

Capítulo 4

CERATOCONE: EVOLUÇÃO DO TRATAMENTO COM *CROSSLINKING* E TÉCNICAS CIRÚRGICAS

BEATRIZ LUANA BARATTER DO CARMO¹
MANUELA ESTEVA MONTEIRO BRITO¹
JOÃO VITOR BITTENCOURT VENERA¹
MARIA EDUARDA PINTO¹
THAIS LOPES FILIPUS¹
EMANUELA BIELESKI OKUYAMA¹
GABRIELLA MOSER DOS SANTOS¹
BÁRBARA VIEIRA DE ANDRADE¹
EDUARDA MARTINS PITTEL¹
ENRICO TURRI PASCHOA¹

¹Discente - Medicina no Centro Universitário da Fundação Educacional de Brusque (UNIFEBE).

Palavras-chave: Ceratocone; Tratamento; Crosslinking.

INTRODUÇÃO

O ceratocone é uma doença ectásica progressiva da córnea, geralmente bilateral e assimétrica, caracterizada pelo afinamento e aumento progressivo da curvatura corneana. Essas alterações modificam a estrutura da córnea e podem ocasionar miopia, astigmatismo irregular e redução da acuidade visual, comprometendo a qualidade de vida dos pacientes (GOMES *et al.*, 2026; HASHEMI *et al.*, 2020). A doença manifesta-se principalmente durante a adolescência e início da vida adulta, período em que também apresenta maior possibilidade de progressão (GOMES *et al.*, 2026). Sua prevalência apresenta ampla variação entre diferentes populações e regiões geográficas, sendo estimada mundialmente em aproximadamente 1,38 caso por 1.000 (HASHEMI *et al.*, 2020). No Brasil, estudo realizado com adolescentes da região Sul encontrou prevalência de 0,73%, demonstrando a presença significativa da doença também na população brasileira (MAGALHÃES *et al.*, 2024).

A fisiopatologia do ceratocone ainda não é completamente compreendida e apresenta caráter multifatorial, envolvendo fatores genéticos, ambientais e alterações biomecânicas da córnea (GOMES *et al.*, 2026; VOUGHT *et al.*, 2025). O enfraquecimento progressivo do estroma corneano provoca redução da resistência biomecânica e favorece o afinamento e a protrusão da córnea (VOUGHT *et al.*, 2025; BUI *et al.*, 2023). Alterações na organização das fibras de colágeno, aumento do estresse oxidativo e modificações na matriz extracelular também têm sido relacionadas ao desenvolvimento e à progressão da doença (VOUGHT *et al.*, 2025). Além disso, alguns fatores estão associados ao ceratocone, como história familiar, doenças atópicas e o hábito de coçar os olhos, que pode contribuir para o trauma mecânico repetitivo da

córnea e para a progressão da ectasia (GOMES *et al.*, 2026; MAGALHÃES *et al.*, 2024; BUI *et al.*, 2023).

A classificação do ceratocone é importante para determinar a gravidade da doença, acompanhar sua progressão e auxiliar na escolha do tratamento. Tradicionalmente, a classificação de Amsler-Krumeich divide o ceratocone em estágios conforme parâmetros como ceratometria, refração, espessura e presença de cicatrizes corneanas. Com o avanço dos métodos diagnósticos, novos sistemas passaram a incorporar informações obtidas pela topografia e tomografia corneana. Entre eles, destaca-se a classificação Belin ABCD, que considera alterações das superfícies anterior e posterior da córnea, sua espessura no ponto mais fino e a acuidade visual. Atualmente, a associação entre avaliação clínica, topografia, tomografia e análise biomecânica permite diagnosticar alterações mais precoces e acompanhar de forma mais precisa a evolução da doença (GOMES *et al.*, 2026; BUI *et al.*, 2023; BELIN; DUNCAN, 2016).

O tratamento do ceratocone depende da idade do paciente, do estágio e da progressão da doença, das características da córnea e do comprometimento visual. Nos casos iniciais, óculos e lentes de contato podem ser utilizados para correção da alteração refrativa, sendo as lentes rígidas gás-permeáveis e esclerais importantes opções quando existe astigmatismo irregular. Nos casos com progressão documentada, o *crosslinking* do colágeno corneano tornou-se uma das principais alternativas terapêuticas, pois aumenta a resistência biomecânica da córnea e pode retardar ou interromper a evolução da ectasia. Outras possibilidades incluem a implantação de segmentos de anel intracorneano para melhorar a regularidade corneana e a acuidade visual e, nos casos mais avançados, procedimentos como a ceratoplastia lamelar anterior

profunda ou a ceratoplastia penetrante (GOMES *et al.*, 2026; DESHMUKH *et al.*, 2023; IZQUIERDO *et al.*, 2019; AWAD *et al.*, 2025; DINIZ *et al.*, 2021; RAISKUP *et al.*, 2023).

Nas últimas décadas, o tratamento do ceratocone apresentou importante evolução, passando de uma abordagem voltada principalmente à correção visual e ao transplante de córnea para estratégias capazes de interferir na progressão da doença (DESHMUKH *et al.*, 2023; RAISKUP *et al.*, 2023). O desenvolvimento do *crosslinking* representou uma importante mudança no manejo do ceratocone, principalmente quando realizado nos estágios iniciais da ectasia (DINIZ *et al.*, 2021; RAISKUP *et al.*, 2023). Paralelamente, o aprimoramento dos segmentos intracorneanos e das técnicas de transplante permitiu ampliar as possibilidades de reabilitação visual nos casos moderados e avançados (IZQUIERDO *et al.*, 2019; AWAD *et al.*, 2025). Apesar desses avanços, a escolha do tratamento permanece individualizada e depende das características clínicas e anatômicas de cada paciente. Dessa forma, compreender a evolução das diferentes técnicas é importante para estabelecer estratégias terapêuticas capazes de preservar a visão e reduzir a necessidade de procedimentos mais invasivos (GOMES *et al.*, 2026; DESHMUKH *et al.*, 2023).

Diante desse panorama, o presente estudo teve como objetivo analisar a evolução do tratamento do ceratocone, com ênfase no *crosslinking* do colágeno corneano e nas principais técnicas cirúrgicas utilizadas no manejo da doença. Busca-se abordar as indicações e os resultados das diferentes estratégias terapêuticas, incluindo os segmentos de anel intracorneano e as técnicas de transplante de córnea, destacando os avanços que contribuíram para a estabilização da doença e para a melhora da acuidade visual dos pacientes.

MÉTODO

Trata-se de uma revisão narrativa da literatura realizada por meio de pesquisas nas bases de dados PubMed e SciELO no período de julho a agosto de 2026. Foram utilizados os descritores: “*ceratocone*”, “*crosslinking*”, “*tratamento*” e “*diagnóstico*”. Os critérios de inclusão foram: artigos nos idiomas português e inglês que abordavam as temáticas propostas para esta pesquisa. Os critérios de exclusão foram: artigos duplicados, disponibilizados apenas na forma de resumo, que não abordavam diretamente a proposta estudada (focando em diagnósticos tardios ou terapias não tecnológicas) e que não atendiam aos demais critérios de inclusão. Após a aplicação dos critérios de elegibilidade e seleção, foram incluídos 15 artigos, que foram submetidos à leitura minuciosa para a coleta dos dados. Os resultados foram apresentados de forma descritiva, mostrando desde sinais e sintomas, formas de diagnósticos, abordando principalmente a evolução do tratamento para ceratocone, desde medidas para correção visual até técnicas capazes de estabilizar a córnea e procedimentos cirúrgicos para casos avançados, com destaque para o *crosslinking*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A busca realizada nas bases de dados PubMed e SciELO resultou na seleção de 15 artigos científicos que atenderam integralmente aos critérios de elegibilidade definidos para esta revisão narrativa. Os estudos selecionados, publicados nos idiomas português e inglês entre os anos de 2005 e 2024, abrangeram desde a caracterização clínica e fisiopatológica da doença até as abordagens diagnósticas e terapêuticas modernas. A análise descritiva desses dados revelou que a detecção precoce do ceratocone, obtida pela integração de tomografia, triagem genética e avaliação da biomecânica da córnea,

é um fator determinante para estabelecer o manejo adequado e conter a evolução da ectasia.

No âmbito do diagnóstico e estadiamento da patologia, os dados demonstram uma evolução metodológica significativa. Historicamente, a classificação de Amsler-Krumeich norteava o acompanhamento clínico com base em variáveis como refração, ceratometria, espessura e cicatrizes corneanas. Contudo, a introdução de sistemas contemporâneos, como a classificação Belin ABCD, permitiu uma avaliação mais precisa ao incorporar, de forma objetiva, dados das superfícies anterior e posterior da córnea, a espessura corneana em seu ponto mais fino e a acuidade visual do paciente. Essa evolução propiciou o diagnóstico precoce de alterações estruturais e um monitoramento mais refinado da progressão da doença.

No que tange às condutas terapêuticas iniciais, os resultados confirmam que o tratamento deve ser individualizado, considerando a idade, o estágio clínico, a progressão documentada da ectasia, as características anatômicas da córnea e o grau de comprometimento visual de cada indivíduo. Nos estágios iniciais do ceratocone, a reabilitação da visão baseia-se no uso de óculos e de lentes de contato rígidas gás-permeáveis (RGP) ou lentes esclerais. Esses dispositivos ópticos desempenham um papel crucial na regularização da superfície da córnea e na correção do astigmatismo irregular, contribuindo para o restabelecimento da função visual.

À medida que a doença demonstra progressão clínica, faz-se necessário intensificar o tratamento para evitar medidas cirúrgicas altamente invasivas. Nesse contexto, o CXL consolidou-se como a terapia mais eficaz para interromper a progressão do ceratocone. O procedimento atua promovendo o aumento da resistência e da estabilidade biomecânica do estroma corneano, sendo capaz de retardar ou estagnar a

evolução da ectasia. Paralelamente, novas perspectivas preventivas não invasivas vêm sendo estudadas, destacando-se as pesquisas em torno do colírio de sulfato de cobre (IVMED-80) e do uso de vesículas extracelulares para conter o avanço estrutural da doença (BUI *et al.*, 2023).

Para os cenários em que o paciente apresenta intolerância às lentes de contato ou necessita de reestruturação corneana, as técnicas cirúrgicas tornam-se ferramentas fundamentais. Os segmentos de anel intracorneano, inseridos de forma estromal, configuram-se como uma excelente alternativa para aplanar e regularizar a curvatura da córnea, melhorando significativamente a acuidade visual em ectasias moderadas, embora não tenham a propriedade de paralisar a progressão da doença.

Por fim, nos casos mais avançados, caracterizados por afinamento estromal severo ou presença de cicatrizes corneanas opacas, o transplante de córnea é indicado para a recuperação visual, sendo viabilizado tanto pela técnica convencional penetrante quanto pela ceratoplastia lamelar anterior profunda (DALK), uma abordagem mais conservadora e amplamente refinada nas últimas décadas.

Descrita pela primeira vez em detalhe em 1854 (HILGERT *et al.*, 2020), a compreensão epidemiológica do ceratocone foi modificada ao longo do tempo. Estimativas mais antigas apontavam incidência de cerca de 2 novos casos a cada 100 mil habitantes/ano (KENNEDY *et al.*, 1986), enquanto revisões mais recentes descrevem prevalência mundial mais ampla, entre 50 e 230 casos por 100 mil habitantes (HILGERT *et al.*, 2020). As diferenças expressivas entre essas estimativas provavelmente refletem diferenças metodológicas, populacionais e na capacidade diagnóstica, especialmente após a incorporação de métodos de imagem mais sensíveis, capazes de identificar casos subclínicos anteriormente não diagnosticados.

Essa capacidade diagnóstica começa na etapa de rastreio, atualmente favorecida pelo uso da tomografia corneana, que permite avaliar de forma tridimensional as superfícies anterior e posterior da córnea e fornecer informações detalhadas sobre sua espessura. O impacto prático dessa mudança é relevante, uma vez que o diagnóstico mais precoce amplia a possibilidade de intervenção antes da evolução para estágios que demandem procedimentos cirúrgicos mais invasivos. O mapeamento da espessura epitelial por OCT surge como ferramenta complementar, ainda que seus resultados não sejam totalmente uniformes entre os estudos, sugerindo que sua utilização deve ocorrer de forma auxiliar, e não de modo isolado para determinar a progressão da doença (BUI *et al.*, 2023).

Uma vez levantada a suspeita clínica, o diagnóstico depende de exames capazes de avaliar com maior precisão a curvatura, a espessura e a morfologia corneanas, uma vez que ferramentas tradicionais, como ceratometria e retinoscopia, apresentam limitações para a identificação de alterações iniciais. A topografia corneana permite identificar padrões característicos, como o *bow tie* assimétrico, enquanto a tomografia de Scheimpflug amplia essa avaliação ao incorporar informações sobre as superfícies anterior e posterior e a distribuição da espessura corneana. Essa abordagem é particularmente relevante em candidatos à cirurgia refrativa, nos quais o reconhecimento de alterações corneanas predisponentes pode reduzir o risco de ectasia iatrogênica pós-LASIK. Além disso, a incorporação de índices biomecânicos e de tecnologias emergentes, como a elastografia corneana, evidencia uma evolução de uma abordagem diagnóstica predominantemente baseada na morfologia para uma avaliação que também considera as propriedades biomecânicas da córnea (VALE *et al.*, 2024). Essa evolução pode au-

mentar a capacidade de identificação de alterações precoces, em fases nas quais medidas conservadoras e terapêuticas de estabilização ainda podem ser empregadas.

O momento do diagnóstico exerce influência importante sobre o prognóstico visual do paciente. A documentação objetiva da progressão, baseada na combinação de alterações tomográficas e ceratométricas e, quando pertinente, de parâmetros refracionais e de acuidade visual, é fundamental para orientar a indicação do cross-linking corneano (SANTHIAGO, 2017). Pacientes pediátricos merecem atenção especial, pois tendem a apresentar doença mais agressiva e maior risco de progressão. Além disso, estudos de acompanhamento prolongado demonstram que a progressão pode ocorrer mesmo após uma resposta inicial favorável ao CXL, reforçando a necessidade de monitorização contínua, e não apenas de uma intervenção pontual. Nos casos em que a doença evolui apesar das medidas de controle e o transplante corneano se torna necessário, o prognóstico anatômico costuma ser favorável; entretanto, alterações refracionais e astigmatismo residual podem limitar o resultado visual final.

Esse contínuo entre rastreio, diagnóstico e prognóstico estrutura, na prática, a escalada terapêutica observada nos resultados. O CXL permanece como a principal intervenção destinada a interromper ou retardar a progressão do ceratocone, especialmente quando realizado em fases nas quais ainda há possibilidade de preservar a estrutura corneana (SANTHIAGO, 2017). A maior parte das evidências disponíveis concentra-se no protocolo padrão *epi-off*. As variantes aceleradas e transepiteliais, embora apresentem vantagens potenciais relacionadas ao menor tempo de procedimento, desconforto e recuperação, ainda apresentam diferenças quanto aos protocolos empregados e à consistência das evidências de longo prazo. Para casos

moderados associados à intolerância às lentes de contato, os anéis intracorneanos podem melhorar a regularidade corneana e a acuidade visual, mas não interrompem isoladamente a progressão biomecânica da doença, justificando sua associação ao CXL em pacientes selecionados. Já nos estágios avançados, a ceratoplastia lamelar anterior profunda apresenta vantagens em relação à ceratoplastia penetrante em situações apropriadas, por preservar o endotélio corneano do receptor e reduzir o risco de rejeição endotelial (AMBRÓSIO JUNIOR *et al.*, 2019).

Em conjunto, esses achados sugerem que os avanços terapêuticos no manejo do ceratocone, embora relevantes, não são suficientes, isoladamente, para reduzir toda a carga de comprometimento visual potencialmente evitável. A transformação desse avanço tecnológico em benefício clínico depende da integração entre rastreamento e diagnóstico por métodos de imagem cada vez mais sensíveis, critérios bem estabelecidos para identificação da progressão, utilização adequada do CXL e monitorização regular dos pacientes. Essa abordagem é especialmente importante em indivíduos jovens, nos quais o risco de progressão pode ser maior. Dessa forma, o manejo contemporâneo do ceratocone deve priorizar o diagnóstico precoce e o acompanhamento longitudinal, buscando intervir antes que a progressão da ectasia resulte em comprometimento visual irreversível ou na necessidade de procedimentos cirúrgicos invasivos.

CONCLUSÃO

A presente revisão narrativa evidencia que o manejo do ceratocone passou por transformações nas últimas décadas. A incorporação de sistemas de estadiamento mais sensíveis, como a classificação Belin ABCD, em conjunto com

a tomografia corneana, a triagem genética e a avaliação biomecânica, permitiu identificar a ectasia em estágios cada vez mais iniciais, ampliando a janela de oportunidade para intervenções capazes de alterar o curso da doença.

Do ponto de vista terapêutico, a correção óptica com óculos e lentes de contato rígidas segue como primeira linha em casos iniciais, enquanto o *crosslinking* do colágeno corneano se estabelece como padrão-ouro para interromper a progressão da ectasia, adiando ou até evitando a necessidade de procedimentos mais invasivos. Os segmentos de anel intracorneano tornam-se uma possibilidade de reabilitação visual em estágios moderados, mas sem efeito estabilizador sobre a doença. Isso reforça a importância de associá-los a outras estratégias que contenham a progressão. Nos casos mais avançados, o transplante de córnea, seja pela técnica penetrante ou pela DALK, permanece como recurso crucial para a recuperação da função visual. Além disso, estudos experimentais com alternativas não invasivas, como o colírio de sulfato de cobre (IVMED-80) e vesículas extracelulares, apontam para possibilidades promissoras de terapias menos agressivas, embora ainda sejam necessários estudos para consolidar sua eficácia e segurança em longo prazo.

Conclui-se, portanto, que os pilares essenciais no manejo do ceratocone são o diagnóstico precoce e o acompanhamento multidisciplinar, permitindo uma escolha terapêutica adaptada ao estágio e às particularidades de cada paciente. A continuidade das pesquisas voltadas ao aprimoramento dos métodos diagnósticos e ao desenvolvimento de terapias menos invasivas é fundamental para otimizar os desfechos visuais e a qualidade de vida dos indivíduos acometidos por essa ectasia corneana.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMBRÓSIO JUNIOR, R. *et al.* Ceratocone: quebra de paradigmas e contradições de uma nova subespecialidade. *Revista Brasileira de Oftalmologia*, v. 78, p. 81, 2019. doi: 10.5935/0034-7280.20180101.
- AWAD, A.A. *et al.* Penetrating keratoplasty versus deep anterior lamellar keratoplasty for keratoconus: a systematic review and meta-analysis. *Seminars in Ophthalmology*, v. 40, p. 364, 2025. doi: 10.1016/j.ajo.2022.11.019.
- BELIN, M.W.; DUNCAN, J.K. Keratoconus: the ABCD grading system. *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde*, v. 233, p. 701, 2016. doi: 10.1055/s-0042-100626.
- BUI, A.D. *et al.* Keratoconus diagnosis and treatment: recent advances and future directions. *Clinical Ophthalmology*, v. 17, p. 2705, 2023. doi: 10.2147/OPTH.S392665.
- DESHMUKH, R. *et al.* Management of keratoconus: an updated review. *Frontiers in Medicine*, v. 10, p. 1212314, 2023. doi: 10.3389/fmed.2023.1212314.
- DINIZ, E.R. *et al.* Corneal crosslinking efficacy in patients with keratoconus under 18 years of age. *Arquivos Brasileiros de Oftalmologia*, v. 84, p. 324, 2021. doi: 10.5935/0004-2749.20210046.
- GOMES, J.A.P. *et al.* Global Consensus on Keratoconus and Ectatic Diseases—Edition 2. *Cornea*, v. 45, p. 888, 2026. doi: 10.1097/ICO.00000000000004170.
- HASHEMI, H. *et al.* The prevalence and risk factors for keratoconus: a systematic review and meta-analysis. *Cornea*, v. 39, p. 263, 2020. doi: 10.1097/ICO.0000000000002150.
- HILGERT, G.S.L. *et al.* Diagnóstico do ceratocone: um artigo de revisão. *Revista Brasileira de Oftalmologia*, v. 79, p. 420, 2020. doi: 10.5935/0034-7280.20200092.
- IZQUIERDO, L. *et al.* Effectiveness of intrastromal corneal ring implantation in the treatment of adult patients with keratoconus: a systematic review. *Journal of Refractive Surgery*, v. 35, p. 191, 2019. doi: 10.3928/1081597X-20190109-02.
- KENNEDY, R.H. *et al.* A 48-year clinical and epidemiologic study of keratoconus. *American Journal of Ophthalmology*, v. 101, p. 267, 1986. doi: 10.1016/0002-9394(86)90817-2.
- MAGALHÃES, O.A. *et al.* Prevalence of keratoconus among high school students in Southern Brazil: a community-based study. *Eye & Contact Lens*, v. 50, p. 117, 2024. doi: 10.1097/ICL.0000000000001066.
- RAISKUP, F. *et al.* Corneal crosslinking with riboflavin and UVA light in progressive keratoconus: fifteen-year results. *American Journal of Ophthalmology*, v. 250, p. 95, 2023. doi: 10.1016/j.ajo.2023.01.022.
- SANTHIAGO, M.R. Cross-linking da córnea: protocolo padrão. *Revista Brasileira de Oftalmologia*, v. 76, p. 43, 2017. doi: 10.5935/0034-7280.20170010.
- VALE, R.R. *et al.* Ceratocone: aspectos clínicos, diagnóstico e abordagens terapêuticas. *Brazilian Journal of Health Review*, v. 7, e73410, 2024. doi: 10.34119/bjhrv7n5-356.
- VOUGHT, R. *et al.* The pathophysiology of keratoconus. *Cornea*, v. 44, p. 137, 2025. doi: 10.1097/ICO.0000000000003585.