

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ODONTOLOGIA
Mestrado em Clínica Odontológica – Cariologia/Dentística

JOÃO CARLOS SILVA DO NASCIMENTO FOLY

**DESEMPENHO DE SISTEMAS ADESIVOS UNIVERSAIS APLICADOS AO ESMALTE NO
MODO AUTOCONDICIONANTE – EFEITO DA COMPOSIÇÃO ACÍDICA**

Porto Alegre

2024

JOÃO CARLOS SILVA DO NASCIMENTO FOLY

**DESEMPENHO DE SISTEMAS ADESIVOS UNIVERSAIS APLICADOS AO ESMALTE NO
MODO AUTOCONDICIONANTE – EFEITO DA COMPOSIÇÃO ACÍDICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Odontologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Odontologia, Área de Concentração em Clínica Odontológica – Cariologia-Dentística
Linha de Pesquisa: Biomateriais e Técnicas Terapêuticas em Odontologia

Orientador: Prof. Dr. Eliseu Aldrighi Münchow

Porto Alegre

2024

AGRADECIMENTOS

À **Universidade Federal do Rio Grande do Sul** e ao **Programa de Pós-Graduação em Odontologia** pelo curso, estrutura e aprendizado fornecidos.

Agradeço humildemente a todos aqueles que me rodeiam, uma vez que foram companheiros de percurso e só com a sua ajuda, amizade e carinho foi possível concretizar mais este sonho. Não posso, no entanto, deixar de agradecer particularmente a algumas pessoas.

Ao **Professor Orientador Eliseu Aldrighi Münchow**, pela orientação impecável, pelas horas que dispôs a este estudo, com toda a sua paciência, dedicação e disponibilidade. Não posso deixar de agradecer a forma como se empenhou para me ajudar e a superar todos os obstáculos que foram surgindo e no rigor científico que deu a este trabalho. Agradeço por sua amizade que começou durante o mestrado e que vou levar para sempre. Sou profundamente grato por todo aprendizado adquirido ao longo do curso, que me proporcionou um crescimento imenso, e por ser um grande exemplo a ser seguido.

Aos **Professores da Universidade Católica de Pelotas** pelos ensinamentos, em especial aos **Professores Gregori Franco Boeira e Fernanda Barbosa Leal**, pelos valiosos ensinamentos em dentística durante a graduação e pela amizade. Sou muito feliz por tê-los como professores.

Aos **Professores da área de Cariologia-Dentística**, por todo aprendizado proporcionado.

À minha **Família, Carla, João Carlos, Cassiane, Elizabeth e José Carlos** por me apoiarem na minha escolha e trajetória profissional, mesmo que isso tenha me levado a sair do Rio de Janeiro. Amo muito vocês!

Aos meus **amigos**, que estão sempre presentes mesmo que à distância, por cada conversa feliz ou de desabafo. Amo vocês!

RESUMO

Sabendo-se que adesivos universais são composições heterogêneas, o efeito de misturas complexas pode atuar em sinergia ou não com o componente ácido do material, influenciando positiva ou negativamente o desempenho adesivo final do material. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência da composição acídica de sistemas adesivos universais nas propriedades adesivas e resistência de união ao esmalte quando aplicados no modo autocondicionante. Oito adesivos foram utilizados neste estudo: All-Bond Universal (Bisco), Ambar Universal (FGM), Gluma Bond Universal (Kulzer), OptiBond Universal (Kerr), Prime&Bond Universal (Dentsply), Peak Universal Bond (Ultradent), Singlebond Universal (3M ESPE), e Tetric N-Bond Universal (Ivoclar). Dentes incisivos bovinos foram preparados com exposição do esmalte vestibular prismático, o qual foi tratado com os diferentes adesivos para avaliação da capacidade de molhamento superficial (análise do ângulo de contato entre adesivo e esmalte), alteração topográfica (análise de perfilometria óptica do esmalte com e sem aplicação adesiva), alteração do conteúdo inorgânico superficial do esmalte (análise de espectroscopia de raios X por dispersão em energia [EDX]), e potencial adesivo (análise de resistência de união ao microcisalhamento [μ SBS]). Os dados foram analisados estatisticamente com o programa SigmaPlot (versão 12) com testes paramétricos ou não-paramétricos, conforme distribuição de normalidade verificada pelo teste de Kolmogorov-Smirnoff. Testes de correlação e associação entre variáveis estudadas também foram realizadas. A análise de Weibull foi utilizada para verificar a confiabilidade estrutural das interfaces adesivas testadas no estudo. O nível de significância foi fixado em $\alpha=5\%$. Dentre os materiais testados no estudo, os principais monômeros ácidos presentes na sua formulação foram o 10-MDP, GPDM, 4-META, PENTA e outras variações de monômeros derivados do ácido carboxílico e ácido fosfórico. Diferenças significativas foram encontradas nos ângulos de contato imediatamente após a aplicação de cada adesivo e após 30 segundos de aplicação, com o Gluma Bond e o Tetric N-Bond apresentando os valores mais baixos e mais altos do estudo, respectivamente, ou seja, a melhor e a pior molhabilidade superficial ao esmalte. A análise de EDX revelou vários graus de redução de elementos como cálcio (Ca) e fósforo (P), com Gluma Bond apresentando a maior redução de Ca (redução de $\sim 65\%$) e de P (redução de $\sim 62\%$). A análise topográfica indicou alterações significativas na rugosidade do esmalte após aplicação dos adesivos, principalmente para o Gluma Bond. Os valores médios do μ SBS variaram de 14,7 MPa (grupo do adesivo Ambar) a 26,8 MPa (grupo do adesivo Tetric N-Bond). Os adesivos OptiBond e Tetric N-Bond exibiram os maiores valores de μ SBS. Quanto à análise de Weibull, o adesivo OptiBond demonstrou valores maiores de módulo e de resistência característica, sugerindo ser uma das composições adesivas testadas mais interessantes para a união ao esmalte utilizando-se a estratégia adesiva autocondicionante. Conclui-se que o adesivo universal contendo GPDM apresentou uma capacidade de condicionamento intensa, atingindo áreas profundas do esmalte a semelhante modo do condicionamento com ácido fosfórico. A presença de 10-MDP não pareceu significativa para a adesão ao esmalte, com os materiais contendo 10-MDP mostrando resistência adesiva semelhante ou pior do que outras formulações acídicas. De maneira geral, a composição heterogênea de adesivos universais parece influenciar diretamente nas propriedades de molhamento superficial, alteração topográfica e adesividade do esmalte, com o tipo de monômero ácido não demonstrando um papel significativo nos aspectos supracitados.

Palavras-chave: Adesivos universais; Análise de Weibull; Avaliação topográfica; Estratégia adesiva autocondicionante; Molhabilidade superficial; Monômero funcional ácido; Resistência de união ao microcisalhamento.

ABSTRACT

Considering that universal adhesives are heterogeneous compositions, the effect of complex formulations can act in synergy or not with the acidic component of the material, positively or negatively influencing the final bonding performance of the material. Thus, the objective of this study was to evaluate the influence of the acidic composition of universal adhesive systems on the adhesive properties and bond strength to enamel when applied using the self-etch mode. Eight adhesives were used in this study: All-Bond Universal (Bisco), Ambar Universal (FGM), Gluma Bond Universal (Kulzer), OptiBond Universal (Kerr), Prime&Bond Universal (Dentsply), Peak Universal Bond (Ultradent), Singlebond Universal (3M ESPE), and Tetric N-Bond Universal (Ivoclar). Bovine incisor teeth were prepared with exposure of the prismatic vestibular enamel, which was treated with different adhesives to evaluate the surface wetting capacity (analysis of the contact angle between adhesive and enamel), topographic alteration (optical profilometry analysis of the enamel with and without adhesive application), alteration of the surface inorganic content of the enamel (energy dispersive X-ray spectroscopy [EDX] analysis), and adhesive potential (microshear bond strength [μ SBS] analysis). The data were statistically analyzed using the SigmaPlot program (version 12) with parametric or non-parametric tests, according to the normality distribution verified by the Kolmogorov-Smirnoff test. Correlation and association tests between studied variables were also carried out. Weibull analysis was used to verify the structural reliability of the adhesive interfaces tested in the study. The significance level was set at $\alpha=5\%$. Among the materials tested in the study, the main acidic monomers present in its formulation were 10-MDP, GPDM, 4-META, PENTA and other variations of monomers derived from carboxylic acid and phosphoric acid. Significant differences were found in the contact angles immediately after application of each adhesive and after 30 seconds of application, with Gluma Bond and Tetric N-Bond presenting the lowest and highest values in the study, respectively, i.e., the best and worse surface wettability to the enamel. EDX analysis revealed varying degrees of reduction of elements such as calcium (Ca) and phosphorus (P), with Gluma Bond showing the greatest reduction of Ca (~65% reduction) and P (~62% reduction). Topographic analysis indicated significant changes in enamel roughness after application of the adhesives, mainly for Gluma Bond. Mean μ SBS values ranged from 14.7 MPa (Amber adhesive group) to 26.8 MPa (Tetric N-Bond adhesive group). OptiBond and Tetric N-Bond adhesives exhibited the highest μ SBS values. Regarding the Weibull analysis, the OptiBond adhesive demonstrated higher values of modulus and characteristic resistance, suggesting that it is one of the most interesting adhesive compositions tested for bonding to enamel using the self-etching adhesive strategy. It is concluded that the universal adhesive containing GPDM presented an intense conditioning capacity, reaching deep areas of the enamel similar to that obtained with phosphoric acid etching. The presence of 10-MDP did not appear to be significant for adhesion to enamel, with materials containing 10-MDP showing similar or lower adhesive potential than other acidic formulations. Overall, the heterogeneous composition of universal adhesives seems to directly influence the surface wetting properties, topographic changes and enamel adhesiveness, with the type of acidic monomer not demonstrating a significant role in the aforementioned aspects.

Keywords: Universal adhesives; Weibull analysis; Topographic assessment; Self-etching adhesive strategy; Surface wettability; Acid functional monomer; Bond strength to microshear.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	7
2.	OBJETIVOS	9
2.1.	Objetivo Geral	9
2.2.	Objetivos Específicos	9
3.	HIPÓTESES	10
4.	ARTIGO	11
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
6.	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas adesivos autocondicionantes (SAA) representam um dos mais recentes avanços em adesão, compreendendo as 6^a, 7^a e 8^a gerações de adesivos dentários. Eles diferem dos sistemas adesivos convencionais pois eliminam a etapa de condicionamento com ácido fosfórico prévio do substrato, já que a presença de monômeros ácidos garante o condicionamento dental. De fato, o monômero acídico é responsável por desmineralizar o substrato e realizar a concomitante infiltração resinosa, facilitando a técnica adesiva (SOFAN 2017; VAN MEERBEEK, 2020; VAN MEERBEEK, 2011).

Os SAA apresentam desempenho favorável e bons resultados de longevidade clínica, principalmente em dentina (KARABAY et al., 2023; DE OLIVEIRA et al., 2023). Porém, a sua capacidade adesiva no esmalte é mais complexa devido ao maior conteúdo mineral presente neste substrato. Quando comparados à acidez obtida com a estratégia convencional, os SAA apresentam-se menos ácidos, e, por isso, possuem um potencial de desmineralização diminuído, impactando diretamente no padrão de condicionamento superficial obtido. Além disso, os SAA apresentam geralmente uma composição química mais hidrofílica, o que favorece a ocorrência dos fenômenos de degradação e hidrólise da camada adesiva (BOUSHELL, 2016; DE ASSIS, 2020; PEUMANS, 2010).

Dentre todos os ingredientes químicos dos SAA, o monômero ácido parece ser o fator chave para uma adequada adesão, já que é responsável por um mecanismo de adesão tripla que consiste em molhamento satisfatório da superfície, desmineralização do substrato, e ligação química à hidroxiapatita (VAN MEERBEEK, 2020). Os monômeros ácidos podem derivar do ácido carboxílico, como no caso dos monômeros 4-META, 4-AET ou MAC-10, ou do ácido fosfórico, tendo como exemplos os monômeros 10-MDP, MEP, PENTA, MAP ou GPDM (SALZ, 2005; YOSHIHARA, 2018). De acordo com o estudo de Feitosa et al. (2014), características como a hidrofiliabilidade e o comprimento da cadeia espaçadora dos monômeros funcionais acídicos desempenham um papel significativo na efetividade adesiva dos SAA, sendo estas características variáveis conforme o tipo de monômero utilizado.

Atualmente, o monômero funcional conhecido por 10-MDP (10-metacrilóiloxi-decil-di-hidrogenofosfato) tem sido o mais utilizado em formulações autocondicionantes, principalmente devido ao seu confirmado efeito na longevidade adesiva ao dente (PEUMANS, 2010) e devido à sua adequada interação química com a hidroxiapatita, sendo capaz de formar um sal estável de 10-MDP-Ca (FEITOSA, 2014; YOSHIDA, 2004; YOSHIHARA, 2013). Acredita-se que o excelente desempenho deste monômero ácido se deve à sua capacidade de desmineralização suave e à sua cadeia espaçadora longa e relativamente hidrofóbica, a qual separa o metacrilato polimerizável do grupo funcional fosfato (YOSHIDA, 2004; IONUE, 2005; VAN LANDUYT, 2008). Porém, conforme os resultados de dois estudos de revisão sistemática acerca da capacidade adesiva de sistemas contendo 10-MDP se comparados a outras formulações acídicas (FEHRENBACH et al., 2021, 2022), percebe-se que esse monômero parece ser um ingrediente de primeira escolha no caso da adesão à dentina, mas ao esmalte, ele não se demonstra superior a outras formulações ácidas.

Como integrantes dos sistemas adesivos de 8ª geração, os adesivos universais foram lançados no mercado odontológico há pouco mais de uma década, com a promessa de garantirem adesão química e micromecânica a qualquer substrato e sob qualquer estratégia adesiva (autocondicionante ou convencional), dependendo da condição clínica e opção do operador (CUEVAS-SUAREZ, 2019). Embora eles sejam sistemas menos sensíveis quanto à técnica operatória e mais práticos de utilizar, o seu potencial adesivo ao esmalte ainda necessita ser melhor investigado, especialmente utilizando-se a estratégia adesiva autocondicionante (FEHRENBACH et al., 2021, 2022). Sabendo-se que adesivos universais são composições heterogêneas, variando quanto ao tipo de monômero funcional, monômero reticulador, solvente, e outros ingredientes específicos de cada produto, o efeito de misturas complexas pode atuar em sinergia ou não com o componente ácido do material, influenciando positiva ou negativamente o desempenho adesivo final do material. Além disso, a capacidade de formar sais estáveis de monômero-Ca é dependente de características particulares de cada composição ácida, tornando-se fundamental avaliar o efeito de adesivos com variadas composições acídicas nas características do esmalte e no potencial adesivo ao substrato.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo desse estudo foi avaliar o efeito da composição acídica de sistemas adesivos universais nas propriedades adesivas e resistência de união ao esmalte quando aplicados no modo autocondicionante.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar o efeito dos adesivos na molhabilidade superficial do esmalte;
- Investigar o efeito dos adesivos na alteração dos elementos inorgânicos da superfície do esmalte;
- Investigar o efeito dos adesivos na alteração topográfica do esmalte;
- Investigar o efeito dos adesivos na resistência de união ao esmalte;
- Investigar a confiabilidade estrutural das interfaces adesivas obtidas com os diferentes adesivos universais aplicados ao esmalte.

3 HIPÓTESES

A hipótese nula do estudo é a de que o desempenho adesivo dos materiais ao esmalte será similar independentemente da composição acídica do sistema adesivo universal.

4 ARTIGO

Esta dissertação é composta por um artigo científico que avaliou o desempenho adesivo ao esmalte de sistemas adesivos universais com variada composição acídica. O artigo foi preparado conforme as normas do periódico *Dental Materials*, e ainda não foi submetido para apreciação ao corpo editorial.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os adesivos universais representam um avanço importante na odontologia contemporânea, proporcionando simplicidade de uso e eficiência nos procedimentos restauradores adesivos. Esses materiais podem ser aplicados em diferentes substratos, como esmalte e dentina. Assim, é crucial entender melhor o mecanismo de adesão aos tecidos dentais e a durabilidade que se obtém com diversas composições químicas para garantir bons resultados em cada substrato específico. O estudo realizado nesta dissertação buscou investigar a influência da composição acídica no desempenho de sistemas adesivos universais à superfície do esmalte.

Embora a literatura demonstre que o monômero 10-MDP influencia positivamente a adesão à dentina, o seu efeito adesivo ao esmalte não parece ser tão efetivo. Isso foi de fato evidenciado no presente estudo, visto que nem todas as composições adesivas contendo 10-MDP apresentaram o melhor desempenho. Por outro lado, o monômero ácido GPDM contribuiu para um desempenho adesivo imediato ao esmalte, com o adesivo contendo esse monômero resultando em confiabilidade estrutural adequada dos resultados obtidos. Contudo, o adesivo Tetric N-Bond também demonstrou bons resultados adesivos, apesar da sua composição a base de 10-MDP e outros monômeros derivados de ácido carboxílico. Vale salientar que a variação na composição dos adesivos, com diferentes monômeros ácidos, solventes e conteúdo de matriz orgânica, impactou diretamente a capacidade de espalhamento do material sobre o esmalte bem como a afinidade superficial dos adesivos por esse substrato. Portanto, parece haver uma relação entre a composição ácida dos sistemas adesivos e o tipo de substrato, indicando que a adesão aos tecidos dentais envolve um mecanismo complexo que ainda precisa ser mais bem compreendido para utilizar o melhor produto em cada situação clínica.

O mecanismo de adesão tripla que consiste em umedecimento satisfatório do substrato, desmineralização da superfície e ligação química à hidroxiapatita, parece ser verdadeira quando se consideram adesivos com composição mais homogênea. Por outro lado, materiais heterogêneos como os adesivos universais multifuncionais são composições únicas que podem demonstrar potencial de ligação variável ao esmalte, contando especialmente com os efeitos sinérgicos de todos os ingredientes combinados em um único frasco.

Conforme os resultados apresentados nessa dissertação, a modificação da rugosidade superficial e a remoção de elementos inorgânicos como o cálcio e o fósforo do

esmalte não foram os fatores principais para uma boa adesão em esmalte. Em contrapartida, a possível interação química individual de cada composição adesiva ao cálcio da hidroxiapatita parece ser um fator mais importante para se obter uma adequada adesão ao esmalte. Nesse contexto, também foi perceptível que a presença de 10-MDP não resultou nos melhores resultados, permitindo a rejeição da hipótese nula do estudo.

De modo geral, a presente dissertação destaca a complexidade na formulação de adesivos dentários eficazes. A combinação ideal de monômeros funcionais, solventes e outros ingredientes é essencial para se alcançar uma união adesiva superior ao esmalte. Considerando que novos sistemas adesivos são lançados no mercado a cada ano, é importante verificar quais aspectos do protocolo adesivo e a combinação de materiais podem resultar em maior potencial adesivo ao esmalte, especialmente com o uso de sistemas adesivos autocondicionantes, cada vez mais populares na prática clínica odontológica.

6 REFERÊNCIAS

Almusa A, Delgado AHS, Ashley P, Young AM. Determination of Dental Adhesive Composition throughout Solvent Drying and Polymerization Using ATR-FTIR Spectroscopy. *Polymers (Basel)* 2021;13. <https://doi.org/10.3390/polym13223886>.

Arandi NZ. The Classification and Selection of Adhesive Agents; an Overview for the General Dentist. *Clin Cosmet Investig Dent* 2023;15:165–80. <https://doi.org/10.2147/CCIDE.S425024>.

Bossardi M, Piva E, Isolan CP, Münchow EA. One-year bonding performance of one-bottle etch-and-rinse adhesives to dentin at different moisture conditions. *J Adhes Sci Technol* 2020;34:686–94. <https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1677138>.

Boushell LW, Heymann HO, Ritter A V, Sturdevant JR, Swift EJ, Wilder AD, et al. Six-year clinical performance of etch-and-rinse and self-etch adhesives. *Dent Mater* 2016;32:1065–72. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2016.06.003>.

Carrilho E, Cardoso M, Marques Ferreira M, Marto CM, Paula A, Coelho AS. 10-MDP Based Dental Adhesives: Adhesive Interface Characterization and Adhesive Stability-A Systematic Review. *Materials (Basel)* 2019;12. <https://doi.org/10.3390/ma12050790>.

Cuevas-Suárez CE, Ramos TS, Rodrigues SB, Collares FM, Zanchi CH, Lund RG, et al. Impact of shelf-life simulation on bonding performance of universal adhesive systems. *Dent Mater* 2019;35:e204–19. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2019.05.023>.

de Assis C, Lemos C, Gomes J, Vasconcelos B, Moraes S, Braz R, et al. Clinical Efficiency of Self-etching One-Step and Two-Step Adhesives in NCCL: A Systematic Review and Meta-analysis. *Oper Dent* 2020;45:598–607. <https://doi.org/10.2341/19-185-L>.

de Oliveira RP, de Paula BLF, Alencar C de M, Alves EB, Silva CM. A randomized clinical study of the performance of self-etching adhesives containing HEMA and 10-MDP on non-carious cervical lesions: A 2-year follow-up study. *J Dent* 2023;130:104407. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2022.104407>.

Dressano D, Salvador M V, Oliveira MT, Marchi GM, Fronza BM, Hadis M, et al. Chemistry of novel and contemporary resin-based dental adhesives. *J Mech Behav Biomed Mater* 2020;110:103875. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.103875>.

Ebnesajjad S, Landrock AH. Adhesives for Medical and Dental Applications. *Adhesives Technology Handbook*, Elsevier; 2015, p. 258–96. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35595-7.00010-3>.

Fehrenbach J, Isolan CP, Münchow EA. Is the presence of 10-MDP associated to higher bonding performance for self-etching adhesive systems? A meta-analysis of in vitro studies. *Dent Mater* 2021;37:1463–85. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2021.08.014>.

Fehrenbach J, Lacerda-Santos R, Machado LS, Miotti LL, de Carvalho FG, Münchow EA. Which self-etch acidic composition may result in higher dental bonds at the long-term? A

network meta-analysis review of in vitro studies. *J Dent* 2022;126:104283. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2022.104283>.

Feitosa VP, Sauro S, Ogliari FA, Ogliari AO, Yoshihara K, Zanchi CH, et al. Impact of hydrophilicity and length of spacer chains on the bonding of functional monomers. *Dent Mater* 2014;30:e317-23. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2014.06.006>.

Feitosa VP, Sauro S, Ogliari FA, Stansbury JW, Carpenter GH, Watson TF, et al. The role of spacer carbon chain in acidic functional monomers on the physicochemical properties of self-etch dental adhesives. *J Dent* 2014;42:565–74. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2014.02.009>.

Han F, Dai S, Yang J, Shen J, Liao M, Xie H, et al. Glycerol Phosphate Dimethacrylate: An Alternative Functional Phosphate Ester Monomer to 10-Methacryloyloxydecyl Dihydrogen Phosphate for Enamel Bonding. *ACS Omega* 2020;5:24826–37. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03523>.

Hass V, Abuna G, Pinheiro Feitosa V, Martini EC, Sinhoreti MA, Furtado Carvalho R, et al. Self-Etching Enamel Bonding Using Acidic Functional Monomers with Different-length Carbon Chains and Hydrophilicity. *J Adhes Dent* 2017;19:497–505. <https://doi.org/10.3290/j.jad.a39565>.

Inoue S, Koshiro K, Yoshida Y, De Munck J, Nagakane K, Suzuki K, et al. Hydrolytic stability of self-etch adhesives bonded to dentin. *J Dent Res* 2005;84:1160–4. <https://doi.org/10.1177/154405910508401213>.

Karabay F, Demirci M, Tuncer S, Tekçe N, Berkman M, Baydemir C. Short-Term Comparison of Clinical Performance of Universal Adhesives with Self-Etch Mode in NCCL Restorations. *Eur J Prosthodont Restor Dent* 2023;31:78–91. https://doi.org/10.1922/EJPRD_2429Karabay14.

Münchow EA, da Silva AF, da Silveira Lima G, Wulff T, Barbosa M, Ogliari FA, et al. Polypropylene glycol phosphate methacrylate as an alternative acid-functional monomer on self-etching adhesives. *J Dent* 2015;43:94–102. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2014.11.005>.

Perdigão J, Dutra-Corrêa M, Saraceni CHC, Ciaramicoli MT, Kiyari VH, Queiroz CS. Randomized clinical trial of four adhesion strategies: 18-month results. *Oper Dent* 2012;37:3–11. <https://doi.org/10.2341/11-222-C>.

Peumans M, De Munck J, Van Landuyt KL, Poitevin A, Lambrechts P, Van Meerbeek B. Eight-year clinical evaluation of a 2-step self-etch adhesive with and without selective enamel etching. *Dent Mater* 2010;26:1176–84. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2010.08.190>.

Peutzfeldt A, Hug T, Wierichs RJ. Bond strength and marginal adaptation of resin composites and correlations with clinical results. *Dent Mater* 2024. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2024.05.004>.

Prado RD, Pereira GKR, Bottino MA, Melo RM de, Valandro LF. Effect of ceramic thickness, grinding, and aging on the mechanical behavior of a polycrystalline zirconia. *Braz Oral Res* 2017;31:e82. <https://doi.org/10.1590/1807-3107BOR-2017.vol31.0082>.

- Quinn JB, Quinn GD. A practical and systematic review of Weibull statistics for reporting strengths of dental materials. *Dent Mater* 2010;26:135–47. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2009.09.006>.
- Salz U, Zimmermann J, Zeuner F, Moszner N. Hydrolytic stability of self-etching adhesive systems. *J Adhes Dent* 2005;7:107–16.
- Sofan E, Sofan A, Palaia G, Tenore G, Romeo U, Migliau G. Classification review of dental adhesive systems: from the IV generation to the universal type. *Ann Stomatol (Roma)* 2017;8:1–17. <https://doi.org/10.11138/ads/2017.8.1.001>.
- Trevelin LT, Villanueva J, Zamperini CA, Mathew MT, Matos AB, Bedran-Russo AK. Investigation of five α -hydroxy acids for enamel and dentin etching: Demineralization depth, resin adhesion and dentin enzymatic activity. *Dent Mater* 2019;35:900–8. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2019.03.005>.
- Valente LL, Silva MF, Fonseca AS, Münchow EA, Isolan CP, Moraes RR. Effect of Diamond Bur Grit Size on Composite Repair. *J Adhes Dent* 2015;17:257–63. <https://doi.org/10.3290/j.jad.a34398>.
- Van Landuyt KL, Yoshida Y, Hirata I, Snauwaert J, De Munck J, Okazaki M, et al. Influence of the chemical structure of functional monomers on their adhesive performance. *J Dent Res* 2008;87:757–61. <https://doi.org/10.1177/154405910808700804>.
- Van Meerbeek B, Yoshihara K, Van Landuyt K, Yoshida Y, Peumans M. From Buonocore's Pioneering Acid-Etch Technique to Self-Adhering Restoratives. A Status Perspective of Rapidly Advancing Dental Adhesive Technology. *J Adhes Dent* 2020;22:7–34. <https://doi.org/10.3290/j.jad.a43994>.
- Van Meerbeek B, Yoshihara K, Yoshida Y, Mine A, J. DM, K.L. VL. State of the art of self-etch adhesives. *Dental Materials* 2011;27:17–28. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2010.10.023>.
- Yoshida Y, Nagakane K, Fukuda R, Nakayama Y, Okazaki M, Shintani H, et al. Comparative study on adhesive performance of functional monomers. *J Dent Res* 2004;83:454–8. <https://doi.org/10.1177/154405910408300604>.
- Yoshida Y, Yoshihara K, Nagaoka N, Hayakawa S, Torii Y, Ogawa T, et al. Self-assembled Nano-layering at the Adhesive interface. *J Dent Res* 2012;91:376–81. <https://doi.org/10.1177/0022034512437375>.
- Yoshihara K, Hayakawa S, Nagaoka N, Okihara T, Yoshida Y, Van Meerbeek B. Etching Efficacy of Self-Etching Functional Monomers. *J Dent Res* 2018;97:1010–6. <https://doi.org/10.1177/0022034518763606>.
- Yoshihara K, Nagaoka N, Hayakawa S, Okihara T, Yoshida Y, Van Meerbeek B. Chemical interaction of glycerophosphate dimethacrylate (GPDM) with hydroxyapatite and dentin. *Dent Mater* 2018;34:1072–81. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2018.04.003>.

Yoshihara K, Yoshida Y, Hayakawa S, Nagaoka N, Irie M, Ogawa T, et al. Nanolayering of phosphoric acid ester monomer on enamel and dentin. *Acta Biomater* 2011;7:3187–95. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2011.04.026>.

Yoshihara K, Yoshida Y, Nagaoka N, Fukegawa D, Hayakawa S, Mine A, et al. Nano-controlled molecular interaction at adhesive interfaces for hard tissue reconstruction. *Acta Biomater* 2010;6:3573–82. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2010.03.024>.

Yoshihara K, Yoshida Y, Nagaoka N, Hayakawa S, Okihara T, De Munck J, et al. Adhesive interfacial interaction affected by different carbon-chain monomers. *Dent Mater* 2013;29:888–97. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2013.05.006>.

Yoshioka M, Yoshida Y, Inoue S, Lambrechts P, Vanherle G, Nomura Y, et al. Adhesion/decalcification mechanisms of acid interactions with human hard tissues. *J Biomed Mater Res* 2002;59:56–62. <https://doi.org/10.1002/jbm.1216>.

Zhao Q, Han F, Yuan X, Chen C. Effects of Solvents and pH Values on the Chemical Affinity of 10-Methacryloyloxydecyl Dihydrogen Phosphate toward Hydroxyapatite. *ACS Omega* 2021;6:19183–93. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02521>.