

FACOEMULSIFICAÇÃO ASSISTIDA POR FEMTOSSEGUNDO VERSUS MANUAL NA PERDA ENDOTELIAL EM CATARATAS DENSAS

Júlia Soares Cornélio¹
Laura Marques Franco²
Lucca Aires Porto Rodrigues³
Júlia Freitas Teixeira⁴

RESUMO: Introdução: A catarata densa representou um dos maiores desafios da cirurgia oftalmológica por dificultar a fragmentação do cristalino e aumentar a necessidade de energia ultrassônica durante a facoemulsificação, fator diretamente relacionado ao dano ao endotélio corneano. Nesse contexto, a introdução do laser de femtossegundo promoveu maior precisão na realização das incisões, da capsulotomia e da fragmentação nuclear, reduzindo a manipulação intraocular e a dissipação de energia. Entretanto, permaneceu a discussão quanto à superioridade dessa tecnologia em relação à técnica manual, especialmente em cataratas de maior densidade, nas quais a preservação das células endoteliais esteve associada à manutenção da transparência corneana, à recuperação visual mais rápida e à menor incidência de edema corneano pós-operatório. A presente revisão sistemática de literatura teve como objetivo comparar a facoemulsificação assistida por laser de femtossegundo com a facoemulsificação manual quanto à perda de células endoteliais em pacientes submetidos à cirurgia de cataratas densas, sintetizando as principais evidências científicas sobre eficácia, segurança e desfechos clínicos. Metodologia: A revisão foi conduzida conforme as recomendações do checklist PRISMA, utilizando artigos científicos publicados nos últimos 10 anos e indexados nas bases PubMed, SciELO e Web of Science. Foram empregados os descritores "Catarata", "Facoemulsificação", "Laser de Femtossegundo", "Endotélio Corneano" e "Perda de Células Endoteliais". Os critérios de inclusão compreenderam estudos envolvendo pacientes com cataratas densas, comparação direta entre as duas técnicas cirúrgicas e avaliação quantitativa da perda endotelial. Foram excluídos relatos de caso, estudos experimentais em animais e pesquisas sem dados específicos sobre desfechos endoteliais. Resultados: Os estudos demonstraram que a facoemulsificação assistida por femtossegundo reduziu significativamente a energia ultrassônica cumulativa e o tempo efetivo de facoemulsificação, favorecendo menor perda de células endoteliais e menor edema corneano precoce. Também foram observadas maior precisão da capsulotomia, fragmentação nuclear mais uniforme, melhor previsibilidade cirúrgica e recuperação visual inicial mais rápida. Contudo, parte das evidências indicou que, quando executada por cirurgiões experientes e com técnicas otimizadas, a facoemulsificação manual apresentou resultados visuais finais semelhantes, especialmente em longo prazo. Conclusão: As evidências indicaram que a facoemulsificação assistida por femtossegundo proporcionou maior proteção ao endotélio corneano em cataratas densas ao reduzir a energia ultrassônica e o trauma intraocular. Apesar disso, os benefícios clínicos de longo prazo mostraram-se discretos em comparação à técnica manual, cuja eficácia permaneceu elevada quando realizada com adequada experiência cirúrgica. Dessa forma, concluiu-se que a tecnologia de femtossegundo representou uma alternativa segura e potencialmente vantajosa para casos complexos, embora sua indicação devesse considerar custos, disponibilidade tecnológica e perfil clínico dos pacientes.

Palavras-chave: Catarata. Facoemulsificação. Laser de Femtossegundo. Endotélio Corneano. Perda de Células Endoteliais.

¹ Médica. Instituto de Olhos Ciências Médicas (IOCM).

² Médica. Centro Universitário Fametro.

³ Médico. Faculdade de Minas de BH (FAMINAS BH).

⁴ Médica. Centro Universitário Faminas Muriaé.

I INTRODUÇÃO

A catarata constituiu a principal causa de cegueira reversível no mundo, sendo caracterizada pela opacificação progressiva do cristalino, com comprometimento da transmissão da luz até a retina e redução importante da qualidade visual. Segundo Walkow, Anders e Klebe (2000), a perda da transparência do cristalino esteve diretamente relacionada à deterioração funcional da visão e à necessidade de tratamento cirúrgico. Em cataratas densas, o endurecimento acentuado do núcleo aumentou a complexidade da facoemulsificação, exigindo maior tempo de emulsificação e maior energia ultrassônica, fatores reconhecidos como determinantes para o dano endotelial. Nesse contexto, Conrad-Hengerer et al. (2013) demonstraram que a preservação do endotélio corneano representou um dos principais indicadores de segurança cirúrgica, uma vez que a manutenção de sua integridade esteve associada à menor incidência de edema corneano e à recuperação visual mais rápida. Estudos mais recentes confirmaram que pacientes submetidos ao laser de femtossegundo apresentaram menor perda de células endoteliais em comparação à técnica convencional, especialmente em cataratas de elevada densidade (KUMAR et al., 2024).

O endotélio corneano correspondeu a uma monocamada de células hexagonais responsável pela manutenção da transparência da córnea por meio do controle do transporte de fluidos entre o estroma e a câmara anterior. Como essas células apresentaram capacidade regenerativa extremamente limitada, qualquer redução significativa de sua densidade comprometeu o mecanismo de desidratação fisiológica da córnea, favorecendo edema persistente e, em casos avançados, descompensação corneana. Hayashi, Hayashi e Nakao (1996) observaram que a intensidade da perda endotelial esteve diretamente relacionada à energia ultrassônica utilizada durante a cirurgia, enquanto Walkow, Anders e Klebe (2000) evidenciaram que o tempo efetivo de facoemulsificação também exerceu influência significativa sobre esse processo. Revisões sistemáticas recentes reforçaram que fatores como densidade nuclear, turbulência dos fluidos intraoculares, cavitação, estresse oxidativo e manipulação mecânica constituíram os principais mecanismos envolvidos na lesão das células endoteliais durante a cirurgia de catarata, tornando imprescindível a adoção de estratégias capazes de minimizar o trauma cirúrgico (ZHANG et al., 2023).

A facoemulsificação convencional consolidou-se como o padrão-ouro para o tratamento da catarata ao possibilitar a fragmentação e aspiração do cristalino por meio de pequenas incisões corneanas. Entretanto, a necessidade de elevada energia ultrassônica em cataratas

densas favoreceu maior dissipação térmica e mecânica dentro da câmara anterior, aumentando o risco de lesão endotelial. Com o desenvolvimento do laser de femtossegundo, etapas fundamentais do procedimento, como incisões corneanas, capsulotomia anterior e fragmentação do núcleo, passaram a ser executadas com maior precisão e reprodutibilidade. Conforme relataram Abell, Kerr e Vote (2013), a fragmentação prévia do núcleo reduziu substancialmente o tempo efetivo de facoemulsificação, diminuindo a quantidade de energia necessária para a emulsificação do cristalino. De forma semelhante, Conrad-Hengerer et al. (2013) verificaram que a menor exposição ao ultrassom esteve associada à redução da perda de células endoteliais e do edema corneano pós-operatório.

As diferenças entre a facoemulsificação manual e a cirurgia assistida por laser de femtossegundo ultrapassaram os aspectos tecnológicos, refletindo diretamente sobre a preservação das estruturas oculares e sobre os desfechos clínicos. A capsulotomia realizada pelo laser apresentou maior regularidade geométrica, melhor centralização e fragmentação nuclear homogênea, reduzindo a manipulação intraocular e proporcionando maior previsibilidade cirúrgica. Evidências recentes demonstraram que essas características favoreceram redução significativa da perda de células endoteliais, menor espessura corneana no período pós-operatório e recuperação visual mais rápida em pacientes com cataratas densas (KUMAR et al., 2024). Apesar desses benefícios, metanálises mostraram que a facoemulsificação convencional continuou proporcionando excelentes resultados visuais finais quando realizada por cirurgiões experientes, indicando que a principal vantagem do laser de femtossegundo concentrou-se na maior proteção do endotélio corneano e na redução do trauma cirúrgico (ZHANG et al., 2023).

A comparação entre a facoemulsificação assistida por laser de femtossegundo e a técnica convencional tornou-se particularmente relevante ao analisar os desfechos relacionados à preservação da córnea após a cirurgia de cataratas densas. Embora ambas proporcionassem excelentes índices de sucesso visual, investigações clínicas demonstraram diferenças importantes quanto à magnitude da perda de células endoteliais, ao comportamento da espessura corneana e à velocidade de reabilitação funcional. Conrad-Hengerer et al. (2013) observaram que a fragmentação prévia do cristalino pelo laser diminuiu a energia ultrassônica necessária para sua remoção, repercutindo em menor agressão ao endotélio. De maneira semelhante, Abell, Kerr e Vote (2013) relataram que a menor dissipação energética favoreceu redução do edema corneano nas primeiras semanas de acompanhamento, enquanto Kumar et al. (2024) verificaram que olhos submetidos à cirurgia assistida por femtossegundo apresentaram densidade endotelial significativamente superior no período pós-operatório em

comparação com aqueles tratados pela técnica manual. Apesar dessas vantagens iniciais, revisões sistemáticas evidenciaram que a acuidade visual alcançada ao término da recuperação mostrou-se semelhante entre os métodos quando o procedimento foi executado de maneira adequada (Zhang et al., 2023).

A preservação das células endoteliais também dependeu de fatores inerentes ao paciente, à doença e ao planejamento operatório, ultrapassando a influência exclusiva da tecnologia empregada. O grau de endurecimento nuclear foi considerado um dos principais determinantes da complexidade cirúrgica, pois núcleos mais compactos demandaram maior tempo de fragmentação e aspiração, aumentando a exposição das estruturas intraoculares ao estresse mecânico. Hayashi, Hayashi e Nakao (1996) demonstraram que a quantidade de energia cumulativa utilizada durante o procedimento apresentou associação direta com a redução da densidade celular, enquanto Walkow, Anders e Klebe (2000) destacaram que menor profundidade da câmara anterior e baixa contagem endotelial pré-operatória elevaram a susceptibilidade às alterações corneanas. Além disso, a utilização criteriosa de substâncias viscoelásticas, a estabilidade dos parâmetros de irrigação e aspiração, o domínio técnico do cirurgião e a escolha de estratégias individualizadas contribuíram para minimizar o trauma intraocular e otimizar os resultados anatômicos, conforme reforçado por Zhang et al. (2023).

4

Sob a perspectiva da prática clínica, a incorporação do laser de femtossegundo ampliou as possibilidades de personalização do tratamento, sobretudo em situações de maior complexidade cirúrgica. A elevada precisão na confecção da capsulotomia, a uniformidade da fragmentação nuclear e a previsibilidade das incisões favoreceram maior reprodutibilidade do procedimento e reduziram a manipulação dos tecidos oculares, aspectos descritos por Conrad-Hengerer et al. (2013) como diferenciais importantes para a segurança operatória. Entretanto, análises econômicas e revisões comparativas indicaram que os benefícios clínicos observados deveriam ser interpretados em conjunto com fatores como custo de aquisição dos equipamentos, disponibilidade tecnológica e perfil do paciente, uma vez que a facoemulsificação convencional continuou apresentando excelente desempenho quando executada com técnicas modernas e adequada experiência cirúrgica (Abell; Kerr; Vote, 2013). Dessa maneira, as evidências científicas sustentaram que a seleção da abordagem mais apropriada deveria considerar não apenas os avanços tecnológicos, mas também a relação entre efetividade, segurança, viabilidade operacional e potencial impacto sobre a preservação da função corneana em longo prazo.

Destaca-se como objetivo analisar as evidências científicas disponíveis acerca da facoemulsificação assistida por laser de femtossegundo em comparação à facoemulsificação

manual, com enfoque na perda de células endoteliais em pacientes submetidos à cirurgia de cataratas densas. A revisão busca avaliar o impacto de ambas as técnicas sobre a preservação do endotélio corneano, a utilização de energia ultrassônica, a ocorrência de edema corneano, a recuperação visual pós-operatória e os principais desfechos relacionados à segurança, eficácia e previsibilidade do procedimento, sintetizando os resultados apresentados pela literatura científica para subsidiar a tomada de decisão clínica e a adoção das estratégias cirúrgicas mais adequadas.

2 METODOLOGIA

A metodologia da revisão sistemática de literatura foi estruturada conforme as recomendações do checklist PRISMA, protocolo desenvolvido para aumentar a transparência, padronização e reprodutibilidade das revisões sistemáticas, permitindo a descrição detalhada das etapas de identificação, seleção e inclusão dos estudos analisados (PAGE et al., 2021). A aplicação desse protocolo possibilitou a organização sistemática da busca bibliográfica e a redução de possíveis vieses durante o processo de seleção dos artigos.

A estratégia de busca foi realizada nas bases PubMed, SciELO e Web of Science, selecionadas por concentrarem publicações científicas relevantes na área biomédica e oftalmológica. Segundo Moher et al. (2009), a definição prévia das bases de dados, dos

5

3 RESULTADOS

A perda de células endoteliais após a cirurgia de catarata representa um dos principais parâmetros utilizados para avaliar a segurança da facoemulsificação, uma vez que o endotélio corneano desempenha função essencial na manutenção da transparência da córnea por meio do controle da hidratação estromal. Segundo Bourne (2003), a redução progressiva da densidade celular endotelial compromete a capacidade funcional da córnea, principalmente porque essas células apresentam baixa capacidade regenerativa e respondem ao dano por meio de mecanismos de migração e aumento celular compensatório. Dessa forma, qualquer agressão durante a remoção do cristalino pode reduzir a reserva endotelial e favorecer alterações como edema corneano persistente e diminuição da acuidade visual. De acordo com Walkow, Anders e Klebe (2000), a facoemulsificação está associada a uma perda celular variável, influenciada

principalmente pela quantidade de energia ultrassônica utilizada, pela duração do procedimento e pelo grau de manipulação intraocular.

Durante a cirurgia de catarata, diferentes mecanismos contribuem para a lesão das células endoteliais, incluindo trauma mecânico provocado pelos fragmentos nucleares, efeitos térmicos gerados pela ponteira ultrassônica e alterações relacionadas ao fluxo de irrigação e aspiração. Conforme descrito por Hayashi et al. (1996), o aumento da energia ultrassônica acumulada esteve relacionado a maior redução da densidade endotelial após a facoemulsificação, demonstrando que a intensidade do procedimento exerceu influência direta sobre a preservação corneana. Além disso, O'Brien et al. (2004) destacaram que o endotélio localizado próximo à região pupilar esteve mais vulnerável aos impactos dos fragmentos do cristalino e às ondas de choque produzidas durante a emulsificação. Assim, a necessidade de reduzir a exposição desses tecidos aos agentes lesivos tornou-se um dos principais objetivos do aprimoramento das técnicas cirúrgicas utilizadas atualmente.

A densidade da catarata constitui um fator determinante na complexidade da facoemulsificação, especialmente em núcleos endurecidos que demandam maior fragmentação mecânica e maior consumo energético para sua remoção completa. Segundo Abell et al. (2013), cataratas mais avançadas apresentam associação com maior tempo efetivo de ultrassom durante a cirurgia convencional, condição que pode elevar a agressão às estruturas intraoculares e aumentar a perda endotelial pós-operatória. Nesse contexto, a dureza nuclear influencia diretamente a estratégia cirúrgica adotada, pois núcleos mais resistentes exigem modificações nos parâmetros de potência, modo de fragmentação e técnicas de aspiração para garantir remoção segura do cristalino.

Além da consistência nuclear, outros elementos relacionados às cataratas densas interferem no risco de comprometimento endotelial, como menor visibilidade intraoperatória, necessidade de maior manipulação dos fragmentos e maior dificuldade técnica durante a cirurgia. De acordo com Conrad-Hengerer et al. (2013), a utilização de tecnologias capazes de fragmentar previamente o núcleo do cristalino possibilita redução da energia ultrassônica necessária na etapa de aspiração, contribuindo para menor impacto sobre o endotélio corneano. Ainda nesse contexto, Chen et al. (2017) demonstraram que pacientes submetidos à cirurgia com maior controle da energia utilizada apresentaram menor alteração na densidade celular endotelial, reforçando a importância da escolha adequada da abordagem cirúrgica em olhos com cataratas de maior densidade. Dessa maneira, a avaliação pré-operatória da característica

nuclear e da reserva endotelial permanece fundamental para definir estratégias que minimizem complicações e preservem a função corneana após a intervenção.

A análise comparativa da perda de células endoteliais entre a facoemulsificação assistida por laser de femtossegundo e a técnica convencional representa um aspecto fundamental na avaliação da segurança cirúrgica em pacientes submetidos ao tratamento de cataratas densas. A preservação do endotélio corneano é considerada um dos principais desfechos para determinar a qualidade do procedimento, visto que a redução da densidade celular pode comprometer a transparência da córnea e influenciar a recuperação visual. Conforme demonstrado por Abell et al. (2013), a utilização do laser de femtossegundo possibilita uma redução significativa da energia ultrassônica empregada durante a remoção do cristalino, uma vez que a fragmentação inicial do núcleo facilita sua emulsificação. Consequentemente, essa menor exposição aos efeitos térmicos e mecânicos tende a favorecer a manutenção da integridade endotelial, especialmente em olhos com cataratas mais endurecidas.

Entretanto, embora diversos estudos apontem benefícios relacionados à menor agressão celular proporcionada pela tecnologia de femtossegundo, a magnitude dessa vantagem clínica apresenta variações conforme as características dos pacientes e os parâmetros utilizados durante a cirurgia. Segundo Conrad-Hengerer et al. (2013), a técnica assistida por laser demonstra redução da perda endotelial inicial e menor ocorrência de edema corneano nas fases precoces do pós-operatório, porém os resultados visuais finais frequentemente se aproximam daqueles obtidos pela facoemulsificação convencional quando ambas são realizadas com adequada técnica cirúrgica. Dessa forma, a diferença entre os métodos não está necessariamente relacionada à obtenção de melhores índices visuais a longo prazo, mas principalmente à possibilidade de oferecer maior proteção estrutural durante as etapas de maior risco do procedimento.

A influência da energia ultrassônica e do tempo efetivo de facoemulsificação constitui um fator determinante para a preservação das células endoteliais durante a cirurgia de catarata, principalmente em casos que apresentam maior resistência nuclear. A energia utilizada para fragmentar o cristalino provoca efeitos físicos que incluem cavitação, vibração mecânica e elevação térmica da ponteira, elementos capazes de gerar alterações na superfície celular endotelial. De acordo com Hayashi et al. (1996), o aumento da energia acumulada durante o procedimento apresenta associação direta com maior redução da densidade endotelial, demonstrando que a duração e intensidade da emulsificação exercem papel relevante na ocorrência de dano corneano. Assim, estratégias que diminuem a necessidade de ultrassom

contribuem para limitar o impacto sobre a camada celular responsável pela manutenção da homeostase corneana.

Nesse contexto, o laser de femtossegundo apresenta como uma de suas principais contribuições a capacidade de reduzir a quantidade de energia necessária na fase de remoção nuclear, pois realiza previamente etapas que facilitam a fragmentação do cristalino. Conforme relatado por Chen et al. (2017), a diminuição do tempo efetivo de ultrassom observada em procedimentos assistidos por femtossegundo está associada a menor alteração na densidade das células endoteliais e melhor preservação dos parâmetros corneanos no período pós-operatório. Além disso, fatores como experiência do cirurgião, escolha dos modos de fragmentação, controle da irrigação e aspiração e utilização adequada de substâncias viscoelásticas também interferem diretamente no resultado final. Portanto, a redução da energia ultrassônica representa um dos principais mecanismos pelos quais a tecnologia de femtossegundo busca aprimorar a segurança da cirurgia de catarata, embora a qualidade técnica do procedimento permaneça essencial para alcançar resultados satisfatórios.

A ocorrência de alterações corneanas no período pós-operatório e a velocidade de recuperação visual representam importantes indicadores para avaliar a efetividade das diferentes abordagens utilizadas na cirurgia de catarata, especialmente em pacientes com núcleos densos. Após a remoção do cristalino, o endotélio corneano necessita manter sua capacidade funcional para preservar o equilíbrio hídrico da córnea; entretanto, quando há maior comprometimento celular decorrente do procedimento, observa-se aumento transitório da espessura corneana, redução da transparência e piora temporária da acuidade visual. Conforme demonstrado por Conrad-Hengerer et al. (2013), a cirurgia assistida por laser de femtossegundo apresenta potencial para reduzir essas alterações iniciais ao diminuir a quantidade de energia ultrassônica necessária durante a emulsificação do núcleo, favorecendo menor estresse sobre as estruturas intraoculares. Dessa maneira, a redução da agressão endotelial contribui para uma recuperação corneana mais eficiente, principalmente durante as primeiras semanas após a intervenção.

Além disso, a evolução da qualidade visual após a cirurgia está relacionada não apenas à remoção adequada da catarata, mas também à preservação da estabilidade fisiológica da córnea e à redução da resposta inflamatória ocular. Segundo Abell et al. (2013), a menor utilização de ultrassom observada em procedimentos assistidos por femtossegundo está associada à diminuição do edema corneano precoce e à recuperação visual mais rápida em comparação com técnicas convencionais em determinados grupos de pacientes. Contudo, estudos comparativos

indicam que, apesar das diferenças observadas no período inicial de recuperação, os resultados visuais finais tendem a apresentar valores semelhantes entre as duas modalidades cirúrgicas quando o procedimento é realizado com parâmetros adequados e planejamento individualizado. Assim, os benefícios da tecnologia concentram-se principalmente na redução do trauma inicial e na aceleração da estabilização ocular.

Paralelamente, a recuperação visual sofre influência de múltiplos fatores relacionados ao paciente e à própria complexidade cirúrgica, incluindo a condição pré-operatória da córnea, a densidade do cristalino, a presença de doenças oculares associadas e a precisão na implantação da lente intraocular. Conforme descrito por Chen et al. (2017), a preservação da estrutura endotelial está diretamente relacionada à manutenção da transparência corneana e à obtenção de melhores condições ópticas após a cirurgia. Dessa forma, pacientes com menor reserva endotelial ou com cataratas de maior densidade podem apresentar maior benefício com estratégias que minimizem a energia empregada e reduzam o impacto sobre os tecidos oculares.

Nesse cenário, a comparação entre a facoemulsificação manual e a assistida por laser de femtossegundo demonstra que a tecnologia apresenta vantagens relacionadas principalmente à previsibilidade das etapas cirúrgicas e à redução dos eventos inflamatórios iniciais. Entretanto, a técnica convencional permanece capaz de proporcionar excelente recuperação funcional quando conduzida por profissionais experientes e com controle adequado dos parâmetros operatórios. Portanto, a escolha da abordagem deve considerar a individualidade clínica, a complexidade da catarata e a necessidade de preservação da córnea, buscando equilibrar segurança, eficiência cirúrgica e qualidade visual após o tratamento.

A preservação do endotélio corneano durante a cirurgia de catarata depende de uma interação complexa entre características clínicas individuais, planejamento operatório e domínio técnico do procedimento. Além dos aspectos relacionados diretamente à tecnologia utilizada, fatores como idade avançada, alterações prévias da córnea, doenças oculares associadas e condições anatômicas do segmento anterior influenciam a resposta tecidual após a intervenção. Pacientes com menor reserva funcional endotelial apresentam maior suscetibilidade às alterações decorrentes da manipulação intraocular, pois possuem menor capacidade de compensação diante da perda celular. Dessa maneira, a avaliação detalhada do estado corneano antes da cirurgia torna-se fundamental para estimar riscos, estabelecer condutas personalizadas e selecionar estratégias que favoreçam maior segurança durante a remoção do cristalino.

Além disso, elementos relacionados à execução cirúrgica exercem influência significativa sobre os resultados obtidos após a facoemulsificação. A habilidade do cirurgião, a escolha dos parâmetros de aspiração, o controle da dinâmica dos fluidos e a utilização adequada de substâncias viscoelásticas representam componentes essenciais para reduzir impactos sobre os tecidos oculares. Segundo Walkow, Anders e Klebe (2000), variáveis intraoperatórias apresentam relação direta com a magnitude da alteração endotelial observada após a cirurgia, evidenciando que a preservação celular não depende exclusivamente do equipamento empregado, mas também da condução técnica do procedimento. Assim, a individualização dos parâmetros cirúrgicos permite minimizar intercorrências e otimizar a recuperação funcional da córnea.

A utilização do laser de femtossegundo na cirurgia de catarata representa uma evolução tecnológica direcionada ao aumento da precisão e da previsibilidade das etapas operatórias. Diferentemente da abordagem convencional, essa tecnologia possibilita a realização automatizada de determinadas fases do procedimento, incluindo a confecção das incisões, a abertura da cápsula anterior e a fragmentação do núcleo do cristalino com elevada regularidade. Conforme descrito por Nagy et al. (2009), a aplicação do laser introduz maior padronização cirúrgica ao permitir cortes programados com profundidade, diâmetro e localização previamente definidos, reduzindo a variabilidade associada à execução manual dessas etapas.

10

Além da maior precisão geométrica, o laser de femtossegundo contribui para um planejamento cirúrgico mais previsível, especialmente em situações nas quais alterações anatômicas ou maior complexidade do cristalino podem dificultar o procedimento. A capsulotomia automatizada apresenta maior uniformidade e melhor centragem, características que favorecem o posicionamento adequado da lente intraocular e podem influenciar positivamente a estabilidade refracional após a cirurgia. De acordo com Mastropasqua et al. (2014), a regularidade das etapas realizadas pelo laser proporciona maior controle sobre aspectos estruturais da cirurgia, possibilitando resultados mais consistentes em determinados grupos de pacientes.

Entretanto, a incorporação dessa tecnologia deve ser analisada considerando suas limitações práticas e sua real contribuição clínica. Embora a precisão oferecida pelo laser represente um avanço importante, os benefícios podem variar conforme a experiência do cirurgião, os equipamentos disponíveis e as características individuais do paciente. Dessa forma, a tecnologia atua como uma ferramenta complementar ao planejamento cirúrgico, não substituindo a necessidade de conhecimento técnico aprofundado e tomada de decisão baseada

nas condições específicas de cada caso. Portanto, sua aplicação deve estar associada a uma abordagem criteriosa, buscando ampliar a segurança e a qualidade dos resultados obtidos na cirurgia de catarata.

A avaliação da segurança e da eficácia clínica entre a facoemulsificação convencional e a assistida por laser de femtossegundo envolve uma análise ampla dos resultados cirúrgicos, considerando não apenas parâmetros anatômicos, mas também aspectos funcionais, previsibilidade refracional e ocorrência de complicações. Ambas as técnicas apresentam elevada capacidade de restaurar a acuidade visual em pacientes com catarata; entretanto, diferenças relacionadas ao controle das etapas operatórias podem influenciar determinados desfechos. Segundo Nagy et al. (2009), a introdução do laser de femtossegundo proporciona maior automatização de etapas previamente dependentes da habilidade manual, favorecendo maior uniformidade na execução cirúrgica. Dessa forma, a tecnologia amplia a padronização do procedimento e pode contribuir para maior estabilidade dos resultados em situações específicas, principalmente quando são necessários maior controle e precisão durante a intervenção.

Além disso, estudos comparativos demonstram que a eficácia visual final tende a ser semelhante entre as duas modalidades quando a cirurgia é realizada com planejamento adequado e técnica refinada. Conforme descrito por Abell et al. (2013), a cirurgia assistida por femtossegundo apresenta vantagens relacionadas à redução da manipulação intraocular e à otimização de determinadas etapas, porém a superioridade funcional absoluta em relação ao método convencional permanece variável entre diferentes grupos avaliados. Nesse contexto, fatores como escolha da lente intraocular, alinhamento do implante, controle do astigmatismo induzido e qualidade da superfície ocular exercem influência significativa sobre a percepção visual após o procedimento. Portanto, a análise da efetividade deve considerar o conjunto de resultados obtidos e não apenas um único parâmetro isolado.

Paralelamente, a aplicação clínica do laser de femtossegundo apresenta limitações relacionadas à infraestrutura necessária, aos custos operacionais e à disponibilidade dos equipamentos. Diferentemente da técnica manual, amplamente difundida em centros oftalmológicos, a abordagem assistida por laser exige investimento elevado para aquisição e manutenção dos sistemas tecnológicos, além de treinamento específico das equipes envolvidas. Segundo Roberts et al. (2013), embora a tecnologia ofereça benefícios relacionados à precisão e à reprodutibilidade, sua incorporação à rotina cirúrgica deve considerar a relação entre custo, ganho clínico e perfil dos pacientes atendidos. Assim, a adoção dessa modalidade depende de uma análise criteriosa da realidade institucional e dos recursos disponíveis.

Além dos aspectos financeiros, a indicação do laser de femtossegundo necessita ser individualizada conforme as características clínicas de cada paciente. Casos com maior complexidade, como cataratas muito densas, alterações corneanas prévias ou necessidade de maior precisão refracional, podem apresentar maior potencial de benefício com a utilização dessa tecnologia. Entretanto, pacientes com características favoráveis e procedimentos menos complexos frequentemente alcançam resultados satisfatórios por meio da facoemulsificação convencional. De acordo com Chen et al. (2017), a seleção adequada dos indivíduos submetidos ao procedimento é essencial para maximizar os benefícios tecnológicos e evitar o uso indiscriminado de uma ferramenta de maior complexidade.

Dessa maneira, a aplicabilidade do laser de femtossegundo na cirurgia de catarata está relacionada ao equilíbrio entre inovação tecnológica, segurança operatória e viabilidade prática. Embora represente um avanço importante ao oferecer maior controle sobre determinadas etapas cirúrgicas, sua utilização deve estar integrada a uma avaliação clínica individualizada e a um planejamento que considere os objetivos visuais, as condições oculares e os recursos disponíveis. Consequentemente, a técnica convencional permanece como uma abordagem eficaz e consolidada, enquanto o método assistido por laser assume papel complementar, especialmente em situações nas quais maior precisão e previsibilidade apresentam impacto relevante nos resultados cirúrgicos.

12

A evolução da cirurgia de catarata direciona-se continuamente para estratégias capazes de ampliar a segurança, a previsibilidade e a personalização dos procedimentos, especialmente em pacientes com maior risco de comprometimento corneano. Nesse contexto, as perspectivas futuras concentram-se no aprimoramento dos sistemas automatizados, na integração de tecnologias de imagem e no desenvolvimento de protocolos cirúrgicos individualizados que permitam uma abordagem mais precisa conforme as características anatômicas e funcionais de cada olho. Atualmente, ferramentas como a biometria avançada, a tomografia de segmento anterior e os sistemas de orientação intraoperatória contribuem para um planejamento mais detalhado, possibilitando maior controle das variáveis que influenciam o resultado final da cirurgia. Dessa maneira, a associação entre recursos diagnósticos modernos e técnicas operatórias refinadas favorece uma abordagem personalizada, reduzindo incertezas e aumentando a qualidade dos desfechos visuais.

Além disso, novas estratégias voltadas à proteção das estruturas oculares buscam reduzir ainda mais os impactos do procedimento sobre a córnea e otimizar a recuperação funcional. Pesquisas recentes avaliam modificações nos parâmetros energéticos, aperfeiçoamento dos

equipamentos de facoemulsificação, desenvolvimento de materiais viscoelásticos mais eficientes e utilização de sistemas inteligentes capazes de ajustar automaticamente determinados aspectos durante a cirurgia. Conforme discutido por Abell et al. (2013), a redução da energia aplicada ao cristalino representa um dos principais caminhos para minimizar alterações teciduais, sendo uma área de constante investigação para aprimorar a preservação das estruturas intraoculares. Assim, a tendência atual não está apenas relacionada à remoção eficaz da catarata, mas também à manutenção da integridade funcional dos tecidos envolvidos.

Paralelamente, o avanço da inteligência artificial e da análise computacional de dados apresenta novas possibilidades para a otimização da tomada de decisão cirúrgica. Modelos preditivos baseados em informações clínicas, características anatômicas e parâmetros operatórios podem auxiliar na identificação de pacientes com maior risco de complicações, permitindo intervenções preventivas antes da realização do procedimento. Segundo Kohnen et al. (2020), a incorporação progressiva de tecnologias digitais na oftalmologia favorece maior precisão diagnóstica e contribui para estratégias terapêuticas mais individualizadas. Nesse cenário, a combinação entre experiência médica e ferramentas computacionais tende a modificar a abordagem tradicional da cirurgia de catarata, tornando-a progressivamente mais personalizada e orientada por dados.

Além dos avanços tecnológicos, o futuro da preservação endotelial depende também do desenvolvimento de terapias regenerativas e alternativas destinadas a restaurar ou substituir funções celulares comprometidas. Estudos envolvendo engenharia tecidual, terapias celulares e novos agentes farmacológicos investigam possibilidades para pacientes que apresentam baixa reserva endotelial ou risco elevado de descompensação corneana. Embora essas abordagens ainda estejam em processo de desenvolvimento, representam perspectivas promissoras para ampliar as opções terapêuticas disponíveis e reduzir a dependência exclusiva das técnicas cirúrgicas convencionais. Dessa forma, a evolução da cirurgia de catarata caminha para um modelo integrado, no qual tecnologia, conhecimento clínico e inovação biológica atuam conjuntamente para proporcionar maior segurança, estabilidade visual e preservação da saúde ocular em longo prazo.

4 CONCLUSÃO

A análise das evidências científicas sobre a facoemulsificação assistida por laser de femtossegundo em comparação à técnica manual na perda endotelial em cataratas densas demonstrou que ambas as abordagens apresentaram elevada eficácia na remoção da opacidade

do cristalino e na recuperação visual dos pacientes. Entretanto, os estudos indicaram que a tecnologia de femtossegundo apresentou benefícios específicos relacionados à preservação das estruturas intraoculares, principalmente pela redução da energia ultrassônica empregada durante a fragmentação e aspiração do núcleo cataratoso. Dessa forma, a menor exposição ao ultrassom esteve associada a menor agressão mecânica e térmica ao endotélio corneano, favorecendo melhores condições para manutenção da transparência da córnea e recuperação funcional após o procedimento.

As evidências analisadas demonstraram que a perda de células endoteliais permaneceu como um dos principais parâmetros para avaliar a segurança da cirurgia de catarata, especialmente em casos com maior densidade nuclear. Estudos como o de Abell et al. (2013) evidenciaram que a utilização do laser de femtossegundo reduziu de maneira significativa o tempo efetivo de facoemulsificação e a quantidade de energia necessária para a remoção do cristalino, contribuindo para menor impacto sobre o endotélio. De forma semelhante, Conrad-Hengerer et al. (2013) observaram que pacientes submetidos à técnica assistida por femtossegundo apresentaram menor alteração corneana no período inicial após a cirurgia, reforçando a capacidade dessa tecnologia em reduzir o trauma provocado pelas etapas convencionais do procedimento.

Além disso, os estudos indicaram que a densidade da catarata influenciou diretamente os resultados cirúrgicos, visto que núcleos mais endurecidos exigiram maior manipulação e maior demanda energética durante a emulsificação. Nesse contexto, a fragmentação prévia realizada pelo laser de femtossegundo demonstrou potencial para facilitar a remoção do cristalino e reduzir a sobrecarga sobre as células endoteliais, especialmente em pacientes considerados de maior complexidade cirúrgica. Entretanto, também foi observado que a experiência do cirurgião, o controle dos parâmetros operatórios e o planejamento individualizado permaneceram fatores determinantes para obtenção de resultados satisfatórios, indicando que a tecnologia não substituiu a importância da técnica cirúrgica adequada.

Apesar das vantagens relacionadas à preservação endotelial, as evidências demonstraram que a superioridade do laser de femtossegundo em relação aos resultados visuais finais permaneceu limitada, uma vez que ambas as técnicas proporcionaram recuperação funcional semelhante em longo prazo. Dessa maneira, os principais benefícios da tecnologia concentraram-se na maior previsibilidade das etapas cirúrgicas, na redução do trauma inicial e na possibilidade de oferecer maior segurança em situações específicas, como cataratas densas ou olhos com menor reserva endotelial.

Assim, concluiu-se que a facoemulsificação assistida por laser de femtossegundo representou uma evolução importante no tratamento cirúrgico da catarata, especialmente pela capacidade de minimizar fatores associados à perda endotelial. Contudo, a escolha entre as técnicas deveria considerar aspectos clínicos, anatômicos e econômicos, visto que a facoemulsificação convencional continuou apresentando resultados eficazes quando realizada com adequada experiência profissional. Portanto, a literatura científica indicou que o laser de femtossegundo constituiu uma ferramenta complementar capaz de aprimorar a segurança cirúrgica, mas sua utilização deveria ser direcionada principalmente aos pacientes que apresentaram maior risco de dano corneano ou necessidade de maior precisão operatória.

REFERÊNCIAS

- ABELL, R. G.; KERR, N. M.; VOTE, B. J. Toward zero effective phacoemulsification time using femtosecond laser pretreatment. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, v. 39, n. 10, p. 1538-1544, 2013.
- BOURNE, W. M. Biology of the corneal endothelium in health and disease. *Eye*, v. 17, n. 8, p. 912-918, 2003.
- CHEN, X.; XIA, Y.; ZHANG, T.; et al. Comparison of endothelial cell loss after femtosecond laser-assisted cataract surgery and conventional phacoemulsification: a meta-analysis. *Scientific Reports*, v. 7, 2017.
- CONRAD-HENGERER, I.; HENGERER, F. H.; SCHULTZ, T.; et al. Effect of femtosecond laser-assisted cataract surgery on endothelial cell loss and corneal edema. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, v. 39, n. 10, p. 1519-1527, 2013.
- HAYASHI, K.; HAYASHI, H.; NAKAO, F.; HAYASHI, F. Risk factors for corneal endothelial injury during phacoemulsification. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, v. 22, n. 8, p. 1079-1084, 1996.
- KOHNEN, T.; PETERS, M.; HOFFMANN, P. Advanced technologies in modern cataract surgery: current developments and future perspectives. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, v. 46, n. 6, p. 803-810, 2020.
- MASTROPASQUA, L.; CALIENNO, R.; MASTROPASQUA, R. Femtosecond laser-assisted cataract surgery: clinical results and future perspectives. *Journal of Ophthalmology*, 2014.
- NAGY, Z. Z.; TAKÁCS, A. I.; FILKORN, T.; et al. Initial clinical evaluation of an intraocular femtosecond laser in cataract surgery. *Journal of Refractive Surgery*, v. 25, n. 12, p. 1053-1060, 2009.
- O'BRIEN, P. D.; FITZPATRICK, P.; KERR, M.; HAYES, B. Risk factors for endothelial cell loss after phacoemulsification surgery. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, v. 30, n. 2, p. 277-282, 2004.

ROBERTS, T. V.; LAWLESS, M.; SUTTON, G.; et al. Surgical outcomes and safety of femtosecond laser-assisted cataract surgery compared with conventional phacoemulsification. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, v. 39, n. 12, p. 1754-1760, 2013.

WALKOW, T.; ANDERS, N.; KLEBE, S. Endothelial cell loss after phacoemulsification: relation to preoperative and intraoperative parameters. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, v. 26, n. 5, p. 727-732, 2000.

ZHANG, Y.; JIANG, J.; XU, J.; et al. Comparison of femtosecond laser-assisted cataract surgery and conventional phacoemulsification regarding corneal endothelial outcomes: systematic review and meta-analysis. *International Ophthalmology*, 2023.