

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 29/01/2028.



UNESP - Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”
Faculdade de Odontologia de Araraquara



Bruno Arruda Mascaro

**Influência da espessura, tonalidade do substrato e iluminante no
comportamento óptico de materiais CAD-CAM: estudo experimental e com
predição por inteligência artificial**

Araraquara

2026



UNESP - Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”
Faculdade de Odontologia de Araraquara



Bruno Arruda Mascaro

**Influência da espessura, tonalidade do substrato e iluminante no
comportamento óptico de materiais CAD-CAM: estudo experimental e com
predição por inteligência artificial**

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Odontologia de Araraquara, para obtenção do título de Doutor em Odontologia, na Área de Reabilitação Oral.

Orientador: Prof. Dr. José Maurício dos Santos Nunes Reis

Co-orientadora: Profa. Dra. Renata Garcia Fonseca

Araraquara

2026

M395i Mascaró, Bruno Arruda

Influência da espessura, tonalidade do substrato e iluminante no comportamento óptico de materiais CAD-CAM: estudo experimental e com predição por inteligência artificial / Bruno Arruda Mascaró. -- , 2026

141 p. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Odontologia, Araraquara,

Orientador: Prof. Dr. José Maurício dos Santos Nunes Reis

Coorientadora: Profa. Dra. Renata Garcia Fonseca

1. Odontologia. 2. Materiais dentários. 3. Estética dentária. 4. Cor. 5. Inteligência artificial. I. Título.

Bruno Arruda Mascaro

Influência da espessura, tonalidade do substrato e iluminante no comportamento óptico de materiais CAD-CAM: estudo experimental e com predição por inteligência artificial

Comissão Julgadora

Tese para obtenção do grau de doutor em Odontologia, na área de Reabilitação Oral

Presidente e orientador: Prof. Dr. José Maurício dos Santos Nunes Reis

2º Examinador: Prof. Dr. Oscar Emilio Pecho Yataco

3º Examinador: Prof^a. Dr^a. Andréa Cândido dos Reis

4º Examinador: Prof^a. Dr^a. Marilia Mattar de Amoêdo Campos Velo

Araraquara, 28 de janeiro de 2026

DADOS CURRICULARES

Bruno Arruda Mascaro

NASCIMENTO 14 de novembro de 1994 – Araraquara-SP, Brasil

FILIAÇÃO Flavio Mascaro
Silvia Helena Arruda Mascaro

- 2014 – 2018** Graduação em Odontologia.
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Odontologia, Araraquara-SP.
- 2015 – 2017** Estágio de Iniciação Científica.
Disciplina de Periodontia.
Departamento de Diagnóstico e Cirurgia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Odontologia, Araraquara-SP.
- 2018 – 2018** Estágio de Iniciação Científica.
Disciplina de Prótese Fixa Convencional e sobre Implantes.
Departamento de Materiais Odontológicos e Prótese, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Odontologia, Araraquara-SP.
- 2018 – 2019** Aperfeiçoamento: Estética com ênfase em restaurações adesivas indiretas.
Associação Paulista de Cirurgiões Dentistas (APCD), Regional Araraquara-SP.
- 2019 – 2021** Mestrado em Odontologia, área de concentração: Reabilitação Oral.
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Odontologia, Araraquara-SP. Bolsas CAPES (88882.441611/2019-01) e FAPESP (2018/24595-7).
- 2021 – Atual** Doutorado em Odontologia, área de concentração: Reabilitação Oral.
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Odontologia, Araraquara-SP. Bolsa FAPESP (2022/12431-5).
- 2024 – 2024** Doutorado sanduíche: Departamento de Óptica, Faculdade de Ciências, Universidade de Granada-UGR, Granada, Espanha. Bolsa BEPE FAPESP (2023/15441-4).

Dedico este trabalho a toda minha família, que me apoiou para que eu me mantivesse firme ao propósito. Sem vocês nada disso seria possível.

“In Memoriam”. Aos meus avós paternos Cid Mascaró e Emília Irene Rodella Mascaró; e avô materno José Roberto Arruda Mendonça, com amor e saudades.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a **DEUS** por me permitir trilhar o caminho do conhecimento e da sabedoria e por me conceder saúde, disciplina, disposição e energia para seguir os meus sonhos. Sou profundamente grato por todas as bênçãos recebidas ao longo desta jornada e por colocar em meu caminho pessoas especiais que foram essenciais para alcançar este objetivo.

Aos meus pais, **Silvia Helena Arruda Mascaro e Flávio Mascaro**, pelo amor incondicional que sempre me dedicaram. As palavras me faltam e me emociono ao expressar aqui toda a minha gratidão pela vida, pela educação, pelos valores e por todo o empenho e incentivo à minha formação como pessoa, filho, homem e profissional. Vocês têm todo o meu reconhecimento por tudo o que fizeram e se dedicaram para que eu pudesse seguir meus estudos e objetivos, colocando muitas vezes as minhas necessidades acima de seus sonhos e desejos, algo que guardarei sempre com profunda gratidão. Suas orientações em conselhos de sempre seguir o caminho do bem, com respeito ao próximo, dignidade, humildade e honra foram pilares fundamentais que construímos juntos e que sustentaram a realização dos meus sonhos. Foi sempre debaixo de muito sol, que hoje, vocês fizeram com que eu chegasse até aqui, na sombra. Muito do que sou hoje, conquistei e do que construí em minha vida, devo aos ensinamentos, à persistência e à confiança de vocês. Obrigado por tudo, amo vocês!

À minha irmã **Laura Arruda Mascaro**, agradeço pela presença em minha vida. Como sempre costumamos brincar, você nunca conheceu a vida sem mim. E hoje posso afirmar que eu não imagino a minha sem você, sempre disposta a me ajudar, aconselhar e compartilhar seus conhecimentos a qualquer momento. Seu jeito crítico, incentivo, apoio e torcida pela minha vitória foram fundamentais para minhas conquistas.

À minha esposa **Jéssica Arielli Pradelli** pelos anos de convivência e por caminhar ao meu lado durante todo o processo. Agradeço pelos bons momentos e, principalmente, por ser meu principal ponto de apoio, amor, paz, incentivo, torcida, cuidado e carinho. Em você encontro todo o suporte necessário para enfrentar as dificuldades da rotina, a leveza que acalmou e me preparou para seguir sempre buscando o melhor, os conselhos que fizeram com que eu sempre encontrasse a maneira correta, mais fácil e justa de alcançar meus objetivos, e a confiança em

acreditar em mim até mesmo quando eu duvidava. Agradeço também por sempre compreender minhas ausências durante toda a minha Pós-Graduação. Você, melhor do que ninguém, sabe que este trabalho somente foi possível em razão da nossa sintonia e união. Esta conquista também é sua. Amo você.

Ao meu orientador durante toda a minha trajetória na pós-graduação, **Prof. Dr. José Maurício dos Santos Nunes Reis**, expresso aqui minha profunda gratidão pela oportunidade e confiança em primeiro lugar. Quero que saiba que você foi uma peça-chave na minha vida acadêmica. Obrigado pela disponibilidade constante e pela generosidade em sempre compartilhar o conhecimento que me inspirou a buscar o aprimoramento e a excelência. Por todos os incentivos, suporte, exigência e dedicação, e por ser essa pessoa agradável, gentil e acessível, atribuições essas que, em muito, contribuíram para a harmonia na relação aluno-orientador e, sem sombra de dúvidas, estão diretamente relacionadas a tudo o que conquistei e alcançamos até aqui. Você acreditou e alavancou minhas capacidades, habilidades e potencial não apenas pelos ensinamentos teóricos e técnicos, mas também pelos valores humanos transmitidos. Serei eternamente grato.

À minha co-orientadora **Profa. Dra. Renata Garcia Fonseca**, sou imensamente grato pela valiosa contribuição, pela confiança e pelo incentivo constante. Sua forma inspiradora de ensinar, de incentivar, de compartilhar e sua disponibilidade tornaram o caminho leve e muito produtivo. Agradeço por acreditar neste projeto e por ter contribuído de maneira ímpar para meu crescimento científico e pessoal.

À **Profa. Dra. Maria del Mar Perez**, expresso aqui todo meu agradecimento e reconhecimento pela valiosa oportunidade de aprendizado e pelo acolhimento durante meu período de doutorado sanduíche na Faculdade de Ciências da Universidade de Granada (UGR), na Espanha. Sua capacidade de estimular o pensamento crítico, de oferecer direcionamentos claros e abrir espaço para o desenvolvimento de ideias foi determinante para a evolução e conclusão desta pesquisa. Obrigado pela generosidade e pela atenção com que compartilhou comigo sua vasta experiência e conhecimentos, essenciais para meu crescimento e para a minha formação. Guardarei sempre comigo nossas conversas inspiradoras e o ambiente motivador que te rodeia.

Aos amigos e colegas do **Laboratório de Óptica de Biomateriais e do Departamento de Óptica da Universidade de Granada (UGR)**, na Espanha, **Maria**

Tejada-Casado, Juan de la Cruz Cardona, Aitor Marzo, Javier Ruiz-López, Rafael Vázquez Conejo, Razvan Ghinea e Ana Maria Ionescu obrigado pela recepção, acolhimento, apoio, bons momentos, experiências e pelos conhecimentos transmitidos que tornaram a experiência de viver no exterior durante o doutorado sanduíche memorável, enriquecedora e leve.

A todos os **amigos e colegas da turma de Pós-Graduação e do grupo de pesquisa**, por dividirem a trajetória durante esses longos anos, compartilhando seus conhecimentos, experiências, momentos, angústias e, principalmente, por todo o suporte e ajuda quando foram precisos. Sem dúvidas, crescemos juntos. Desejo sucesso a todos.

A todos os amigos e docentes da **Disciplina de Prótese Fixa Convencional e sobre Implantes** da Faculdade de Odontologia de Araraquara (FOAr-UNESP), pela convivência diária, conhecimentos transmitidos, oportunidades, confiança, paciência e disposição para ajudar a todo momento.

Aos docentes da **Disciplina de Materiais Odontológicos** da Faculdade de Odontologia de Araraquara (FOAr-UNESP), pela oportunidade de atuar como estagiário docente a mim concedida, confiança, conhecimentos transmitidos e pelo harmonioso convívio diário.

Aos docentes da **Disciplina de Prótese Total Convencional e sobre Implantes** da Faculdade de Odontologia de Araraquara (FOAr-UNESP), pela oportunidade e confiança de atuar como estagiário docente nas atividades práticas da disciplina, impulsionando minha formação profissional e pessoal.

À **Faculdade de Odontologia de Araraquara da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (FOAr-UNESP)**, na pessoa da Diretora Prof. Dra. Patrícia Petromilli Nordi Sasso Garcia e da Vice-Diretora Profa. Dra. Elaine Pereira da Silva Tagliaferro, pela formação e oportunidade a mim proporcionadas e pela infraestrutura disponibilizada por esta instituição.

Ao **Departamento de Materiais Odontológicos e Prótese (DMOP)** da Faculdade de Odontologia de Araraquara (FOAr-UNESP) e a todos os seus **docentes, servidores e funcionários**, representados pela chefe de Departamento Profa. Dra. Ana Carolina Pero e vice-chefe Prof. Dr. José Maurício dos Santos Nunes Reis.

Ao **Programa de Pós-Graduação em Odontologia** da Faculdade de Odontologia de Araraquara (FOAr-UNESP), representado pelo coordenador Profa.

Dra. Morgana Rodrigues Guimarães Stabili e vice-coordenadora Profa. Dra. Daniela Leal Zandim Barcelos, por todo o suporte e formação.

Aos servidores da **seção de Pós-Graduação** da Faculdade de Odontologia de Araraquara (FOAr-UNESP), **José Alexandre Garcia, Cristiano Afonso Lamounier e Alessandra Cristina Francischini de Carvalho**, pela exemplar dedicação, disponibilidade, suporte e atenção com que sempre atenderam e resolveram minhas solicitações.

Aos membros da banca examinadora, **Prof. Dr. Oscar Emilio Pecho Yataco, Prof^a. Dr^a. Andréa Cândidos dos Reis e Prof^a. Dr^a. Marília Mattar de Amoêdo Campos Velo** pela valiosa participação, leitura atenta, sugestões e contribuições que foram essenciais para o aprimoramento da versão final desse trabalho.

À **CAPES**: O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

À **FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo** (Processos nº 2022/12430-9, nº 2022/12431-5 e nº 2023/15441-4) pelo apoio financeiro essencial para realização dessa pesquisa.

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta para o desenvolvimento deste trabalho,

Meus sinceros agradecimentos!

Mascaro BA. Influência da espessura, tonalidade do substrato e iluminante no comportamento óptico de materiais CAD-CAM: estudo experimental e com predição por inteligência artificial [tese de doutorado]. Araraquara: Faculdade de Odontologia da UNESP; 2026.

RESUMO

Objetivos: Este estudo *in vitro* avaliou o comportamento óptico, a capacidade de mascaramento, a precisão de um modelo de regressão baseado em aprendizado de máquina (IA) para predição de cor e a influência da tonalidade do substrato e de diferentes iluminantes na cor de materiais CAD-CAM com distintas espessuras.

Material e Métodos: Discos com espessuras de 0,5; 1,0 e 1,5 mm foram obtidos a partir de blocos CAD-CAM de tonalidade A2 e alta translucidez (HT) dos materiais: resina composta nanocerâmica (Lava Ultimate-LU), resina composta nanohíbrida (Grandio Blocs-GB), cerâmica com matriz polimérica incorporada (VITA Enamic-VE) e porcelana feldspática (VITA Mark II-VM). A reflectância espectral de todos os espécimes foi medida sobre fundo preto padronizado e nove fundos coloridos fabricados (ND1-ND9, IPS Natural Die Material) utilizando espectrorradiômetro (SpectraScan PR670). Os valores de reflectância espectral foram convertidos em coordenadas CIEL*a*b, croma (C) e matiz (h°). Os dados obtidos foram utilizados em quatro estudos *in vitro*: **Publicação 1:** A partir dos valores espectrais, foram calculados os coeficientes de dispersão (S), absorção (K), albedo (a), transmitância (T%), refletividade da luz (RI) e espessura óptica infinita (X_{∞}) de espécimes com 1,0 mm de espessura ($n=10/\text{material}$), utilizando a teoria de Kubelka-Munk. A razão K/S dos materiais CAD-CAM foi comparada com a de estruturas dentais bovinas. O Erro Quadrático Médio (RMSE) e o Grau de Ajuste (GFC) foram utilizados como parâmetros de análise do comportamento óptico. A translucidez foi avaliada utilizando o parâmetro relativo (RTP₀₀) e respectivos limiares de perceptibilidade (TPT₀₀) e aceitabilidade (TAT₀₀). As propriedades ópticas e a translucidez variaram de acordo com a composição e microestrutura dos materiais CAD-CAM, sendo que VM apresentou maiores valores de S e menores valores de RTP₀₀. A dispersão (scattering) foi identificada como fenômeno de atenuação da luz mais relevante, embora tenha se mostrado menos significativa em comparação com as estruturas dentárias. **Publicação 2:** Diferenças de cor (ΔE_{00}), de parâmetro de translucidez relativa (ΔRTP_{00}) e espessura óptica infinita (X_{∞}) foram calculadas para avaliar a capacidade dos materiais CAD-CAM, nas diferentes espessuras ($n=3/\text{material}$), em mascarar os fundos ND1-ND9. Dados de ΔE_{00} foram analisados por Kruskal-Wallis e Mann-Whitney ($\alpha=0,05$). Os valores de ΔE_{00} entre as espessuras foram comparados com os limiares de perceptibilidade e aceitabilidade. O RMSE e o GFC foram utilizados como parâmetros de desempenho óptico de X_{∞} . A capacidade de mascaramento dos materiais CAD-CAM de alta translucidez foi influenciada pela composição, espessura e cor do substrato ND subjacente, sendo que VM demonstrou efeito de mascaramento superior aos demais materiais para todas as espessuras. **Publicação 3:** Para desenvolver e avaliar o modelo de predição de cor baseado em inteligência artificial (IA), o conjunto de dados de entrada consistiu nas coordenadas L*, a* e b* mensuradas de todos os espécimes; utilizadas para prever as coordenadas de cor de determinada amostra. Estratégia de validação cruzada *leave-one-out* (LOO-CV) foi utilizada para desenvolver e avaliar os modelos preditivos. Modelos de regressão *Partial Least Square* (PLS) foram empregados para prever valores de L*, a* e b* com base nos dados das variáveis de entrada: material, espessura e fundo ND. O RMSE

foi utilizado como parâmetro de avaliação de desempenho do método. Diferenças de cor CIEDE2000 entre dados medidos e preditos foram calculadas, e a precisão foi avaliada comparando os valores de ΔE_{00} com os limiares de perceptibilidade e aceitabilidade. Os modelos de aprendizado de máquina desenvolvidos previram com precisão as coordenadas CIE-L*a*b*, com todos os valores de ΔE_{00} permanecendo dentro do limite de aceitabilidade. A precisão da predição de cor melhorou substancialmente quando os dados foram segmentados por material e espessura. No geral, a integração de LOO-CV e da regressão PLS produziu um modelo estável e reproduzível. **Publicação 4:** A partir da reflectância espectral de cada amostra de material CAD-CAM com 1,0 mm de espessura (n=3/material) sobre cada fundo ND, as cores correspondentes sob os iluminantes D65, A e nove LEDs brancos foram calculadas utilizando a transformação cromática CIECAT16. Diferenças de cor CIEDE2000 entre as amostras iluminadas pelo CIE D65 e demais iluminantes foram calculadas. Os limiares de perceptibilidade e aceitabilidade foram utilizados para analisar as variações de cor entre os distintos iluminantes. Os iluminantes LED B3, B4 e B5 geralmente apresentaram os menores valores de ΔE_{00} para todos os materiais e tonalidades de substrato, mantendo-se consistentemente dentro dos limites de perceptibilidade e aceitabilidade. VE e VM revelaram maior inconstância de cor, particularmente nos substratos ND4, ND5 e ND6, geralmente com valores acima do limite de aceitabilidade. **Conclusão:** Com base nas metodologias propostas e nos achados das quatro publicações, foi possível concluir que o comportamento óptico e desempenho estético de materiais restauradores CAD-CAM são dependentes de sua composição, microestrutura, espessura e da interação com o substrato e as condições de iluminação. A compreensão integrada desses fatores permite aprimorar a previsibilidade estética de restaurações, orientar a seleção de cor e de materiais de forma mais racional e apoiar o desenvolvimento de novas ferramentas e protocolos baseados em ciência da cor e modelagem preditiva.

Palavras-chave: Materiais dentários; Desenho assistido por computador; Estética dentária; Cor; Inteligência artificial.

Mascaro BA. Influence of thickness, substrate shade, and illuminant on the optical behavior of CAD-CAM materials: an experimental study and artificial intelligence prediction [tese de doutorado]. Araraquara: Faculdade de Odontologia da UNESP; 2026.

ABSTRACT

Objectives: This in vitro study assessed the optical behavior, masking ability, the accuracy of a machine learning regression model (AI) for color prediction, and the influence of different illuminants on the color of CAD-CAM with varying thicknesses.

Material and Methods: Disk-shaped samples in 0.5, 1.0, and 1.5 mm of thickness ($n=12$) were obtained in A2 shade and high translucency level (HT) of CAD-CAM nanoceramic composite resin (Lava Ultimate-LU), nanohybrid composite resin (Grandio Blocs-GB), polymer-infiltrated ceramic network (VITA Enamic-VE), and feldspar porcelain (VITA Mark II-VM). The spectral reflectance of specimens was measured over a standardized black background and nine fabricated colored backgrounds (ND1-ND9, IPS Natural Die Material) using a non-contact spectroradiometer (SpectraScan PR670). Spectral reflectance values were converted into CIEL*a*b* and chroma (C^*) and hue (h°) coordinates. The data obtained were utilized across four in vitro studies: **Study 1:** From the spectral values, scattering (S), absorption (K), albedo (a) coefficient, transmittance ($T\%$), light reflectivity (RI), and infinite optical thickness (X_∞) were calculated for 1.0 mm thick samples using Kubelka-Munk theory. The K/S ratio of CAD-CAM materials was compared to that of bovine dental structures. Root Mean Square Error ($RMSE$) and Goodness of Fit (GFC) were used as performance optical behavior. Translucency was evaluated using the relative parameter (RTP_{00}) and 50:50% translucency perceptibility and acceptability thresholds. The optical properties and translucency varied according to the composition and microstructure of the CAD-CAM materials, with VM showing higher scattering and lower RTP_{00} values. Scattering was identified as the most relevant light attenuation phenomenon, although it proved to be less significant compared to dental structures. **Study 2:** Calculations of color differences (ΔE_{00}), relative translucency parameter (ΔRTP_{00}), and infinite optical thickness (X_∞) were performed to assess the ability of the CAD-CAM materials at different thicknesses ($n=3$ /material) to mask the ND1-ND9 backgrounds. ΔE_{00} data were analyzed by Kruskal-Wallis and Mann-Whitney tests ($\alpha=0.05$). ΔE_{00} values between thicknesses were compared to perceptible and acceptable thresholds. $RMSE$ and GFC were used as performance optical behavior of X_∞ . The masking ability of high-translucency CAD-CAM materials was influenced by material composition, thickness, and the color of the underlying ND substrate, with VM demonstrating the superior masking effect across all thicknesses. **Study 3:** To develop and evaluate the AI color predictive model, the input dataset consisted of the measured L^* , a^* , and b^* coordinates of the samples, which were used to predict the CIE- $L^*a^*b^*$ color coordinates of a given sample. A leave-one-out cross-validation (LOO-CV) strategy was implemented for model development and evaluation. Partial Least Squares (PLS) regression models were applied to predict the color coordinate value as a function of thicknesses and against the ND backgrounds. Color

differences (ΔE_{00}) were calculated between the measured and predicted values. The ΔE_{00} 50:50% acceptability and perceptibility thresholds were used as performance assessments of the method. The machine learning models developed accurately predicted CIE-L*a*b* coordinates, with all ΔE_{00} values remaining within the acceptable limit. Prediction accuracy improved substantially when data were segmented by material and thickness. Overall, the integration of LOO-CV and PLS regression produced a stable and reproducible model. **Study 4:** From the spectral reflectance factors of each CAD-CAM material sample with a thickness of 1.0 mm ($n=3/\text{material}$) on each ND background, the corresponding colors under D65, A, and nine white LED illuminants were computed using the chromatic adaptation transform CIECAT16. CIEDE2000 color differences between samples illuminated by the CIE D65 and other illuminants were calculated. The respective perceptibility and acceptability color thresholds were used to analyze the color variations among the different illuminants. LED illuminants B3, B4, and B5 generally yielded the lowest ΔE_{00} values for all materials and substrate shades, consistently within perceptible and acceptable limits. VE and VM revealed greater color inconstancy, particularly on substrates ND4, ND5, and ND6, generally above the acceptability threshold. **Conclusion:** Based on the proposed methodologies and the findings of the four studies, it is evident that the optical behavior and esthetic performance of CAD-CAM restorative materials depend on their composition, microstructure, thickness, and interaction with the substrate and lighting conditions. Understanding these factors in an integrated manner allows for improving the aesthetic predictability of restorations, guiding color and material selection more rationally, and supporting the development of new tools and protocols based on color science and predictive modeling.

Keywords: Dental materials; Computer-aided design; Esthetics, dental; Color; Artificial intelligence.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 PROPOSIÇÃO	21
2.1 Objetivos Específicos	21
3 PUBLICAÇÕES	22
3.1 Publicação 1	22
3.2 Publicação 2	47
3.3 Publicação 3	69
3.4 Publicação 4	92
4 DISCUSSÃO	108
5 CONCLUSÃO	113
REFERÊNCIAS	115
APÊNDICE.....	121
ANEXO A	139
ANEXO B	140
ANEXO C	141

1 INTRODUÇÃO

O fluxo de trabalho na reabilitação oral passou por avanços significativos nas etapas, técnicas e materiais disponíveis para a confecção de restaurações indiretas em decorrência do desenvolvimento e evolução da tecnologia CAD-CAM (*Computer-Aided Design and Computer-Aided Manufacturing*)¹⁻³. Materiais CAD-CAM que não exigem etapas adicionais de cristalização ou sinterização após fresagem têm ganhado popularidade devido a sua relativa facilidade e rapidez de confecção em fluxos de trabalho em consultório, conhecidos como *chairside*⁴⁻⁷. Dentre esses materiais, os compósitos resinosos (por exemplo, Lava Ultimate e Grandio Blocs) e os à base de cerâmica infiltrada por polímero (cerâmica híbrida; por exemplo, VITA Enamic) têm sido amplamente utilizados, por combinarem a resistência mecânica, estabilidade de cor e resultado estético das cerâmicas com o módulo de elasticidade, menor desgaste de dentes antagonistas, possibilidade e facilidade de reparos intraorais e polimento das resinas compostas⁸⁻¹¹. Propriedades físico-mecânicas dos materiais restauradores desempenham papel fundamental para o desempenho clínico e sucesso a longo prazo de restaurações indiretas⁹. Contudo, o resultado estético depende predominantemente de suas propriedades ópticas, as quais devem reproduzir de forma fidedigna as características dos dentes naturais^{9,12}.

A determinação precisa da cor é um fator-chave para materiais restauradores. Alcançar uma correspondência ideal entre a cor e propriedades ópticas de restaurações e aquelas dos dentes naturais adjacentes é altamente desejável, especialmente em casos envolvendo a região anterior¹³⁻¹⁵. Entretanto, se configura como um dos maiores desafios clínicos, uma vez que a cor de dentais naturais resulta da combinação de diferentes estruturas, isto é, esmalte, dentina e polpa, com características totalmente distintas entre si^{11,12,14}. Na maioria das abordagens clínicas, a comparação visual com escalas de cor dentais padronizadas comercialmente disponíveis é o método mais utilizado para realizar a seleção de cor em odontologia.^{2,10,16} Apesar de ser um método tradicional e consagrado, estudos relataram que nenhum dos materiais CAD-CAM avaliados foi capaz de corresponder adequadamente a respectiva guia da escala de cor VITA Classical A1-D4^{2,10}. Além disso, durante a avaliação visual, a variabilidade entre diferentes escalas de cor, a tonalidade do substrato, subjetividade do observador e as condições de iluminação são todos parâmetros que podem influenciar a correspondência de cor¹⁶⁻¹⁸.

Paralelamente, foi descrito que a cor do substrato, o tipo de material restaurador, a translucidez, espessura e os diferentes iluminantes podem influenciar a cor final de restaurações indiretas¹⁹⁻²¹. As interações complexas entre esses fatores tornam a correspondência de cor e o resultado estético final de restaurações indiretas tarefas desafiadoras.

Uma compreensão abrangente da cor e propriedades ópticas dos materiais dentários, obtida por meio do aprendizado sobre sua caracterização e comportamento óptico, pode auxiliar clínicos na escolha do material mais adequado dependendo da situação clínica^{22,23}. A medição da reflectância espectral de um objeto é um método confiável para descrever a cor, pois é independente das condições de iluminação e de observação¹⁴. No entanto, ao considerar o resultado estético final de materiais CAD-CAM, é essencial avaliar a dispersão, absorção, reflexão e transmissão da luz para compreender suas propriedades ópticas intrínsecas^{9,22-25}. Esse conhecimento ajuda a prever como a luz interage com o material, influenciando sua integridade visual com os tecidos adjacentes e contribuindo para a percepção de cor e translucidez²⁶. Essas informações podem fornecer dados valiosos sobre o comportamento óptico de materiais restauradores empregados em restaurações e reabilitações com necessidades altamente estéticas.

A cor final e a translucidez de um material restaurador são caracterizadas por dois processos principais e que são dependentes do comprimento de onda da luz visível (380-700 nm): a dispersão e a absorção da luz à medida que ela atravessa o material^{27,28}. Quando a luz incidente é transmitida por um material, ela é múltiplas vezes dispersa por partículas de tamanho pequeno antes de emergir e alcançar o observador, sendo parte desta luz absorvida ou refletida^{29,30}. A refletividade luminosa dos materiais restauradores indica sua reflectância quando opacos e pode ser usada para determinar a cor intrínseca do material, independentemente do fundo^{31,32}.

No campo da óptica, o uso de um modelo de dois fluxos é descrito para a obtenção dos parâmetros ópticos na área odontológica²². A teoria de reflectância de dois fluxos de Kubelka-Munk (K-M)^{33,34} é um modelo unidimensional simplificado, ainda amplamente utilizado devido a sua relativa simplicidade na análise de materiais translúcidos. Esse modelo permite o cálculo dos coeficientes de dispersão e absorção da luz, considerando a reflectância ao longo da espessura do material e a reflectância do fundo³⁴. Assim, é possível extrair os coeficientes espectrais de absorção e dispersão de um determinado material com espessura conhecida por meio de cálculos

analíticos diretos, utilizando apenas duas medições ópticas: os fatores de reflectância da camada em contato óptico com fundos branco ou preto, desde que os fatores de reflectância desses fundos também sejam conhecidos ou mensurados. Esse modelo tem sido aplicado na investigação do comportamento óptico da dentina e esmalte humanos, estruturas de esmalte-dentina bovinas e de materiais odontológicos como compósitos resinosos, zircônia, materiais CAD-CAM multicromáticos e resinas impressas 3D^{9,22,23,25,30,35-39}. No entanto, informações são limitadas a respeito das propriedades ópticas de materiais CAD-CAM monocromáticos de alta translucidez à base de porcelana feldspática, compósitos resinosos e de cerâmicas híbridas.

A aplicação e validação desses modelos ópticos dependem diretamente da obtenção de dados confiáveis de reflectância espectral, o que torna o uso de instrumentos de medição de cor fundamental para caracterização objetiva dos materiais restauradores. Espectrofotômetros, espectrorradiômetros e colorímetros fornecem dados objetivos e quantitativos para avaliação da cor, reduzindo as limitações dos métodos visuais^{40,41}. Todavia, atualmente não existem instrumentos capazes de integrar as coordenadas CIELab obtidas do substrato dental e da restauração para prever qual o material, cor e espessura ideais para adequada correspondência estética. Nesse contexto, o uso da inteligência artificial (IA) pode reduzir erros clínicos, otimizar a seleção de cor e de materiais em si e minimizar retrabalhos, promovendo tratamentos mais eficientes, satisfatórios e, principalmente, previsíveis⁴⁰. A IA na ciência dos materiais tem avançado significativamente e está entre as áreas de pesquisa que mais crescem.⁴²⁻⁴⁴ As técnicas de IA revolucionaram a análise de dados por meio da extração aprofundada de informações a partir de dados coletados. Esse processo é normalmente denominado “Aprendizado de Máquina” (do inglês, *Machine Learning* – ML), um subconjunto da IA que permite que algoritmos aprendam sobre um determinado tema a partir de um conjunto de dados disponível^{42,45}. A extração de informações é geralmente realizada por técnicas de aprendizado supervisionado, que consistem na aprendizagem de uma função que mapeia uma amostra de entrada (*input*) para um resultado desejado (*output*), todos baseados em um banco de dados consistente de pares de entrada e saída (*input-output data*)⁴⁵. Uma vez que essa função é aprendida utilizando dados de treinamento, previsões podem ser realizadas com base em novas amostras recebidas.

No campo da predição de cor na odontologia, modelos de IA podem ser empregados para integrar variáveis como espessura do material, propriedades ópticas

e tonalidades de substratos, proporcionando estimativas mais precisas e personalizadas para caso clínico^{12,16,45}. Modelos de regressão linear têm sido empregados para a predição de cor em pesquisas na área da odontologia. Estudos recentes propuseram o uso de modelos de regressão baseados em aprendizado de máquina para auxiliar clínicos na previsão da cor final de restaurações indiretas anteriores confeccionadas com cerâmica CAD-CAM reforçada por leucita^{40,46}, bem como para estimar a reflectância espectral e cor de compósitos monolíticos com diferentes espessuras⁴⁷. Entre os métodos de regressão, a regressão por Mínimos Quadrados Parciais (do inglês, *Partial Least Squares* – PLS)⁴⁸ destaca-se por seu desempenho robusto em contextos nos quais as variáveis preditoras apresentam alta colinearidade ou quando o número de preditores excede o número de observações. Essa técnica é particularmente útil para modelar relações lineares entre conjuntos de variáveis altamente correlacionadas, pois reduz a dimensionalidade dos dados, enquanto preserva a máxima variância relevante para a variável dependente. Até onde se tem conhecimento, não existem estudos que tenham proposto a predição de coordenadas de cor de compósitos resinosos, cerâmicas híbridas e porcelana feldspática CAD-CAM em função da espessura e avaliados sobre distintas tonalidades de fundos que simulam a coloração dos substratos de dentes pilares. Ao empregar algoritmos de IA para analisar as relações quantitativas entre os fatores envolvidos, este estudo objetivou aprimorar diretrizes clínicas e otimizar a seleção de materiais restauradores, visando resultados previsíveis.

Tratando-se de previsibilidade, a avaliação da cor na odontologia sob diferentes condições de iluminação aumenta a confiabilidade das pesquisas, com aplicabilidade em diversos contextos clínicos e laboratoriais. As coordenadas do espaço de cor CIE (Comissão Internacional de Iluminação), L^* (luminosidade), a^* (eixo vermelho-verde) e b^* (eixo amarelo-azul), são amplamente utilizadas para mensurar diferenças de cor (ΔE)^{14,16,49,50}. Os valores dessas coordenadas são fortemente influenciados pelas fontes de iluminação (ou iluminantes) utilizadas durante a etapa de medição, resultando em alterações nas cores percebidas e mensuradas dos materiais dentários^{16,28,51}. A CIE classificou diferentes iluminantes com o objetivo de padronizar a determinação de cor e a análise instrumental⁵². O iluminante D65 representa a luz do dia padrão, simulando condições naturais de iluminação, sendo recomendado para a realização de seleção visual de cor⁵¹⁻⁵³. O iluminante A corresponde à luz incandescente, comumente utilizada em ambientes internos, podendo ser utilizada

para avaliar diferenças de cor sob iluminação artificial quente^{51,52}. Atualmente, observa-se uma tendência de substituição das fontes de luz tradicionais por diodos emissores de luz (LEDs)^{15,50}. Apesar de suas vantagens de baixo custo, economia energética e alta eficiência luminosa, os LEDs também podem influenciar a aparência de objetos^{15,50}. Com o objetivo de fornecer uma representação aproximada da gama disponível de fontes de luz LED branco, a CIE propôs uma série de nove iluminantes LED específicos⁵²: LEDs B1 a B5, típicos de emissão azul com conversão por fósforo e diferentes temperaturas de cor correlatas; LED BH1, que mistura LEDs azuis e vermelhos convertidos por fósforo; LED RGB, mistura de LEDs vermelho, verde e azul; e os iluminantes LEDs V1 e V2, que são LEDs tradicionais de emissão violeta convertidos por fósforo com temperaturas de cor modificadas⁵². A avaliação da influência dos iluminantes por meio de estudos *in vitro* permite compreensão abrangente do comportamento cromático dos materiais restauradores sob diferentes condições de iluminação, contribuindo para interpretações mais precisas e aplicáveis a esses cenários. No campo da odontologia, um estudo avaliou a variação de cor de dentes naturais sob iluminantes LED, encontrando diferenças de cor e de índice de brancura perceptíveis e não aceitáveis, quando comparados aos iluminantes padrão D65 e A⁵⁰. Outro estudo recente demonstrou que a cor de cerâmicas odontológicas foi influenciada pelos iluminantes LEDs brancos propostos pela CIE, com variações perceptíveis e, em alguns casos, até inaceitáveis¹⁵. Entretanto, até onde se tem conhecimento, informações são limitadas sobre alterações de cor de materiais CAD-CAM com diferentes espessuras avaliadas em distintas tonalidades de substratos, quando iluminados com iluminantes LEDs recém propostos pela CIE, em comparação com sua cor sob o iluminante padrão D65.

Além disso, o sucesso estético clínico pode ser imprevisível quando os procedimentos restauradores envolvem mascarar a cor da estrutura dental preparada⁵⁴. A descoloração dentária pode resultar de tratamentos endodônticos, doenças metabólicas, fatores sistêmicos ou de pigmentações extrínsecas provenientes da dieta ou do uso de medicamentos⁵⁵. O material restaurador pode necessitar de uma espessura específica para alcançar o equilíbrio adequado entre translucidez e opacidade, a fim de obter uma restauração com aparência natural⁵⁶. A análise do conceito de espessura óptica infinita (X_{∞}) pode auxiliar na determinação da espessura mínima em que um material translúcido, quando posicionado sobre um fundo preto, atinge sua máxima reflectância luminosa e torna-se praticamente

opaco³¹. Quando a espessura da restauração excede o valor de X_{∞} , o material absorve ou reflete toda a luz incidente, eliminando a influência da cor do fundo e exibindo sua cor intrínseca^{23,57}. Contudo, em situações nas quais a espessura necessária para bloquear totalmente dentes escurecidos ou manchados não é viável ou atingida clinicamente, torna-se imprescindível a seleção de materiais com alta capacidade de mascaramento⁵⁸.

Diversas metodologias têm sido empregadas para avaliar o efeito de mascaramento de materiais restauradores, incluindo o parâmetro de translucidez (TP) e a razão de contraste (CR)^{54,59}. A utilização da fórmula de diferença de cor CIEDE2000 (ΔE_{00}), associada aos respectivos limiares de perceptibilidade (PT_{00}) e de aceitabilidade (AT_{00}), tem sido considerada a abordagem mais apropriada e recomendada para avaliar a capacidade de mascarar substratos⁵⁹. A capacidade de mascaramento não está necessariamente vinculada à completa neutralização da influência da cor do substrato, mas sim da sua habilidade em atenuar essa interferência a ponto de manter a cor final de uma restauração dentro dos limites de imperceptibilidade ou aceitabilidade da diferença de cor com dentes naturais adjacentes. Assim, foi sugerido que estudos sobre diferenças de cor devem priorizar a avaliação de um determinado material ou estrutura sobre substratos de diferentes cores, ao invés de comparar os valores de coordenadas de cor ou calcular diferenças de cor entre diferentes materiais ou estruturas⁵⁹.

Diversos estudos^{55,58,60-66} investigaram a capacidade de mascaramento de materiais CAD-CAM, sendo que somente um estudo⁶³ considerou a avaliação de múltiplos fatores. No estudo em questão⁶³, amostras com três espessuras foram avaliadas sobre nove tonalidades distintas de substrato, embora utilizando exclusivamente cerâmicas vítreas. Considerando o amplo uso de materiais à base de matriz resinosa e porcelanas feldspáticas em dentes anteriores, compreender a interação desses fatores para esses materiais é de relevância tanto científica quanto clínica. Ademais, apenas nesse estudo⁶³ as coordenadas de cor obtidas sobre os substratos coloridos foram comparadas às obtidas sobre um fundo preto, considerado o fundo ideal para análises in vitro da cor de materiais restauradores por simular o fundo preto da cavidade bucal. Sendo, portanto, metodologia altamente pertinente para determinar a real influência do substrato na cor final da restauração.

Diante do contexto e lacunas existentes na literatura, o presente estudo foi concebido visando aprofundar a análise e proporcionar abordagem detalhada de cada

um dos fatores previamente expostos e discutidos anteriormente, que influenciam o comportamento estético final de materiais restauradores indiretos CAD-CAM.

5 CONCLUSÃO

Com base na metodologia proposta, limitações e resultados obtidos, pode-se concluir que:

Publicação 1: O comportamento espectral de S, K, T%, RI, X_{∞} e do coeficiente de albedo nos compósitos à base de resina CAD-CAM, na cerâmica com rede polimérica infiltrada e na porcelana feldspática avaliados diferiu significativamente entre si e em relação à estrutura dentária bovina. Assim, suas propriedades ópticas foram dependentes do comprimento de onda e influenciadas por suas composições e características microestruturais. A dispersão (*scattering*) foi identificada como o fenômeno de extinção da luz mais relevante, embora tenha se mostrado menos significativa em comparação com as estruturas dentárias. A porcelana feldspática CAD-CAM apresentou a menor translucidez, com valores de ΔRTP_{00} acima do limite de aceitabilidade, quando comparada aos demais materiais.

Publicação 2: A capacidade de mascaramento dos materiais CAD-CAM de alta translucidez variou de acordo com sua composição, espessura e a cor do substrato subjacente. Dentre os materiais avaliados, a porcelana feldspática apresentou efeito de mascaramento superior em todas as espessuras avaliadas, sendo, portanto, um material indicado para restaurações sobre substratos escurecidos. A espessura óptica infinita indicou que é recomendada a utilização dos materiais CAD-CAM com espessura superior a 1,5 mm para garantir a eliminação completa da influência do substrato em todas as faixas de comprimento de onda.

Publicação 3: A integração de LOO-CV com a regressão PLS ofereceu abordagem valiosa para prever a cor final de materiais CAD-CAM com diferentes espessuras sobre variados substratos dentários. As previsões do modelo permaneceram dentro do limite de aceitabilidade visual da cor, demonstrando alta precisão. A segmentação dos dados de acordo com o material e a espessura melhorou o desempenho do modelo ao reduzir a variabilidade interna e aprimorar sua capacidade de aprender padrões de comportamento consistentes. A incorporação desse modelo de regressão, baseado em aprendizado de máquina aos fluxos de trabalho clínicos, pode ser ferramenta promissora para aumentar a previsibilidade, a eficiência e a qualidade estética de restaurações indiretas, especialmente em casos que envolvam diferentes tonalidades de substratos.

Publicação 4: A cor dos materiais restauradores CAD-CAM foi influenciada pelo iluminante e pela tonalidade do substrato, sendo que os iluminantes LED B3, B4 e B5 demonstraram menores alterações e indicaram maior estabilidade de cor sob essas condições de iluminação, independentemente do material. Dentre os materiais, VITA Enamic e Vita Mark II foram mais sensíveis às variações de iluminante e tonalidade do substrato, com diferenças de cor frequentemente próximas ou superiores ao limite de aceitabilidade.

REFERÊNCIAS*

1. Davidowitz G, Kotick PG. The use of CAD-CAM in dentistry. *Dent Clin North Am.* 2011; 55(3): 559-ix.
2. Della Bona A, Pecho OE, Ghinea R, Cardona JC, Pérez MM. Colour parameters and shade correspondence of CAD-CAM ceramic systems. *J Dent.* 2015; 43(6): 726-34.
3. Spitznagel FA, Boldt J, Gierthmuehlen PC. CAD/CAM Ceramic restorative materials for natural teeth. *J Dent Res.* 2018; 97(10): 1082-91.
4. Sen N, Us YO. Mechanical and optical properties of monolithic CAD-CAM restorative materials. *J Prosthet Dent.* 2018; 119(4): 593-9.
5. Blatz MB, Conejo J. The current state of chairside digital dentistry and materials. *Dent Clin North Am.* 2019; 63: 175-97.
6. de Andrade GS, Augusto MG, Simões BV, Pagani C, Saavedra GSFA, Bresciani E. Impact of simulated toothbrushing on surface properties of chairside CAD-CAM materials: an in vitro study. *J Prosthet Dent.* 2020; 125(3): 469.e1-6.
7. Ximinis E, Dionysopoulos D, Papadopoulos C, Tournavitis A, Konstantinidis A, Naka O. Effect of tooth brushing simulation on the surface properties of various resin-matrix computer-aided design/computer-aided manufacturing ceramics. *J Esthet Restor Dent.* 2023; 35(6): 937-46.
8. Della Bona A, Corazza PH, Zhang Y. Characterization of a polymer-infiltrated ceramic-network material. *Dent Mater.* 2014; 30(5): 564-9.
9. Pulgar R, Lucena C, Espinar C, Pecho OE, Ruiz-López J, Della Bona A *et al.* Optical and colorimetric evaluation of a multi-color polymer-infiltrated ceramic-network material. *Dent Mater.* 2019; 35(7): e131-9.
10. Shirani M, Emami M, Mosharraf R, Savabi O, Akhavanakhaleghi M, Azadbakht K. Comparing the color match of monolithic CAD-CAM dental ceramics with the VITA Classical shade guide. *J Prosthet Dent.* 2024; 132(3): 605-11.
11. Ruiz-López J, Espinar C, Lucena C, de la Cruz Cardona J, Pulgar R, Pérez MM. Effect of thickness on color and translucency of a multi-color polymer-infiltrated ceramic-network material. *J Esthet Restor Dent.* 2023; 35(2): 381-9.
12. Tejada-Casado M, Ghinea R, Pérez MM, Cardona JC, Ionescu AM, Lübke H *et al.* Color prediction of layered dental resin composites with varying thickness. *Dent Mater.* 2022; 38(8): 1261-70.

* De acordo com o Guia de Trabalhos Acadêmicos da FOAr, adaptado das Normas Vancouver. Disponível no site da Biblioteca: <http://www.foar.unesp.br/Home/Biblioteca/guia-de-normalizacao-atualizado.pdf>

13. Sulaiman TA, Abdulmajeed AA, Donovan TE, Vallittu PK, Närhi TO, Lassila LV. The effect of staining and vacuum sintering on optical and mechanical properties of partially and fully stabilized monolithic zirconia. *Dent Mater J*. 2015; 34(5): 605-10.
14. Tejada-Casado M, Ghinea R, Perez MM, Lübke H, Pop-Ciutrita IS, Ruiz-López J *et al*. Reflectance and color prediction of dental material monolithic samples with varying thickness. *Dent Mater*. 2022; 38(4): 622-31.
15. Ruiz-López J, Melgosa M, Ghinea R, Tejada-Casado C, Pop-Ciutrita IS, Pérez MM. Effect of white light-emitting diode illuminants recommended by the CIE on colors of dental ceramic materials. *Applied Sciences*. 2023; 13(3): 1518.
16. Tejada-Casado M, Ghinea R, Pérez MM, Ruiz-López J, Lübke H, Herrera LJ. Development of thickness-dependent predictive methods for the estimation of the CIEL*a*b* color coordinates of monolithic and layered dental resin composites. *Materials (Basel)*. 2023; 16(2): 761.
17. Sampaio CS, Gurrea J, Gurrea M, Bruguera A, Atria PJ, Janal M *et al*. Dental shade guide variability for hues B, C, and D using cross-polarized photography. *Int J Periodontics Restorative Dent*. 2018; 38(Suppl): s113-8.
18. Pérez MM, Della Bona A, Carrillo-Pérez F, Dudea D, Pecho OE, Herra LJ. Does background color influence visual thresholds? *J Dent*. 2020; 102: 103475.
19. Dagg H, O'Connell B, Claffey N, Byrne D, Gorman C. The influence of some different factors on the accuracy of shade selection. *J Oral Rehabil*. 2004; 31: 900-4.
20. Wang J, Yang J, Lv K, Zhang H, Huang H, Jiang X. Can we use the translucency parameter to predict the CAD/CAM ceramic restoration aesthetic? *Dent Mater*. 2023; 39(3): e1-10.
21. Mascaro BA, Tejada-Casado M, Fonseca RG, Cardona JC, dos Santos Nunes Reis JM, Pérez MM. Masking ability of CAD-CAM materials at different thicknesses: A study on color, translucency, and infinite optical thickness. *J Esthet Restor Dent*. 2025; 37(9): 2134-43.
22. Duveiller V, Clerc R, Eymard J, Salomon JP, Hébert M. Performance of two-flux and four-flux models for predicting the spectral reflectance and transmittance factors of flowable dental resin composites. *Dent Mater*. 2023; 39(8): 743.
23. Espinar C, Della Bona A, Tejada-Casado M, Pulgar R, Pérez MM. Optical behavior of 3D-printed dental restorative resins: influence of thickness and printing angle. *Dent Mater*. 2023; 39(10): 894-902.
24. Duveiller V, Gevaux L, Clerc R, Salomon JP, Hébert M. Reflectance and transmittance of flowable dental resin composite predicted by the two-flux model: on the importance of analyzing the effective measurement geometry. *Color Imaging Conf*. 2020; 28(1): 313-20.

25. Lucena C, Ruiz-López J, Pulgar R, Della Bona A, Pérez MM. Optical behavior of one-shaded resin-based composites. *Dent Mater.* 2021; 37(5): 840-8.
26. Pecho OE, Ghinea R, do Amaral EA, Cardona JC, Della Bona A, Pérez MM. Relevant optical properties for direct restorative materials. *Dent Mater.* 2016; 32(5): e105-12.
27. Lee YK, Lim BS, Rhee SH, Yang HC, Lim YK. Changes in scattering and absorption properties of esthetic filling materials after aging. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater.* 2007; 80(1): 131-9.
28. A. Della Bona, *Color and Appearance in Dentistry*. First ed., Springer, 2020.
29. Arikawa H, Kanie T, Fujii K, Takahashi H, Ban S. Effect of filler properties in composite resins on light transmittance characteristics and color. *Dent Mater J.* 2007; 26(1): 38-44.
30. Shabbach LM, dos Santos BC, De Bortoli LS, Fredel MC, Henriques B. Application of Kubelka-Munk model on the optical characterization of translucent dental zirconia. *Mater Chem Phys.* 2021; 258: 123994.
31. Yeh CL, Miyagawa Y, Powers JM. Optical properties of composites of selected shades. *J Dent Res.* 1982;61(6):797-801.
32. Powers JM, Yeh CL, Miyagawa Y. Optical properties of composites of selected shades in white light. *J Oral Rehabil.* 1983; 10(4): 319-24.
33. Kubelka P. New contributions to the optics of intensely light scattering materials. Part 1. *J Opt Soc Am.* 1948; 38: 448-57.
34. Kubelka P. New contributions to the optics of intensely light-scattering materials. Part II: nonhomogeneous layers. *J Opt Soc Am* 1954;44:330–5.
35. Ragain JC Jr, Johnston WM. Accuracy of Kubelka-Munk reflectance theory applied to human dentin and enamel. *J Dent Res.* 2001; 80(2): 449-52.
36. Li R, Ma X, Liang S, Sa Y, Jiang T, Wang Y. Optical properties of enamel and translucent composites by diffuse reflectance measurements. *J Dent.* 2012; 40 Suppl 1:e40-7.
37. Pecho OE, Ghinea R, Ionescu AM, Cardona JC, Della Bona A, Pérez Mdel M. Optical behavior of dental zirconia and dentin analyzed by Kubelka-Munk theory. *Dent Mater.* 2015; 31(1): 60-7.
38. Pop-Ciutrla IS, Ghinea R, Perez Gomez MDM, Colosi HA, Dudea D, Badea M. Dentine scattering, absorption, transmittance and light reflectivity in human incisors, canines and molars. *J Dent.* 2015; 43(9): 1116-24.
39. Pecho OE, Benetti P, Ruiz-López J, Furini GP, Tejada-Casado M, Pérez MM. Optical properties of dental zirconia, bovine dentin, and enamel-dentin structures. *J Esthet Restor Dent.* 2024; 36(3): 511-9.

40. Kose C Jr, Oliveira D, Pereira PNR, Rocha MG. Using artificial intelligence to predict the final color of leucite-reinforced ceramic restorations. *J Esthet Restor Dent*. 2023; 35(1): 105-115.
41. Shetty S, Gali S, Augustine D, Sv S. Artificial intelligence systems in dental shade-matching: A systematic review. *J Prosthodont*. 2024; 33(6): 519-532.
42. Fatima A, Shafi I, Afzal H, Díez IT, Lourdes DRM, Breñosa J *et al*. Advancements in dentistry with artificial intelligence: Current clinical applications and future perspectives. *Healthcare (Basel)*. 2022; 10(11): 2188.
43. Revilla-León M, Gómez-Polo M, Vyas S, Barmak BA, Galluci GO, Att W *et al*. Artificial intelligence applications in implant dentistry: A systematic review. *J Prosthet Dent*. 2023; 129(2): 293-300.
44. Ghaffari M, Zhu Y, Shrestha A. A review of advancements of artificial intelligence in dentistry. *Dentistry Review*. 2024; 4(2): 100081.
45. Carrillo-Perez F, Pecho OE, Morales JC, Paravina RD, Della Bona A, Ghinea R *et al*. Applications of artificial intelligence in dentistry: A comprehensive review. *J Esthet Restor Dent*. 2022; 34(1): 259-80.
46. Kose C, Oliveira D, Roulet JF, Pereira P, Rocha MG. Algorithm to predict the final color of leucite-reinforced ceramic restorations. *Dent Mater*. 2022; 38 Suppl 1: e65.
47. Tejada-Casado M, Duveiller V, Ghinea R, Gautheron A, Clerc R, Salomon JP *et al*. Comparative analysis of optical and numerical models for reflectance and color prediction of monolithic dental resin composites with varying thicknesses. *Dent Mater*. 2024; 40(10): 1677-84.
48. Geladi P, Kowalski BR. Partial least-squares regression: a tutorial. *Anal Chim Acta*. 1986; 185: 1-17.
49. Johnston WM. Color measurement in dentistry. *J Dent*. 2009; 37 Suppl 1: e2-6.
50. Melgosa M, Ruiz-López J, Li C, García PA, Della Bona A, Pérez MM. Color inconstancy of natural teeth measured under white light-emitting diode illuminants. *Dent Mater*. 2020; 36: 1680-90.
51. Volpato CA, Monteiro S Jr, de Andrada MC, Fredel MC, Petter CO. Optical influence of the type of illuminant, substrates and thickness of ceramic materials. *Dent Mater*. 2009; 25(1): 87-93.
52. CIE 015:2018. Colorimetry, 4th ed. Technical report. The International Commission on Illumination, Vienna, Austria, 2019.
53. International Organization for Standardization. ISO/TR28642: technical report(E): dentistry-guidance on color measurements. Geneva: ISO: Switzerland; 2016.

54. Basegio MM, Pecho OE, Ghinea R, Perez MM, Della Bona A. Masking ability of indirect restorative systems on tooth-colored resin substrates. *Dent Mater.* 2019; 35(6): e122-e130.
55. Juntavee N, Juntavee A, Phetpanompond S. Masking ability of different ceramics upon various underlying structures. *J Esthet Restor Dent.* 2022; 34(2): 430-9.
56. Perez BG, Gaidarji B, Righes DZ, Pecho OE, Pereira GKR, Durand LB. Masking ability of resin composites: A scoping review. *J Esthet Restor Dent.* 2023;35(2):333-44.
57. Comba A, Paolone G, Baldi A, Vichi A, Goracci C, Bertozzi G, Scotti N. Effects of substrate and cement shade on the translucency and color of CAD/CAM lithium-disilicate and zirconia ceramic materials. *Polymers (Basel)* 2022; 14(9): 1778.
58. Basso GR, Kodama AB, Pimentel AH, Kaizer MR, Bona AD, Moraes RR *et al.* Masking colored substrates using monolithic and bilayer CAD-CAM ceramic structures. *Oper Dent.* 2017; 42(4): 387-95.
59. Dos Santos RB, Collares K, Brandeburski SBN, Pecho OE, Della Bona A. Experimental methodologies to evaluate the masking ability of dental materials: A systematic review. *J Esthet Restor Dent.* 2021;33(8):1118-31.
60. Czigola A, Abram E, Kovacs ZI, Marton K, Hermann P, Borbely J. Effects of substrate, ceramic thickness, translucency, and cement shade on the color of CAD/CAM lithium-disilicate crowns. *J Esthet Restor Dent.* 2019; 31(5): 457-64.
61. Tabatabaian F, Dalirani S, Namdmari M. Effect of thickness of zirconia ceramic on its masking ability: An in vitro study. *J Prosthodont.* 2019; 28(6): 666-71.
62. Değirmenci B, Rasool F. Evaluating the masking ability of CAD/CAM hybrid ceramics with different thicknesses. *Int J Dent Res.* 2021; 11: 114-20.
63. Ellakany P, Madi M, Aly NM, Al-Aql ZS, AlGhamdi M, AlJeraisy A *et al.* Effect of CAD/CAM ceramic thickness on shade masking ability of discolored teeth: in vitro study. *Int J Environ Res Public Health.* 2021; 18(24): 13359.
64. Alfouzan AF, Alnafaiy SM, Alsaleh LS, Bawazir NH, Al-Otaibi HN, Taweel SMA *et al.* Effects of background color and thickness on the optical properties of CAD-CAM resin-matrix ceramics. *J Prosthet Dent.* 2022; 128(3): 497.e1-497.e9.
65. Saláta J, Szabó F, Csuti P, Antal M, Márton P, Hermann P *et al.* Effect of thickness, translucency, and substrates on the masking ability of a polymer-infiltrated ceramic-network material. *J Esthet Restor Dent.* 2023; 35(6): 886-95.
66. Zhu J, Xia Y, Lui S, Wang W, Liang S, Huang C. Masking ability of CAD-CAM resin-matrix ceramics with different translucencies and thicknesses combined with four cement shades against varying background colors when facing veneer restorations. *BMC Oral Health.* 2024; 24(1): 1198.

67. Elgendy H, Maia RR, Skiff F, Denehy G, Qian F. Comparison of light propagation in dental tissues and nano-filled resin-based composite. *Clin Oral Investig*. 2019; 23(1): 423-33.
68. Durand LB, Ruiz-López J, Perez BG, Ionescu AM, Carrilo-Pérez F, Ghinea R *et al*. Color, lightness, chroma, hue, and translucency adjustment potential of resin composites using CIEDE2000 color difference formula. *J Esthet Restor Dent*. 2021; 33(6): 836-43.
69. Ismail EH, Paravina RD. Color adjustment potential of resin composites: optical illusion or physical reality, a comprehensive overview. *J Esthet Restor Dent*. 2022; 34(1): 42-54.
70. Fried D, Glena RE, Featherstone JD, Seka W. Nature of light scattering in dental enamel and dentin at visible and near-infrared wavelengths. *Appl Opt*. 1995; 34(7): 1278-85.
71. Lee YK. Translucency of human teeth and dental restorative materials and its clinical relevance. *J Biomed Opt*. 2015; 20(4): 045002.
72. Salas M, Lucena C, Herrera LJ, Yebra A, Della Bona A, Pérez MM. Translucency thresholds for dental materials. *Dent Mater*. 2018; 34(8): 1168-74.
73. Darabi F, Radafshar G, Tavangar M, Davaloo R, Khosravian A, Mirfarhadi N. Translucency and masking ability of various composite resins at different thicknesses. *J Dent*. 2014; 15(3): 117-22.
74. Mascaro BA, Tejada-Casado M, Fonseca RG, Reis JMDSN, Pérez MM. Exploring the optical behavior and relative translucency parameter of CAD-CAM resin-based composites, polymer-infiltrated ceramic network, and feldspar porcelain. *Dent Mater*. 2024; 40(11): 1954-61.
75. Haas K, Azhar G, Wood DJ, Moharamzadeh K, van Noort R. The effects of different opacifiers on the translucency of experimental dental composite resins. *Dent Mater*. 2017; 33(8): e310-e316.
76. Vichi A, Balestra D, Scotti N, Louca C, Paolone G. Translucency of CAD/CAM and 3D printable composite materials for permanent dental restorations. *Polym (Basel)*. 2023; 15(6): 1443.