



CLAREAMENTO FOTOCATALÍTICO DIRECIONADO COM GÊIS DE PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO ATIVADOS POR LED/LASER CONTENDO TiO_2 DOPADO COM NITROGÊNIO: UMA ANÁLISE CLÍNICA MULTIESTUDO DA EFICÁCIA, SENSIBILIDADE E OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA.

Thais Campos Pereira¹, Javier Martín², Milton Carlos Kuga¹, Javier Basualdo³, Alfredo Von Marttens⁴, Leonardo Díaz^{4,5,6}, Cristian Bersezio², Víctor Beltrán⁷, Gilbert Jorquera⁸, Eduardo Fernández^{2,9}, Andrea Abi Rached¹

1 Restorative Dentistry Department, Faculty of Dentistry, UNESP- Araraquara, Brazil

2 Department of Restorative Dentistry, Faculty of Dentistry, University of Chile, Chile

3 Postgraduate School, Faculty of Dentistry, University of Chile, Chile

4 Department of Prosthodontics, Faculty of Dentistry, University of Chile, Santiago, Chile

5 PhD Student, Department of Stomatology, Faculty of Dentistry, Universidad de Sevilla, d Sevilla, Spain

6 Perioplastic Institute, Santiago, Chile

7 Clinical Investigation and Dental Innovation Center (CIDIC), Faculty of Dentistry, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile

8 Department of oral rehabilitation, Facultad de Odontología, Universidad de Los Andes, Santiago, Chile

9 Instituto de Ciencias Biomédicas, Universidad Autónoma de Chile, Santiago, Chile

Resumo: Este estudo avaliou a eficácia clínica, a segurança e os parâmetros energéticos de géis contendo 6% e 15% de peróxido de hidrogênio (PH) com dióxido de titânio dopado com nitrogênio (N-TiO₂), ativados por LED e laser. A análise de seis ensaios clínicos mostrou um clareamento eficaz ($\Delta E > 5,0$), baixa sensibilidade dentária e estabilidade de cor por até 24 meses. Os resultados indicam que o efeito ocorre por fotocatalise específica dos comprimentos de onda utilizados.

Palavras-chave: Ativação fotodinâmica; Clareamento dental; Clareamento assistido por LED/laser; Dióxido de titânio dopado com nitrogênio.

INTRODUÇÃO

A alteração de cor dental, causada por pigmentações extrínsecas e intrínsecas, permanece como uma das principais queixas estéticas entre pacientes que buscam tratamentos minimamente invasivos [1].

Entre as opções disponíveis, o clareamento em consultório com peróxido de hidrogênio (PH) é uma das técnicas mais consolidadas, por apresentar resultados rápidos e previsíveis. No entanto, os protocolos convencionais geralmente utilizam altas concentrações de PH (30–40%), que, apesar da efetividade, podem estar associados a efeitos biológicos indesejáveis, como desmineralização do esmalte, inflamação pulpar e sensibilidade dentária [2]. Dessa forma, cresce o interesse por estratégias clareadoras que utilizem menores concentrações de PH sem comprometer a eficácia clínica.

Uma abordagem promissora é a incorporação de agentes fotocatalíticos aos géis clareadores, especialmente o dióxido de titânio (TiO₂). Quando irradiado, o TiO₂ gera espécies reativas de oxigênio, como radicais hidroxila e ânions superóxido, capazes de oxidar cromóforos orgânicos presentes no complexo esmalte-dentina e favorecer o clareamento

[3]. Entretanto, o TiO₂ convencional requer luz ultravioleta para sua ativação, o que limita sua aplicação clínica. A dopagem com nitrogênio modifica sua estrutura eletrônica, permitindo a ativação por luz visível, principalmente na faixa azul ($450 \pm 10 \text{ nm}$) [4].

Essa modificação possibilita o uso de fontes luminosas mais seguras, como LEDs azuis, e pode ser associada ao laser infravermelho próximo. Na ativação por duplo comprimento de onda, a luz azul estimula as nanopartículas de TiO₂_N e acelera a decomposição do PH, enquanto o laser pode contribuir por mecanismos de fotobiomodulação, incluindo modulação inflamatória, melhora da microcirculação e redução da percepção dolorosa [5–7]. Assim, a combinação entre TiO₂_N, PH em baixa concentração e ativação por LED/laser pode favorecer a eficácia clareadora e reduzir a sensibilidade pós-operatória.

Estudos clínicos têm demonstrado que sistemas à base de TiO₂_N associados a baixas concentrações de PH podem promover alterações de cor clinicamente perceptíveis e menor sensibilidade quando comparados a protocolos convencionais com altas



concentrações de peróxido [7–9]. Além disso, avaliações longitudinais sugerem estabilidade de cor satisfatória ao longo do tempo [10]. Esses achados também se alinham a diretrizes regulatórias, como a Diretiva Europeia 2011/84/EU, que limita a concentração de PH em produtos odontológicos cosméticos a 6% [11].

Apesar dos resultados promissores, ainda é necessário compreender melhor os efeitos individuais e combinados da ativação por LED e laser sobre a eficácia e a segurança de sistemas clareadores com peróxido em baixa concentração. Portanto, este estudo teve como objetivo analisar a influência da ativação por LED e laser no desempenho clínico de sistemas fotocatalíticos contendo dióxido de titânio dopado com nitrogênio ($\text{TiO}_2\text{-N}$) e géis de peróxido de hidrogênio em baixa concentração, por meio de uma síntese de estudos clínicos randomizados. A análise considerou a efetividade clareadora, a sensibilidade dentária pós-operatória e a estabilidade de cor em longo prazo, em comparação a protocolos convencionais e controles não ativados.

MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo consistiu em uma análise clínica integrada de seis ensaios clínicos randomizados, conduzidos entre 2015 e 2023 na Universidade do Chile e na UNESP, Brasil. Os estudos avaliaram protocolos de clareamento dental em consultório utilizando géis de peróxido de hidrogênio em baixa concentração, associados a nanopartículas de dióxido de titânio dopado com nitrogênio ($\text{TiO}_2\text{-N}$) e ativação por LED/laser. Todos os estudos seguiram as diretrizes CONSORT, foram aprovados por seus respectivos comitês de ética e incluíram participantes mediante assinatura do termo de consentimento livre e esclarecido.

Foram incluídos adultos saudáveis, com 18 anos ou mais, que apresentavam incisivos superiores centrais ou laterais com cor A2 ou mais escura, de acordo com a escala Vita Classical. Os principais critérios de exclusão foram gestação ou lactação, clareamento dental nos dois anos anteriores, uso recente de analgésicos, anti-inflamatórios ou medicamentos fotossensibilizantes, presença de cárie, doença periodontal ativa ou restaurações na região estética.

Nos estudos com delineamento de boca dividida, uma hemiarcada recebeu o tratamento experimental com peróxido de hidrogênio a 6% associado ao $\text{TiO}_2\text{-N}$ e ativado por LED/laser, enquanto a hemiarcada contralateral recebeu o protocolo controle. A randomização foi realizada por sequências geradas por computador, e operadores, avaliadores e participantes foram mascarados quanto à alocação dos tratamentos.

O protocolo clareador foi realizado em até três sessões clínicas, com intervalo de uma semana entre elas. Antes de cada sessão, foi realizada profilaxia com pedra-pomes e água, seguida da proteção dos tecidos moles com barreira gengival fotopolimerizável. O gel clareador foi preparado imediatamente antes da aplicação, pela mistura do peróxido de hidrogênio com o agente espessante contendo $\text{TiO}_2\text{-N}$, na proporção de 3:1, conforme as instruções do fabricante. O gel foi aplicado sobre as superfícies vestibulares dos dentes anteriores superiores, abrangendo a zona estética. Cada sessão incluiu dois ciclos de aplicação de 12 minutos, totalizando 24 minutos de contato ativo por sessão.

A ativação fotônica foi realizada com fonte de LED azul, na faixa de 450 ± 10 nm, associada ou não ao laser infravermelho próximo de 808 ± 10 nm, conforme o protocolo de cada estudo. Os parâmetros de irradiação foram mantidos dentro de limites considerados seguros, com exposição intermitente e controle térmico durante a aplicação.

A alteração de cor foi avaliada por métodos subjetivos e objetivos. Para a avaliação visual, foram utilizadas as escalas Vita Classical e Vita Bleachedguide 3D-Master, por examinadores previamente calibrados. A avaliação objetiva foi realizada com espectrofotômetro, utilizando matriz de silicone individualizada para padronizar a posição da ponta ativa. Os valores de L^* , a^* e b^* foram registrados, e a variação total de cor foi calculada por ΔE .

A sensibilidade dentária foi mensurada por meio de escala visual analógica e escala numérica, em diferentes períodos após cada sessão clareadora. Para a análise dos dados, foram considerados os maiores escores relatados por cada participante. Os resultados dos estudos foram integrados por meio de uma abordagem narrativa e quantitativa, considerando alterações de cor, sensibilidade pós-operatória e estabilidade do efeito clareador ao longo do tempo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados e Discussão

Os estudos clínicos incluídos demonstraram que protocolos de clareamento em consultório com peróxido de hidrogênio (PH) em baixa concentração, associado ao dióxido de titânio dopado com nitrogênio ($\text{TiO}_2\text{-N}$) e ativado por LED/laser, promoveram alterações de cor clinicamente perceptíveis. Os valores de ΔE permaneceram, em geral, acima do limiar clínico, variando aproximadamente entre 4,9 e 6,1 nos protocolos com PH a 6%. Além disso, os resultados subjetivos de cor (ΔSGU) acompanharam os achados objetivos, com melhora visual relevante nos estudos avaliados.



Tabela 1. Resumo dos principais desfechos clínicos dos estudos utilizando PH associado ao TiO₂_N e ativação por LED/laser.

Estudo	Protocolo	Alteração de cor	Sensibilidade
Martín et al. (2015)	PH 6% + N-TiO ₂ , 3 sessões	$\Delta E = 5,57$; $\Delta SGU = 5,03 \pm 2,30$	VAS = $3,53 \pm 1,90$
Bortolatto et al. (2015)	PH 15% + TiO ₂ , 3 sessões	$\Delta E \approx 6,0-6,5$; $\Delta SGU = 5,4 \pm 1,9$	VAS = $2,1 \pm 0,8$
Vildósola et al. (2017)	PH 6% + TiO ₂ _N, LED/laser	$\Delta E > 5,0$ em 12 meses; $\Delta SGU = 4,0$	VAS < 1
Vildósola et al. (2017)	PH 6%, protocolos abreviados	$\Delta E = 5,71$ e $4,93$	VAS médio = $0,15$
Bersezio et al. (2018)	PH 6% + TiO ₂ versus PH 35%	$\Delta E = 5,57$ versus $7,98$	Baixa e comparável
Bersezio et al. (2021)	1×72 min versus 2×36 min	$\Delta E = 4,99$ e $5,46$; $\Delta SGU \approx 4,6-4,8$	VAS = $0,18 \pm 0,88$

Abreviações: PH = peróxido de hidrogênio; ΔE = alteração objetiva de cor; ΔSGU = alteração subjetiva por escala de cor; VAS = escala visual analógica de sensibilidade.

A sensibilidade dentária foi baixa na maioria dos estudos, especialmente nos protocolos com PH a 6%, que frequentemente apresentaram valores reduzidos de VAS. Quando comparados aos protocolos convencionais com PH a 35%, os sistemas com menor concentração de peróxido demonstraram menor desconforto, mantendo efetividade clareadora clinicamente relevante. Esse resultado pode ser explicado pela menor carga oxidativa associada ao uso do TiO₂_N, que favorece a decomposição localizada do peróxido e a geração de espécies reativas de oxigênio na superfície dental.

Os parâmetros fotônicos utilizados foram semelhantes entre os estudos, com LED azul na faixa de 450 ± 10 nm e laser infravermelho próximo de 808 ± 10 nm. O LED azul parece exercer papel direto na ativação fotocatalítica do TiO₂_N, enquanto o laser pode contribuir principalmente para a fotobiomodulação, reduzindo a resposta inflamatória e a percepção dolorosa.

Tabela 2. Parâmetros fotônicos dos estudos clínicos incluídos.

Estudo	Protocolo	Acompanhamento	Energia total
Martín et al. (2015)	3 sessões $\times 24$ min	1 mês	5616 J
Bortolatto et al. (2015)	3 sessões $\times 24$ min	1 semana	6480 J
Vildósola et al. (2017)	3 sessões $\times 24$ min	12 meses	6480 J
Vildósola et al. (2017)	2 sessões $\times 24$ min	1 mês	4320 J
Bersezio et al. (2018)	3 sessões $\times 24$ min	24 meses	6480 J
Bersezio et al. (2021)	1 sessão $\times 72$ min	1 mês	6480 J

Em relação à estabilidade do clareamento, os estudos com acompanhamento de 12 e 24 meses indicaram manutenção satisfatória da cor. Esses achados sugerem que os sistemas contendo TiO₂_N podem promover não apenas alteração inicial de cor, mas também estabilidade clínica do resultado ao longo do tempo.

Apesar de revisões anteriores questionarem o benefício da ativação luminosa no clareamento dental, tais análises geralmente incluíram protocolos heterogêneos, com diferentes fontes de luz e sem catalisadores específicos. Nos sistemas com TiO₂_N, a luz azul atua diretamente no mecanismo fotocatalítico, o que diferencia esses protocolos dos modelos convencionais. Assim, os resultados indicam que o uso de PH em baixa concentração, associado ao TiO₂_N e à ativação por LED/laser, pode representar uma alternativa eficaz e biologicamente mais segura aos protocolos tradicionais com altas concentrações de peróxido.

CONCLUSÃO

Em síntese, os géis de peróxido de hidrogênio a 6% e 15% contendo N-TiO₂ e ativados por LED/laser demonstraram elevada eficácia clareadora, com sensibilidade dentária reduzida. A associação entre fotocatalisadores sensíveis à luz visível e modulação biofotônica pelo laser infravermelho próximo representa uma evolução dos protocolos de clareamento dental, ao integrar princípios da ciência dos materiais, fotoquímica e fotobiologia clínica. Esses achados reforçam o potencial das tecnologias fotocatalíticas na Odontologia estética moderna,



especialmente para tratamentos clareadores minimamente invasivos, confortáveis e compatíveis com regulamentações que limitam o uso de altas concentrações de peróxido.

REFERÊNCIAS

Referências

- Asahi, R.; Morikawa, T.; Irie, H.; Ohwaki, T. Nitrogen-doped titanium dioxide as visible-light-sensitive photocatalyst: designs, developments, and prospects. *Chemical Reviews*, 114, 9824–9852, 2014.
- Bersezio, C.; Martín, J.; Angel, P.; Bottner, J.; Godoy, I.; Avalos, F.; Fernández, E. Teeth whitening with 6% hydrogen peroxide and its impact on quality of life: 2 years of follow-up. *Odontology*, 107, 118–125, 2019.
- Bersezio, C.; Pardo, C.; Miranda, S.; Medeiros Maran, B.; Jorquera, G.; Rosa da Silva, A.; Tonetto Rodrigues, M.; Fernández, E. Evaluation of the effectiveness in teeth whitening of a single session with 6% hydrogen peroxide laser/LED system. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 36, 102532, 2021.
- Bersezio, C.; Ledezma, P.; Torres, V.; Villagra, J.; Aravena, D.; Kuga, M.; Martín, J.; Fernández, E. Comparative efficacy of in-office and walking bleach techniques in whitening of non-vital teeth. *Clinical Oral Investigations*, 29, 24, 2024.
- Bortolatto, J. F.; Pretel, H.; Floros, M. C.; Luizzi, A. C.; Dantas, A. A.; Fernandez, E.; Moncada, G.; Oliveira Jr., O. B. Low concentration H₂O₂/TiO₂ in office bleaching: a randomized clinical trial. *Journal of Dental Research*, 93, 66S–71S, 2014.
- Carey, C. M. Tooth whitening: what we now know. *Journal of Evidence-Based Dental Practice*, 14, 70–76, 2014.
- de Geus, J. L.; Wambier, L. M.; Kossatz, S.; Loguercio, A. D.; Reis, A. At-home vs in-office bleaching: a systematic review and meta-analysis. *Operative Dentistry*, 41, 341–356, 2016.
- Gururaj, S. B.; Shankar, S. M.; Parveen, F.; Chidambar, C. K.; Bhushan, K.; Prabhudev, C. M. Assessment of healing and pain response at mandibular third molar extraction sites with and without pre- and postoperative photobiomodulation at red and near-infrared wavelengths: a clinical study. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, 14, S470–S474, 2022.
- Hamblin, M. R. Mechanisms and mitochondrial redox signaling in photobiomodulation. *Photochemistry and Photobiology*, 94, 199–212, 2018.
- He, L. B.; Shao, M. Y.; Tan, K.; Xu, X.; Li, J. Y. The effects of light on bleaching and tooth sensitivity during in-office vital bleaching: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Dentistry*, 40, 644–653, 2012.
- Kahler, B. Present status and future directions: managing discoloured teeth. *International Endodontic Journal*, 55, 922–950, 2022.
- Langella, L. G.; Casalechi, H. L.; Tomazoni, S. S.; Johnson, D. S.; Albertini, R.; Pallotta, R. C.; Labat Marcos, R.; de Carvalho, P. T. C.; Leal-Junior, E. C. P. Photobiomodulation therapy (PBMT) on acute pain and inflammation in patients who underwent total hip arthroplasty: a randomized, triple-blind, placebo-controlled clinical trial. *Lasers in Medical Science*, 33, 1933–1940, 2018.
- Maran, B. M.; Burey, A.; de Paris Matos, T.; Loguercio, A. D.; Reis, A. In-office dental bleaching with light vs. without light: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Dentistry*, 70, 1–13, 2018.
- Maran, B. M.; Ziegelmann, P. K.; Burey, A.; de Paris Matos, T.; Loguercio, A. D.; Reis, A. Different light-activation systems associated with dental bleaching: a systematic review and a network meta-analysis. *Clinical Oral Investigations*, 23, 1499–1512, 2019.
- Martín, J.; Vildósola, P.; Bersezio, C.; Herrera, A.; Bortolatto, J.; Saad, J. R.; Oliveira Jr., O. B.; Fernández, E. Effectiveness of 6% hydrogen peroxide concentration for tooth bleaching: a double-blind, randomized clinical trial. *Journal of Dentistry*, 43, 965–972, 2015.
- Moran, B. M.; Ziegelmann, P. K.; Berger, S. B.; Burey, A.; de Paris Matos, T.; Fernández, E.; Loguercio, A. D.; Reis, A. Evaluation of tooth sensitivity of in-office bleaching with different light activation sources: a systematic review and a network meta-analysis. *Operative Dentistry*, 46, E199–E223, 2021.
- Mouhat, M.; Mercer, J.; Stangvaltaite, L.; Örtengren, U. Light-curing units used in dentistry: factors associated with heat development-potential risk for patients. *Clinical Oral Investigations*, 21, 1687–1696, 2017.
- Paravina, R. D.; Pérez, M. M.; Ghinea, R. Acceptability and perceptibility thresholds in dentistry: a comprehensive review of clinical and research applications. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 31, 103–112, 2019.
- Pereira, D. A.; Bonatto, M. S.; Soares, E. C.; Mendes, P. G. J.; Pessoa, R. S. E.; de Oliveira, G. J. P. L. Photobiomodulation with infrared and dual-wavelength laser induces similar repair and control



of inflammation after third molar extraction: a double-blinded split-mouth randomized controlled trial. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 2024.

Pitre, S. P.; Yoon, T. P.; Scaiano, J. C. Titanium dioxide visible light photocatalysis: surface association enables photocatalysis with visible light irradiation. *Chemical Communications*, 53, 4335–4338, 2017.

Suemori, T.; Kato, J.; Nakazawa, T.; Akashi, G.; Igarashi, A.; Hirai, Y.; Kumagai, Y.; Kurata, H. Effects of light irradiation on bleaching by a 3.5% hydrogen peroxide solution containing titanium dioxide. *Laser Physics Letters*, 5, 379, 2008.

Vildósola, P.; Bottner, J.; Avalos, F.; Godoy, I.; Martín, J.; Fernández, E. Teeth bleaching with low concentrations of hydrogen peroxide (6%) and catalyzed by LED blue (450 ± 10 nm) and laser infrared (808 ± 10 nm) light for in-office treatment: randomized clinical trial 1-year follow-up. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 29, 339–345, 2017a.

Vildósola, P.; Vera, F.; Ramírez, J.; Rencoret, J.; Pretel, H.; Oliveira Jr., O. B.; Tonetto, M.; Martín, J.; Fernández, E. Comparison of effectiveness and sensitivity using two in-office bleaching protocols for a 6% hydrogen peroxide gel in a randomized clinical trial. *Operative Dentistry*, 42, 244–252, 2017b.

Yee, R.; Wong, V. Brexit: implications for tooth whitening. *British Dental Journal*, 221, 211–212, 2016.