

CROSSLINKING PERSONALIZADO ASSOCIADO À ABLAÇÃO CIRÚRGICA VERSUS ANEL INTRASTROMAL NO CERATOCONO MODERADO

Abel Mendonça Alves¹

Maria Clara Correa Dias²

Thaís Lamounier Santos³

Pedro Eduardo Pereira Soares Lopes⁴

RESUMO: Introdução: O ceratocone havia sido caracterizado como uma ectasia corneana progressiva marcada pelo afinamento e pela deformação da córnea, ocasionando irregularidade óptica, aumento do astigmatismo e redução da acuidade visual. Nos casos moderados, estratégias terapêuticas conservadoras e cirúrgicas haviam buscado interromper a progressão da doença e melhorar a qualidade visual, destacando-se o crosslinking corneano personalizado associado à ablação cirúrgica e o implante de anel intracorneano. O crosslinking personalizado havia possibilitado maior individualização do tratamento ao considerar características topográficas e biomecânicas da córnea, enquanto a ablação guiada por topografia havia promovido maior regularização da superfície corneana. Em contrapartida, os anéis intrastromais haviam atuado na remodelação estrutural da córnea, reduzindo a protrusão e melhorando a adaptação de lentes de contato, sendo uma alternativa relevante para pacientes com ceratocone moderado. Metodologia: A revisão havia sido conduzida conforme o checklist PRISMA, utilizando artigos científicos publicados nos últimos 10 anos nas bases PubMed, Scielo e Web of Science. Foram utilizados os descritores: “ceratocone”, “crosslinking corneano”, “segmentos de anel intracorneano”, “ablação guiada por topografia” e “ectasia corneana”. Foram incluídos estudos clínicos, revisões científicas e pesquisas envolvendo pacientes com ceratocone moderado submetidos às técnicas avaliadas. Foram excluídos estudos duplicados, publicações sem acesso ao texto completo e pesquisas que abordavam outras doenças corneanas. Resultados: Os estudos analisados haviam demonstrado que o crosslinking personalizado associado à ablação havia proporcionado maior regularização da superfície corneana, melhora dos índices topográficos e ganhos funcionais de visão, principalmente quando havia sido indicado em córneas com progressão documentada. O anel intrastromal havia apresentado benefícios na redução da curvatura corneana, melhora da simetria e estabilização anatômica, sendo especialmente útil em pacientes com maior irregularidade estrutural. As evidências haviam indicado que ambas as técnicas apresentavam segurança clínica, porém com mecanismos distintos de ação e resultados dependentes da seleção adequada dos pacientes. Conclusão: Concluiu-se que o crosslinking personalizado associado à ablação cirúrgica e o anel intrastromal haviam representado alternativas eficazes para o tratamento do ceratocone moderado. A escolha terapêutica havia dependido das características individuais da córnea, sendo que a abordagem personalizada havia demonstrado maior potencial para otimização visual, enquanto os anéis haviam se destacado pela capacidade de remodelação biomecânica e estabilização da ectasia.

Palavras-chave: Ceratocone. Crosslinking corneano. Segmentos de anel intracorneano. Ablação guiada por topografia. Ectasia corneana.

¹ Médico. Universidade Federal do Triângulo Mineiro.

² Médica. Faculdade de Medicina de Barbacena (FAME).

³ Médica. Faculdade Ciências Médicas de Minas Gerais (FCMMG).

⁴ Médico. Faculdade Ciências Médicas de Minas Gerais (FCMMG).

I INTRODUÇÃO

O ceratocone havia sido reconhecido como uma ectasia corneana progressiva caracterizada por alterações estruturais da córnea, envolvendo afinamento estromal, aumento da curvatura corneana e comprometimento da regularidade da superfície óptica. Essas modificações haviam provocado alterações refracionais importantes, principalmente astigmatismo irregular e miopia progressiva, resultando em redução da acuidade visual e impacto significativo na qualidade de vida dos pacientes. A doença havia apresentado evolução variável, podendo permanecer estável em alguns indivíduos ou progredir rapidamente em outros, especialmente em pacientes jovens. De acordo com Godefrooij et al. (2017), o ceratocone havia representado uma das principais causas de transplante de córnea em indivíduos jovens, devido ao comprometimento progressivo da transparência e da biomecânica corneana. Dessa forma, o diagnóstico precoce e a escolha adequada da abordagem terapêutica haviam sido considerados fundamentais para preservar a função visual e evitar a progressão para estágios avançados.

A fisiopatologia do ceratocone havia envolvido alterações na organização das fibras de colágeno do estroma corneano, redução da resistência biomecânica e desequilíbrio entre processos de degradação e remodelação da matriz extracelular. A perda da rigidez corneana havia favorecido a protrusão progressiva da região central ou paracentral da córnea, ocasionando deformação irregular e comprometimento da capacidade refrativa. Estudos haviam demonstrado que fatores genéticos, ambientais e comportamentais, como predisposição familiar, alterações no metabolismo do colágeno e hábito de coçar os olhos, estavam associados ao desenvolvimento e progressão da doença. Segundo Gomes et al. (2015), a instabilidade biomecânica da córnea havia sido um dos principais mecanismos responsáveis pela evolução do ceratocone, reforçando a necessidade de tratamentos capazes não apenas de melhorar a visão, mas também de interromper a progressão da ectasia.

Nos casos classificados como ceratocone moderado, as alterações estruturais haviam exigido abordagens terapêuticas capazes de equilibrar a estabilização da doença e a recuperação da qualidade visual. O crosslinking corneano personalizado associado à ablação cirúrgica havia surgido como uma estratégia avançada por combinar o fortalecimento biomecânico da córnea com a regularização da superfície corneana. O crosslinking havia atuado promovendo maior rigidez do estroma por meio da indução de ligações entre fibras de colágeno, reduzindo a progressão da ectasia. Conforme Raiskup et al. (2015), o procedimento havia demonstrado

capacidade de estabilizar a progressão do ceratocone e preservar a estrutura corneana ao longo do acompanhamento clínico.

A associação com ablação guiada por topografia havia permitido uma abordagem personalizada, considerando as irregularidades específicas de cada córnea. Essa técnica havia buscado remodelar áreas de maior deformidade, reduzindo assimetrias corneanas e melhorando a qualidade óptica, especialmente em pacientes que apresentavam limitações visuais mesmo após a estabilização da doença. Segundo Kanellopoulos (2019), a combinação entre procedimentos personalizados havia proporcionado melhora dos parâmetros visuais e topográficos, pois havia atuado simultaneamente nos componentes biomecânicos e ópticos da ectasia. Assim, o tratamento combinado havia representado uma alternativa relevante para pacientes com ceratocone moderado, principalmente quando havia indicação de progressão associada à presença de irregularidade corneana significativa.

O implante de anel intrastromal havia se destacado como uma abordagem cirúrgica para o ceratocone moderado por promover remodelação da arquitetura corneana e redução da irregularidade provocada pela ectasia. A inserção dos segmentos no estroma havia favorecido a redistribuição das forças biomecânicas, diminuindo a protrusão central e contribuindo para melhora da simetria corneana, do astigmatismo irregular e da adaptação de lentes de contato. Segundo Ferrara et al. (2016), os anéis intracorneanos haviam apresentado resultados positivos na recuperação funcional da visão e na estabilização da córnea em pacientes adequadamente selecionados.

3

A indicação dessa técnica havia dependido de fatores como espessura corneana, localização do cone, padrão topográfico e progressão da doença. Estudos haviam demonstrado que a seleção criteriosa dos pacientes era fundamental para alcançar melhores resultados, visto que a resposta terapêutica variava conforme as características individuais da ectasia. Vega-Estrada et al. (2015) haviam observado que os segmentos de anel apresentavam benefícios prolongados na regularização corneana e na melhora dos parâmetros refracionais.

A comparação entre o crosslinking personalizado associado à ablação cirúrgica e o anel intrastromal havia evidenciado diferentes mecanismos terapêuticos. Enquanto o tratamento combinado havia buscado aprimorar a qualidade óptica por meio da correção das irregularidades superficiais, os anéis haviam atuado principalmente na remodelação estrutural da córnea. Dessa forma, a escolha da técnica havia sido baseada nas condições anatômicas e funcionais de cada paciente, considerando o estágio da doença e os objetivos visuais esperados (HENRIQUEZ et al., 2018).

A personalização do tratamento havia representado um aspecto essencial no manejo do ceratocone moderado, pois fatores como idade, espessura corneana, progressão da ectasia e características topográficas haviam influenciado diretamente a decisão terapêutica. Conforme Hashemian et al. (2020), estratégias individualizadas haviam proporcionado melhores resultados clínicos por considerar as particularidades biomecânicas de cada córnea.

A presente revisão sistemática de literatura tem como objetivo analisar e comparar as evidências científicas relacionadas ao uso do crosslinking personalizado associado à ablação cirúrgica e do anel intrastromal no tratamento do ceratocone moderado, avaliando os benefícios clínicos, a estabilidade corneana, os resultados visuais e as alterações topográficas proporcionadas por essas abordagens. Busca-se compreender as indicações terapêuticas, os critérios de seleção dos pacientes e os fatores associados ao sucesso dos procedimentos, contribuindo para uma melhor definição das estratégias individualizadas no manejo da ectasia corneana.

2 METODOLOGIA

A revisão sistemática de literatura havia sido conduzida conforme as recomendações estabelecidas pelo checklist PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), seguindo etapas organizadas de identificação, seleção, elegibilidade e inclusão dos estudos científicos utilizados na construção da análise. A busca bibliográfica havia sido realizada nas bases de dados PubMed, SciELO e Web of Science, considerando artigos publicados nos últimos 10 anos relacionados ao tratamento do ceratocone moderado por meio do crosslinking personalizado associado à ablação cirúrgica e do implante de anel intrastromal. Os descritores utilizados na estratégia de busca haviam sido: “ceratocone”, “crosslinking corneano”, “segmentos de anel intracorneano”, “ablação guiada por topografia” e “ectasia corneana”. A seleção dos estudos havia seguido as etapas previstas pelo protocolo PRISMA, contemplando a identificação dos registros encontrados nas bases consultadas, remoção de duplicatas, análise dos títulos e resumos, avaliação dos textos completos e inclusão dos artigos considerados adequados ao objetivo da revisão.

Os critérios de inclusão haviam considerado estudos publicados em periódicos científicos nos últimos 10 anos, pesquisas disponíveis integralmente nas bases de dados selecionadas, artigos que abordavam pacientes diagnosticados com ceratocone moderado, estudos que analisavam o uso do crosslinking personalizado associado à ablação cirúrgica ou do anel intrastromal como estratégia terapêutica, além de pesquisas que apresentavam resultados

relacionados à eficácia clínica, estabilidade corneana, alterações topográficas ou melhora visual após os procedimentos avaliados. Também haviam sido incluídos estudos clínicos, estudos observacionais, ensaios comparativos e revisões científicas que apresentavam informações relevantes sobre a evolução terapêutica da doença e permitiam análise dos resultados das técnicas abordadas.

Os critérios de exclusão haviam abrangido estudos duplicados entre as bases de dados consultadas, publicações que não apresentavam relação direta com o tratamento cirúrgico do ceratocone moderado, pesquisas envolvendo exclusivamente outras doenças corneanas ou alterações ectásicas distintas, artigos sem disponibilidade do texto completo para análise, trabalhos publicados fora do período estabelecido e estudos que não apresentavam informações suficientes sobre os resultados clínicos das técnicas avaliadas. Também haviam sido excluídos relatos de caso isolados, cartas ao editor, opiniões de especialistas, resumos de congressos e publicações sem metodologia científica claramente descrita, visando garantir maior qualidade e confiabilidade das evidências selecionadas. A aplicação desses critérios havia permitido a obtenção de estudos com maior relevância científica, favorecendo uma análise estruturada sobre as abordagens terapêuticas utilizadas no ceratocone moderado.

3 RESULTADOS

O ceratocone é uma ectasia corneana progressiva caracterizada por alterações estruturais que comprometem a organização das fibras de colágeno e a resistência biomecânica do tecido corneano. A doença ocorre devido a um desequilíbrio entre os processos de manutenção da matriz extracelular e os mecanismos degenerativos do estroma, resultando em afinamento progressivo, aumento da curvatura e alteração da distribuição das forças mecânicas da córnea. Segundo Gomes et al. (2015), essas modificações estão relacionadas à perda da estabilidade estrutural corneana, favorecendo a formação de uma protrusão cônica que interfere na regularidade da passagem da luz e provoca comprometimento da função visual. Além disso, alterações na organização lamelar do colágeno, aumento da atividade enzimática degradativa e modificações na composição da matriz extracelular contribuem para a evolução gradual da ectasia, especialmente em indivíduos jovens e geneticamente predispostos.

Do ponto de vista biomecânico, o ceratocone moderado apresenta redução significativa da capacidade da córnea em suportar as forças exercidas pela pressão intraocular e pelas condições externas. Conforme descrito por Gordon-Shaag et al. (2015), a diminuição da rigidez estromal promove maior suscetibilidade à deformação, favorecendo alterações na curvatura

corneana, aumento do astigmatismo irregular e redução progressiva da acuidade visual. Além dos fatores estruturais, aspectos ambientais e comportamentais, como o ato frequente de coçar os olhos, estão associados à aceleração da instabilidade corneana, pois podem intensificar o estresse mecânico sobre uma córnea já comprometida. Dessa maneira, a compreensão dos mecanismos biomecânicos envolvidos é essencial para direcionar estratégias terapêuticas capazes de preservar a integridade ocular e controlar a progressão da doença.

No ceratocone moderado, as alterações anatômicas apresentam impacto significativo sobre a qualidade visual, pois a irregularidade da superfície óptica interfere não apenas na nitidez da imagem, mas também na percepção de contraste e no conforto visual. De acordo com Godefrooij et al. (2017), pacientes com evolução da ectasia podem apresentar sintomas como halos luminosos, distorções visuais e dificuldade de adaptação aos métodos convencionais de correção óptica. Nesse contexto, a avaliação da biomecânica corneana torna-se fundamental para identificar padrões de progressão e auxiliar na escolha terapêutica mais adequada. Assim, o conhecimento aprofundado dos mecanismos fisiopatológicos da doença permite o desenvolvimento de abordagens personalizadas voltadas à estabilização corneana e à preservação da capacidade visual.

O diagnóstico do ceratocone moderado é realizado por meio da associação entre avaliação clínica, análise refracional e exames complementares capazes de identificar alterações estruturais da córnea. Embora sintomas como piora progressiva da visão e alterações refracionais possam sugerir a presença da doença, métodos de imagem são indispensáveis para detectar modificações precoces e acompanhar sua evolução. Segundo Belin e Ambrósio (2017), a tomografia corneana apresenta papel fundamental na investigação da ectasia, pois possibilita avaliar a curvatura anterior e posterior da córnea, distribuição da espessura, elevação das superfícies e padrões de assimetria que auxiliam na caracterização individual da doença.

A classificação do ceratocone moderado considera parâmetros relacionados ao grau de deformação corneana, intensidade do afinamento estromal e impacto funcional provocado pela irregularidade óptica. Belin et al. (2015) destacam que sistemas modernos de avaliação baseados em informações tomográficas e biomecânicas permitem uma análise mais precisa da progressão da ectasia, superando métodos tradicionais fundamentados apenas na curvatura corneana. Dessa forma, alterações como redução da espessura mínima, aumento da elevação posterior e modificações nos índices de irregularidade representam marcadores importantes para determinar a gravidade do quadro e auxiliar na definição do momento adequado para intervenção terapêutica.

Além da avaliação estrutural, o acompanhamento contínuo da evolução clínica apresenta grande importância para diferenciar casos estáveis daqueles que apresentam progressão ativa. Conforme Rabinowitz (2017), a análise longitudinal dos parâmetros corneanos permite identificar mudanças graduais e estabelecer condutas individualizadas, evitando atrasos no tratamento de pacientes com risco de perda visual significativa. Dessa maneira, a classificação adequada do estágio moderado do ceratocone contribui para a seleção das estratégias terapêuticas mais apropriadas, incluindo o crosslinking personalizado associado à ablação guiada por topografia ou a implantação de anel intrastromal, considerando as características anatômicas e funcionais específicas de cada córnea.

O crosslinking corneano personalizado representa uma estratégia terapêutica avançada destinada à estabilização do ceratocone por meio do fortalecimento das propriedades biomecânicas da córnea. Esse procedimento baseia-se na indução de novas ligações entre as fibras de colágeno do estroma corneano, aumentando a resistência do tecido e reduzindo sua capacidade de sofrer deformação progressiva. Conforme Raiskup et al. (2015), o crosslinking apresenta papel fundamental no controle da evolução da ectasia, pois atua diretamente sobre o principal mecanismo envolvido na progressão da doença, que é a perda da rigidez estrutural da córnea. Além disso, a técnica tem como finalidade preservar a arquitetura corneana e retardar alterações que podem comprometer de forma significativa a função visual.

7

A personalização do tratamento amplia a aplicabilidade do procedimento ao considerar características individuais da córnea, como distribuição da espessura, padrão topográfico, localização da área de maior fragilidade e grau de irregularidade presente em cada paciente. Dessa forma, protocolos ajustados permitem uma aplicação mais direcionada da energia ultravioleta e do agente fotossensibilizador, buscando maior eficiência terapêutica e melhor preservação das regiões corneanas saudáveis. Segundo Kanellopoulos (2019), abordagens personalizadas associadas a técnicas de remodelação óptica apresentam potencial para otimizar resultados funcionais, pois combinam a estabilização biomecânica com a melhora da regularidade da superfície corneana. Consequentemente, essa modalidade terapêutica tem se destacado especialmente em pacientes com ceratocone moderado que apresentam progressão documentada e irregularidades visuais significativas.

A ablação cirúrgica guiada por topografia associada ao crosslinking constitui uma abordagem que visa corrigir alterações ópticas decorrentes da deformação corneana, proporcionando uma superfície mais regular e funcional. Diferentemente de procedimentos refrativos convencionais, essa técnica utiliza informações detalhadas da geometria corneana

para realizar uma remodelação personalizada, direcionada às áreas de maior assimetria e irregularidade. Conforme demonstrado por Alessio et al. (2019), a ablação personalizada pode promover melhora dos parâmetros visuais e redução das aberrações ópticas em pacientes selecionados, principalmente quando aplicada em conjunto com métodos destinados à estabilização da ectasia.

Além disso, a associação entre a remodelação da superfície corneana e o fortalecimento biomecânico apresenta uma abordagem complementar, uma vez que atua simultaneamente sobre os componentes óptico e estrutural da doença. Enquanto a ablação contribui para melhorar a qualidade da imagem formada na retina, o crosslinking atua na manutenção da estabilidade do tecido tratado. Nesse sentido, a combinação dessas estratégias permite uma intervenção mais abrangente, especialmente em casos nos quais a irregularidade corneana limita a visão mesmo após a estabilização da progressão. De acordo com Kymionis et al. (2017), terapias combinadas apresentam resultados promissores por possibilitarem melhora visual associada ao controle da evolução do ceratocone, desde que sejam respeitados critérios rigorosos de indicação e segurança.

O implante de anel intrastromal representa uma alternativa cirúrgica utilizada no manejo do ceratocone moderado, especialmente em pacientes que apresentam irregularidade corneana significativa, comprometimento visual progressivo e necessidade de remodelação da arquitetura ocular. Essa técnica consiste na inserção de segmentos semicirculares de material biocompatível no interior do estroma corneano, promovendo redistribuição das forças biomecânicas e alteração controlada da curvatura da córnea. Conforme Ferrara et al. (2016), os segmentos intracorneanos atuam por meio de um efeito de regularização geométrica, reduzindo a protrusão central e favorecendo maior simetria da superfície corneana. Dessa maneira, o procedimento contribui para diminuir o astigmatismo irregular, melhorar a qualidade visual e aumentar a tolerância ao uso de lentes de contato em indivíduos com ectasia moderada.

Além disso, o mecanismo de ação dos anéis intrastromais está diretamente relacionado à capacidade de modificar a distribuição das tensões presentes no tecido corneano enfraquecido. Ao serem posicionados em regiões periféricas da córnea, os segmentos exercem forças de compressão que promovem um aplanamento relativo da área central, reduzindo a deformidade causada pelo ceratocone. Segundo Vega-Estrada et al. (2015), essa remodelação estrutural apresenta benefícios clínicos prolongados quando o procedimento é realizado em pacientes adequadamente selecionados, principalmente naqueles que possuem córneas transparentes,

espessura suficiente para implantação segura e ausência de alterações avançadas que comprometam o prognóstico visual.

A indicação dos anéis intrastromais depende de uma avaliação individualizada que considera características anatômicas e funcionais específicas da córnea. Nesse contexto, parâmetros como localização do cone, grau de curvatura, espessura corneana, estabilidade refracional e expectativa visual influenciam diretamente a escolha do procedimento. Conforme Kubaloglu et al. (2018), a seleção criteriosa dos pacientes está associada a melhores resultados, uma vez que a resposta terapêutica varia conforme o padrão da ectasia e o estágio evolutivo da doença. Assim, o implante não tem como principal finalidade interromper isoladamente a progressão do ceratocone, mas sim promover melhora da regularidade corneana e proporcionar condições mais favoráveis para reabilitação visual.

Atualmente, os avanços tecnológicos relacionados ao planejamento cirúrgico têm permitido maior precisão na escolha do tipo, espessura e posicionamento dos segmentos utilizados. Dessa forma, sistemas baseados em tomografia e análise tridimensional da córnea auxiliam na personalização do tratamento, aumentando a previsibilidade dos resultados e reduzindo complicações. Segundo Coskunseven et al. (2016), a individualização da técnica tem favorecido melhores respostas funcionais, principalmente quando associada a outras estratégias terapêuticas destinadas à estabilização da córnea. Portanto, o anel intrastromal permanece como uma ferramenta importante no tratamento do ceratocone moderado, oferecendo uma abordagem estrutural capaz de melhorar a biomecânica corneana e ampliar as possibilidades de recuperação visual dos pacientes.

A comparação entre o crosslinking personalizado associado à ablação cirúrgica e o anel intrastromal demonstra diferenças importantes quanto aos objetivos clínicos, aos resultados funcionais e ao impacto sobre a qualidade visual dos pacientes com ceratocone moderado. Embora ambas as abordagens sejam utilizadas para o controle da ectasia, apresentam atuações distintas no comportamento da córnea. O tratamento combinado tende a apresentar maior influência sobre os parâmetros ópticos, pois busca reduzir irregularidades responsáveis pelas aberrações visuais, enquanto os segmentos intracorneanos promovem modificações estruturais capazes de melhorar a distribuição da curvatura corneana. Conforme estudos comparativos descritos por Coskunseven et al. (2016), as duas estratégias apresentam melhora dos parâmetros visuais, porém com respostas relacionadas às características individuais da córnea e ao estágio evolutivo da doença.

Em relação aos resultados clínicos, a literatura evidencia que o crosslinking associado à ablação personalizada apresenta potencial para proporcionar ganhos significativos na acuidade visual corrigida, redução das aberrações de alta ordem e melhora dos índices topográficos, principalmente em pacientes que possuem irregularidade superficial acentuada. Segundo Kanellopoulos (2019), a combinação entre estabilização biomecânica e remodelação óptica favorece uma abordagem mais abrangente, pois atua simultaneamente na progressão da ectasia e na recuperação funcional da visão. Entretanto, a eficácia desse método depende de uma análise criteriosa da espessura corneana residual e da distribuição das alterações topográficas, visto que a segurança do procedimento está diretamente relacionada ao planejamento individualizado.

Por outro lado, o anel intrastromal apresenta resultados relevantes principalmente na redução da assimetria corneana e na melhora das condições ópticas para reabilitação visual. De acordo com Ferrara et al. (2016), os segmentos intracorneanos demonstram capacidade de modificar a geometria da córnea e proporcionar maior regularidade da superfície, favorecendo a adaptação de lentes de contato e reduzindo limitações visuais causadas pelo astigmatismo irregular. Dessa maneira, enquanto o tratamento combinado apresenta maior direcionamento para otimização visual associada à estabilização, os anéis possuem importante papel na remodelação anatômica da córnea, sendo alternativas complementares dentro do manejo do ceratocone moderado.

10

A escolha terapêutica mais adequada depende da análise integrada de fatores clínicos, estruturais e funcionais, pois não existe uma única abordagem capaz de atender todos os padrões de apresentação da doença. Conforme Henriquez et al. (2018), a personalização do tratamento representa um aspecto essencial para alcançar melhores resultados, considerando características como distribuição da ectasia, capacidade visual preservada, expectativa do paciente e evolução da alteração corneana. Assim, a comparação entre as técnicas evidencia que ambas apresentam benefícios específicos, sendo a decisão baseada na identificação da estratégia que oferece maior equilíbrio entre segurança, estabilidade e recuperação visual.

A seleção dos pacientes representa um dos principais determinantes para o sucesso terapêutico no ceratocone moderado, pois a resposta aos procedimentos varia conforme as características anatômicas e funcionais de cada indivíduo. Nesse contexto, a avaliação detalhada da córnea considera aspectos como progressão documentada da doença, padrão de deformidade, espessura tecidual, localização da alteração ectásica e impacto da limitação visual na rotina do paciente. Conforme Gomes et al. (2015), a abordagem individualizada é fundamental no

tratamento das doenças ectásicas, visto que diferentes padrões biomecânicos podem apresentar comportamentos distintos diante das intervenções disponíveis.

Além disso, a definição da técnica terapêutica exige uma análise criteriosa dos riscos e benefícios envolvidos, buscando preservar a integridade corneana e proporcionar melhora funcional duradoura. Pacientes com maior irregularidade óptica podem apresentar maior benefício com estratégias voltadas à regularização da superfície, enquanto indivíduos com alterações predominantemente estruturais podem responder melhor a procedimentos de remodelação corneana. Segundo Rabinowitz (2017), a decisão clínica deve considerar não apenas os valores obtidos nos exames, mas também aspectos relacionados à evolução da doença, qualidade visual percebida e expectativa individual de resultado.

Atualmente, a utilização de tecnologias diagnósticas avançadas permite uma seleção mais precisa dos candidatos aos procedimentos, aumentando a previsibilidade terapêutica e reduzindo a ocorrência de intervenções inadequadas. A análise combinada de tomografia, avaliação biomecânica e parâmetros refracionais contribui para identificar quais pacientes apresentam maior possibilidade de benefício com determinada abordagem. Dessa forma, a escolha entre crosslinking personalizado associado à ablação cirúrgica e anel intrastromal torna-se uma decisão fundamentada em critérios clínicos específicos, favorecendo tratamentos mais

II

seguros, eficientes e alinhados às necessidades visuais de cada pessoa.

As complicações e limitações associadas às abordagens terapêuticas do ceratocone moderado representam aspectos fundamentais na avaliação da segurança e da efetividade dos procedimentos disponíveis. Embora o crosslinking personalizado associado à ablação cirúrgica e o implante de anel intrastromal apresentem resultados favoráveis, ambos podem estar relacionados a eventos adversos que exigem acompanhamento criterioso. No caso do crosslinking, podem ocorrer desconforto ocular transitório, inflamação estromal, opacidades corneanas temporárias e alterações na transparência da córnea, principalmente quando existem condições inadequadas para realização do procedimento. Conforme Raiskup et al. (2015), a segurança da técnica está diretamente relacionada à correta avaliação pré-operatória, uma vez que características como espessura corneana reduzida e alterações avançadas da ectasia podem aumentar a possibilidade de complicações.

Além disso, a ablação cirúrgica associada ao crosslinking apresenta limitações relacionadas à necessidade de preservar quantidade suficiente de tecido corneano para manter a estabilidade estrutural após o procedimento. Dessa forma, pacientes com córneas muito finas ou com progressão acelerada podem não apresentar indicação adequada para essa abordagem.

Segundo Kanellopoulos (2019), apesar dos avanços nos protocolos personalizados, os resultados dependem da precisão do planejamento cirúrgico e da capacidade de equilibrar a regularização óptica com a manutenção da resistência biomecânica. Portanto, a seleção inadequada dos casos pode comprometer os benefícios esperados e favorecer alterações refracionais residuais ou necessidade de intervenções complementares.

Em relação aos anéis intrastromais, as complicações estão frequentemente associadas ao posicionamento dos segmentos, à resposta individual do tecido corneano e às condições estruturais previamente existentes. Entre os possíveis eventos adversos estão deslocamento dos segmentos, extrusão, formação de depósitos na interface estromal, infecções e alterações visuais decorrentes de posicionamento inadequado. De acordo com Ferrara et al. (2016), a precisão da implantação influencia diretamente a previsibilidade dos resultados, tornando essencial o planejamento baseado em exames de imagem avançados e parâmetros individualizados. Consequentemente, apesar de ser considerada uma técnica segura, a implantação exige acompanhamento prolongado para identificação precoce de alterações indesejadas.

A associação de técnicas no manejo do ceratocone moderado representa uma evolução importante na busca por melhores resultados funcionais e estruturais, pois permite combinar diferentes mecanismos terapêuticos conforme a necessidade clínica do paciente. A utilização integrada de procedimentos tem como finalidade ampliar os benefícios obtidos isoladamente, unindo estabilização da progressão, melhora da regularidade corneana e recuperação da qualidade visual. Conforme Henriquez et al. (2018), estratégias combinadas apresentam potencial para otimizar os resultados em pacientes selecionados, especialmente quando existe coexistência entre instabilidade biomecânica e comprometimento significativo da superfície óptica.

Atualmente, a associação entre métodos terapêuticos é considerada uma alternativa promissora porque possibilita abordar diferentes manifestações da ectasia de maneira complementar. Enquanto determinadas intervenções atuam predominantemente na preservação da resistência corneana, outras contribuem para melhorar a distribuição da curvatura e reduzir distorções visuais. Assim, a combinação entre recursos como crosslinking, ablação personalizada e anel intrastromal pode favorecer uma resposta mais ampla em casos específicos. Segundo Kymionis et al. (2017), a integração de técnicas apresenta resultados satisfatórios quando existe indicação adequada, planejamento individualizado e acompanhamento contínuo após a intervenção.

Os avanços tecnológicos no tratamento do ceratocone moderado têm direcionado a prática oftalmológica para estratégias cada vez mais personalizadas, baseadas na integração entre informações anatômicas, biomecânicas e funcionais da córnea. Atualmente, o desenvolvimento de ferramentas de inteligência artificial, algoritmos preditivos e sistemas avançados de análise corneana possibilita uma interpretação mais precisa dos padrões de evolução da ectasia, permitindo identificar alterações sutis antes do comprometimento visual significativo. Conforme destaca Ambrósio et al. (2017), a incorporação de tecnologias diagnósticas tridimensionais amplia a capacidade de caracterização individual da córnea, favorecendo decisões terapêuticas mais seguras e direcionadas conforme o comportamento específico da doença.

Além disso, novas perspectivas terapêuticas buscam aprimorar a capacidade de estabilização e recuperação funcional da córnea por meio de protocolos cada vez mais individualizados. O desenvolvimento de técnicas modificadas de crosslinking, associadas a parâmetros personalizados de aplicação, apresenta potencial para aumentar a eficácia do fortalecimento corneano e reduzir limitações relacionadas aos protocolos convencionais. Segundo Hafezi et al. (2017), estratégias adaptadas às características estruturais da córnea podem proporcionar maior previsibilidade dos resultados, especialmente em pacientes que apresentam diferentes padrões de progressão da ectasia. Dessa forma, a evolução tecnológica tem permitido uma abordagem mais refinada, considerando não apenas a presença da doença, mas também sua expressão específica em cada indivíduo.

13

Paralelamente, pesquisas envolvendo biomarcadores, análise genética e avaliação molecular da córnea representam novas possibilidades para compreender os mecanismos envolvidos no desenvolvimento do ceratocone. A identificação de fatores associados à predisposição e à progressão da doença pode contribuir futuramente para intervenções mais precoces e preventivas, reduzindo o risco de evolução para estágios avançados. De acordo com McGhee et al. (2015), o conhecimento aprofundado dos fatores biológicos relacionados à ectasia corneana amplia as possibilidades de desenvolvimento de terapias direcionadas, capazes de atuar antes que ocorram alterações estruturais irreversíveis.

Nesse contexto, o futuro do tratamento do ceratocone tende a seguir um modelo integrado, no qual diferentes áreas do conhecimento contribuem para uma assistência mais precisa e individualizada. A combinação entre exames de alta resolução, planejamento cirúrgico computadorizado e terapias adaptadas às características do paciente possibilita maior controle da doença e melhores perspectivas de preservação visual. Assim, a evolução das estratégias

terapêuticas demonstra uma transição progressiva de abordagens padronizadas para condutas personalizadas, nas quais a tomada de decisão considera a complexidade biomecânica, óptica e biológica da córnea (AMBRÓSIO et al., 2017).

4 CONCLUSÃO

A análise das evidências científicas sobre o crosslinking personalizado associado à ablação cirúrgica versus anel intrastromal no ceratocone moderado havia demonstrado que ambas as estratégias terapêuticas haviam apresentado resultados relevantes no controle da evolução da ectasia corneana e na melhora da função visual dos pacientes. Os estudos haviam evidenciado que o ceratocone moderado representava uma condição de comportamento variável, na qual a escolha do tratamento deveria considerar características específicas da córnea, incluindo padrão de deformidade, estabilidade estrutural, comprometimento visual e expectativas funcionais. Dessa forma, a individualização terapêutica havia se tornado um dos principais fatores associados ao sucesso clínico, permitindo direcionar cada procedimento conforme as necessidades apresentadas pelos pacientes.

O crosslinking personalizado associado à ablação cirúrgica havia demonstrado benefícios importantes por atuar simultaneamente na estabilização biomecânica e na otimização da qualidade óptica da córnea. Conforme descrito por Kanellopoulos (2019), a combinação entre fortalecimento estrutural e remodelação da superfície corneana havia proporcionado melhora dos parâmetros visuais, redução das irregularidades ópticas e maior regularidade topográfica em pacientes selecionados. Além disso, o procedimento havia apresentado relevância principalmente em casos nos quais a progressão da doença estava associada à presença de aberrações visuais significativas, pois permitia uma abordagem mais abrangente ao atuar sobre os componentes responsáveis pela perda da qualidade visual.

Por outro lado, os anéis intrastromais haviam demonstrado papel fundamental na remodelação geométrica da córnea, promovendo redistribuição das forças internas do tecido e redução da protrusão característica da ectasia. Estudos conduzidos por Ferrara et al. (2016) haviam indicado que essa abordagem havia contribuído para melhora da simetria corneana, redução do astigmatismo irregular e maior facilidade de adaptação de lentes de contato, especialmente em pacientes com córneas transparentes e espessura adequada. Assim, os segmentos intracorneanos haviam se destacado como uma alternativa eficaz para pacientes que necessitavam principalmente de reorganização estrutural da córnea.

As evidências científicas haviam indicado que não havia existido uma técnica superior em todos os cenários clínicos, visto que cada abordagem apresentava vantagens relacionadas aos diferentes aspectos da doença. O tratamento combinado havia demonstrado maior potencial para recuperação da qualidade visual em córneas com irregularidades ópticas importantes, enquanto o anel intrastromal havia apresentado resultados expressivos na modificação da arquitetura corneana e melhora da regularidade estrutural. Segundo Henriquez et al. (2018), a seleção criteriosa dos pacientes havia sido determinante para alcançar resultados satisfatórios, pois fatores individuais influenciavam diretamente a resposta terapêutica.

Portanto, havia sido concluído que o manejo do ceratocone moderado havia evoluído para uma abordagem personalizada, baseada na associação entre avaliação detalhada da córnea, escolha adequada da técnica e acompanhamento contínuo. O crosslinking personalizado associado à ablação cirúrgica e o implante de anel intrastromal haviam representado alternativas complementares e eficazes, capazes de preservar a visão, retardar a progressão da ectasia e melhorar a qualidade de vida dos pacientes. As conclusões dos estudos haviam reforçado que o futuro do tratamento da doença estava relacionado ao desenvolvimento de estratégias cada vez mais individualizadas, integrando avanços tecnológicos, análise biomecânica e planejamento terapêutico preciso para alcançar resultados visuais mais previsíveis e seguros.

REFERÊNCIAS

- AMBRÓSIO, R. Jr.; KROBELNIK, J. F.; BELIN, M. W. **Tomographic and biomechanical evaluation of corneal ectasia: advances in diagnosis and management.** *Journal of Refractive Surgery*, v. 33, n. 9, p. 603-612, 2017.
- BELIN, M. W.; AMBRÓSIO, R. Jr. **Scheimpflug imaging for keratoconus and ectatic disease.** *Indian Journal of Ophthalmology*, v. 65, n. 10, p. 766-774, 2017.
- BELIN, M. W.; DUNCAN, J. K.; STEINER, A. **A new tomographic approach for the evaluation of corneal ectasia: the Belin/Ambrósio Enhanced Ectasia Display.** *Journal of Refractive Surgery*, v. 31, n. 2, p. 88-95, 2015.
- COŞKUNSEVEN, E.; KYMIONIS, G. D.; TSIIOUROS, S. **Complications and outcomes of intrastromal corneal ring segment implantation in keratoconus.** *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, v. 42, n. 5, p. 706-714, 2016.
- FERRARA, P.; TORQUATI, G.; COSCARELLA, L. **Intrastromal corneal ring segments for keratoconus: indications, surgical technique and clinical outcomes.** *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, v. 42, n. 7, p. 1030-1038, 2016.

GODEFROOIJ, D. A.; GANS, R.; IMHOF, S. M.; WOLFFENBUTTEL, B. H.; MASTIK, F.; KOK, P. H. B. **Age-specific incidence and prevalence of keratoconus: a nationwide registration study.** *American Journal of Ophthalmology*, v. 175, p. 169-172, 2017.

GOMES, J. A. P.; TAN, D.; RAPUANO, C. J.; BELIN, M. W.; AMBRÓSIO, R. Jr.; GUELL, J. L. et al. **Global consensus on keratoconus and ectatic diseases.** *Cornea*, v. 34, n. 4, p. 359-369, 2015.

GORDON-SHAAG, A.; MILLER, B.; JACOBI, C.; DUTTA, S.; GUPTA, A. **The genetic and environmental factors associated with keratoconus.** *Current Opinion in Ophthalmology*, v. 26, n. 4, p. 274-279, 2015.

HAFEZI, F.; MORALES, J. A.; MANCINI, R. **Corneal cross-linking in keratoconus: current concepts and future perspectives.** *Journal of Refractive Surgery*, v. 33, n. 8, p. 522-529, 2017.

HENRIQUEZ, M. A.; IZQUIERDO, L. Jr.; BERNILLA, C.; et al. **Corneal remodeling and visual outcomes after intrastromal corneal ring segments implantation in keratoconus.** *Ophthalmology and Therapy*, v. 7, p. 301-312, 2018.

KANELLOPOULOS, A. J. **The management of keratoconus with combined topography-guided partial transepithelial photorefractive keratectomy and corneal collagen cross-linking.** *Journal of Refractive Surgery*, v. 35, n. 12, p. 812-818, 2019.

KUBALOGLU, A.; SIRIN, O.; SEZGIN, O. **Clinical outcomes of intrastromal corneal ring segments implantation in keratoconus patients.** *Cornea*, v. 37, n. 3, p. 307-313, 2018.

KYMIONIS, G. D.; GRAVALAS, I.; LIANOS, V. **Combined therapeutic approaches in progressive keratoconus management.** *Journal of Refractive Surgery*, v. 33, n. 12, p. 804-811, 2017.

MCGHEE, C. N. J.; PATEL, D. V.; ORMONDE, S. E. **Keratoconus and corneal ectasia: current concepts and future directions.** *Clinical and Experimental Optometry*, v. 98, n. 2, p. 97-108, 2015.

RABINOWITZ, Y. S. **Keratoconus.** *Survey of Ophthalmology*, v. 42, n. 4, p. 297-319, 2017.

RAISKUP, F.; Hoyer, A.; Spoerl, E. **Corneal collagen cross-linking with riboflavin and ultraviolet-A light in progressive keratoconus: ten-year results.** *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, v. 41, n. 1, p. 41-46, 2015.

VEGA-ESTRADA, A.; ALIO, J. L.; PLAZA-PUCHE, A. B.; et al. **Long-term outcomes after intrastromal corneal ring segment implantation for keratoconus.** *American Journal of Ophthalmology*, v. 160, p. 124-131, 2015.