RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 09/12/2025 | aceito: 12/12/2025 | publicação: 15/12/2025

Planejamento cirúrgico virtual em cirurgia e traumatologia bucomaxilofacial: evolução, aplicações clínicas e integração da inteligência artificial

Virtual surgical planning in oral and maxillofacial surgery: evolution, clinical applications and the integration of artificial intelligence

Planificación quirúrgica virtual en cirugía oral y maxilofacial y traumatología: evolución, aplicaciones clínicas e integración de la inteligencia artificial

Eduardo Franco Sansevero

- Cirurgião-Dentista pela Universidade de Santo Amaro (1999);
- Especialista em Cirurgia e Traumatologia Bucomaxilofacial pela Universidade de São Paulo (2004-2006).
- Mais de 20 anos de experiência clínica e docente, com mais de 3.000 cirurgias de implantes osseointegrados e reconstruções complexas documentadas.

Resumo

A incorporação das tecnologias digitais modificou profundamente o planejamento e a execução dos procedimentos em Cirurgia e Traumatologia Bucomaxilofacial. A associação entre tomografia computadorizada, planejamento cirúrgico virtual, sistemas CAD/CAM, manufatura aditiva e, mais recentemente, ferramentas baseadas em inteligência artificial, ampliou a capacidade de individualização do tratamento e favoreceu maior previsibilidade em diferentes abordagens cirúrgicas. Essas tecnologias passaram a desempenhar papel relevante no manejo de deformidades dento faciais, traumatismos complexos, reconstruções craniofaciais e reabilitações implanto suportadas, permitindo integrar dados anatômicos, funcionais e protéticos em um único fluxo digital. Embora os avanços tecnológicos sejam evidentes, sua incorporação à prática clínica deve ser analisada de forma crítica. Grande parte das evidências disponíveis demonstra benefícios relacionados à precisão do planejamento, à reprodutibilidade dos procedimentos e à redução de etapas intraoperatórias. Entretanto, persistem desafios associados à validação clínica dos algoritmos de inteligência artificial, à padronização metodológica dos estudos, aos custos de implementação e à necessidade de treinamento especializado das equipes.

O presente artigo apresenta uma revisão narrativa sobre a evolução do planejamento cirúrgico virtual em Cirurgia e Traumatologia Bucomaxilofacial, discutindo os fundamentos tecnológicos que sustentam sua aplicação clínica, as principais evidências disponíveis na literatura e o papel emergente da inteligência artificial como ferramenta de apoio ao planejamento cirúrgico. Também são abordadas as limitações atuais dessas tecnologias, seus aspectos éticos e regulatórios e as perspectivas para sua incorporação progressiva à prática assistencial baseada em evidências.

Palavras-chave: Cirurgia e Traumatologia Bucomaxilofacial. Planejamento cirúrgico virtual. Inteligência artificial. CAD/CAM. Impressão tridimensional.

Abstract

The incorporation of digital technologies has profoundly transformed planning and execution in Oral and Maxillofacial Surgery. The integration of computed tomography, virtual surgical planning, CAD/CAM systems, additive manufacturing, and more recently artificial intelligence-based tools has improved treatment individualization and enhanced predictability across a wide range of surgical procedures. These technologies have become increasingly relevant in the management of dentofacial deformities, complex facial trauma, craniofacial reconstruction, and implant-supported rehabilitation by integrating anatomical, functional, and prosthetic information into a unified digital workflow.

Despite these advances, the clinical adoption of digital technologies requires critical evaluation. Current evidence consistently demonstrates improvements in planning accuracy, surgical reproducibility, and optimization of intraoperative workflow. However, important challenges remain regarding external validation of artificial intelligence algorithms, methodological heterogeneity

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 09/12/2025 | aceito: 12/12/2025 | publicação: 15/12/2025

among published studies, implementation costs, and the need for specialized professional training. This narrative review discusses the evolution of virtual surgical planning in Oral and Maxillofacial Surgery, emphasizing its technological foundations, current clinical applications, scientific evidence, and the emerging role of artificial intelligence as a decision-support tool. Current limitations, ethical considerations, and future perspectives for evidence-based clinical implementation are also discussed.
Keywords: Oral and Maxillofacial Surgery. Virtual Surgical Planning. Artificial Intelligence. CAD/CAM. Three-dimensional Printing.

1 INTRODUÇÃO

A transformação digital observada nas ciências da saúde nas últimas décadas modificou de forma significativa o planejamento e a execução de procedimentos cirúrgicos de elevada complexidade. Em Cirurgia e Traumatologia Bucomaxilofacial, essa evolução foi impulsionada principalmente pelo desenvolvimento de métodos avançados de aquisição de imagens, softwares de reconstrução tridimensional, sistemas de desenho assistido por computador (*Computer-Aided Design – CAD*), manufatura assistida por computador (*Computer-Aided Manufacturing – CAM*) e tecnologias de manufatura aditiva. A integração desses recursos permitiu substituir parte dos métodos convencionais de planejamento por fluxos digitais capazes de representar com maior fidelidade a anatomia do paciente e antecipar diferentes etapas do procedimento cirúrgico (MILORO et al., 2022; FONSECA, 2018).

Durante grande parte do século XX, o planejamento cirúrgico em Cirurgia e Traumatologia Bucomaxilofacial baseava-se em radiografias bidimensionais, modelos de gesso, traçados cefalométricos e avaliação clínica. Embora esses métodos tenham contribuído decisivamente para a consolidação da especialidade, apresentavam limitações relacionadas à representação tridimensional das estruturas craniofaciais, sobretudo em casos que envolviam deformidades dentoesqueléticas complexas, reconstruções mandibulares extensas e traumatismos faciais de alta energia (ELLIS III; GHALI; LARSEN; WAITE, 2012; FONSECA, 2018).

A introdução da tomografia computadorizada e, posteriormente, da tomografia computadorizada de feixe cônico (*Cone Beam Computed Tomography – CBCT*), representou um marco importante nesse processo evolutivo. A possibilidade de reconstrução tridimensional das estruturas ósseas favoreceu maior compreensão da anatomia individual dos pacientes e criou as bases para o desenvolvimento do planejamento cirúrgico virtual (*Virtual Surgical Planning – VSP*), atualmente empregado em diferentes áreas da especialidade, incluindo cirurgia ortognática, traumatologia facial, reconstrução craniofacial, implantodontia avançada e cirurgia reconstrutiva microvascularizada (JOACHIM; MILORO, 2025).

Nos últimos anos, a incorporação da inteligência artificial passou a ampliar as possibilidades do fluxo

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 09/12/2025 | aceito: 12/12/2025 | publicação: 15/12/2025

digital. Algoritmos de aprendizado de máquina e aprendizado profundo vêm sendo utilizados para automatizar a segmentação de imagens, identificar estruturas anatômicas, auxiliar na elaboração de modelos tridimensionais e otimizar etapas do planejamento pré-operatório. Embora essas aplicações apresentem resultados promissores, a literatura demonstra que sua utilização clínica ainda depende de validação científica robusta, especialmente quanto à reprodutibilidade, à generalização dos algoritmos e ao impacto sobre desfechos clínicos relevantes (DANG et al., 2025).

Diferentemente de interpretações frequentemente difundidas em publicações de caráter tecnológico, a inteligência artificial não representa uma substituição do julgamento clínico. Seu papel atual concentra-se no apoio à tomada de decisão, automatizando tarefas repetitivas e ampliando a eficiência do processamento de informações. A definição da estratégia cirúrgica, a interpretação das características anatômicas e a condução do tratamento permanecem sob responsabilidade do cirurgião, cuja experiência continua sendo determinante para a obtenção de resultados previsíveis e biologicamente seguros (JOACHIM; MILORO, 2025).

Nesse contexto, compreender a evolução do planejamento cirúrgico virtual e analisar criticamente a inserção da inteligência artificial na Cirurgia e Traumatologia Bucomaxilofacial torna-se relevante não apenas para acompanhar o avanço tecnológico da especialidade, mas também para estabelecer limites claros entre aplicações consolidadas, tecnologias emergentes e perspectivas futuras sustentadas pela medicina baseada em evidências.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Evolução do planejamento cirúrgico virtual em Cirurgia e Traumatologia Bucomaxilofacial

O planejamento cirúrgico constitui uma das etapas determinantes para o sucesso dos procedimentos em Cirurgia e Traumatologia Bucomaxilofacial. A previsibilidade do tratamento depende da correta interpretação da anatomia craniofacial, da identificação das alterações estruturais e da definição da estratégia operatória mais adequada para cada paciente. Historicamente, essas decisões eram fundamentadas na avaliação clínica, em radiografias bidimensionais, em modelos de gesso e em análises cefalométricas, recursos que sustentaram o desenvolvimento da especialidade durante décadas, mas que apresentavam limitações importantes para representação de estruturas tridimensionais complexas (FONSECA, 2018; MILORO et al., 2022).

A introdução da tomografia computadorizada representou um dos principais marcos tecnológicos da especialidade ao permitir a visualização volumétrica das estruturas craniofaciais. Posteriormente, a consolidação da tomografia computadorizada de feixe cônico (CBCT) ampliou significativamente

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 09/12/2025 | aceito: 12/12/2025 | publicação: 15/12/2025

sua utilização na prática clínica, sobretudo em razão da elevada resolução espacial para estruturas ósseas, menor dose de radiação quando comparada à tomografia médica convencional em determinadas indicações e maior acessibilidade aos serviços odontológicos especializados. Essas características favoreceram a obtenção de imagens tridimensionais de alta qualidade, essenciais para o desenvolvimento do planejamento cirúrgico virtual (SCARFE; FARMAN, 2008).

A evolução dos sistemas de desenho assistido por computador (Computer-Aided Design – CAD) e manufatura assistida por computador (Computer-Aided Manufacturing – CAM) permitiu que as informações obtidas por meio da tomografia fossem incorporadas a ambientes digitais capazes de reproduzir, com elevada fidelidade, a anatomia individual do paciente. A partir desse fluxo, tornou-se possível realizar simulações tridimensionais, definir osteotomias, posicionar segmentos ósseos, adaptar sistemas de fixação e confeccionar biomodelos anatômicos e guias cirúrgicos personalizados antes da realização do procedimento operatório (MILORO et al., 2022).

Esse processo modificou substancialmente o planejamento de diferentes procedimentos da especialidade. Em cirurgia ortognática, a integração entre tomografia computadorizada, escaneamento intraoral e planejamento virtual reduziu limitações inerentes aos métodos convencionais baseados em articuladores e montagem manual de modelos. Na reconstrução mandibular, a possibilidade de simular previamente osteotomias da fíbula, adaptar placas de reconstrução e confeccionar guias de corte individualizados ampliou a precisão do procedimento e reduziu a necessidade de adaptações intraoperatórias. De forma semelhante, na traumatologia facial, a reconstrução tridimensional permitiu melhor compreensão das linhas de fratura, do posicionamento dos fragmentos ósseos e da relação entre estruturas anatômicas adjacentes (JOACHIM; MILORO, 2025).

Embora frequentemente associado às tecnologias digitais mais recentes, o conceito de planejamento cirúrgico virtual deve ser compreendido como resultado de uma evolução progressiva da própria cirurgia bucomaxilofacial. Sua consolidação não decorre exclusivamente do desenvolvimento de novos softwares, mas da integração entre métodos avançados de diagnóstico por imagem, processamento computacional, engenharia biomédica e conhecimento anatômico acumulado ao longo de décadas de evolução da especialidade. Nesse contexto, o ambiente digital tornou-se uma extensão do planejamento cirúrgico tradicional, oferecendo maior capacidade de análise sem substituir os princípios biológicos e cirúrgicos que fundamentam a prática clínica.

Os avanços observados nos últimos anos também favoreceram a expansão da manufatura aditiva na Cirurgia e Traumatologia Bucomaxilofacial. Biomodelos tridimensionais passaram a ser utilizados para estudo anatômico, treinamento de equipes, planejamento reconstrutivo e comunicação com pacientes. Paralelamente, guias cirúrgicos personalizados e implantes específicos para cada paciente

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.
Ano VI, v.2 2025 | submissão: 09/12/2025 | aceito: 12/12/2025 | publicação: 15/12/2025

(*patient-specific implants* – PSI) ampliaram a precisão da transferência do planejamento virtual para o campo operatório, reduzindo discrepâncias entre a simulação pré-operatória e a execução cirúrgica (MARTELLI JÚNIOR; MARTELLI, 2011; JOACHIM; MILORO, 2025).

Apesar desses avanços, a literatura demonstra que os benefícios do planejamento cirúrgico virtual variam conforme a indicação clínica. As evidências mais robustas concentram-se na cirurgia ortognática, na reconstrução mandibular micro vascularizada e em procedimentos reconstrutivos complexos. Em outras aplicações, embora os resultados iniciais sejam promissores, ainda existe necessidade de estudos prospectivos multicêntricos que permitam padronizar protocolos e avaliar desfechos clínicos de longo prazo (JOACHIM; MILORO, 2025).

2.2 Fundamentos do fluxo digital: CAD/CAM, impressão tridimensional e biomodelos

O planejamento cirúrgico virtual está fundamentado na integração de diferentes tecnologias digitais que atuam de maneira complementar. Entre elas, os sistemas CAD/CAM constituem a base para aquisição, processamento e conversão das imagens médicas em modelos tridimensionais capazes de representar, com elevada precisão, a anatomia craniofacial do paciente. Inicialmente desenvolvidos para aplicações industriais, esses sistemas passaram a ser incorporados à área da saúde a partir da década de 1990, acompanhando a evolução dos métodos de diagnóstico por imagem e da capacidade computacional disponível para processamento de arquivos tridimensionais.

No fluxo digital contemporâneo, as imagens obtidas por tomografia computadorizada ou CBCT são convertidas em modelos digitais por meio de softwares específicos de segmentação. Essa etapa permite isolar estruturas anatômicas de interesse, reconstruir superfícies tridimensionais e realizar medições com elevado grau de precisão. A partir dessas informações, o cirurgião pode simular osteotomias, reposicionar segmentos ósseos, planejar reconstruções e avaliar diferentes estratégias operatórias antes da realização da cirurgia.

A manufatura aditiva representa a etapa seguinte desse processo. Diferentemente dos métodos convencionais de usinagem, nos quais o material é removido progressivamente, a impressão tridimensional baseia-se na deposição sucessiva de camadas, permitindo produzir biomodelos anatômicos, guias cirúrgicos e componentes personalizados diretamente a partir do planejamento digital. Essa tecnologia reduziu significativamente o intervalo entre o planejamento virtual e sua aplicação clínica, tornando possível reproduzir com elevada fidelidade estruturas anatômicas complexas (MARTELLI JÚNIOR; MARTELLI, 2011).

Além de sua aplicação direta no planejamento cirúrgico, os biomodelos tridimensionais passaram a desempenhar papel relevante no ensino, na comunicação entre equipes multiprofissionais e na

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 09/12/2025 | aceito: 12/12/2025 | publicação: 15/12/2025

orientação dos pacientes. A possibilidade de manipular réplicas físicas das estruturas craniofaciais facilita a compreensão da anatomia individual, favorece o planejamento interdisciplinar e contribui para maior previsibilidade em procedimentos de elevada complexidade.

Embora o desenvolvimento dessas tecnologias tenha ampliado significativamente as possibilidades terapêuticas da especialidade, sua efetividade permanece diretamente relacionada à qualidade das imagens adquiridas, à precisão dos processos de segmentação e à correta interpretação clínica realizada pelo cirurgião. Assim, o fluxo digital deve ser compreendido como ferramenta de apoio ao planejamento, cuja eficiência depende da integração entre recursos tecnológicos e experiência profissional, e não como um processo automatizado independente do julgamento clínico.

2.3 Inteligência artificial aplicada ao planejamento cirúrgico

A incorporação da inteligência artificial (IA) ao planejamento cirúrgico representa uma evolução natural do fluxo digital desenvolvido nas últimas décadas em Cirurgia e Traumatologia Bucomaxilofacial. Diferentemente da tomografia computadorizada, da reconstrução tridimensional ou dos sistemas CAD/CAM, que introduziram novas formas de aquisição e manipulação das imagens, a IA passou a atuar sobre os dados já disponíveis, automatizando processos analíticos, reduzindo etapas operacionais e oferecendo suporte à tomada de decisão clínica (DANG et al., 2025).

No contexto da saúde, a inteligência artificial compreende um conjunto de métodos computacionais capazes de executar tarefas tradicionalmente dependentes da interpretação humana, incluindo reconhecimento de padrões, classificação de imagens, segmentação anatômica e construção de modelos preditivos. Entre suas diferentes abordagens, o aprendizado de máquina (*machine learning*) e, mais recentemente, o aprendizado profundo (*deep learning*) tornaram-se as técnicas mais empregadas nas pesquisas em cirurgia bucomaxilofacial, principalmente pela elevada capacidade de processar grandes volumes de imagens médicas e identificar relações complexas entre variáveis anatômicas (TOPOL, 2019).

O aprendizado de máquina baseia-se no treinamento de algoritmos a partir de conjuntos de dados previamente rotulados, permitindo que o sistema identifique padrões estatísticos e realize previsões sem necessidade de programação específica para cada situação. O aprendizado profundo, por sua vez, utiliza redes neurais artificiais compostas por múltiplas camadas de processamento, capazes de extrair automaticamente características relevantes das imagens durante o processo de treinamento. Essa arquitetura reduziu significativamente a dependência da seleção manual de atributos e ampliou o desempenho dos algoritmos em tarefas relacionadas ao diagnóstico por imagem (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016).

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.
Ano VI, v.2 2025 | submissão: 09/12/2025 | aceito: 12/12/2025 | publicação: 15/12/2025

Na Cirurgia e Traumatologia Bucomaxilofacial, as aplicações mais estudadas concentram-se na segmentação automática de estruturas anatômicas em exames de tomografia computadorizada e tomografia computadorizada de feixe cônico. A identificação precisa da mandíbula, maxila, canal mandibular, côndilos, órbitas, dentes impactados e estruturas dentárias representa etapa fundamental para o planejamento cirúrgico virtual, especialmente em procedimentos reconstrutivos, cirurgia ortognática e implantodontia. Tradicionalmente, essa segmentação era realizada manualmente ou por métodos semiautomatizados, demandando tempo considerável do profissional e elevada variabilidade entre observadores. Modelos baseados em aprendizado profundo passaram a demonstrar desempenho consistente na automatização dessas tarefas, reduzindo o tempo necessário para processamento das imagens e aumentando a padronização do fluxo digital (DANG et al., 2025).

Outra aplicação crescente refere-se ao apoio ao diagnóstico e à classificação de alterações craniofaciais. Estudos recentes descrevem o emprego de algoritmos capazes de identificar fraturas mandibulares, localizar terceiros molares inclusos, detectar lesões ósseas e reconhecer alterações da articulação temporomandibular a partir de exames radiográficos e tomográficos. Embora esses resultados sejam promissores, a maior parte das investigações permanece restrita a estudos retrospectivos conduzidos em bases de dados específicas, ainda existindo escassez de validações prospectivas multicêntricas que permitam confirmar sua aplicabilidade clínica em diferentes populações (DANG et al., 2025).

No planejamento cirúrgico propriamente dito, a inteligência artificial também vem sendo utilizada para automatizar etapas tradicionalmente executadas pelo cirurgião. Sistemas experimentais são capazes de sugerir linhas de osteotomia, auxiliar no reposicionamento virtual de segmentos ósseos, estimar volumes reconstrutivos e otimizar o posicionamento de implantes com base em parâmetros anatômicos previamente estabelecidos. Apesar do avanço tecnológico observado nesses modelos, as evidências disponíveis indicam que tais ferramentas devem ser interpretadas como sistemas de apoio ao planejamento e não como mecanismos autônomos de decisão terapêutica. A definição da técnica cirúrgica, a análise funcional e o julgamento clínico continuam dependentes da experiência do especialista, especialmente diante de situações anatômicas complexas ou de condições sistêmicas que escapam aos modelos computacionais atualmente disponíveis (JOACHIM; MILORO, 2025).

Outro campo de investigação envolve o desenvolvimento de modelos preditivos destinados à estimativa de desfechos clínicos. Algoritmos treinados com informações clínicas, radiográficas e cirúrgicas têm sido utilizados para prever estabilidade pós-operatória, ocorrência de complicações, necessidade de enxertos adicionais e comportamento de reconstruções ósseas ao longo do tempo. Embora essas aplicações apresentem potencial para contribuir com a individualização do tratamento, a literatura ainda carece de estudos prospectivos capazes de demonstrar impacto consistente sobre

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 09/12/2025 | aceito: 12/12/2025 | publicação: 15/12/2025

indicadores clínicos relevantes, como redução de complicações, melhora funcional ou aumento da sobrevida de reconstruções complexas (DANG et al., 2025; JOACHIM; MILORO, 2025).

Dessa forma, a principal contribuição da inteligência artificial para a Cirurgia e Traumatologia Bucomaxilofacial não reside na substituição do cirurgião, mas na ampliação da eficiência do fluxo digital. A automatização de tarefas repetitivas, a padronização do processamento das imagens e a integração de grandes volumes de informações permitem otimizar o planejamento pré-operatório e reduzir o tempo dedicado a etapas operacionais. Entretanto, a interpretação clínica, a definição da estratégia terapêutica e a responsabilidade pelas decisões permanecem atribuições exclusivamente humanas, preservando o papel central do cirurgião no processo assistencial.

2.4 Evidências científicas e limitações atuais

O crescimento exponencial das publicações sobre inteligência artificial na última década não foi acompanhado por expansão proporcional de estudos clínicos de elevado nível de evidência. Revisões recentes demonstram que grande parte da literatura disponível é composta por pesquisas retrospectivas, estudos metodológicos e validações computacionais realizadas em ambientes experimentais. Ensaios clínicos prospectivos, estudos multicêntricos e análises comparativas envolvendo desfechos clínicos permanecem relativamente escassos, limitando a extrapolação dos resultados para a prática assistencial (DANG et al., 2025).

Outro aspecto amplamente discutido refere-se à qualidade dos bancos de dados utilizados para treinamento dos algoritmos. Sistemas de aprendizado profundo dependem de milhares de imagens previamente classificadas, segmentadas e validadas por especialistas. Quando essas bases de dados são constituídas por exames provenientes de uma única instituição, adquiridos em equipamentos semelhantes ou representativos de populações específicas, existe risco de redução do desempenho quando o algoritmo é aplicado em cenários clínicos distintos. Essa limitação, conhecida como baixa capacidade de generalização, constitui um dos principais desafios para a implementação rotineira da inteligência artificial em diferentes serviços de saúde.

A heterogeneidade metodológica também dificulta a comparação entre estudos. Diferenças relacionadas aos protocolos de aquisição das imagens, aos softwares utilizados, às arquiteturas das redes neurais, aos critérios de validação e aos indicadores estatísticos empregados impedem, em muitos casos, a realização de comparações diretas entre investigações independentes. Consequentemente, resultados considerados excelentes em um determinado estudo nem sempre podem ser reproduzidos por outros grupos de pesquisa.

Questões relacionadas à transparência dos algoritmos representam outro tema de crescente interesse

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 09/12/2025 | aceito: 12/12/2025 | publicação: 15/12/2025

científico. Muitos modelos de aprendizado profundo operam como sistemas de baixa interpretabilidade, produzindo resultados sem que o usuário consiga compreender integralmente quais parâmetros influenciaram determinada decisão computacional. Essa característica estimulou o desenvolvimento da chamada Inteligência Artificial Explicável (*Explainable Artificial Intelligence – XAI*), cujo objetivo é aumentar a transparência dos modelos e permitir maior compreensão do processo decisório pelos profissionais de saúde (TOPOL, 2019).

Sob o ponto de vista ético, a utilização da inteligência artificial também impõe desafios relacionados à privacidade dos dados, à segurança das informações clínicas e à responsabilidade profissional diante de decisões apoiadas por sistemas computacionais. A anonimização adequada dos exames, a conformidade com legislações de proteção de dados e a definição clara das responsabilidades entre desenvolvedores e profissionais de saúde constituem aspectos indispensáveis para a incorporação segura dessas tecnologias à prática clínica.

Por esse motivo, a literatura contemporânea converge para um entendimento comum: a inteligência artificial deve ser compreendida como uma ferramenta de apoio ao planejamento cirúrgico, capaz de ampliar a eficiência do fluxo digital, mas incapaz de substituir a análise crítica, a experiência clínica e o julgamento profissional do cirurgião bucomaxilofacial. O avanço tecnológico amplia as possibilidades diagnósticas e terapêuticas da especialidade, porém sua utilização permanece condicionada aos princípios da medicina baseada em evidências, da ética profissional e da individualização do cuidado.

3 APLICAÇÕES CLÍNICAS DO PLANEJAMENTO CIRÚRGICO VIRTUAL E DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

3.1 Cirurgia ortognática

A cirurgia ortognática foi uma das primeiras áreas da Cirurgia e Traumatologia Bucomaxilofacial a incorporar de forma sistemática o planejamento cirúrgico virtual. Durante décadas, o planejamento baseou-se em traçados cefalométricos bidimensionais, montagem de modelos em articuladores semiajustáveis e confecção manual de guias oclusais. Embora esses métodos tenham proporcionado resultados clínicos satisfatórios, apresentavam limitações relacionadas à reprodução da anatomia tridimensional, especialmente em deformidades faciais complexas e assimetrias esqueléticas (BELL; PROFFIT; WHITE, 1980; MILORO et al., 2022).

A introdução do planejamento virtual modificou esse cenário ao permitir a integração entre tomografia computadorizada, escaneamento intraoral e modelos digitais das arcadas dentárias. Essa

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 09/12/2025 | aceito: 12/12/2025 | publicação: 15/12/2025

combinação possibilita a reconstrução tridimensional do complexo craniofacial, a simulação das osteotomias e a previsão do posicionamento final dos segmentos ósseos antes da intervenção cirúrgica. Como consequência, procedimentos anteriormente dependentes de sucessivas etapas laboratoriais passaram a ser planejados em ambiente digital, reduzindo potenciais fontes de erro acumuladas ao longo do processo (JOACHIM; MILORO, 2025).

Outro avanço importante foi a substituição progressiva dos guias confeccionados manualmente por guias produzidos por manufatura aditiva a partir do planejamento virtual. Esses dispositivos permitem maior fidelidade entre a simulação pré-operatória e a execução intraoperatória, contribuindo para a reprodutibilidade dos movimentos planejados e reduzindo a necessidade de ajustes durante a cirurgia (MILORO et al., 2022).

Estudos comparativos sugerem que o planejamento virtual apresenta elevada precisão na reprodução dos movimentos maxilares, principalmente quando associado ao escaneamento intraoral e à fabricação digital de guias cirúrgicos. Entretanto, a literatura também demonstra que a magnitude desse benefício varia conforme a complexidade da deformidade, a experiência da equipe e a qualidade do fluxo digital empregado. Dessa forma, o planejamento virtual deve ser compreendido como um instrumento para aumentar a previsibilidade cirúrgica, e não como um fator isolado capaz de garantir melhores resultados clínicos (JOACHIM; MILORO, 2025).

Nos últimos anos, algoritmos de inteligência artificial passaram a ser incorporados a algumas etapas desse processo. Entre suas aplicações destacam-se a segmentação automática das estruturas ósseas, a identificação de pontos cefalométricos e o alinhamento entre exames tomográficos e modelos digitais das arcadas. Embora essas ferramentas reduzam o tempo necessário para preparação do planejamento, sua utilização permanece restrita principalmente ao processamento das informações, sem substituir a definição da estratégia cirúrgica ou a análise funcional realizada pelo especialista (DANG et al., 2025).

3.2 Traumatologia facial

O tratamento das fraturas faciais exige restauração precisa da anatomia esquelética, estabilidade dos segmentos ósseos e recuperação funcional do sistema estomatognático. Em lesões de alta complexidade, especialmente aquelas que envolvem múltiplos ossos da face, a interpretação da anatomia pode tornar-se difícil apenas com imagens bidimensionais, tornando o planejamento tridimensional um recurso de grande relevância clínica (FONSECA, 2018).

A reconstrução virtual permite visualizar simultaneamente todos os fragmentos ósseos, simular reduções anatômicas e antecipar dificuldades relacionadas ao acesso cirúrgico e à adaptação dos

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 09/12/2025 | aceito: 12/12/2025 | publicação: 15/12/2025

sistemas de fixação. Nas fraturas orbitárias, por exemplo, a utilização do lado contralateral como referência anatômica favorece reconstruções mais precisas do volume orbitário. Em fraturas panfaciais, a reconstrução tridimensional auxilia na definição da sequência de redução e estabilização dos diferentes segmentos ósseos, contribuindo para restabelecimento da largura, projeção e altura facial (ELLIS III; ZIDE, 2006).

A impressão tridimensional também passou a desempenhar papel importante nesse contexto. Biomodelos obtidos a partir da tomografia permitem pré-moldagem de placas de titânio antes da cirurgia, reduzindo manipulações intraoperatórias e favorecendo adaptação mais precisa aos contornos ósseos. Em casos selecionados, implantes específicos para o paciente (*patient-specific implants*) também podem ser confeccionados a partir do planejamento virtual, principalmente em reconstruções orbitárias complexas ou defeitos craniofaciais extensos (JOACHIM; MILORO, 2025).

As aplicações da inteligência artificial em traumatologia facial concentram-se principalmente na etapa diagnóstica. Modelos de aprendizado profundo vêm demonstrando desempenho promissor na detecção automática de fraturas mandibulares, zigomáticas e orbitárias em exames tomográficos. Apesar dos elevados índices de sensibilidade relatados em estudos experimentais, a literatura ainda recomenda cautela quanto à sua incorporação rotineira, uma vez que a maioria dos algoritmos permanece dependente de validações retrospectivas realizadas em bases de dados limitadas (DANG et al., 2025).

Sob a perspectiva clínica, a principal contribuição dessas tecnologias está na ampliação da capacidade analítica do cirurgião. A interpretação das linhas de fratura, a escolha da via de acesso, a indicação do método de fixação e a condução do tratamento continuam sendo decisões fundamentadas na experiência profissional, na avaliação clínica e nos princípios biomecânicos consolidados da traumatologia bucomaxilofacial (ELLIS III; GHALI; LARSEN; WAITE, 2012).

3.3 Reconstrução mandibular

A reconstrução mandibular constitui uma das aplicações mais consolidadas do planejamento cirúrgico virtual na Cirurgia e Traumatologia Bucomaxilofacial. Pacientes submetidos à ressecção de tumores, traumatismos extensos, osteonecrose dos maxilares ou sequelas de infecções podem apresentar perdas ósseas significativas, cujo tratamento exige restabelecimento simultâneo da continuidade mandibular, da oclusão, da função mastigatória e da estética facial (HIDALGO, 1989).

Tradicionalmente, a adaptação dos enxertos ósseos e das placas de reconstrução era realizada durante o ato operatório, aumentando o tempo cirúrgico e a complexidade técnica do procedimento. O desenvolvimento do planejamento virtual permitiu antecipar essas etapas por meio da simulação

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 09/12/2025 | aceito: 12/12/2025 | publicação: 15/12/2025

tridimensional das osteotomias, da definição prévia do posicionamento dos segmentos ósseos e da fabricação de guias cirúrgicos individualizados.

A reconstrução com retalho livre de fíbula representa um dos principais exemplos dessa evolução. O planejamento virtual permite determinar previamente o número de segmentos ósseos necessários, o comprimento de cada osteotomia, a posição final do enxerto e a adaptação das placas de reconstrução, reduzindo a necessidade de ajustes intraoperatórios e favorecendo maior previsibilidade anatômica (JOACHIM; MILORO, 2025).

Além dos guias de corte, a utilização de placas personalizadas produzidas por tecnologias CAD/CAM vem sendo progressivamente incorporada aos centros especializados. Esses dispositivos apresentam adaptação precisa à anatomia previamente planejada e podem reduzir deformações decorrentes do contorno manual das placas convencionais. Entretanto, seu custo elevado e a necessidade de infraestrutura tecnológica especializada ainda representam fatores limitantes para ampla disseminação dessa abordagem.

Revisões recentes demonstram que o planejamento virtual proporciona benefícios consistentes relacionados à precisão geométrica da reconstrução e à padronização do procedimento cirúrgico. Entretanto, ainda existem limitações quanto à demonstração de superioridade clínica em desfechos de longo prazo, como recuperação funcional, qualidade de vida e sobrevida dos enxertos, evidenciando a necessidade de estudos prospectivos multicêntricos capazes de reduzir a heterogeneidade metodológica observada na literatura (JOACHIM; MILORO, 2025).

3.4 Implantodontia e reconstruções ósseas

A implantodontia foi uma das áreas mais impactadas pela incorporação do fluxo digital. A associação entre tomografia computadorizada de feixe cônico, escaneamento intraoral e softwares de planejamento tridimensional tornou possível integrar informações anatômicas, protéticas e funcionais em um único ambiente virtual, permitindo que o posicionamento dos implantes seja definido previamente à cirurgia (MISCH, 2015; MILORO et al., 2022).

O planejamento protético guiado passou a representar um dos principais avanços desse processo. Em vez de considerar apenas a disponibilidade óssea, o posicionamento do implante passou a ser planejado de acordo com a futura reabilitação protética, respeitando estruturas anatômicas nobres, características biomecânicas e exigências estéticas. Como consequência, observou-se maior previsibilidade cirúrgica e redução da necessidade de correções durante o procedimento.

Nesse contexto, a inteligência artificial vem sendo aplicada principalmente à segmentação automática de exames tomográficos, identificação do canal mandibular, reconhecimento de estruturas anatômicas

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 09/12/2025 | aceito: 12/12/2025 | publicação: 15/12/2025

e organização do fluxo digital. Embora essas aplicações reduzam o tempo necessário para o planejamento, as evidências disponíveis ainda são insuficientes para afirmar que os algoritmos promovam melhores resultados clínicos quando comparados ao planejamento convencional conduzido por profissionais experientes (DANG et al., 2025).

Assim, a contribuição mais consistente da inteligência artificial na implantodontia permanece relacionada à otimização do fluxo de trabalho, sem substituir o julgamento clínico na definição da estratégia cirúrgica.

4 DISCUSSÃO

A evolução do planejamento cirúrgico virtual representa uma das transformações mais relevantes da Cirurgia e Traumatologia Bucomaxilofacial nas últimas décadas. A incorporação da tomografia computadorizada, dos sistemas CAD/CAM e da manufatura aditiva modificou a forma como procedimentos complexos são planejados, permitindo maior individualização do tratamento e melhor integração entre diagnóstico, planejamento e execução cirúrgica (JOACHIM; MILORO, 2025).

Embora os benefícios relacionados à precisão anatômica e à previsibilidade do planejamento sejam amplamente descritos, sua magnitude varia conforme a indicação clínica. As evidências mais robustas concentram-se na cirurgia ortognática e na reconstrução mandibular com retalhos microvascularizados, áreas nas quais o planejamento virtual demonstrou elevada reprodutibilidade e maior correspondência entre a simulação pré-operatória e o resultado obtido durante a cirurgia. Em outras aplicações, como traumatologia facial e implantodontia, os resultados permanecem promissores, porém ainda dependem de estudos prospectivos capazes de estabelecer protocolos padronizados e avaliar desfechos clínicos de longo prazo.

Situação semelhante ocorre com a inteligência artificial. Apesar do crescimento expressivo das publicações científicas, a maior parte dos estudos concentra-se na automatização da segmentação anatômica, classificação de imagens e desenvolvimento de modelos preditivos. Poucas investigações demonstraram impacto direto sobre indicadores clínicos, como redução de complicações, melhora funcional ou aumento da sobrevida de reconstruções complexas. Dessa forma, os benefícios atualmente observados concentram-se na otimização do fluxo digital e na redução do tempo destinado ao planejamento, e não na substituição da tomada de decisão clínica (DANG et al., 2025).

Outro aspecto frequentemente destacado refere-se à qualidade metodológica das pesquisas. A predominância de estudos retrospectivos, amostras reduzidas, ausência de validação externa e elevada heterogeneidade entre algoritmos dificultam a comparação dos resultados e limitam sua generalização para diferentes populações e serviços. Além disso, aspectos relacionados à transparência dos modelos

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.
Ano VI, v.2 2025 | submissão: 09/12/2025 | aceito: 12/12/2025 | publicação: 15/12/2025

computacionais, proteção de dados e responsabilidade profissional permanecem como temas centrais para a incorporação segura dessas tecnologias à prática assistencial.

Nesse contexto, a inteligência artificial deve ser compreendida como ferramenta complementar ao planejamento cirúrgico, capaz de ampliar a eficiência operacional e apoiar a análise das informações disponíveis, mas sem substituir o conhecimento anatômico, a experiência clínica e o julgamento do cirurgião. A evolução tecnológica amplia as possibilidades da especialidade; entretanto, sua utilização deve permanecer fundamentada nos princípios da medicina baseada em evidências e na avaliação individualizada de cada paciente.

CONCLUSÃO

O planejamento cirúrgico virtual consolidou-se como uma das principais inovações incorporadas à Cirurgia e Traumatologia Bucomaxilofacial nas últimas décadas, promovendo mudanças significativas na forma como procedimentos complexos são planejados e executados. A integração entre exames de imagem tridimensionais, sistemas CAD/CAM, biomodelos, guias cirúrgicos personalizados e tecnologias de manufatura aditiva ampliou a previsibilidade operatória, favoreceu maior precisão na execução das técnicas cirúrgicas e contribuiu para uma abordagem cada vez mais individualizada do tratamento. As evidências científicas disponíveis demonstram benefícios consistentes, especialmente na cirurgia ortognática, reconstrução mandibular, traumatologia facial e implantodontia, áreas nas quais o fluxo digital passou a desempenhar papel relevante na redução da variabilidade operatória e na melhoria do planejamento pré-operatório.

A incorporação da inteligência artificial representa um novo estágio dessa evolução tecnológica. Sua principal contribuição, até o momento, concentra-se na automatização de tarefas relacionadas ao processamento de imagens, segmentação anatômica, organização do fluxo digital e apoio ao planejamento cirúrgico. Entretanto, a literatura analisada demonstra que essas aplicações ainda apresentam limitações importantes, sobretudo quanto à validação clínica, à padronização metodológica e à generalização dos algoritmos para diferentes populações e cenários assistenciais. Embora os resultados iniciais sejam promissores, permanecem escassas as evidências capazes de demonstrar impacto consistente sobre desfechos clínicos de longo prazo, reforçando a necessidade de estudos prospectivos, multicêntricos e metodologicamente mais robustos.

Outro aspecto que merece atenção refere-se aos desafios éticos, regulatórios e operacionais associados à incorporação dessas tecnologias na prática clínica. Questões relacionadas à qualidade dos bancos de dados utilizados para treinamento dos algoritmos, à transparência dos modelos computacionais, à proteção das informações dos pacientes e à responsabilidade profissional diante de

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 09/12/2025 | aceito: 12/12/2025 | publicação: 15/12/2025

decisões apoiadas por sistemas inteligentes deverão acompanhar o avanço tecnológico da especialidade. A adoção dessas ferramentas exige não apenas infraestrutura adequada, mas também capacitação profissional e protocolos que assegurem sua utilização de forma segura, reprodutível e fundamentada em evidências científicas.

Nesse contexto, torna-se evidente que a inteligência artificial não deve ser compreendida como substituta da experiência clínica, mas como um recurso complementar capaz de ampliar a eficiência do planejamento cirúrgico e fornecer suporte à tomada de decisão. A interpretação das informações, a definição da estratégia terapêutica e a condução do tratamento permanecem dependentes do conhecimento técnico, da experiência do cirurgião e da avaliação individualizada de cada paciente, princípios que continuam sendo os pilares da Cirurgia e Traumatologia Bucomaxilofacial contemporânea.

Por fim, conclui-se que o futuro da especialidade será determinado pela integração equilibrada entre inovação tecnológica, conhecimento científico e experiência clínica. O desenvolvimento contínuo do planejamento cirúrgico virtual, aliado ao aperfeiçoamento das aplicações da inteligência artificial, tende a ampliar a precisão dos procedimentos e a fortalecer abordagens cada vez mais personalizadas. Contudo, a consolidação dessas tecnologias dependerá da produção de evidências clínicas de alta qualidade, da padronização dos protocolos digitais e da incorporação responsável dessas ferramentas à prática assistencial, preservando a segurança do paciente e os princípios da medicina baseada em evidências como fundamentos da atuação do cirurgião bucomaxilofacial.

REFERÊNCIAS

BELL, William H.; PROFFIT, William R.; WHITE, Raymond P. *Surgical correction of dentofacial deformities*. Philadelphia: W. B. Saunders, 1980. 2 v.

DANG, Rushil Rajiv et al. The current landscape of artificial intelligence in oral and maxillofacial surgery: a narrative review. *Oral and Maxillofacial Surgery*, 2025.

ELLIS III, Edward; ZIDE, Michael F. *Surgical approaches to the facial skeleton*. 2. ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2006.

FONSECA, Raymond J. (ed.). *Oral and maxillofacial surgery*. 3. ed. St. Louis: Elsevier, 2018. 3 v.

GOODFELLOW, Ian; BENGIO, Yoshua; COURVILLE, Aaron. *Deep learning*. Cambridge: MIT Press, 2016.

HIDALGO, David A. Fibula free flap: a new method of mandible reconstruction. *Plastic and Reconstructive Surgery*, Baltimore, v. 84, n. 1, p. 71-79, 1989.

MARTELLI JÚNIOR, Hercílio; MARTELLI, Danielle Reis. Three-dimensional printing in oral and maxillofacial surgery: a literature review. *Annals of Maxillofacial Surgery*, v. 1, n. 1, p. 67-71, 2011.

MILORO, Michael; GHALI, Gamal E.; LARSEN, Per E.; WAITE, Peter D. *Peterson's principles of oral and maxillofacial surgery*. 4. ed. Cham: Springer, 2022.

MISCH, Carl E. *Dental implant prosthetics*. 2. ed. St. Louis: Elsevier, 2015.

SCARFE, William C.; FARMAN, Allan G. What is cone-beam CT and how does it work? *Dental Clinics of North America*, v. 52, n. 4, p. 707-730, 2008.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 09/12/2025 | aceito: 12/12/2025 | publicação: 15/12/2025

TOPOL, Eric. *Deep medicine: how artificial intelligence can make healthcare human again*. New York: Basic Books, 2019.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.