivalence for ΔE_{ab} (90% CI, -0.26 to 0.88 ; margin ± 1.2 ; $p = 0.008$) and ΔE_{00} (90% CI, -0.14 to 0.64 ; margin ± 0.8 ; $p = 0.013$).

Conclusion: Enamel etching and additional RelyX Ceramic Primer application were associated with higher bond strength. Integrated silane did not reproduce the mechanical performance of the separate primer. Global color change was compatible with equivalence in an exploratory post-hoc analysis, whereas coordinate-specific findings require confirmation. Mechanical and color effect magnitudes cannot be directly compared because the experiments used different factors and aging conditions.

Keywords:

Lithium disilicate; Resin cements; Silanes; Dental bonding; Color stability.

Introduction

Lithium disilicate veneers provide a conservative option for esthetic rehabilitation because their mechanical strength and optical properties permit thin restorations with favorable clinical performance. Their limited macromechanical retention, however, makes the quality of adhesive cementation central to longevity. The bonded assembly depends on the continuity of two interfaces—ceramic–cement and cement–enamel—and deterioration at either interface may contribute to debonding, fracture, or marginal alteration [1–3].

For silica-based lithium disilicate, the conventional ceramic protocol combines hydrofluoric acid etching with silane application. Etching creates micromechanical retention, whereas silane couples the silica-rich ceramic surface to methacrylate-

based resin materials. The incorporation of silane into universal adhesives was intended to simplify this protocol, but acidic, aqueous adhesive formulations may impair silane stability and effectiveness. Laboratory evidence therefore remains product dependent and frequently favors a dedicated silane applied before the universal adhesive [4–8].

At the dental interface, phosphoric acid etching produces a retentive enamel pattern and generally improves the bond durability of universal adhesives. Because veneers depend largely on enamel adhesion, omission of this step may compromise the assembly even when the ceramic interface is adequately treated [9–11].

Optical stability is also critical for thin veneers, through which changes in the resin cement and bonded interface may remain visible. Water sorption, polymer conversion, material composition, and interfacial degradation can alter lightness and chromatic coordinates. A stronger and more homogeneous ceramic–resin interface could plausibly limit water-accessible defects, but the relationship between separate silanization and color stability remains insufficiently investigated [12–14].

This in vitro study therefore investigated the system-specific question of whether the silane incorporated into Scotchbond Universal Plus can replace RelyX Ceramic Primer when lithium disilicate veneers are cemented with RelyX Universal. The effects of enamel etching and silanization strategy on bond strength and failure mode were examined, and the optical comparison included the individual CIELAB coordinates, ΔE_{ab} , and ΔE_{00} after water aging.

By combining mechanical and optical outcomes, the study tests whether clinical simplification carries the same consequence for different dimensions of performance.

The null hypotheses were that enamel etching and silanization strategy would not affect bond strength, failure-mode distribution, or color outcomes after aging, and that the two factors would not interact for bond strength.

Subjects and Methods

Study design

Two complementary randomized in vitro experiments with blinded outcome assessment were conducted in October 2023. The bond-strength experiment used a 2×2 factorial design and thermocycling. The color experiment kept enamel etched in all specimens and compared only SI versus SS after water storage, to isolate silanization strategy. Because factors and aging conditions differed, the experiments were complementary but not directly comparable in effect magnitude. The experimental unit was the bonded assembly comprising bovine enamel, lithium disilicate ceramic, and the resin cement system.

Thermocycling was used only in the bond-strength experiment; the color experiment used 90-day water storage to isolate hydrolytic optical changes.

Sample size calculation

An a priori sample-size calculation for the bond-strength experiment was performed in G*Power. The effect estimate was derived from a pilot study with five specimens per group. Assuming Cohen $f = 0.60$, $\alpha = 0.05$, and 80% power, at least nine specimens per group were required; ten were included. The calculation targeted main effects and did not specifically power the interaction term. No color-specific calculation was performed; therefore, conventional color comparisons and equivalence analyses were exploratory.

Preparation of ceramic specimens

Forty lithium disilicate ceramic specimens ($4 \times 4 \times 0.5$ mm; HT A1 IPS e.max CAD, Ivoclar AG, Schaan, Liechtenstein) were fabricated using a precision cutting machine (Isomet 5000, Buehler, Lake Bluff, USA).

The specimens were crystallized in a ceramic furnace (Programat EP 5000, Ivoclar AG) at 840 °C for 7 min, following the manufacturer's recommendations. Dimensions were verified with a digital caliper accurate to 0.01 mm (Mitutoyo, Kawasaki, Japan). Before cementation, ceramic surfaces were cleaned with isopropyl alcohol to remove contaminants.

Preparation of enamel specimens

Forty sound, previously extracted bovine incisors obtained from a tooth bank available for laboratory research were selected. Teeth presenting visible cracks, fractures, lesions, or buccal-surface defects were excluded. The selected teeth were stored in 0.1% thymol solution until preparation. No live animals were involved in the experiment.

Crowns were sectioned from the roots 1 mm above the cemento-enamel junction with a low-speed diamond disc under water cooling. Enamel surfaces were standardized with #600-grit silicon carbide paper.

Before surface treatment, enamel prophylaxis was performed with a Robinson brush (KG Sorensen, Cotia, Brazil) using pumice and water. Specimens were then thoroughly rinsed. Each specimen was embedded in a PVC cylinder filled with self-curing acrylic resin, exposing only the enamel surface for bonding.

Experimental groups

Specimens were allocated to four groups ($n = 10$) by simple randomization according to enamel surface treatment and ceramic silanization strategy:

- E-/SI: No enamel etching; silane integrated in universal adhesive

- E-/SS: No enamel etching; separate silane application
- E+/SI: Enamel etched with 37% phosphoric acid; silane integrated
- E+/SS: Enamel etched with 37% phosphoric acid; separate silane application

The internal surface of every ceramic specimen was etched with 9% hydrofluoric acid for 20 s, thoroughly rinsed, cleaned with 37% phosphoric acid for 20 s to remove hydrofluoric acid residues, rinsed again, and air-dried.

In SI groups, Scotchbond Universal Plus (Solventum, St Paul, MN, USA), which contains silane, was rubbed directly onto the etched ceramic for 20 s and air-dried. In SS groups, RelyX Ceramic Primer (Solventum) was applied to the etched ceramic for 5 s and air-dried for 5 s; Scotchbond Universal Plus was then rubbed for 20 s and air-dried. In E+ groups, enamel was etched with 37% phosphoric acid for 30 s, rinsed for 30 s, and dried until a frosty appearance was obtained; this etching step was omitted in E- groups. In all groups, one coat of Scotchbond Universal Plus was actively applied to enamel for 20 s and air-dried for 20 s to obtain a thin, uniform film. The adhesive was not separately light-cured before seating, to avoid increasing film thickness and interfering with ceramic adaptation; light activation was performed after specimen seating and cementation.

Cementation procedure

RelyX Universal resin cement, shade A1 (Solventum), was applied to the treated ceramic surface. The ceramic was seated on enamel under a standardized 5-N load for 5 s, and excess cement was removed. A single operator performed all cementation procedures in both experiments. Light activation was performed for 30 s with a VALO Grand unit (Ultradent Products, South Jordan, UT, USA) in High Power mode (nominal

irradiance, 1,600 mW/cm²). The light-guide tip was placed directly against the specimen, perpendicular to its surface.

The bonded area was measured with a digital caliper to accurately calculate bond strength. The materials used in this study are detailed in Table 1.

Shear bond strength test

Bond-strength specimens underwent 10,000 thermal cycles in water baths at 5°C, 37°C, and 55°C, with a dwell time of 60 s in each bath and a transfer time of 30 s. Shear testing was then performed with an Instron 3340 universal testing machine at a crosshead speed of 0.5 mm/min until failure.

Bond strength (MPa) was calculated by dividing the failure load (N) by the bonded area (mm²).

Failure analysis

Failure modes were evaluated by a calibrated examiner who was blinded to group allocation, using a stereomicroscope at 50× magnification. Failures were classified as cohesive in enamel, cohesive in resin cement, cohesive in ceramic, or mixed, according to the region involved and ASTM D5573-99 criteria [16].

Color stability evaluation

For color analysis, 20 additional bonded assemblies were allocated by simple randomization to two independent groups (n = 10). Enamel was etched with 37% phosphoric acid in every specimen so that the experiment isolated silanization strategy. In SI, only Scotchbond Universal Plus was used on etched ceramic; in SS, RelyX Ceramic Primer was additionally applied before the same adhesive. Thus, the color experiment did not assess E-/E+ or an enamel-etching interaction.

Color coordinates were measured with a Lovibond RT Series Reflectance Tintometer. Specimens were positioned on a black background and centered in a circular 5-mm

reading aperture in the same orientation. A glycerin layer provided optical coupling. One blinded operator obtained two readings per specimen, separated by 24 h, at baseline and after 90 days of water storage. No thermocycling was used in the color experiment, to isolate hydrolytic aging. Changes in CIELAB coordinates, ΔE_{ab} , and ΔE_{00} were calculated; $k_L = k_C = k_H = 1$ for ΔE_{00} .

Statistical analysis

Analyses were two-sided with $\alpha = 0.05$. Bond strength was log-transformed and analyzed by two-way ANOVA including enamel etching, silanization strategy, and their interaction. Failure modes were compared with exact tests. Conventional color comparisons used Welch t-tests, except Δa^* , which used the exact Mann–Whitney test; five color outcomes were examined without multiplicity adjustment. Exploratory post-hoc TOST analyses used margins of ± 1.2 for ΔE_{ab} and ± 0.8 for ΔE_{00} , based on published 50:50 perceptibility thresholds [17]. Equivalence was considered compatible when the 90% CI for SS – SI lay entirely within the margin. Because margins and sample size were not specified prospectively, TOST findings were not confirmatory.

Results

Shear bond strength

Mean shear bond strength values were 5.95 ± 1.08 MPa in E–/SI, 9.37 ± 2.56 MPa in E–/SS, 13.90 ± 3.12 MPa in E+/SI, and 25.82 ± 4.58 MPa in E+/SS. Two-way ANOVA revealed significant main effects of enamel etching [$F(1,36) = 189.74$, $p < 0.001$, partial $\eta^2 = 0.841$] and silanization strategy [$F(1,36) = 61.65$, $p < 0.001$, partial $\eta^2 = 0.631$]. The interaction was not statistically significant [$F(1,36) = 2.04$, $p = 0.162$, partial $\eta^2 = 0.054$]. Because the study was not specifically powered for interaction, this result indicates no detected interaction and does not demonstrate independence.

Failure mode analysis

Failure modes differed significantly among the four groups (Fisher–Freeman–Halton exact test, $p < 0.001$). In E–/SI, 7 specimens (70%) failed cohesively in enamel, 1 (10%) in resin cement, and 2 (20%) showed mixed failure. In E–/SS, 5 specimens (50%) failed in enamel, 1 (10%) in resin cement, and 4 (40%) showed mixed failure. In E+/SS, 1 specimen (10%) failed in enamel, 5 (50%) in ceramic, and 4 (40%) showed mixed failure. All E+/SI specimens failed cohesively in ceramic (10/10; 100%). In the pooled four-category analysis, failure-mode distribution was associated with enamel etching ($p < 0.001$) but not with silanization strategy ($p = 0.146$).

Color stability

Color results are presented in Table 3. Nominal differences were observed for ΔL^* (Welch $p = 0.042$) and Δa^* (exact Mann–Whitney $p = 0.008$), whereas conventional comparisons did not detect differences for Δb^* ($p = 0.190$), ΔE_{ab} ($p = 0.363$), or ΔE_{00} ($p = 0.277$). Because five outcomes were tested without multiplicity adjustment, coordinate-specific findings were exploratory. For global color change, exploratory TOST yielded a 90% CI of -0.26 to 0.88 for ΔE_{ab} , within ± 1.2 ($p = 0.008$), and -0.14 to 0.64 for ΔE_{00} , within ± 0.8 ($p = 0.013$). These findings were compatible with equivalence within the adopted margins but were not confirmatory.

Discussion

This study tested two simplifications within the same luting system. Phosphoric-acid etching and separate ceramic priming both increased aged bond strength, and failure patterns changed across protocols. The mechanical message was clear. The color experiment was different: ΔL^* and Δa^* showed nominal shifts, whereas Δb^* , ΔE_{ab} , and ΔE_{00} did not differ. Post-hoc TOST favored similar global color change within the selected margins. Simplification therefore had a measurable mechanical cost, but no demonstrated global color penalty under 90-day water storage.

Enamel etching was the dominant factor in the bond-strength model (partial $\eta^2 = 0.841$). Universal adhesives in self-etch mode create a shallower enamel pattern than phosphoric acid, with less micromechanical retention. Previous studies likewise reported higher immediate or aged enamel bonding after pre-etching [9–11]. In thin veneers, where macromechanical retention is limited, this step matters. The present data do not support omitting phosphoric acid simply because the adhesive is labeled universal. Laboratory bond strength cannot be converted into a survival rate [22], but the direction and magnitude of this effect are unambiguous.

Separate ceramic priming also had a large effect (partial $\eta^2 = 0.631$). The comparison was between complete protocols: Scotchbond Universal Plus alone on etched lithium disilicate versus RelyX Ceramic Primer followed by the same adhesive. Both supplied silane. What differed was how that silane reached the ceramic, together with its concentration, solvent, hydrolysis state, evaporation, film formation, and interaction with the cement.

That distinction has a chemical basis. A dedicated primer delivers hydrolyzed silanol species to a relatively simple environment, where they can adsorb and condense on silica while the organofunctional end remains available for copolymerization. In a universal adhesive, silane shares an acidic, water-containing solution with other monomers and solvents; hydrolysis and premature self-condensation may compete during storage. Yoshihara et al., Yao et al., and Chen et al. provide chemical and mechanical support for this pathway [4,6,7]. Interfacial chemistry was not measured here, so the mechanism explains the result without being presented as a measured outcome.

The effect is product specific. Cardenas et al. and Almaskin et al. found advantages for separate silane or combined protocols [5,8]. Awad et al. showed that

Scotchbond Universal Plus outperformed an earlier γ MPTS-containing adhesive, yet still remained below a dedicated primer [20]. Universal adhesives differ in silane chemistry, pH, water, solvent, and shelf stability. The conclusion should therefore stay with the tested combination: RelyX Universal, Scotchbond Universal Plus, and RelyX Ceramic Primer.

The interaction is less certain. It was not significant ($p = 0.162$; partial $\eta^2 = 0.054$), and the sample-size calculation targeted main effects rather than their interaction. E+/SS had the highest mean, but the data neither prove synergy nor establish independence. A smaller joint effect may have gone undetected.

Failure modes added a useful map of where the assemblies broke. Enamel failures predominated without etching; ceramic fractures became more frequent after etching. All E+/SI specimens fractured cohesively in ceramic despite a lower mean strength than E+/SS. This is not contradictory. Shear loading produces edge stress concentrations, and crack paths depend on geometry, elastic modulus, film thickness, and load position [18,19]. Failure mode locates the fracture; bond strength quantifies the load-bearing response.

The mechanical specimens had already faced water and 10,000 temperature changes. These exposures can plasticize the polymer network, hydrolyze susceptible bonds, and remove weakly adsorbed silane [12]. The separate-primer advantage persisted. This is evidence of better relative performance after the applied aging protocol, not a conversion of thermal cycles into years of service.

Color addressed another part of the problem. Silane is not a pigment. The rationale was that a more continuous ceramic–resin interface might alter water access, microvoids, refractive-index transitions, and light scattering. Water can plasticize the cement and intensify optical heterogeneity [12]. Because sorption, film thickness,

nanoleakage, and interfacial morphology were not measured, this pathway remains a working explanation rather than a causal finding.

At 90 days, ΔE_{ab} and ΔE_{00} did not differ by conventional tests. Post-hoc TOST then asked the more relevant question: was any disadvantage of the simplified protocol contained within perceptibility-based margins? The 90% confidence intervals remained within ± 1.2 for ΔE_{ab} and ± 0.8 for ΔE_{00} ($p = 0.008$ and $p = 0.013$). That result supports global color equivalence within the selected bounds. It is not confirmatory, because the margins, analysis, and color-specific sample size were not specified prospectively.

The coordinate results deserve still more restraint. SS became lighter and shifted further toward green; Δb^* did not differ. Directional changes can offset one another within ΔE_{ab} or ΔE_{00} , which is why reporting the coordinates remains informative. Yet five color outcomes were tested without multiplicity adjustment. The ΔL^* and Δa^* signals are hypothesis-generating, not stand-alone proof of a treatment effect.

Mean ΔE_{ab} values fell above the 1.2 perceptibility threshold and below the 2.7 acceptability threshold [17]. Mean ΔE_{00} remained below 1.8, although SS approached it. These thresholds describe probabilities of seeing or accepting a color difference; they do not replace group comparisons, and individual values remain important in thin translucent restorations.

Cement chemistry provides additional context. RelyX Universal is a dual-cure cement that can be used alone or with its companion adhesive. Benkeser et al. reported greater water sorption for RelyX Universal than for two comparator cements and linked sorption to ΔE_{00} ; light activation reduced solubility, especially for this material [13]. Ceramic–cement combination, initiator chemistry, coverage, and aging also affect veneer color [14,21]. These studies make water uptake and conversion

credible contributors, while ceramic thickness, cement-film thickness, and delivered light energy remain part of the optical response.

Bernardi et al. examined the same adhesive–primer pair on pressed lithium disilicate [23]. Scotchbond Universal Plus alone yielded 23.9 ± 2.5 MPa immediately and 18.4 ± 2.9 MPa after 10,000 cycles; adding RelyX Ceramic Primer increased the values to 26.1 ± 3.3 and 21.5 ± 2.5 MPa. The gains were significant but modest (about 9% and 17%), with a group-by-time interaction ($p = .015$). Our relative difference was larger. The studies used different ceramic processing routes, specimens, and test geometries: Bernardi et al. bonded cylinders to pressed ceramic discs, whereas we tested a complete enamel–cement–CAD/CAM ceramic assembly. Despite that variation, both studies point in the same direction. The silane incorporated into Scotchbond Universal Plus did not fully reproduce separate priming. Bernardi et al. did not evaluate color.

Lithium disilicate veneers perform well clinically when enamel is preserved and adhesive procedures are carefully executed [1,2]. Resin-cement adhesion also affects fatigue behavior [3]. Our laboratory data strengthen the case for phosphoric-acid etching and separate ceramic priming with this product combination. They do not supply a clinical survival estimate, nor can 90-day water storage predict long-term marginal discoloration. For color, the defensible statement remains narrower: the two strategies showed exploratory equivalence in global change within the adopted margins.

The study used bovine enamel, shear loading, and no fatigue challenge. Mechanical specimens were thermocycled; color specimens were stored only in water, and enamel was etched in every color group. Interaction power was not established, equivalence was not prospectively powered, and five color outcomes were tested

without adjustment. Interfacial sorption, nanoleakage, microscopy, and spectroscopy were also beyond the design. Future work should align factorial design and aging across outcomes, prespecify one primary color endpoint and its equivalence margin, and add fatigue, interfacial characterization, and clinical follow-up.

Conclusion

Within the limitations of this in vitro study, 37% phosphoric acid etching of enamel and additional RelyX Ceramic Primer application were associated with higher bond strength when RelyX Universal and Scotchbond Universal Plus were used. No interaction was detected, but independence was not demonstrated.

Coordinate-specific color differences were exploratory, while post-hoc TOST was compatible with equivalence in global color change within the adopted margins. Because aging conditions and factors differed between experiments, mechanical and optical effect magnitudes cannot be directly compared.

The principal contribution is that substitution of the separate primer by the silane incorporated into the universal adhesive depended on the outcome: simplification had a measurable mechanical cost, whereas no difference in global color change was demonstrated.

For this material combination, preserving enamel etching and separate ceramic priming is supported when the objective is to maximize laboratory bond strength; translation to clinical longevity requires prospective confirmation.

Acknowledgment

None.

Financial support and sponsorship

None.

Conflicts of interest

There are no conflicts of interest.

Ethical approval

This laboratory study did not involve human participants or live animals. Previously extracted bovine teeth obtained from a tooth bank available for laboratory research were used.

Use of Artificial Intelligence

Artificial intelligence tools were used solely for linguistic revision and improvement of clarity and organization of the manuscript. The authors take full responsibility for the scientific content, data accuracy, and interpretations presented.

References

1. Aslan Y, Uludamar A, Özkan Y. Retrospective analysis of lithium disilicate laminate veneers applied by experienced dentists: 10-year results. *Int J Prosthodont*. 2019;32(6):471–474. doi:10.11607/ijp.6234.
2. Imburgia M, Lerner H, Mangano F. A retrospective clinical study on 1075 lithium disilicate CAD/CAM veneers with feather-edge margins cemented on 105 patients. *Eur J Prosthodont Restor Dent*. 2021;29(1):54–63. doi:10.1922/EJPRD_2248Mangano10.
3. Pilecco R, et al. The loss of resin cement adhesion to ceramic influences the fatigue behavior of bonded lithium disilicate restorations. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2023;148:106169. doi:10.1016/j.jmbbm.2023.106169.
4. Yoshihara K, et al. Effectiveness and stability of silane coupling agent incorporated in universal adhesives. *Dent Mater*. 2016;32(10):1218–1225. doi:10.1016/j.dental.2016.07.002.
5. Cardenas A, et al. Effect of MDP-containing silane and adhesive used alone or in combination on the long-term bond strength and chemical interaction with lithium disilicate ceramics. *J Adhes Dent*. 2017. doi:10.3290/j.jad.a38414.
6. Yao C, et al. Acidic pH weakens the bonding effectiveness of silane contained in universal adhesives. *Dent Mater*. 2018;34(5):809–818. doi:10.1016/j.dental.2018.02.004.
7. Chen B, et al. Effectiveness of pre-silanization in improving bond performance of universal adhesives or self-adhesive resin cements to silica-based ceramics: chemical and in vitro evidence. *Dent Mater*. 2019;35(4):543–553. doi:10.1016/j.dental.2019.01.010.

8. Almaskin D, et al. The bond strength of a universal adhesive system with silane to lithium disilicates in comparison with an isolated silane coupling agent. *J Prosthodont*. 2022;31(6):512–520. doi:10.1111/jopr.13442.
9. Tsujimoto A, et al. Influence of duration of phosphoric acid pre-etching on bond durability of universal adhesives and surface free-energy characteristics of enamel. *Eur J Oral Sci*. 2016;124(4):377–386. doi:10.1111/eos.12284.
10. Beltrami R, et al. Comparison of shear bond strength of universal adhesives on etched and nonetched enamel. *J Appl Biomater Funct Mater*. 2016. doi:10.5301/jabfm.5000261.
11. Suda S, et al. Comparison of enamel bond fatigue durability between universal adhesives and two-step self-etch adhesives: effect of phosphoric acid pre-etching. *Dent Mater J*. 2018. doi:10.4012/dmj.2017-059.
12. Ferracane JL. Hygroscopic and hydrolytic effects in dental polymer networks. *Dent Mater*. 2006;22(3):211–222. doi:10.1016/j.dental.2005.05.005.
13. Benkeser SM, Karlin S, Rohr N. Effect of curing mode of resin composite cements on water sorption, color stability, and biaxial flexural strength. *Dent Mater*. 2024;40(6):897–906. doi:10.1016/j.dental.2024.04.004.
14. Lee SM, Choi YS. Effect of ceramic material and resin cement systems on the color stability of laminate veneers after accelerated aging. *J Prosthet Dent*. 2018. doi:10.1016/j.prosdent.2017.09.014.
15. Sharma G, Wu W, Dalal EN. The CIEDE2000 color-difference formula: implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. *Color Res Appl*. 2005;30(1):21–30. doi:10.1002/col.20070.
16. ASTM International. ASTM D5573-99: Standard Practice for Classifying Failure Modes in Adhesive Bonding. West Conshohocken, PA: ASTM International; 1999.
17. Paravina RD, et al. Color difference thresholds in dentistry. *J Esthet Restor Dent*. 2015;27(Suppl 1):S1–S9. doi:10.1111/jerd.12149.
18. Placido E, Meira JBC, Lima RG, Muench A, de Souza RM, Ballester RY. Shear versus micro-shear bond strength test: a finite element stress analysis. *Dent Mater*. 2007;23(9):1086–1092. doi:10.1016/j.dental.2006.10.002.
19. Armstrong S, Geraldeli S, Maia R, Raposo LHA, Soares CJ, Yamagawa J. Adhesion to tooth structure: a critical review of micro bond strength test methods. *Dent Mater*. 2010;26(2):e50–e62. doi:10.1016/j.dental.2009.11.155.
20. Awad MM, Alhalabi F, Alshehri A, et al. Silane-containing universal adhesives influence resin-ceramic microtensile bond strength. *Coatings*. 2023;13(2):477. doi:10.3390/coatings13020477.
21. Yang Y, Wang Y, Yang H, Chen Y, Huang C. Effect of aging on color stability and bond strength of dual-cured resin cement with amine or amine-free self-initiators. *Dent Mater J*. 2022;41(1). doi:10.4012/dmj.2020-306.

22. Heintze SD, Rousson V, Mahn E. Bond strength tests of dental adhesive systems and their correlation with clinical results: a meta-analysis. Dent Mater. 2015;31(4):423–434. doi:10.1016/j.dental.2015.01.011.

23. Bernardi LG, Wendlinger M, Ñaupari-Villasante R, Aguirre-Balseca M, Loguercio AD, Gomes JC. Influence of silane-containing universal adhesives and separate silanization on lithium disilicate bond strength. J Prosthet Dent. 2026. Epub ahead of print. doi:10.1016/j.prosdent.2026.06.015.

Tables

Table 1. Detailed information on the materials

Materials used in this study, including their commercial names, manufacturers, batch numbers, expiration dates, and chemical compositions:

Material	Batch	Expiration	Description/composition
IPS e.max CAD HT A1/C14 (Ivoclar)	YB552S	17 Mar 2024	Lithium disilicate glass-ceramic block
Scotchbond Universal Plus Adhesive (Solventum)	9952917	2 May 2026	Universal adhesive containing functional monomers and integrated silane
RelyX Universal Resin Cement A1 (Solventum)	10765160	17 Sep 2025	Dual-cure universal resin cement
RelyX Ceramic Primer (Solventum)	10475182	16 Dec 2024	Ethanol/water solution containing methacryloxypropyltrimethoxysilane
Porcelain Etch (Ultradent)	D018 H	30 Sep 2024	9% hydrofluoric acid gel
Ultra-Etch, 37% phosphoric acid (Ultradent Products)	890123	Jan 2025	37% phosphoric acid gel

Table 2. Shear bond strength (MPa) of experimental groups

Values are presented as arithmetic mean $\pm$ standard deviation in MPa. Inferential analysis was performed by two-way ANOVA on log-transformed values ($\alpha = 0.05$).

Group	Mean $\pm$ SD (MPa)	95% CI of mean
E-/SI	5.95 $\pm$ 1.08	5.18 to 6.72
E-/SS	9.37 $\pm$ 2.56	7.53 to 11.20
E+/SI	13.90 $\pm$ 3.12	11.67 to 16.13
E+/SS	25.82 $\pm$ 4.58	22.54 to 29.10

Table 3. Color-coordinate changes and overall color differences after 90 days of water storage

Values are mean $\pm$ standard deviation. Differences are SS – SI. SI: silane integrated into Scotchbond Universal Plus without separate primer; SS: additional RelyX Ceramic Primer followed by Scotchbond Universal Plus. CI: confidence interval; g: Hedges g; r_{β} : rank-biserial correlation. * $p < 0.05$. Welch t-tests were used except for Δa^* , which was analyzed with the exact Mann–Whitney test; a mean-difference CI was not estimated for that nonparametric comparison.

Outcome	SI mean $\pm$ SD	SS mean $\pm$ SD	SS – SI	95% CI	Effect	p
ΔL^*	1.20 $\pm$ 0.90	2.05 $\pm$ 0.83	0.85	0.03 to 1.67	g = 0.94	0.042*
Δa^*	-0.09 $\pm$ 0.14	-0.27 $\pm$ 0.12	-0.18	—	$r_{\beta} = -0.68$	0.008*
Δb^*	1.65 $\pm$ 0.44	1.19 $\pm$ 0.96	-0.46	-1.19 to 0.26	g = -0.59	0.190
ΔE_{ab}	2.22 $\pm$ 0.43	2.53 $\pm$ 0.93	0.31	-0.40 to 1.01	g = 0.40	0.363
ΔE_{00}	1.52 $\pm$ 0.30	1.77 $\pm$ 0.62	0.25	-0.22 to 0.72	g = 0.49	0.277