

INSTITUTO UNIVERSITÁRIO EGAS MONIZ

MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA DENTÁRIA

CIRURGIA GUIADA EM IMPLANTOLOGIA.

REVISAO NARRATIVA.

Trabalho submetido por

Anna Fischler

para a obtenção do grau de Mestre em Medicina Dentária

setembro de 2025



EGAS MONIZ SCHOOL
of HEALTH & SCIENCE

INSTITUTO UNIVERSITÁRIO
EGAS MONIZ

INSTITUTO UNIVERSITÁRIO EGAS MONIZ

MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA DENTÁRIA

CIRURGIA GUIADA EM IMPLANTOLOGIA. REVISAO NARRATIVA.

Trabalho submetido por

Anna Fischler

para a obtenção do grau de Mestre em Medicina Dentária

Trabalho orientado por

Professor Pedro Trancoso

setembro de 2025

À mon Papi, ce grand-père exceptionnel, dentiste visionnaire et modèle de droiture et de tendresse. Tu es le meilleur grand-père que l'on puisse rêver, et je te dédie cette thèse avec tout mon amour.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Pedro Trancoso pela orientação prestada ao longo desta tese e pela confiança que em mim depositou.

Agradeço à Egas Moniz School of Health and Science pela oportunidade de estudar em condições de excelência, pelo corpo docente que me orientou ao longo destes cinco anos e por me ter permitido realizar o sonho de exercer a profissão que sempre desejei.

Agradeço à Nina por me ter dado a honra de ser sua monitora, pela confiança e pelos ensinamentos que me transmitiu, assim como pela amizade, que muito estimo.

À ma mère, la plus géniale des mamans dont l'amour et les conseils m'accompagnent chaque jour, tu es et tu resteras toujours mon modèle ; j'espère réussir à devenir ne serait-ce qu'un dixième de la femme et de la dentiste exceptionnelle que tu es. À mon père, qui m'a toujours encouragée à offrir le meilleur de moi dans chacune de mes entreprises, qui m'a enseigné la valeur du courage et de la détermination, transmis un tempérament de guerrière et éveillé en moi la passion de la chirurgie. C'est en grande partie grâce à toi que cette thèse a vu le jour.

À mon frère et à ma sœur, mes deux piliers, je mesure chaque jour la chance immense de vous avoir à mes côtés ; même à distance, je pense toujours très fort à vous.

À mes deux grand-mères, modèles d'amour, de sagesse et de générosité. Votre tendresse et votre soutien m'accompagnent chaque jour, et à mon Papé qui me regarde de là-haut, tu me manques chaque jour. À mon tonton David d'être toujours présent pour moi.

À Anatole, que j'admire pour tout ce qu'il incarne : sa gentillesse, sa patience, sa générosité, son humilité... Merci pour tout l'amour que tu m'offres chaque jour et que tu répands autour de toi. Je me sens tellement chanceuse de t'avoir à mes côtés. Je t'aime.

À mes merveilleuses amies : Manoune, Soso, Marine, Margue, Inès, Margaux, Mayou, Léa, Béa, Élise, Clémence, Nour et à mes formidables amis : Valou, Baptiste, Lucas, Doudou, Alfred, Turtur, Coco, Pierre, Nathan, Yanis, Thomas, Joey, vous êtes vraiment des personnes extraordinaires. Mon parcours lisboète n'aurait jamais été le même sans vous. Merci du fond du cœur pour toutes les aventures vécues ensemble, pour vos rires, votre soutien, et pour tous les souvenirs précieux que vous m'avez laissés.

À mes meilleures amies d'enfance, Matou, Ioio, Joe et Manouch, qui m'accompagnent et me soutiennent chaque jour, même à distance. Merci d'être toujours là pour moi.

RESUMO

A cirurgia guiada em implantologia representa um avanço significativo na medicina dentária contemporânea. Esta revisão narrativa aborda a evolução da implantologia, desde as suas origens históricas até à integração das tecnologias digitais atuais. São destacados os contributos das técnicas de cirurgia guiada estática e dinâmica na otimização do posicionamento aquando da colocação dos implantes dentários, em termos de precisão, segurança e reprodutibilidade.

O trabalho inicia-se com uma apresentação dos implantes dentários, abordando os seus princípios biológicos, os materiais utilizados e os principais desafios clínicos associados. De seguida, são descritos as diferentes tipos de guias cirúrgicas utilizadas em implantologia, classificados consoante o nível de orientação, o tipo de suporte e a tecnologia empregue. A cirurgia guiada estática é analisada em detalhe, com especial enfoque no fluxo digital, nas etapas de fabrico das guias e nas potenciais fontes de erro. Por fim, é explorada a cirurgia guiada dinâmica, destacando-se a utilização da navegação em tempo real como uma inovação no planeamento e execução dos procedimentos.

É realizada uma comparação crítica entre três abordagens: cirurgia não guiada, cirurgia guiada estática e cirurgia guiada dinâmica com avaliação da precisão, curva de aprendizagem, invasividade, custo, complicações e resultados a longo prazo. Conclui-se que as técnicas guiadas permitem uma melhor antecipação protética e uma redução dos riscos cirúrgicos, embora não garantam resultados superiores em termos de taxa de sobrevivência dos implantes a longo prazo.

Em suma, a cirurgia guiada, particularmente na sua vertente estática, constitui atualmente uma opção segura, acessível e reprodutível para uma vasta gama de casos clínicos. No entanto, o domínio da técnica convencional continua a ser fundamental, enquanto a cirurgia guiada dinâmica se afirma como uma tecnologia promissora no futuro da implantologia.

Palavras-chave: Implantologia; Cirurgia guiada; Planeamento digital; CAD-CAM

ABSTRACT

Guided implant surgery represents a major advancement in contemporary dental medicine. This narrative review traces the evolution of implantology, from its historical roots to the integration of current digital technologies. It highlights the contributions of static and dynamic guided surgery in optimizing implant placement with improved precision, safety, and reproducibility.

The work begins with a presentation of dental implants, addressing their biological principles, the materials used, and the main associated clinical challenges. Next, the different types of surgical guides used in implantology are described, classified according to the level of guidance, the type of support, and the technology employed. Static guided surgery is analyzed in detail, with particular emphasis on the digital workflow, the stages of guide fabrication, and the potential sources of error. Finally, dynamic guided surgery is explored, with real-time navigation highlighted as an innovation in the planning and execution of procedures.

A critical comparison is drawn between the three main techniques freehand, static guided, and dynamic guided surgery evaluating precision, learning curve, invasiveness, cost, complications, and long-term outcomes. It concludes that guided techniques allow for better prosthetic planning and reduced surgical risks, though they do not necessarily ensure superior long-term implant survival.

In summary, guided surgery, particularly in its static form, currently represents a safe, accessible, and reproducible option for a wide range of clinical cases. However, mastery of the conventional technique remains essential, while dynamic guided surgery is emerging as a promising technology for the future of implantology.

Keys-words: Implantology; Guided surgery; Digital planning; CAD/CAM

ÍNDICE GERAL

I. INTRODUÇÃO	15
1.1. Evolução histórica.....	15
1.2. Definição de um implante	16
1.3. A chegada das tecnologias na implantologia moderna.....	19
II. DESENVOLVIMENTO	21
2.1. Definição e classificação de uma guia de implantes.....	21
2.2. Guia radiológica.....	23
2.3. Cirurgia guiada.....	25
2.3.1. Guia cirúrgica estática	28
2.3.1.1. Recolha das informações	30
2.3.1.2. Planeamento.....	37
2.3.1.3. Fabricação da guia	40
2.3.1.4. Precisão da cirurgia guiada estática	49
2.3.1.5. Fontes de erro pré-operatória e peroperatória.....	50
2.3.2. Guia cirúrgica dinâmica.....	52
2.3.2.1. Recolha das informações e planeamento	53
2.3.2.2. Calibração	55
2.3.2.3. Verificação e validação do sistema de navegação	60
2.3.2.4. Vantagens da cirurgia guiada por navegação dinâmica.....	60
2.3.2.5. Desvantagens da cirurgia guiada por navegação dinâmica	61
2.3.2.6. Perspetivas de evolução	62
2.3.3. Cirurgia <i>flapless</i> guiada	63
2.3.3.1. Vantagens	64

2.3.3.2. Limitações e inconvenientes.....	64
2.3.3.3. <i>Flapless</i> e guia cirúrgica	64
2.4. Comparação cirurgia guiada Vs cirurgia a mão livre.....	65
2.4.1. Precisão de colocação: diferenças significativas entre as técnicas	65
2.4.2. Acessibilidade, logística e curva de aprendizagem	66
2.4.3. Duração operatório e invasividade: vantagens concretas do guiamento.....	67
2.4.4. Complicações e segurança operatória: um risco melhor controlado graças ao digital.....	67
2.4.5. Precisão, rapidez, tecnologia, mas no fim os resultados para o paciente são realmente melhores?	68
III. CONCLUSÃO.....	72
IV. BIBLIOGRAFIA	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 : Planeamento de implantes utilizando o software Procera® Clinical Design Premium (Chan et al., 2013)	24
Figura 2: Conversão de uma guia radiológica em guia cirúrgica (Chan et al., 2013).....	24
Figura 3: Guia cirúrgica convertida utilizando o GCM (Peng et al., 2017)	25
Figura 4: O processo de guia cirúrgica estática. A – Design da posição ideal do implante B – Guia cirúrgica inserida e controlada quanto à estabilidade da posição do implante. C – Utilização da broca para a preparação. D – Imagem intraoral da colocação do implante (Wu et al., 2020)	26
Figura 5: Exemplo de um sistema de navegação dinâmica. (A) Sistema de navegação dinâmica DCARER (Suzhou Digital-Health Care Co., Ltd, Suzhou, China), com rastreamento ativo, incluindo computador, ecrã e câmara estereoscópica. (B) Sistema de rastreamento composto por uma câmara estereoscópica de infravermelhos. (C) Software DNS suporta o planeamento pré-operatório e fornece orientação intraoperatória em tempo real. (D, E) Instrumentos de rastreamento, incluindo uma peça de mão dentária especializada (D) e um posicionador conectado aos dentes (E), emitindo ativamente luz infravermelha para o sistema de rastreamento (Tang et al., 2024).....	27
Figura 6 : A arquitetura da robótica em implantologia dentária (Liu et al., 2024)	28
Figura 7 : Fotografia de um exame de tomografia computadorizada de feixe cónico (CBCT) realizado com o dispositivo Planmeca Viso G3® (Planmeca Oy, Helsínquia, Finlândia) em contexto clínico	31
Figura 8: Fotografia dum scanner intraoral da marca 3Shape TRIOS 5 Wireless® (3Shape A/S, Copenhaga, Dinamarca) em contexto clínico	33
Figura 9 : Conceção digital de uma guia cirúrgica estática: (a) Ficheiro de planeamento STL e (b) preparação para impressão com o Form 3, utilizando o software PreForm® (Formlabs Inc., Somerville, MA, USA) (Wegmüller et al.,2021).....	36

Figura 10: Fluxo de trabalho clínico demonstrado o planeamento para colocação de implantes, a conceção da guia, a impressão 3D e a colocação do implante (Adams et al., 2023).....	37
Figura 11: Conceção de guias cirúrgicas para perfuração em NobelClinician® (Nobel Biocare Services AG, Kloten, Suíça) (A), Implant Studio® (3Shape A/S, Copenhaga, Dinamarca) (B), coDiagnostiX® (Dental Wings GmbH, Chemnitz, Alemanha) (C), Simplant® (Dentsply Sirona, York, EUA) (D) e SMOP (Swissmeda AG, Baar, Suíça) (E), através da seleção das superfícies de suporte (Kernen et al., 2020) ...	39
Figura 12: Exemplos de guias cirúrgicas estáticas: (A) guias cirúrgicas fresadas; (B) guia cirúrgica impressa em 3D (Lo Russo et al., 2023)	41
Figura 13: Esquema da tecnologia de estereolitografia (SLA) (Jeong et al., 2024)	42
Figura 14: Esquema da tecnologia de processamento digital de luz (DLP) (Jeong et al., 2024)	43
Figura 15: Fotografia de guias cirúrgicas fabricadas por impressão 3D (NextDent 5100, 3D Systems, Rock Hill, SC, EUA) em situação pré-clínica. (A) Guia cirúrgica sem posicionadores metálicos (B) Guia cirúrgica com posicionadores metálicos (Oh et al., 2021).....	46
Figura 16: Tipos de superfícies de suporte das guias (Kalaivani et al., 2020)..	48
Figura 17: Os indicadores de precisão cirúrgica em implantologia (Shi et al., 2023).....	49
Figura 18: Guia fraturada durante o procedimento cirúrgico (D’haese et al., 2017)	51
Figura 19: Fotografia da instalação do sistema de navegação dinâmica X-Guide® (X-NAV Technologies, LLC, Lansdale (Pensilvânia, Estados Unidos) em cirurgia implantológica. O dispositivo é composto por um braço de navegação ótica ligado a um ecrã de controlo permitindo a visualização em tempo real da perfuração e da colocação dos implantes	53
Figura 20: Fotografias de o X-Clip : a) O dispositivo termoformado, o X-clip utilizado para o sistema de navegação dinâmica X-Guide®; b) Colocação intraoral do X-	

clip num paciente, associado ao jaw tracker que permite o acompanhamento em tempo real dos movimentos do paciente..... 56

Figura 21: Controlo de calibração realizado colocando a broca seleccionada sobre a placa perfurada e medindo o seu comprimento (Ma et al., 2023) 58

Figura 22: Componentes do sistema de navegação dinâmica X-Guide (X-Nav Technologies). (A) *Patient/Jaw tracker*: traqueador fixo no X-Clip que assegura o seguimento em tempo real dos movimentos da mandíbula; (B) *Drill tag*: adaptador com marcadores para calibração e localização da broca; (C) *Calibration disc*: disco de calibração para o alinhamento do comprimento e do eixo da broca; (D) *Through-hole calibration plate*: placa perfurada para verificação da calibração instrumental; (E) *Handpiece tracker*: suporte com marcadores fixado à peça de mão cirúrgica; (F) Chave de aperto: ferramenta metálica usada para apertar ou ajustar certos componentes; (G) Chave de calibração (aparafusador): ferramenta manual destinada à fixação/desfixação e montagem do sistema 59

Figura 23: Exemplo de intervenção implantológica realizada com cirurgia guiada dinâmica. A) a equipa cirúrgica durante o procedimento com visualização em tempo real no ecrã operatório; B) a interface do software de navegação apresentando o planeamento virtual e o acompanhamento da posição da fresa em relação às estruturas anatómicas... 59

Figura 24: A cirurgia implantar sem retalho, ou flapless (Cattoni et al., 2021).. 63

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Categoria de guias cirúrgicas em implantologia	22
Tabela 2: Vantagens e desvantagens do SLA e do DLP na fabricação de guias cirúrgicas estáticas.....	44
Tabela 3: Comparação entre Técnicas de Cirurgia Implantar: Manual, Guiada Estática e Guiada Dinâmica	68

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CAD - Computor Aided Design

CAIC - Computer-Aided Implantology and Surgery

CAM - Computor Aided Manufacturing

CBCT - Cone Beam Computed Tomography

CNNs - Convolutional Neural Networks

DICOM - Digital Imaging and Communication in Medicine

DLP - Digital Light Processing

DSD - Digital Smile Design

FEA - Finite Element Analysis

FOV - Field Of View

GCM - Geometric Conversion Method

PEEK - PolyEtherEtherKetone

RMS - Root Mean Squares

SLA - StereoLithography Apparatus

STL - Standard Tessellation Language

WHO - World Health Organization

I. INTRODUÇÃO

1.1.Evolução histórica

A perda dentária é um desafio de saúde pública desde o início da humanidade. A dentição, desempenhando um papel na nutrição, na fala, na aparência e, portanto, na autoestima, tem um lugar fundamental na nossa qualidade de vida, mas também no nosso estado geral de saúde, como primeira etapa do processo digestivo (Guida e al., 2022).

A preocupação com a restauração da estética e da função oral remonta a milénios, como evidenciam as diversas tentativas de substituição dentária realizadas por várias civilizações ao longo da história.

- 2500 a.C., os egípcios estabilizavam os dentes móveis com fios de ouro.
- 500 a.C., os etruscos e os fenícios utilizavam ossos de animais, marfim e até dentes esculpidos ligados por fios metálicos para criar próteses dentárias.
- 600 a.C., os maias utilizavam fragmentos de conchas para substituir dentes perdidos e radiografias revelaram uma integração óssea surpreendentemente semelhante à dos implantes modernos (Abraham, 2014; Kandavalli et al., 2021).

Embora rudimentares, essas primeiras tentativas revelavam uma consciência precoce da importância dos dentes. Assim se abriu o caminho para uma longa evolução, marcada pela procura incessante do material e da forma ideais para alcançar, ao longo dos séculos, uma reabilitação adequada.

É no século XX que a implantologia conhece um verdadeiro avanço científico. Em 1952, o professor sueco Dr. Per-Ingvar Brånemark investigava a microcirculação óssea utilizando câmaras de titânio fixadas ao osso femoral de coelho (Pal, 2015). No final da experiência, ao tentar removê-las, apercebeu-se de que o titânio estava completamente integrado no osso. Foi assim que descobriu o fenómeno da osteointegração, dando origem à implantologia moderna (Kandavalli et al., 2021).

Posteriormente, em 1965, Brånemark colocou os primeiros implantes de titânio em pacientes, tendo estes demonstrado sucesso a longo prazo (Guida et al., 2022).

Atualmente, o implante dentário em titânio provou a sua eficácia e consolidou-se como a solução mais previsível e duradoura para a substituição de dentes em falta (Pal, 2015).

Nos últimos anos, a implantologia registou avanços significativos não apenas ao nível dos biomateriais, com a otimização das superfícies dos implantes e da sua biocompatibilidade, mas também nas técnicas de colocação, impulsionadas pelo desenvolvimento da cirurgia assistida por computador, das guias cirúrgicas personalizadas e da cirurgia navegada. Estas inovações permitem hoje uma precisão superior e uma maior previsibilidade dos resultados (Guillaume, 2016; Kandavalli et al., 2021).

1.2. Definição de um implante

O implante dentário é um dispositivo médico fabricado a partir de material biocompatível, inserido no osso maxilar ou mandibular. A sua função é criar uma ancoragem estável e duradoura que permita a fixação de uma prótese dentária fixa (coroa, ponte) ou removível (prótese suportada por implantes) (Gupta et al., 2023). Considerado como uma verdadeira raiz artificial, o implante dentário impõe-se hoje como a opção terapêutica de referência na medicina dentária contemporânea para substituir dentes em falta.

A eficácia dos implantes baseia-se no princípio da osteointegração. Este fenómeno consiste na adesão direta, estrutural e funcional entre o osso vivo e a superfície do implante. Esta ligação íntima garante não só a estabilidade primária, indispensável ao adequado processo de cicatrização, como também a estabilidade secundária a longo prazo, condição essencial para o sucesso duradouro do tratamento com implantes dentários (Mohammad, 2017).

Atualmente, o material mais utilizado é o titânio, quer puro, quer sob a forma de ligas, devido à sua excelente biocompatibilidade com o osso, às suas propriedades

mecânicas ideais e à elevada resistência à corrosão. A ligação entre o osso e o implante revela-se, assim, rápida e estável.

Como alternativa, a zircónia apresenta-se como um material igualmente biocompatível, sobretudo indicado para o setor anterior em casos de fenótipo gengival fino, respondendo a elevados requisitos estéticos graças à sua cor branca. É particularmente vantajosa em doentes hipersensíveis ou alérgicos ao titânio, mas também pode ser considerada para pacientes com alto risco de peri-implantite graças à sua resistência à colonização bacteriana (Wiedemann, 2024).

Em paralelo, novos materiais como o *PolyEtherEtherKetone* (PEEK), alguns polímeros técnicos e compósitos bioativos estão a ser estudados, embora permaneçam em fase experimental. A forma consagrada na prática clínica continua a ser o implante endósseo roscado cilindro-cónico de tipo Brånemark, considerado padrão de referência científico e clínico, pela sua estabilidade primária, pela distribuição otimizada das cargas mastigatórias e pela facilidade de osteointegração (Diakonoff e Pirnay, 2021; Weiss & Weiss, 2001).

Existem diferentes comprimentos, diâmetros e superfícies, permitindo a melhor adaptação possível à morfologia óssea de cada paciente.

Para além de fornecer suporte protético, os implantes dentários permitem uma reabilitação funcional completa: asseguram boa mastigação e fonação; preservam o osso alveolar, reduzindo a reabsorção pós-extração; melhoram a estética, em particular na região anterior; e possibilitam uma higiene oral mais eficaz, prevenindo cáries e infeções endodônticas nos dentes adjacentes. Consequentemente, têm um impacto direto e positivo na qualidade de vida dos pacientes, tanto no bem-estar físico como psicológico (Gupta e al., 2023).

As suas indicações estendem-se ainda a situações complexas, como reabilitações maxilo-faciais pós-traumáticas ou pós-oncológicas (Marques et al., 2023).

Segundo estimativas da World Health Organization (WHO), a prevalência mundial média de edentulismo é de 7% em adultos a partir dos 20 anos, aumentando para 23% nos indivíduos com mais de 60 anos (World Health Organization (WHO), 2025). Um estudo recente sobre a carga global das doenças orais demonstrou que a incidência do edentulismo registou um aumento de 93,56% entre 1990 e 2021, atingindo 26,5 milhões de novos casos nesse último ano (Yan et al., 2025). As projeções sugerem que esta tendência ascendente se manterá nas próximas décadas, reforçando a necessidade de desenvolver e implementar estratégias de reabilitação cada vez mais eficazes. Neste enquadramento epidemiológico, a implantologia emerge como uma solução terapêutica de elevada relevância, respondendo de forma direta ao aumento do número de indivíduos edêntulos. Em 2021, estimou-se que mais de 9 milhões de implantes dentários foram colocados a nível mundial. Paralelamente, o mercado global dos implantes, avaliado em 4,12 mil milhões de dólares, tem evidenciado um crescimento contínuo, sustentado não apenas pelo elevado sucesso clínico destes dispositivos, mas também pela progressiva ampliação das suas indicações terapêuticas (Sartoretto et al., 2023).

Hoje, os implantes dentários são considerados a alternativa terapêutica mais fiável no domínio das próteses fixas, graças à sua durabilidade, integração biológica e elevada taxa de sucesso, frequentemente superior a 90% ao fim de dez anos, segundo estudos longitudinais (Gupta et al., 2023)

Estes indicadores ilustram de forma inequívoca a expansão significativa da implantologia no contexto da reabilitação em medicina dentária moderna, estreitamente associada aos avanços tecnológicos desde os trabalhos fundadores de Brånemark – nomeadamente a introdução da tomografia volumétrica de feixe cónico (CBCT), o desenvolvimento de *softwares* de planeamento cirúrgico em 3D e, mais recentemente, a cirurgia guiada e navegada, que vieram acrescentar precisão, segurança e previsibilidade aos resultados clínicos acrescida, uma segurança reforçada e uma melhor previsibilidade dos resultados clínicos.

1.3. A chegada das tecnologias na implantologia moderna

Nos seus primórdios, a colocação de implantes dependia sobretudo da habilidade técnica do médico dentista e do seu juízo clínico, baseando-se, na maioria dos casos, em radiografias bidimensionais. Embora estes métodos tenham possibilitado inúmeros sucessos, estavam frequentemente associados a limitações significativas, como o posicionamento inadequado dos implantes, o risco de lesão de estruturas anatómicas vizinhas (como o nervo alveolar inferior ou os seios maxilares), a variabilidade interindividual das estruturas ósseas e períodos de recuperação prolongados. Estas condicionantes evidenciavam a necessidade de recorrer a abordagens mais fiáveis, reprodutíveis e individualizadas (Gonçalves Duarte e al., 2025)

Foi neste contexto que emergiram avanços tecnológicos de grande impacto, responsáveis por transformar profundamente a prática implantológica contemporânea. Entre eles destacam-se a introdução do CBCT, o desenvolvimento de *softwares* de planeamento tridimensional e, mais recentemente, a cirurgia guiada e a cirurgia navegada, que possibilitaram alcançar níveis inéditos de precisão, reforçando a segurança operatória e aumentando a previsibilidade dos resultados clínicos (Gonçalves Duarte e al., 2025).

A necessidade de posicionar os implantes com exatidão conduziu ao desenvolvimento do conceito de implantologia guiada pela prótese, que assenta no princípio de que a posição e a angulação dos implantes devem ser previamente determinadas na fase de diagnóstico (Kusum e al., 2022).

Neste enquadramento, a presente revisão narrativa tem como objetivo analisar o desenvolvimento da cirurgia guiada em implantologia, abordando os diferentes tipos de guias cirúrgicas, as técnicas de colocação assistida e a implantologia navegada, de forma a compreender melhor o seu papel na otimização da precisão cirúrgica e na melhoria da reabilitação protética. No final dos objetivos acrescentar as bases de dados e palavras-chave.

II. DESENVOLVIMENTO

2.1. Definição e classificação de uma guia de implantes

Em implantologia, a guia cirúrgica constitui um dispositivo médico utilizado para transpor, de forma precisa, o planeamento virtual para a situação clínica real, aquando da colocação de um ou mais implantes. O seu objetivo é orientar o posicionamento das brocas cirúrgicas e/ou dos implantes, tendo em conta tanto as limitações anatómicas (volume ósseo, estruturas nervosas, dentes adjacentes) como as condicionantes protéticas (eixo de inserção, ponto de emergência, exigências funcionais e estéticas).

A utilização da guia permite a transição de uma cirurgia tradicional não guiada, onde a precisão do gesto depende sobretudo da experiência e destreza do operador, para uma abordagem baseada num planeamento digital, reproduzível e rigoroso, planeada previamente e em conformidade com o projeto protético inicial (Sastre e al., 2018).

Este dispositivo contribui para um posicionamento mais seguro e previsível dos implantes, particularmente em casos complexos, reduzindo os riscos anatómicos, como a lesão nervosa ou a perfuração da membrana sinusal, e melhorando os resultados funcionais e estéticos a longo prazo (Gonçalves Duarte e al., 2025).

Assim, as guias cirúrgicas podem ser classificadas segundo quatro critérios principais (Tabela 1):

- Utilização primária: cirúrgica e não cirúrgica
- Nível de orientação: parcialmente guiada (ou semi-guiada) e totalmente guiada
- Dependendo das tecnologias utilizadas: convencional, estática, dinâmica
- Suporte: dentário, mucoso, ósseo, suportado por pinos ou implantes.

Tabela 1: Categoria de guias cirúrgicas em implantologia

Categorias	Tipo de guia	Descrição / Indicação	Referências bibliográficas
Indicação	Guia não cirúrgica	Utilizado apenas para o planejamento (ex. guia radiológica)	(Gonçalves Duarte et al., 2025)
	Guia cirúrgica	Utilizado durante a cirurgia para guiar os instrumentos	(Dioguardi et al., 2023)
Nível de guia *só para guias estáticas	Guia de perfuração piloto	Apenas a primeira perfuração é guiada (<i>pilot drill</i>)	(Araujo-Corchado & Pardal-Peláez, 2022)
	Parcialmente guiado	A sequência de perfuração é guiada, mas o implante é inserido manualmente	(Araujo-Corchado & Pardal-Peláez, 2022)
	Totalmente guiado	Perfuração e inserção do implante são totalmente guiadas	(Araujo-Corchado & Pardal-Peláez, 2022)
Tecnologia	Guia convencional	Fabricado manualmente (alginato e gesso), sem planejamento digital	(Berta et al., 2024)
	Guia estática digital	Desenhado e fabricado por CAD/CAM, impresso em 3D	(D’haese et al., 2017)
	Guia dinâmica	Navegação em tempo real	(D’haese et al., 2017)
Tipo de suporte *só para guias estáticas	Guia dento-suportado	Apoiado em dentes remanescentes — muito estável	(D’haese et al., 2017)
	Guia mucoso-suportado	Apoiado na mucosa — usado em pacientes totalmente desdentados	(D’haese et al., 2017)
	Guia ósseo-suportado	Apoiado diretamente no osso após levantamento de retalho — indicado em reconstruções	(D’haese et al., 2017)
	Guia implanto/pino-suportado	Apoiado em implantes já instalados ou em mini-pinos — alta estabilidade	(D’haese et al., 2017)

2.2. Guia radiológica

As guias radiológicas são dispositivas em resina, geralmente concebidos a partir da duplicação de uma prótese já existente (desdentados totais) ou de um *wax-up* (desdentados parciais), ou seja, uma modelação em cera da futura reabilitação protética, realizada pelo protésico em estreita colaboração com o médico dentista. Estes dispositivos integram marcadores rádio-opacos como a guta-percha, esferas metálicas em titânio ou aço inoxidável, resinas carregadas com sulfato de bário ou fios metálicos. Estes marcadores vão servir como referências protéticas, nomeadamente indicando a localização do bordo incisal, o eixo vestibulo-lingual ou o contorno da base protética (Scherer, 2014). Durante a realização do exame radiográfico, a guia radiológica é colocada na cavidade oral do paciente, permitindo visualizar nas três dimensões do espaço o eixo de inserção e a posição protética ideal dos futuros implantes, possibilitando a determinação da sua orientação ótima (Gellée e al., 2022).

Além disso, estes marcadores rádio-opacos funcionam como referências fiduciárias que facilitam a correlação entre o projeto protético e os dados imagiológicos. Em associação com a informação obtida através do CBCT da zona desdentada, estas guias permitem identificar com precisão estruturas anatómicas críticas (nervos alveolares inferiores, nervos mentonianos, fossas nasais e cavidades sinusais) e suportam, assim, um planeamento digital rigoroso (Peng e al., 2017; Scherer, 2014).

A guia radiológica é, portanto, uma ferramenta de planeamento guiado proteticamente, mas que, por si só, não orienta o profissional durante o ato cirúrgico. Todavia, existem técnicas que permitem a sua conversão em guia cirúrgica (Gonçalves Duarte et al., 2025).

Entre elas, destaca-se a técnica de conversão manual descrita por Chan et al. (2013), que utilizaram uma guia em acrílico concebida com o *software* NobelProCera® (Nobel Biocare, Kloten, Zurique, Suíça) (Figuras 1 e 2). Embora relativamente simples e acessível, esta técnica não está isenta de falhas, sobretudo na definição do ponto inicial de perfuração, o que pode comprometer significativamente a precisão angular do implante a colocar.

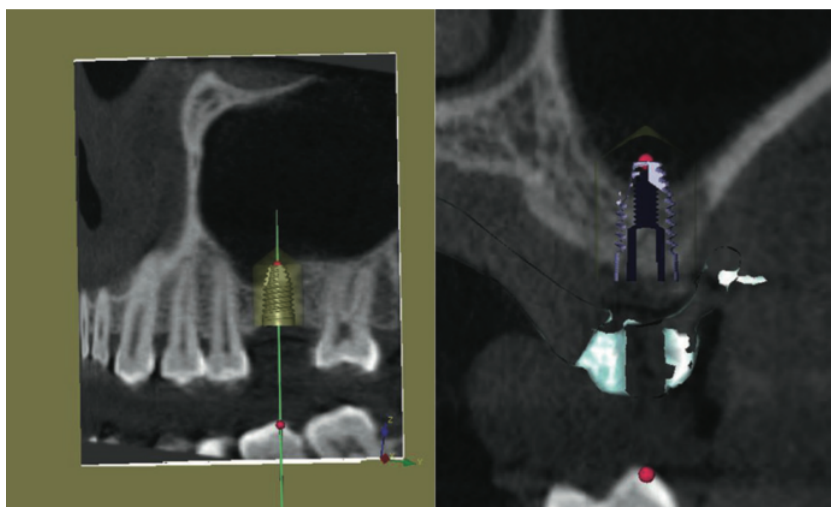


Figura 1 : Planeamento de implantes utilizando o software Procera® Clinical Design Premium (Chan et al., 2013)

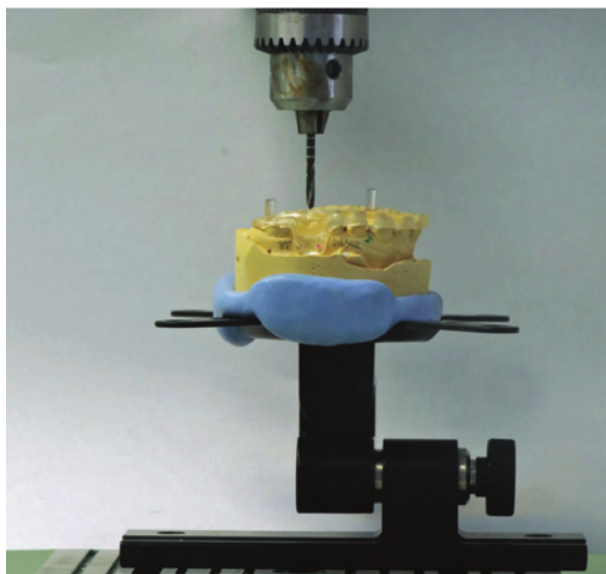


Figura 2: Conversão de uma guia radiológica em guia cirúrgica (Chan et al., 2013)

Para além das técnicas manuais, surgiram também métodos mais modernos e tecnologicamente avançados, como o Método de Conversão Geométrica (GCM), desenvolvidos com o objetivo de aumentar a precisão e a consistência deste processo de transformação. Este método baseia-se na colocação de hastes cerâmicas paralelas de 2 mm na guia radiológica, permitindo a sua conversão precisa numa guia cirúrgica. Após a aquisição da CBCT e o planeamento dos implantes através de software específico,

recorrem-se a planos geométricos para determinar o eixo, o ponto de entrada e a profundidade dos implantes.

Trata-se de um método compatível com um fluxo de trabalho digital parcial, que se destaca pela elevada precisão e por apresentar um custo mais acessível do que os sistemas totalmente digitais. A transformação da guia é finalizada com recurso a uma máquina de perfuração específica (Peng et al., 2017) (Figura 3).

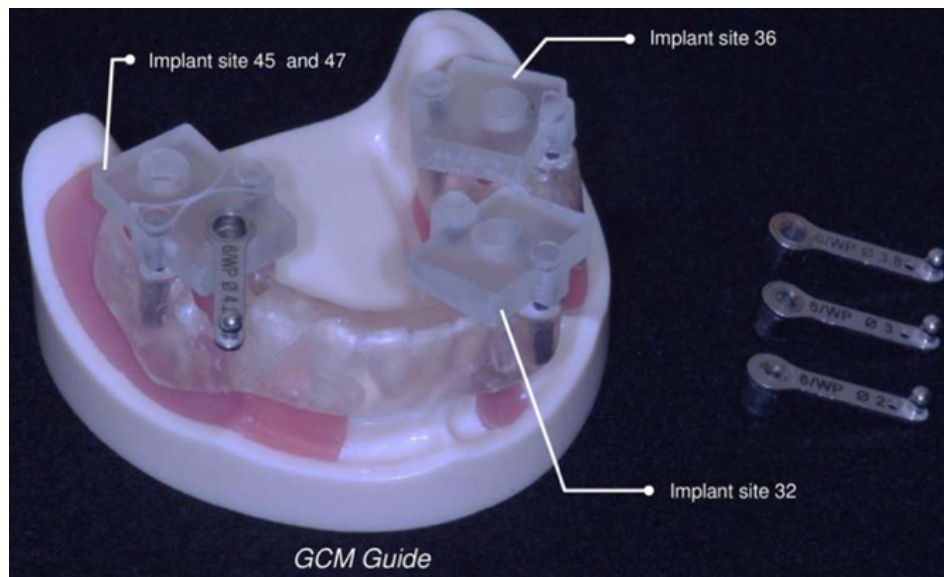


Figura 3: Guia cirúrgica convertida utilizando o GCM (Peng et al., 2017)

2.3. Cirurgia guiada

A cirurgia guiada em implantologia representa, atualmente, um dos avanços mais relevantes no âmbito da medicina dentária digital. Consiste na tentativa de transferência precisa do planeamento virtual da colocação de um ou mais implantes para a cavidade oral do paciente, recorrendo a ferramentas tecnológicas que orientam o gesto cirúrgico de forma pré-estabelecida ou em tempo real. O objetivo principal é assegurar o posicionamento tridimensional exato dos implantes, em conformidade com o projeto protético e respeitando as estruturas anatómicas críticas, garantindo, assim, uma cirurgia previsível, segura e reproduzível (Shalash & Zohny, 2025).

Em setembro de 2022, o Dr. Philippe Levy publicou no jornal científico francófono *Dental Tribune* o artigo intitulado «*Cas clinique de chirurgie guidé: C'est la prothèse qui guide l'implant et non le contraire*» [Caso clínico de cirurgia guiada: é a prótese que guia o implante e não o contrário]. Neste trabalho, o autor recorda que, originalmente, as guias cirúrgicas eram confeccionadas a partir de guias radiológicas em resina integrando marcadores rádio-opacos. Esses dispositivos eram posteriormente perfurados manualmente para poderem ser utilizados durante a intervenção. Apesar da sua simplicidade e rapidez de produção, apresentavam uma precisão limitada, sobretudo devido à ausência de integração digital no processo de fabrico (Levy, 2022).

A evolução tecnológica das últimas duas décadas permitiu a generalização da cirurgia assistida por computador, que atualmente se organiza em três modalidades principais: cirurgia guiada estática, cirurgia dinâmica e cirurgia robotizada. Todas partilham um princípio comum: a transposição clínica de um plano implantário previamente estabelecido com recurso a software de planeamento digital baseado em ficheiros *Digital Imaging and Communication in Medicine* (DICOM) e *Standard Tessellation Language* (STL) (Khaoen et al., 2024).

A cirurgia guiada estática baseia-se na utilização de guias cirúrgicos físicos, geralmente impressos em 3D, que condicionam mecanicamente o posicionamento das brocas durante a intervenção. Estas guias podem ser suportadas pelos dentes, pela mucosa, pelo osso ou por coroas protéticas, consoante as características do caso clínico (Araujo-Corchado & Pardal-Peláez, 2022). Esta abordagem permite cirurgias minimamente invasivas e favorece a aplicação de protocolos de carga imediata, nomeadamente pela possibilidade de conceber previamente a prótese provisória, antes mesmo da intervenção (Gillot et al., 2010; Romandini et al., 2023) (Figura 4).



Figura 4: O processo de guia cirúrgica estática. A – *Design* da posição ideal do implante B – Guia cirúrgica inserida e controlada quanto à estabilidade da posição do implante. C – Utilização da broca para a preparação. D – Imagem intraoral da colocação do implante (Wu et al., 2020)

A cirurgia guiada dinâmica distingue-se pela ausência de uma guia física. Este método baseia-se num sistema de navegação em tempo real, associado a *software* de rastreamento ótico ou eletromagnético, que permite ao profissional visualizar continuamente a posição e a angulação da broca no espaço operatório. Proporciona, assim, uma elevada liberdade intraoperatória, mantendo ao mesmo tempo um nível de precisão comparável ao obtido com as guias estáticas (Araujo-Corchado & Pardal-Peláez, 2022) (Figura 5).

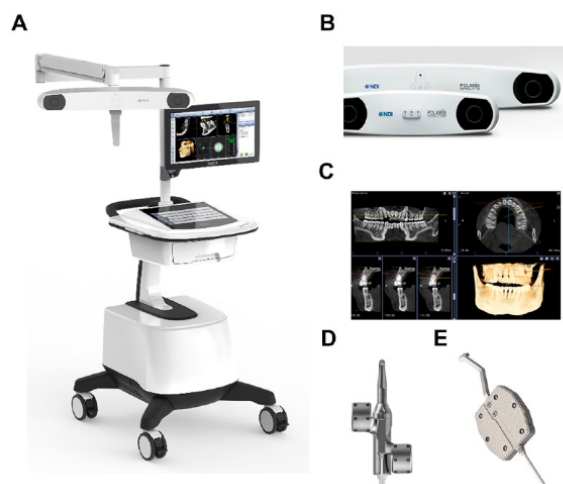


Figura 5: Exemplo de um sistema de navegação dinâmica. (A) Sistema de navegação dinâmica DCARER (Suzhou Digital-Health Care Co., Ltd, Suzhou, China), com rastreamento ativo, incluindo computador, ecrã e câmara estereoscópica. (B) Sistema de rastreamento composto por uma câmara estereoscópica de infravermelhos. (C) *Software* DNS suporta o planeamento pré-operatório e fornece orientação intraoperatória em tempo real. (D, E) Instrumentos de rastreamento, incluindo uma peça de mão dentária especializada (D) e um posicionador conectado aos dentes (E), emitindo ativamente luz infravermelha para o sistema de rastreamento (Tang et al., 2024)

A cirurgia robotizada representa a abordagem mais recente no âmbito da implantologia digital. Recorre a braços robóticos semi-autónomos, capazes de controlar e até de restringir ativamente os movimentos do profissional com base no plano previamente estabelecido (Figura 6). Apesar do seu elevado potencial, esta técnica permanece pouco difundida na prática clínica corrente, devido ao custo elevado e à complexidade de implementação. Ainda assim, abre perspetivas para uma cirurgia de precisão incomparável (Khaohoen et al., 2024).

Contudo, dado tratar-se de um desenvolvimento ainda muito recente e cuja aplicação se encontra limitada a centros altamente especializados, a cirurgia robotizada não será objeto de análise aprofundada neste trabalho. A atenção centrar-se-á, portanto,

nas abordagens estática e dinâmica, atualmente as modalidades mais amplamente utilizadas e validadas na prática clínica.

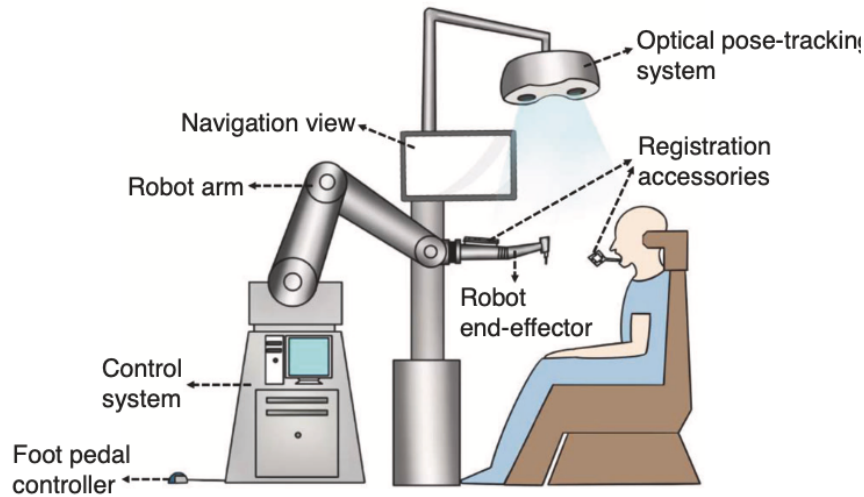


Figura 6 : A arquitetura da robótica em implantologia dentária (Liu et al., 2024)

Por fim, a associação da cirurgia guiada, seja na modalidade estática ou dinâmica, com uma abordagem sem retalho (*flapless*) apresenta benefícios clínicos significativos, nomeadamente pela maior precisão e pela redução das complicações pós-operatórias. Esta técnica permite alcançar um posicionamento implantário ideal, enquanto minimiza a variabilidade operatória e o traumatismo dos tecidos. Consequentemente, favorece uma cicatrização mais rápida e uma menor morbidade para os pacientes (Gonçalves Duarte et al., 2025).

2.3.1. Guia cirúrgica estática

As guias cirúrgicas estáticas constituem atualmente a abordagem mais amplamente utilizada na cirurgia implantológica assistida por computador (CAIC). Estes dispositivos são realizados antes da intervenção cirúrgica com recurso a software de *Computer-Aided Design* (CAD) e posteriormente produzidos através de processos de *Computer-Aided Manufacturing* (CAM), como a impressão 3D. São concebidos de forma personalizada a partir dos dados clínicos e radiológicos do paciente. Na maioria dos casos, a sua fabricação ocorre em laboratório com impressoras profissionais; contudo, graças

aos avanços tecnológicos, é hoje possível produzi-los diretamente no consultório (Wegmüller et al., 2021). Uma vez bem posicionados na boca do paciente, não podem mais ser modificados, o que os torna instrumentos rígidos, mas extremamente precisos para a realização do gesto operatório (Chackartchi et al., 2022).

A sua principal vantagem reside na capacidade de transferir fielmente o planeamento virtual da colocação dos implantes para o sítio cirúrgico real. Isso permite posicionar os implantes de acordo com as exigências anatómicas e protéticas com grande exatidão (Todaro et al., 2023). Vários estudos demonstraram que a utilização de guias estáticas reduz de forma significativa os desvios em relação ao posicionamento planeado, em comparação com a colocação a mão livre, que gera até duas vezes mais erros (Shalash & Zohny, 2025).

Além disso, a precisão e a previsibilidade proporcionadas pela cirurgia guiada contribuem de forma favorável para a durabilidade dos implantes. Com efeito, um posicionamento ótimo garante uma distribuição equilibrada das forças mastigatórias, limitando assim os riscos de sobrecarga funcional e de falha do implante (Gonçalves Duarte et al., 2025). Contudo, vários fatores influenciam a sua precisão: a qualidade dos dados radiográficos, o alinhamento dos ficheiros digitais STL e DICOM, o processo de fabrico, o tipo de suporte sobre o qual o guia assenta, bem como o cumprimento rigoroso do protocolo de colocação por parte do profissional durante a intervenção (Shalash & Zohny, 2025). Existem várias modalidades de utilização das guias estáticas:

- Cirurgia totalmente guiada: a guia orienta a totalidade da colocação do implante (desde a broca piloto até à inserção do implante).
- Cirurgia parcialmente guiada, que inclui:
 - Cirurgia *drill-guided*: perfuração integralmente guiada, mas colocação livre do implante
 - Cirurgia *pilot drill-guided*: apenas a primeira perfuração é guiada (Araujo-Corchado & Pardal-Peláez, 2022).

Por fim, existe um consenso científico que considera o protocolo totalmente guiado como a referência na prática clínica, devido à sua fiabilidade e ao seu elevado grau de precisão. (Khaoen et al., 2024).

2.3.1.1.Recolha das informações

A implantologia moderna beneficia plenamente da integração das tecnologias digitais, que permitem atualmente estruturar um fluxo de trabalho totalmente digitalizado, desde a fase de diagnóstico até à fabricação da guia cirúrgica. Este fluxo assenta em várias etapas sucessivas:

- Aquisição de dados tridimensionais através da tomografia computadorizada de feixe cónico (CBCT)
- Impressões óticas (scans intraorais, extraorais e faciais)
- Fusão dos ficheiros DICOM e STL
- Segmentação das estruturas anatómicas
- Planeamento implantário orientado pelas exigências protéticas
- Conceção e fabrico da guia através de *Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing* (CAD/CAM) (Flügge et al., 2022; Kusum et al., 2022).

A medicina dentária foi uma das primeiras áreas médicas a utilizar plenamente as ferramentas provenientes da conceção digital e da impressão 3D, inicialmente desenvolvidas em ortopedia, integrando desde cedo um fluxo de trabalho totalmente digitalizado, tanto em meio hospitalar como em consultório privado (Todaro et al., 2023).

A CBCT, combinada com os softwares de planeamento 3D, permite integrar os parâmetros protéticos desde as primeiras etapas do planeamento. Esta abordagem, denominada “retrógrada”, melhora a segurança do gesto cirúrgico, reforça a reprodutibilidade dos resultados e permite antecipar com precisão a posição dos implantes, respeitando a anatomia e as exigências funcionais (Araujo-Corchado & Pardal-Peláez, 2022; Schubert et al., 2019).

Por fim, esta digitalização do processo de tomada de decisão transformou a comunicação com o paciente e com a equipa clínica. Facilita a visualização dos objetivos terapêuticos, encurta os prazos de tratamento e torna possível, em certos casos, a carga

imediate de uma prótese provisória. Em suma, o fluxo digital representa atualmente um avanço determinante na abordagem implantológica, especialmente nos casos clínicos complexos (Todaro et al., 2023).

CBCT:

A integração da tomografia volumétrica de feixe cônico (CBCT) (Figura 7) no fluxo de trabalho digital em implantologia representa um avanço significativo em termos de precisão diagnóstica e de planeamento cirúrgico. Ao contrário dos métodos radiográficos convencionais bidimensionais, a CBCT permite uma análise tridimensional das estruturas ósseas, dentárias e anatómicas nobres, mantendo simultaneamente uma baixa dose de exposição à radiação (Scherer, 2014; Todaro et al., 2023). Esta imagiologia volumétrica oferece uma visualização clara e detalhada do osso alveolar, do trajeto intraósseo do nervo alveolar inferior e dos dentes adjacentes informações essenciais para antecipar a estabilidade primária dos implantes e adaptar as técnicas cirúrgicas às exigências anatómicas (Kernen et al., 2020; Khaohoen et al., 2024).



Figura 7 : Fotografia de um exame de tomografia computadorizada de feixe cônico (CBCT) realizado com o dispositivo Planmeca Viso G3® (Planmeca Oy, Helsínquia, Finlândia) em contexto clínico

Os dados obtidos são apresentados sob a forma de cortes multiplanares e reconstruções de superfície, permitindo uma avaliação detalhada da topografia óssea.

Cada voxel¹ da imagem CBCT corresponde a um valor de cinzento definido pela atenuação da radiação, de acordo com as características específicas do tecido, o que permite uma segmentação seletiva dos tecidos. Esta etapa é crucial para gerar modelos 3D utilizáveis nos *softwares* de planeamento: consiste em isolar manual ou automaticamente as estruturas ósseas alveolares e os dentes (Kernen et al., 2020).

Além disso, a utilização do CBCT estende-se ao controlo pós-operatório no âmbito da cirurgia guiada. Ao sobrepor o CBCT pré-operatório (com os implantes planificados virtualmente) ao CBCT pós-operatório (com os implantes colocados), é possível avaliar com precisão os desvios de posicionamento, denominados “*delta*”, e assim medir objetivamente a precisão da orientação cirúrgica (Todaro et al., 2023).

Todos estes contributos fazem do CBCT uma ferramenta indispensável no planeamento moderna dos tratamentos implantológicos guiados, especialmente nos casos complexos que exigem uma avaliação detalhada dos volumes ósseos disponíveis.

O tamanho e a posição do campo de visão (*Field Of View* ou FOV) do CBCT devem ser escolhidos de forma adequada para se obterem dados utilizáveis. Esta escolha é crucial, pois um FOV demasiado restrito pode omitir zonas-chave necessárias ao planeamento implantológico (Schubert et al., 2019)

Scanner intraoral e extraoral: método direto e indireto:

O fluxo de trabalho indireto corresponde a um método no qual a impressão do paciente é inicialmente realizada de forma convencional, utilizando materiais físicos como o silicone ou o alginato. Esta impressão é depois moldada para obter um modelo em gesso, que será digitalizado através de um scanner extraoral no laboratório. O ficheiro obtido, geralmente no formato STL, pode então ser utilizado para o planeamento implantar digital ou para a conceção de próteses sobre implantes. Este método, embora proveniente de uma abordagem mais tradicional, continua a ser amplamente utilizado em muitos consultórios, especialmente quando não se dispõe de equipamento intraoral ou

¹ Um voxel (contração de *volume* e *pixel*) é a unidade básica de uma imagem médica em 3D.

quando a equipa clínica está habituada a um protocolo misto. O estudo de Kiatkroekkrai e al., 2020 demonstrou que as guias cirúrgicas estáticas fabricadas a partir destes scans extraorais apresentam uma precisão tridimensional equivalente à das guias concebidos com base em ficheiros provenientes de scanners intraorais, validando assim a fiabilidade clínica desta abordagem.

Paralelamente, o desenvolvimento dos scanners intraorais (Figura 8) transformou consideravelmente a fase de aquisição de dados digitais. Estes dispositivos permitem captar a forma, as estruturas dentárias e os tecidos moles diretamente na boca, sem recurso a uma impressão física permitindo assim um fluxo de trabalho 100% digital (Shetty et al., 2023). A abordagem digital direta oferece várias vantagens: redução dos erros de manipulação, maior conforto para o paciente e diminuição significativa do tempo passado na cadeira (Todaro et al., 2023). Num estudo comparativo, Cappare et al., 2019 observaram uma redução do tempo clínico entre 4% e 20% quando se utiliza um scanner intraoral em comparação com um método de digitalização extraoral.

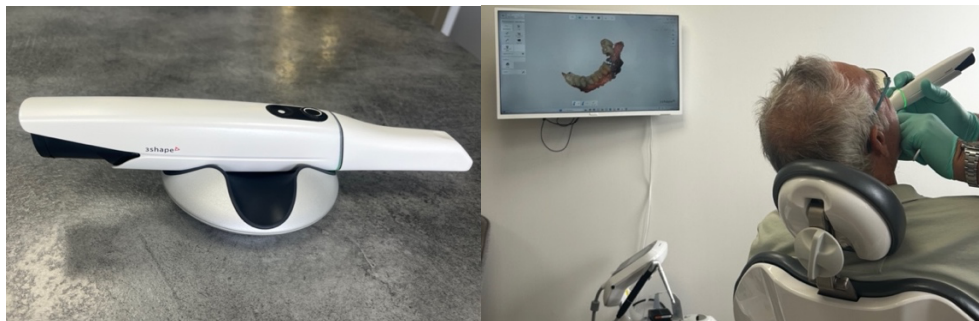


Figura 8: Fotografia dum scanner intraoral da marca 3Shape TRIOS 5 Wireless® (3Shape A/S, Copenhaga, Dinamarca) em contexto clínico

No entanto, como referem Todaro e al., 2023, a qualidade das impressões digitais continua a depender do domínio técnico do operador. Uma aquisição incorreta pode provocar distorções no modelo virtual, comprometendo a precisão do planeamento implantar. Isto relembra que, embora a tecnologia facilite o processo, a competência clínica continua a ser um fator determinante na fiabilidade do resultado.

Ficheiros DICOM e STL:

A precisão do planeamento cirúrgico em implantologia baseia-se na capacidade de combinar diferentes fontes de dados de diagnóstico, de modo a reconstruir virtualmente o ambiente clínico do paciente. Entre essas fontes, os ficheiros DICOM e STL desempenham um papel fundamental na elaboração de um modelo tridimensional completo e funcional.

O planeamento digital em implantologia assenta na fusão de dois tipos de dados complementares, provenientes de modalidades de aquisição distintas: os ficheiros DICOM, gerados por exames radiográficos seccionais (CBCT ou TC), e os ficheiros STL, obtidos a partir de scanners óticos intraorais ou extraorais. Esta combinação permite reconstruir uma representação tridimensional completa do paciente, integrando simultaneamente a anatomia interna e a envolvente externa (Todaro et al., 2023).

- Dados DICOM: Função e Características

Os ficheiros DICOM constituem o padrão internacional para o armazenamento e a transferência de dados de imagiologia médica. Estes ficheiros incluem não só os dados geométricos em vóxeis, mas também informações técnicas sobre a aquisição, como os parâmetros radiográficos, a resolução ou ainda o protocolo utilizado (Kernen et al., 2020). Em implantologia, estes ficheiros são indispensáveis para visualizar estruturas internas como o osso maxilar e mandibular, os trajetos nervosos, os seios maxilares, e para avaliar os volumes ósseos disponíveis (Berta et al., 2024).

- Etapa de segmentação

A segmentação das estruturas anatómicas é uma etapa essencial no fluxo digital em implantologia, pois permite transformar os volumes radiográficos obtidos por CBCT em modelos 3D utilizáveis, isolando os dentes, o osso alveolar e as estruturas críticas. Como referem Cui e al., 2022, «Segmentation aims to delineate tooth and alveolar bone structures from CBCT images», [A segmentação tem como objetivo delinear as estruturas dentárias e do osso alveolar a partir de imagens CBCT]. Este procedimento é indispensável para garantir a precisão do posicionamento dos implantes durante a conceção das guias cirúrgicas. No fluxo digital, a segmentação ocorre imediatamente

após a aquisição CBCT, antes do planeamento implantar e da fusão com os dados óticos, constituindo uma etapa-chave entre a imagiologia e a modelação 3D.

Tradicionalmente, a segmentação era realizada através de métodos como o *graph cut* ou os algoritmos *level set*, técnicas fortemente dependentes da intervenção manual, morosas e particularmente vulneráveis a artefactos de imagem. Estas limitações foram ultrapassadas graças às soluções baseadas em inteligência artificial, como as *Convolutional Neural Networks* (CNNs), que permitem uma segmentação automática, rápida e precisa. Os autores referem: «The proposed AI system demonstrates segmentation accuracy comparable to, or even superior to, that of experienced clinicians», [O sistema de IA proposto apresenta uma precisão de segmentação comparável ou mesmo superior à dos clínicos experientes.] (Cui et al., 2022).

Além disso, a precisão da segmentação e a sua correta fusão com os dados de superfície óticos (ficheiros STL) é determinante. Qualquer erro na delimitação dos volumes ósseos ou dentários pode provocar um desalinhamento entre os ficheiros, comprometendo o planeamento implantar e reduzindo a precisão da guia (Marquez Bautista et al., 2024). Assim, a fiabilidade do modelo 3D segmentado condiciona diretamente o sucesso das etapas subsequentes do fluxo digital, especialmente nos casos complexos ou na presença de anatomia alterada.

- Dados STL: Aquisição e Característica

Após a conclusão da segmentação, os dados radiológicos estão prontos para ser fundidos com os modelos de superfície obtidos por scanners óticos, representados pelos ficheiros *Standard Tessellation Language* (STL). Por oposição, os ficheiros STL representam o contorno externo das estruturas e são obtidos por meio de um scanner intraoral da cavidade oral ou através da digitalização extraoral de modelos em gesso. Estes ficheiros contêm dados geométricos superficiais, permitindo visualizar os dentes, os tecidos moles e os elementos protéticos existentes, tanto em 2D (a partir de cortes) como em 3D (Schubert et al., 2019). Atualmente, estes ficheiros são considerados fiáveis para modelação, planeamento protético e fabrico de guias cirúrgicos (Figura 9).

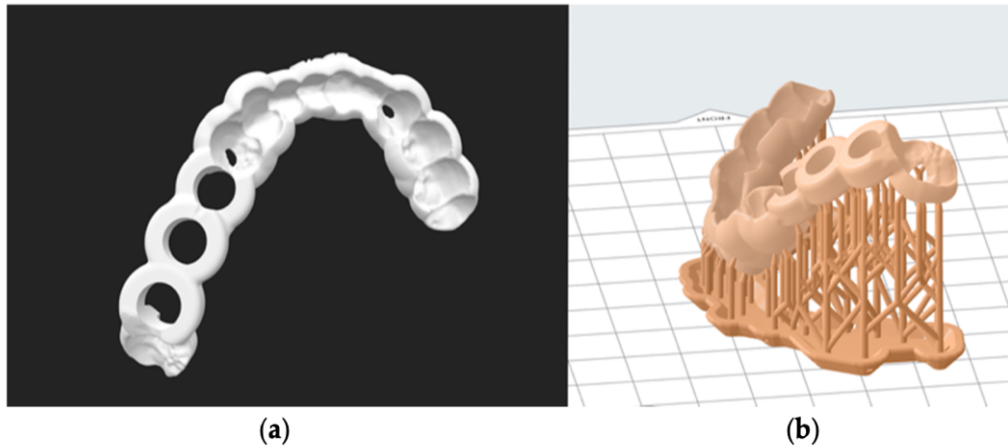


Figura 9 : Conceção digital de uma guia cirúrgica estática: (a) Ficheiro de planeamento STL e (b) preparação para impressão com o Form 3, utilizando o software PreForm® (Formlabs Inc., Somerville, MA, USA) (Wegmüller et al., 2021)

- Fusão dos ficheiros DICOM e STL: *Registration*

Para que o planeamento seja fiável, é indispensável uma fusão correta entre os dados DICOM e STL. Este processo é denominado *registration* ou registo. Consiste na sobreposição dos dois conjuntos de dados com base em estruturas comuns, geralmente a superfície dos dentes visível tanto nas imagens CBCT como no modelo STL (Kernen et al., 2020). Quando a morfologia dentária não é suficiente (por exemplo, em pacientes totalmente edêntulos) ou apresenta restaurações metálicas (que provocam artefactos), podem ser utilizados marcadores fiduciais integrados numa goteira radiológica para orientar o alinhamento (Schubert et al., 2019). O sucesso desta fusão depende de vários parâmetros:

- A qualidade dos ficheiros de origem: resolução do CBCT, ausência de artefactos, estabilidade do paciente, qualidade do scan ótico (Schubert et al., 2019)
- A zona anatómica partilhada entre os dois ficheiros: o FOV (*field of view* ou campo de visão) do CBCT deve incluir as estruturas visíveis no scan STL, caso contrário o alinhamento torna-se impreciso ou mesmo impossível (Schubert et al., 2019).
- A ausência de distorções no modelo STL, que podem ocorrer em caso de aquisição incorreta ou de má junção das superfícies (Todaro et al., 2023).

Uma vez corretamente alinhados, os dados DICOM e STL são integrados num *software* de simulação implantar, permitindo um planeamento tridimensional pré-cirúrgico preciso. Este planeamento considera tanto as limitações anatómicas profundas como os requisitos protéticos, garantindo assim um posicionamento ideal do implante (Berta et al., 2024).

2.3.1.2.Planeamento

O planeamento implantar representa uma etapa decisiva para o sucesso dos tratamentos protéticos (Figura 10). Tem como objetivo determinar a posição ideal dos implantes, tendo em conta tanto as limitações anatómicas do sítio receptor como os requisitos protéticos associados à reabilitação oral final (Flügge et al., 2022). O implante não deve, portanto, ser posicionado apenas com base no volume ósseo disponível, mas sim em estreita relação com a morfologia da futura prótese, o perfil de emergência, bem como os contactos oclusais e proximais. Um posicionamento correto influencia diretamente a estética do resultado, a estabilidade biomecânica da restauração e a longevidade do implante (Thangwarawut et al., 2022).

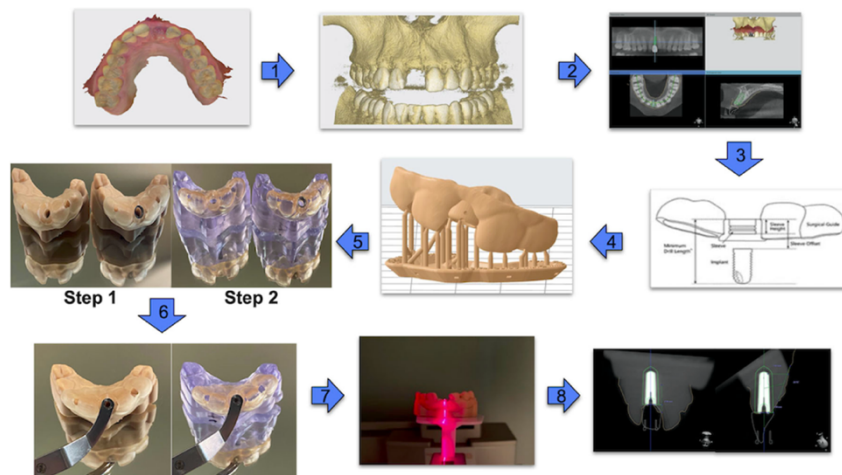


Figura 10: Fluxo de trabalho clínico demonstrado o planeamento para colocação de implantes, a conceção da guia, a impressão 3D e a colocação do implante (Adams et al., 2023)

Planeamento convencional VS planeamento digital:

Tradicionalmente, o planeamento implantar baseava-se na utilização de modelos em gesso acompanhados de um *wax-up* físico, posteriormente transferido para uma goteira radiológica. Esta abordagem permitia uma sobreposição visual entre o volume ósseo e a prótese projetada, mas implicava várias etapas manuais e uma grande dependência do técnico.

Atualmente, os protocolos digitais tendem a substituir este método. Permitem uma conceção direta em *softwares* de planeamento, oferecendo uma visualização tridimensional do projeto protético, associada a ferramentas de análise oclusal, articulação virtual e modelação personalizada (Flügge et al., 2022). As plataformas modernas permitem também a integração de um *wax-up* virtual, modificável a qualquer momento, o que constitui uma vantagem em termos de flexibilidade (Shetty et al., 2023). Comparativamente aos métodos tradicionais, estes *wax-ups* digitais oferecem uma maior eficiência clínica e podem ser integrados diretamente nos *softwares* de cirurgia guiada.

Softwares de planeamento:

No seu estudo comparativo sobre *softwares* de planeamento implantar guiado, Kernen et al., 2020 procurou evidenciar as diferenças em termos de compatibilidade, visualização, *design* e fabrico das guias cirúrgicas. Os autores mostram que, embora todos os *softwares* permitam o planeamento guiado, o seu grau de abertura, flexibilidade e personalização varia consideravelmente. Alguns programas são mais abertos e flexíveis (como o coDiagnostiX®, Implant Studio® ou Smop®), enquanto outros são mais fechados e limitados (como o NobelClinician® ou o Simplant Pro®) (Figura 11). A escolha do *software* deve basear-se em vários critérios: o tipo de suporte pretendido (dentário, mucoso ou ósseo), a compatibilidade com os implantes selecionados, o nível de personalização desejado para a guia, bem como as restrições de tempo e de custo (Kernen et al., 2020; Khourani & Yamani, 2021).

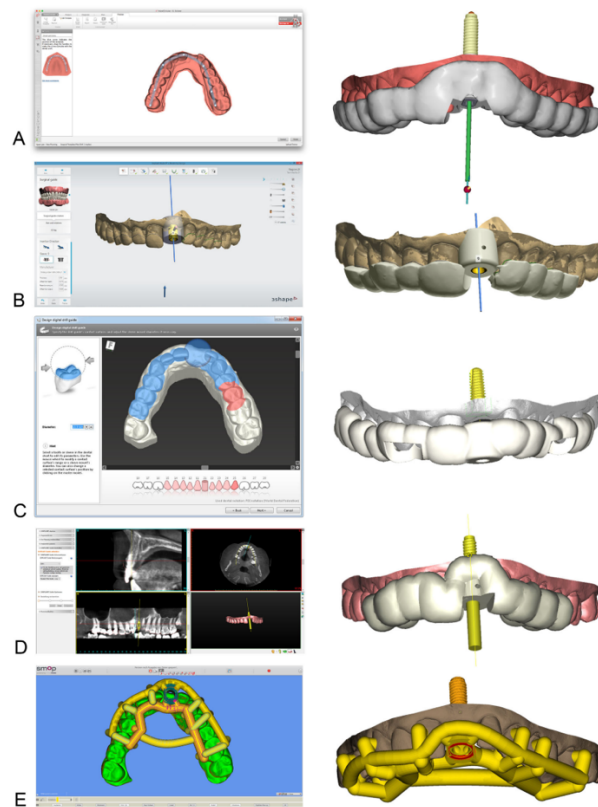


Figura 11: Conceção de guias cirúrgicas para perfuração em NobelClinician® (Nobel Biocare Services AG, Kloten, Suíça) (A), Implant Studio® (3Shape A/S, Copenhaga, Dinamarca) (B), coDiagnostiX® (Dental Wings GmbH, Chemnitz, Alemanha) (C), Simplant® (Dentsply Sirona, York, EUA) (D) e SMOP (Swissmeda AG, Baar, Suíça) (E), através da seleção das superfícies de suporte (Kernen et al., 2020)

A montante, ferramentas como o *Digital Smile Design* (DSD) podem ser integradas neste fluxo para antecipar as expectativas estéticas do paciente e orientar a posição dos implantes com base no resultado visual desejado.

Além disso, tecnologias mais avançadas, como a análise por elementos finitos (*Finite Element Analysis*, FEA), permitem avaliar a distribuição das tensões mecânicas sobre o osso e os implantes, otimizando assim o planeamento em casos com elevado risco biomecânico (Fiorillo et al., 2023).

Deste modo, a escolha do *software* deve ser adaptada ao sistema implantar utilizado, às necessidades protéticas, à complexidade do caso e ao ambiente clínico do profissional.

Impacto clínico do planeamento virtual guiado:

Uma das vantagens mais concretas do planeamento virtual é a possibilidade de produzir uma prótese provisória para carga imediata, diretamente a partir do projeto digital. Este tipo de procedimento permite:

- Uma redução do tempo operatório
- Uma cirurgia menos invasiva graças a abordagem *flapless*
- Uma diminuição da morbilidade pós-operatória (Todaro et al., 2023).

O planeamento 3D desempenha também um papel fundamental na avaliação da espessura da cortical vestibular e na relação entre os implantes e a cortical vestibular — aspetos cruciais para evitar complicações ósseas (Dioguardi et al., 2023). Por fim, a escolha do software de planeamento deve ter em conta a compatibilidade com os sistemas implantológicos utilizados na prática clínica diária, bem como a precisão da guia cirúrgica (Flügge et al., 2022; Kernén et al., 2020).

2.3.1.3.Fabricação da guia

Locais de fabrico:

As guias cirúrgicas podem ser fabricadas em um laboratório especializado ou diretamente no consultório, dependendo do equipamento disponível e da escolha do médico. O crescimento das tecnologias digitais, especialmente a acessibilidade de *software* de planeamento de implantes e impressoras 3D de alta precisão, permite hoje uma produção no local rápida e confiável. Esta possibilidade de fabricação no consultório, também conhecida como "*chairside*", oferece maior autonomia, reduz os tempos de processamento e permite uma melhor integração do fluxo de trabalho digital na prática clínica (Kobe et al., 2023; Wegmüller et al., 2021).

Tecnologias de fabricação: subtrativa VS aditiva:

Duas abordagens são usadas principalmente na fabricação das guias cirúrgicas digitais: técnicas subtrativas (fresagem) e técnicas aditivas (impressão 3D), ambas baseadas em uma cadeia digital do tipo CAD/CAM (Figura 12).

- A fresagem (subtrativa) permite obter estruturas homogêneas, rígidas e precisas. Ainda é recomendado para peças sujeitas a grandes forças, mas gera um desperdício de material e limita a complexidade geométrica (Kusum et al., 2022).
- A impressão 3D (aditiva) permite a criação de geometrias complexas, mesmo impossíveis por fresagem, limitando ao mesmo tempo as perdas de material. É hoje amplamente utilizada na fabricação das guias cirúrgicas (Jeong et al., 2024; Morón-Conejo et al., 2024). Esta técnica é amplamente utilizada para fazer guias cirúrgicas em implantologia.

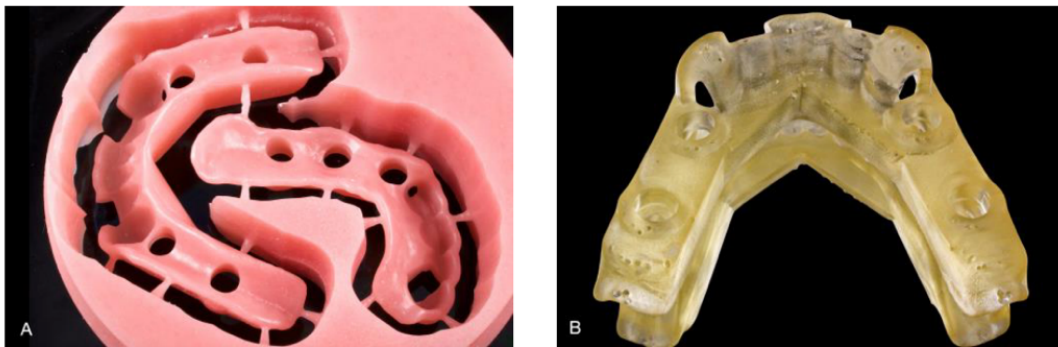


Figura 12: Exemplos de guias cirúrgicas estáticas: (A) guias cirúrgicas fresadas; (B) guia cirúrgica impressa em 3D (Lo Russo et al., 2023)

Tecnologias de impressão 3D: *StereoLithography (SLA)* e *Digital Light Processing (DLP)* aplicadas à fabricação das guias cirúrgicas estática:

Com a evolução das tecnologias digitais, as guias cirúrgicas passaram a ser concebidas a partir de dados de CBCT e de scans intraorais, sendo depois impressas em 3D com recurso a softwares de CAD. Esta abordagem oferece uma precisão significativamente superior à dos guias tradicionais. Entre as diferentes tecnologias de impressão disponíveis encontram-se SLA, DLP, FFF ou PolyJet.

Para além desta precisão, a impressão 3D permite um custo reduzido, uma poupança de tempo operatório e uma melhor adaptação anatómica (Jeong et al., 2024).

A *stereolithography* (SLA o estereolitografia) e o *Digital Light Processing* (DLP) são atualmente as tecnologias mais utilizadas para a fabricação das guias cirúrgicas implantológicas (Nulty, 2024). Por este motivo, a presente revisão centrar-se-á exclusivamente nestas duas técnicas.

- SLA

A SLA (Figura 13) consiste na solidificação de uma resina líquida através de um laser ultravioleta. Também conhecida como prototipagem rápida, esta tecnologia permite a fabricação de guias cirúrgicas personalizadas a partir de dados de imagiologia tridimensional, garantindo elevada precisão e uma adaptação protética (Peng et al., 2017).

Tahmaseb et al., 2014 demonstraram que as guias impressas por SLA apresentavam desvios médios de 0,9 mm na entrada e 1,0 mm no ápice, contra 2,1 mm e 1,5 mm para as guias convencionais.

Atualmente, a SLA é amplamente utilizada em medicina dentária, não só para guias cirúrgicas, mas também para coroas, pontes provisórias e modelos de diagnóstico (Jeong et al., 2024). A sua principal limitação reside na lentidão do processo, dado que o feixe de laser desenha cada secção do modelo ponto a ponto.

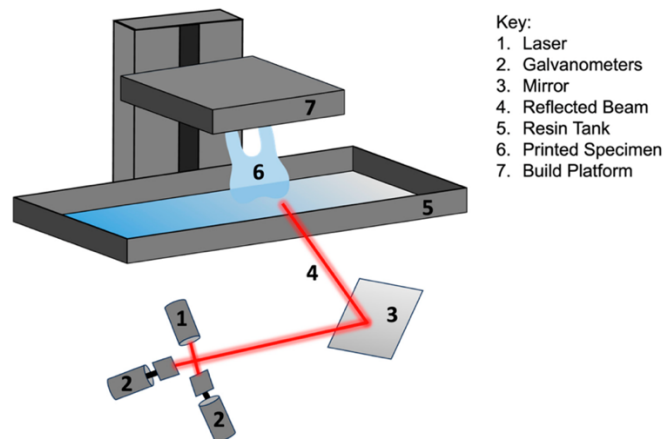


Figura 13: Esquema da tecnologia de estereolitografia (SLA) (Jeong et al., 2024)

- Digital Light Processing (DLP)

O DLP (Figura 14) baseia-se num princípio semelhante ao da SLA, ou seja, a fotopolimerização de uma resina líquida. No entanto, a principal diferença reside na fonte de luz utilizada: em vez de um laser, o DLP utiliza um projetor digital que expõe toda uma camada do modelo simultaneamente (Morón-Conejo et al., 2024). Isso torna o processo frequentemente mais rápido do que a SLA, mantendo ao mesmo tempo uma elevada precisão.

Estudos demonstraram que o DLP oferece, em certos casos, uma precisão superior à da SLA, especialmente na reprodução de modelos dentários, com valores de *root mean squares* (RMS²) mais baixos, o que pode influenciar diretamente a exatidão da colocação dos implantes (Kim et al., 2018).

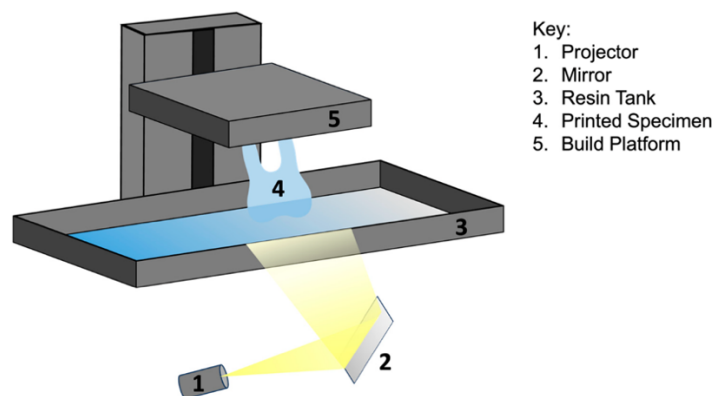


Figura 14: Esquema da tecnologia de processamento digital de luz (DLP) (Jeong et al., 2024)

- Qual é a tecnologia mais utilizada?

A qualidade das guias cirúrgicas depende fortemente da qualidade da impressão 3D. Apesar do elevado desempenho do DLP, é a SLA que continua a ser, atualmente, a tecnologia mais utilizada na fabricação de guias cirúrgicas estáticas em implantologia

² O *Root Mean Square* (RMS) constitui um parâmetro estatístico amplamente utilizado para avaliar a precisão e a fidelidade dos modelos dentários impressos em 3D: mais baixo for o RMS, mais preciso e fiel é o sistema. Um RMS elevado significa uma maior variabilidade ou erros em relação ao modelo de referência.

(Peng et al., 2017). Este facto explica-se pela sua maturidade clínica, pela sua presença comercial mais antiga e pela sua adaptabilidade aos *softwares* de planeamento implantar.

A sua utilização está intimamente ligada à evolução dos protocolos digitais na cirurgia implantar guiada, que se baseiam na aquisição de dados CBCT e de impressões óticas para produzir guias precisas, fáceis de utilizar, promovendo intervenções cirúrgicas menos invasivas e maior conforto pós-operatório para o paciente (Jeong et al., 2024; Peng et al., 2017) (Tabela 2).

Tabela 2: Vantagens e desvantagens do SLA e do DLP na fabricação de guias cirúrgicas estáticas

Tecnologia 3D	Vantagens	Desvantagens
<i>Stereolithography (SLA)</i>	•Velocidade de produção rápida •Precisa e altamente exata •Suporta <i>designs</i> complexos •Numerosas opções de materiais.	•A produção pode ser mais lenta em comparação com outras impressoras •Altos requisitos de pós-processamento
<i>Digital light processing (DLP)</i>	•Alta velocidade •Precisa e altamente exata •Suporta <i>designs</i> complexos •Numerosas opções de materiais	•Qualidade possivelmente inferior em comparação com outras impressoras •Limitada pelo tamanho do voxel

Composição da guia cirúrgica estática:

Uma guia cirúrgica estática é composta por uma estrutura principal, geralmente em resina impressa em 3D, e por um ou vários posicionadores metálicos ou cerâmicos que garantem a precisão do posicionamento do implante. O grau de orientação total ou parcial influencia diretamente este *design*, condicionando a complexidade dos elementos integrados, nomeadamente a geometria geral, a escolha e disposição dos posicionadores, bem como os requisitos de estabilidade. O *design* deve, por isso, ser rigorosamente adaptado às exigências clínicas e protéticas específicas de cada caso.

- Posicionador

Um dos componentes-chave da guia é o posicionador (*sleeve*), por onde passam os instrumentos de perfuração. Ela permite um direcionamento ótimo das brocas, contribuindo assim para a precisão do posicionamento tridimensional dos implantes (Oh

et al., 2021) . Os posicionadores estão disponíveis em vários comprimentos, diâmetros e alturas, de acordo com as limitações anatómicas, a abertura da boca e o plano de colocação dos implantes previamente estabelecido (Ozan et al., 2022).

O tipo de posicionador mais utilizado na fabricação de guias cirúrgicas estáticas continua a ser o posicionador metálico padronizado, geralmente fabricado em aço inoxidável, titânio ou cobalto-cromo, devido à sua robustez, precisão mecânica e compatibilidade com a maioria das brocas específicas aos sistemas implantológicos. No entanto, a zircônia tem despertado recentemente interesse como material alternativo. Apresenta uma resistência ao desgaste superior ao cobalto-cromo e revela-se promissora para uma utilização a longo prazo. Ainda assim, o seu custo elevado e a escassez de estudos clínicos aprofundados limitam, por agora, a sua aplicação na prática clínica corrente (Ozan et al., 2022).

Estas posicionadores metálicos garantem o direcionamento das brocas, mas apresentam várias desvantagens práticas e económicas: exigem um espaço méso-distal considerável, podem provocar sobreaquecimento ósseo durante a perfuração devido a uma irrigação menos eficaz, e são específicas para cada sistema implantar, o que aumenta os custos e complica a logística operatória (Adams et al., 2023; Kalaivani et al., 2020).

Para ultrapassar estas limitações, foram desenvolvidas recentemente alternativas, nomeadamente a fabricação de guias sem posicionador metálico, nos quais o canal de perfuração é diretamente integrado na própria resina da guia. Estes dispositivos podem ser concebidos em versão fechada ou aberta, sendo que esta última inclui uma ranhura vestibular ou lingual que permite uma melhor irrigação do leito ósseo, reduzindo assim o risco de sobreaquecimento (Kalaivani et al., 2020). Neste contexto, o estudo de Son & Lee, (2020) descreve um protocolo de fabrico baseado no ajuste digital do canal de perfuração em função das dimensões exatas da broca utilizada. Esta personalização permite adaptar a guia aos instrumentos cirúrgicos escolhidos, tornando este sistema potencialmente compatível com uma grande variedade de sistemas implantológicos, desde que seja respeitado um planeamento digital rigoroso.

Desta forma, ao eliminar a dependência de posicionadores metálicos e ao permitir uma personalização precisa dos canais de perfuração, esta tecnologia torna a cirurgia

guiada mais simples, flexível e acessível a todos os médicos dentistas, independentemente de o sistema implantar utilizado.

Estudos clínicos e *in vitro* avaliaram a precisão das guias cirúrgicas estáticas, comparando aqueles que integram ou não posicionadores metálicos:

- Tallarico et al., (2021) demonstraram, numa revisão sistemática envolvendo 614 implantes, que os guias sem posicionador apresentaram desvios angulares ($2,33^\circ$), verticais (0,62 mm) e horizontais (0,62 mm) inferiores aos observados com posicionadores metálicos ($3,09^\circ$, 0,95 mm e 1,11 mm, respetivamente). Estes resultados sugerem uma precisão pelo menos equivalente, ou mesmo superior, dos guias impressos sem posicionador, especialmente em pacientes parcialmente desdentados. Além disso, não foi observada qualquer diferença em termos de taxa de sobrevivência dos implantes.
- Os estudos *in vitro* de Oh et al., (2021) e Raabe et al., (2023) que compararam guias com e sem posicionador (Figura 15), não revelaram diferenças estatisticamente significativas no que diz respeito ao desvio angular ou linear da perfuração. No entanto, as guias sem posicionador oferecem vantagens clínicas relevantes: são mais adequados a zonas com espaço reduzido, facilitam a irrigação e simplificam a cadeia de fabrico ao eliminar a etapa de inserção dos posicionadores. Estes fatores contribuem para uma redução global dos custos, mantendo simultaneamente uma precisão satisfatória.



Figura 15: Fotografia de guias cirúrgicas fabricadas por impressão 3D (NextDent 5100, 3D Systems, Rock Hill, SC, EUA) em situação pré-clínica. (A) Guia cirúrgica sem posicionadores metálicos (B) Guia cirúrgica com posicionadores metálicos (Oh et al., 2021)

A falta de dados clínicos a longo prazo, a diversidade metodológica dos estudos e a ausência de ensaios clínicos randomizados de grande escala limitam atualmente o alcance das conclusões quanto à superioridade ou equivalência das guias sem posicionador metálico. São ainda necessários estudos clínicos bem estruturados para confirmar a sua fiabilidade na prática quotidiana.

- Diferentes tipos de apoio

A precisão do posicionamento dos implantes é um fator determinante para assegurar a estabilidade a longo prazo dos tecidos peri-implantares, evitar complicações anatómicas (dentes adjacentes, seios maxilares, nervos) e garantir uma estética e uma biomecânica ideais (Takács et al., 2023). Essa precisão é diretamente influenciada pelo tipo de suporte da guia cirurgia, que condiciona a sua estabilidade durante o procedimento.

Segundo Kalaivani et al., 2020, existem quatro grandes categorias de guias cirúrgicas estáticas (Figura 16), classificadas de acordo com a superfície de apoio da base do guia:

1. Guias dento-suportados, que assentam sobre os dentes naturais remanescentes.
2. Guias mucoso-suportados, utilizados sobretudo em pacientes totalmente desdentados.
3. Guias ósseo-suportados, que se apoiam diretamente no osso após o descolamento de um retalho.
4. Guias com apoio especial, estabilizados através de mini-implantes ou parafusos transitórios.



Figura 16: Tipos de superfícies de suporte das guias (Kalaivani et al., 2020)

As guias dento-suportados são amplamente reconhecidas como as mais precisas, devido à estabilidade proporcionada pelos dentes residuais (Shalash & Zohny, 2025). A revisão sistemática da 5.^a Conferência de Consenso da ITI concluiu, aliás, que as guias ósseo-suportadas apresentam as maiores imprecisões em comparação com os outros tipos de suporte (D'haese et al., 2017). Estes resultados foram confirmados por Kernén et al., (2020), que referem que os suportes dentários ou mucosos permitem uma melhor transferência da posição dos implantes do planeamento virtual para a realidade cirúrgica do que os suportes ósseos.

Contudo, em pacientes totalmente desdentados, a estabilidade da guia é frequentemente comprometida. Nestes casos, as guias mucoso-suportadas ou ósseo-suportadas são as únicas opções viáveis, mas requerem sistemas de fixação adicionais (pinos, parafusos transitórios ou mini-implantes) para limitar os micromovimentos da guia e melhorar a precisão (Azevedo et al., 2024).

Por fim, Kasradze & Kubilius, (2025) recordam que a escolha do tipo de suporte deve ser adaptada ao sítio implantar. O seu estudo mostra que guias apoiadas em poucos dentes bem distribuídos podem garantir uma precisão satisfatória, particularmente nas regiões posteriores. Pelo contrário, em casos como os desdentamentos unitários anteriores, onde a superfície de apoio é reduzida e os incisivos têm uma geometria piramidal, a estabilidade é insuficiente e a precisão do posicionamento implantar diminui consideravelmente.

2.3.1.4. Precisão da cirurgia guiada estática

A cirurgia guiada estática impôs-se como uma técnica de grande precisão na colocação de implantes. Os dados da literatura confirmam que este protocolo permite reduzir significativamente as discrepâncias entre o planeamento virtual e a posição final do implante (Figura 17). Shi et al., (2023) referem que, graças aos guias digitais, a precisão cirúrgica atinge geralmente um desvio linear médio inferior a 2 mm (frequentemente < 1 mm) e um desvio angular inferior a 8° (frequentemente $< 5^\circ$), o que corresponde a margens clinicamente aceitáveis. Estes resultados são corroborados pela meta-análise de Khaohoen et al., (2024), que incluiu 67 ensaios clínicos e indicou, para a cirurgia guiada estática, um desvio coronal médio de 1,11 mm, um desvio apical de 1,44 mm e um desvio angular de $3,58^\circ$. Além disso, estes autores salientam que a precisão é otimizada quando o protocolo é totalmente guiado e realizado segundo uma abordagem *flapless*, em particular ao nível mandibular, onde a maior densidade óssea contribui para a estabilidade do guia. Assim, a cirurgia guiada estática constitui uma abordagem fiável e previsível, oferecendo uma precisão suficiente para garantir a segurança anatômica e o sucesso protético a longo prazo (Khaohoen et al., 2024; Shi et al., 2023).

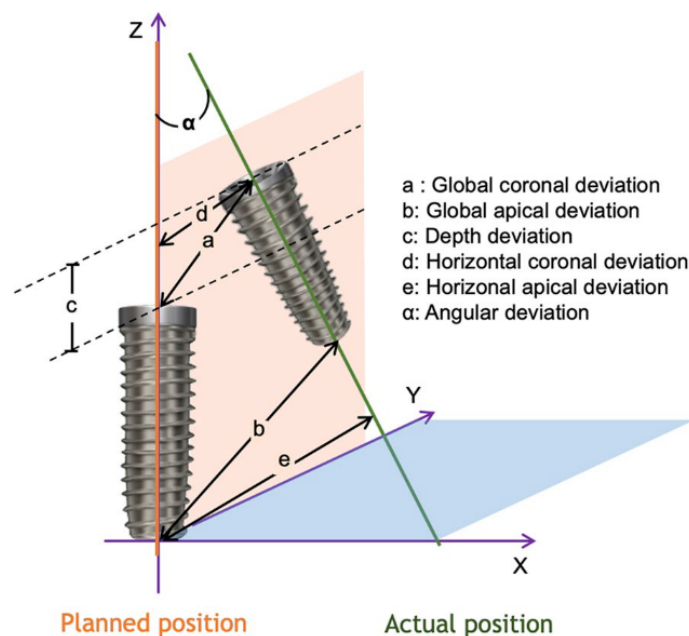


Figura 17: Os indicadores de precisão cirúrgica em implantologia (Shi et al., 2023)

2.3.1.5. Fontes de erro pré-operatória e peroperatória

Apesar dos avanços significativos proporcionados pela cirurgia implantar guiada, as guias cirúrgicas estáticas não estão isentas de falhas, que podem comprometer a precisão do posicionamento dos implantes. Estas falhas dividem-se em duas grandes categorias: os erros pré-operatórios, que ocorrem durante a fase de planeamento e fabrico da guia, e os erros peri-operatórios, que surgem durante o próprio ato cirúrgico.

Erros pré-operatórios:

Estas falhas resultam de um conjunto complexo de fatores que afetam o fluxo digital de planeamento. Entre eles destacam-se as imprecisões na aquisição dos dados radiográficos e óticos (CBCT e scanner intraoral), a qualidade do *software* de planeamento, o sistema implantar selecionado, bem como as tecnologias utilizadas na fabricação da guia, incluindo o tipo de impressora 3D, os parâmetros de impressão e o pós-processamento do modelo (Kobe et al., 2023).

Outras fontes de erro incluem a transferência de dados, a fusão dos ficheiros, o posicionamento virtual dos implantes e a própria fabricação da guia, especialmente em casos de retração polimérica do material ou de conversão de formatos (Lo Russo et al., 2023; Shah et al., 2022). Tal como referido por Bai et al., (2024), os erros podem ainda estar relacionados com a estratégia de perfuração, o *design* das brocas e a experiência do operador.

De forma mais específica, Shah et al., (2022) evidenciaram desvios lineares que podem atingir até 40 mm entre o desenho virtual e a versão impressa das guias estereolitográficas, bem como um desvio angular até 5,9°. Estas diferenças refletem uma acumulação de erros em cada etapa do processo de planeamento digital, que podem estar presentes antes mesmo do início do ato cirúrgico.

Erros peri-operatórios:

Estas falhas resultam frequentemente de uma má estabilização ou de um deslocamento da guia durante o ato cirúrgico. A espessura da mucosa, o tipo de suporte (dentário, mucoso ou ósseo), a fratura da guia (Figura 18) ou a desintegração do posicionador metálico são fatores que podem comprometer a estabilidade da guia no momento da perfuração (Khaohoen et al., 2024). Estes erros podem causar desvios tridimensionais ao nível da entrada ou do ápice do implante, com consequências funcionais e estéticas significativas (Carrico et al., 2024).



Figura 18: Guia fraturada durante o procedimento cirúrgico (D'haese et al., 2017)

Para reduzir estas imprecisões, foi sugerido adiar a anestesia local particularmente a nível palatino até após a fixação da guia, de modo a evitar qualquer deformação dos tecidos moles provocada pela infiltração (Dioguardi et al., 2023)

Além disso, algumas inovações tecnológicas visam simplificar o manuseamento intraoperatório, de forma a limitar os erros relacionados com a instabilidade da guia. É o caso dos sistemas *keyless* (sem chave), que substituem os dispositivos de orientação que requerem uma chave externa para a perfuração. Ao eliminar a necessidade de segurar a chave com a mão não dominante, estes sistemas permitem ao profissional utilizar essa mão para estabilizar ativamente a guia na boca, reduzindo assim o risco de deslocamento durante a perfuração (Kasradze & Kubilius, 2025).

Por fim, o posicionamento final do implante pode divergir do planejado devido ao efeito combinado destes erros. Como resumem Lo Russo et al., (2023), trata-se de um resultado cumulativo de todas as etapas do protocolo cirúrgico guiado, desde a aquisição dos dados até à estabilização intraoral da guia.

2.3.2. Guia cirúrgica dinâmica

A cirurgia guiada por navegação dinâmica baseia-se numa tecnologia de estereotaxia que permite o acompanhamento em tempo real dos instrumentos cirúrgicos, associada a dados imagiológicos pré-operatórios provenientes de um CBCT. Este método permite orientar a colocação dos implantes dentários durante a intervenção, com uma visualização instantânea dos movimentos realizados (Bhalerao et al., 2024). Ao contrário das guias estáticas, não requer qualquer suporte físico intraoral, mas utiliza dispositivos de seguimento e um *feedback* visual em tempo real, oferecendo assim uma maior flexibilidade intraoperatória (Marques-Guasch et al., 2023). Vários sistemas foram desenvolvidos especificamente para responder às necessidades da implantologia, como o ImplaNavi® (Bresmedical, Ingleburn (Sydney), Austrália), X-Guide® (X-NAV Technologies, LLC, Lansdale (Pensilvânia), Estados Unidos) (Figura 19) e Navident® (ClaroNav Inc., Toronto (Ontario), Canada), refletindo o crescente interesse por esta tecnologia no campo da cirurgia oral. No entanto, a literatura científica ainda é limitada, baseando-se principalmente em casos clínicos isolados, o que restringe por agora a possibilidade de tirar conclusões generalizáveis (Oilic et al., 2023).



Figura 19: Fotografia da instalação do sistema de navegação dinâmica X-Guide® (X-NAV Technologies, LLC, Lansdale (Pensilvânia, Estados Unidos) em cirurgia implantológica. O dispositivo é composto por um braço de navegação ótica ligado a um ecrã de controlo permitindo a visualização em tempo real da perfuração e da colocação dos implantes

As indicações da navegação dinâmica em cirurgia oral são diversas, sendo a implantologia a principal área de aplicação (Chen et al., 2025). Esta técnica é especialmente indicada para a colocação de implantes unitários ou múltiplos nos sectores posteriores, bem como em zonas anteriores com elevado impacto estético, particularmente quando se prevê uma carga imediata. Revela também interesse particular em casos anatómicos complexos ou quando o espaço disponível é insuficiente para a utilização de uma guia estática. Outras indicações incluem a implantologia zigomática ou pterigóidea, bem como a reabilitação de pacientes edêntulos em protocolos minimamente invasivos, com ou sem elevação de retalho (Chen et al., 2025; Oillic et al., 2023) . Por fim, a utilização desta tecnologia tem sido relatada na reabilitação de sequelas oncológicas, nomeadamente com recurso a implantes zigomáticos destinados a suportar epíteses ou próteses maxilo-faciais, com especial interesse em pacientes irradiados ou com risco de osteorradionecrose (Oillic et al., 2023) .

2.3.2.1.Recolha das informações e planeamento

O protocolo pré-operatório da cirurgia guiada por navegação dinâmica segue as etapas clássicas da cirurgia guiada, nomeadamente a realização de um exame CBCT e de

um scan intraoral. Estes exames geram, respetivamente, ficheiros DICOM e STL, que serão posteriormente fundidos na fase de planeamento (Bhalerao et al., 2024).

Consoante o sistema de navegação utilizado, a imagiologia CBCT pode ser realizada com ou sem marcador fiducial. Alguns protocolos exigem a presença de um marcador radiológico visível durante a aquisição (*marker-based*), enquanto outros permitem um registo livre, denominado *free registration*, baseado em referências anatómicas ou numa impressão ótica (Tang et al., 2024). É, portanto, essencial adaptar a aquisição imagiológica à tecnologia empregue.

A qualidade da imagem CBCT continua a ser um fator crítico para o sucesso da navegação dinâmica. Esta permite um planeamento fiável, uma avaliação da densidade óssea através das unidades *Hounsfield*³ e uma identificação precisa das estruturas anatómicas a preservar (Goyal et al., 2023).

Em seguida, o planeamento implantar é realizado através de um *software* específico ao sistema de navegação (por exemplo, Navident® (ClaroNav Inc., Toronto (Ontario), Canada), X-Guide® (X-NAV Technologies, LLC, Lansdale (Pensilvânia), Estados Unidos) ou ImplNav® (Bresmedical, Ingleburn (Sydney), Austrália). Estas ferramentas permitem:

- Determinar a localização ideal do implante com base no eixo protético,
- Evitar estruturas anatómicas sensíveis como o nervo alveolar inferior ou os seios maxilares,
- Simular a trajetória da broca para garantir segurança na fase de perfuração (Tang et al., 2024),
- Definir o comprimento e o diâmetro dos implantes (Jorba-García et al., 2023).

³ A unidades *Hounsfield* é um valor numérico atribuído ao voxel, que traduz a densidade radiológica do tecido contido nesse voxel. Permite identificar se esse voxel corresponde a ar, gordura, músculo, osso esponjoso ou osso cortical.

Este plano é depois transferido para o sistema de navegação, que permite ao profissional de acompanhar em tempo real a posição do instrumento em relação à anatomia do paciente.

2.3.2.2. Calibração

A calibração constitui uma etapa essencial na cirurgia implantar guiada dinâmica. É ela que permite sobrepor com precisão a anatomia real do paciente ao seu modelo virtual obtido por CBCT, garantindo assim a fiabilidade da navegação em tempo real. Sem uma calibração rigorosa, a navegação dinâmica não conseguiria oferecer a precisão esperada, expondo o médico dentista a desvios angulares ou posicionais significativos.

A qualidade desta sobreposição baseia-se fundamentalmente na utilização de marcadores fiduciais, que servem como pontos de referência partilhados entre a imagem radiológica (CBCT) e a situação clínica. Como descrito por Marques-Guasch et al., 2023, estes marcadores podem ser radiológicos como parafusos ósseos inseridos na mandíbula ou anatómicos, como estruturas dentárias naturalmente reconhecíveis. A sua função é permitir ao *software* de navegação localizar, no paciente real, os pontos previamente identificados na imagem, de modo a criar uma correspondência fiável entre os dois referenciais. Este processo de alinhamento, ou registo, constitui a base da calibração.

Marcadores fiduciais radiológicos:

O método de calibração mais clássico baseia-se na utilização de marcadores fiduciais radiológicos. Trata-se de elementos visíveis no CBCT, que funcionam como pontos de referência entre o ambiente virtual e a anatomia real do paciente. Em sistemas como o X-Guide® (X-NAV Technologies, LLC, Lansdale (Pensilvânia), Estados Unidos), o marcador utilizado é uma goteira personalizada chamada X-Clip (Figura 20), que contém marcadores radio-opacos (incorpora esferas metálica de referência). Este dispositivo deve ser utilizado pelo paciente durante a aquisição do CBCT, de forma que o *software* registe a sua posição relativa à anatomia. Durante a cirurgia, o X-Clip é reposicionado exatamente da mesma forma, garantindo a correspondência entre o CBCT

e a realidade clínica, enquanto serve de suporte ao *jaw tracker* (Figura 20B), responsável pelo seguimento espacial em tempo real ⁴.

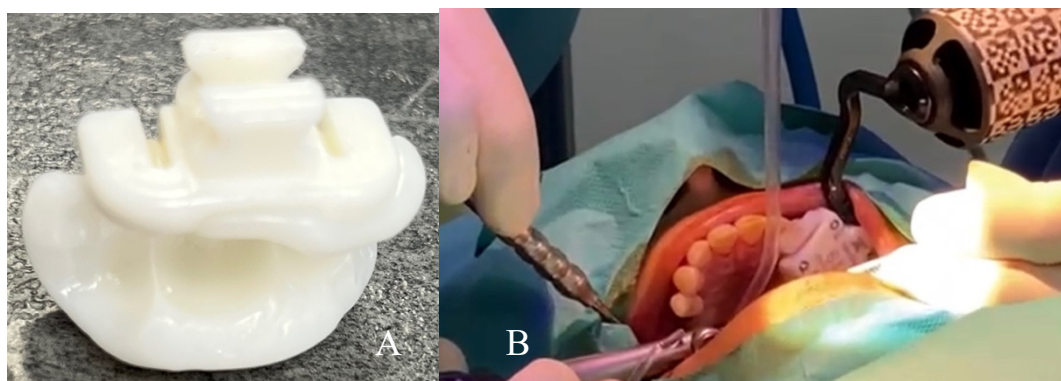


Figura 20: Fotografias de o X-Clip : a) O dispositivo termoformado, o X-clip utilizado para o sistema de navegação dinâmica X-Guide®; b) Colocação intraoral do X-clip num paciente, associado ao *jaw tracker* que permite o acompanhamento em tempo real dos movimentos do paciente

Uma abordagem diferente foi descrita por Wu et al., 2020, que relataram a utilização de um dispositivo de referência fixado no arco dentário com recurso a um elastômero de silicone, usado durante a aquisição do CBCT. Este dispositivo serve como suporte de calibração radiológica, embora não seja padronizado como um X-Clip ou um parafuso ósseo. Também pode ser utilizado como suporte para o *tracker* ótico durante a cirurgia.

Em pacientes edêntulos, a ausência de estruturas dentárias impossibilita a utilização de dispositivos como o X-Clip. Nestes casos, é necessário recorrer a parafusos ósseos fiduciais, inseridos sob anestesia local antes da aquisição imagiológica. Estes parafusos devem obrigatoriamente estar visíveis num CBCT realizado após a fixação ou durante o ato operatório, para poderem ser integrados no plano de navegação (Oillic et al., 2023). Embora este protocolo assegure uma excelente estabilidade dos pontos de referência, prolonga o tempo operatório e pode complicar o controlo anestésico, especialmente em cirurgias mais invasivas.

⁴ Descrição do X-Clip no folheto do fabricante (X-NAV Technologies)

Marcadores fiduciais anatômicos - *trace registration*:

Como alternativa aos marcadores físicos radiológicos, alguns sistemas permitem uma calibração denominada *trace registration*, baseada na utilização de marcadores anatômicos naturais do paciente. Esses pontos de referência como dentes, cristas ósseas ou tuberosidades devem ser visíveis tanto no CBCT como na cavidade oral. O sistema Navident® (ClaroNav Inc., Toronto (Ontario), Canada), por exemplo, permite ao clínico selecionar pelo menos três desses pontos no CBCT e localizá-los clinicamente com uma sonda previamente calibrada. O *software* estabelece então a correspondência entre a imagem radiológica e a anatomia real. Este método, não invasivo, é particularmente vantajoso em pacientes parcialmente desdentados, pois evita a utilização de parafusos ósseos ou de goteiras específicas. Contribui também para reduzir o tempo de preparação e as restrições biomecânicas, mantendo um nível de precisão satisfatório quando as condições são favoráveis (boa fixação dentária e ausência de mobilidade). (Jorba-García et al., 2023).

Calibração dos instrumentos e seguimento ótico em tempo real:

Para além da calibração do paciente, a calibração dos instrumentos cirúrgicos é uma etapa indispensável na navegação dinâmica. Cada broca ou peça de mão utilizada deve ser previamente calibrada para que o sistema reconheça com precisão a sua geometria, o seu comprimento ativo e a sua posição espacial. Esta calibração é geralmente repetida antes de cada etapa crítica (Figura 21), nomeadamente antes da perfuração e da colocação do implante (Jorba-García et al., 2023).

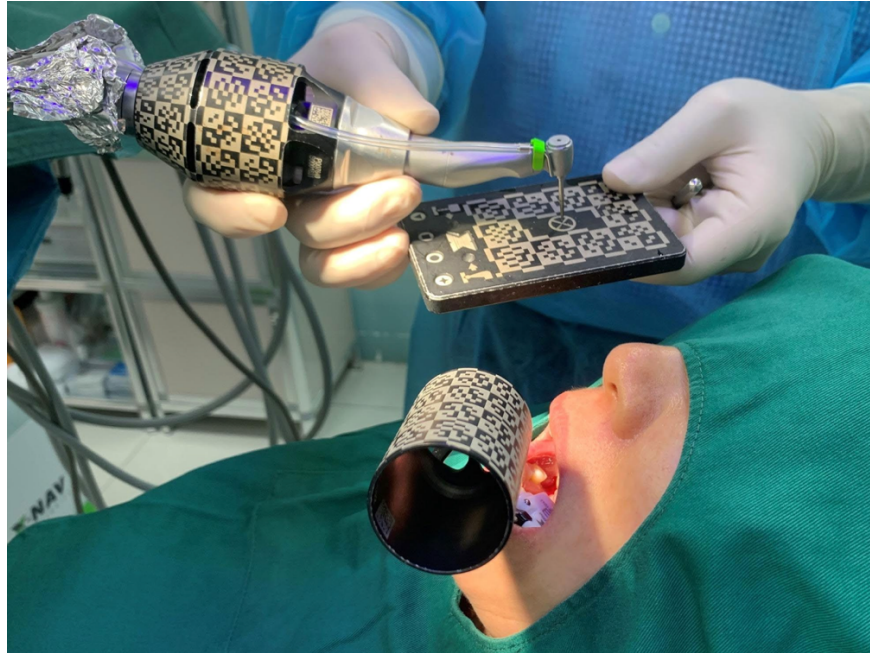


Figura 21: Controlo de calibração realizado colocando a broca seleccionada sobre a placa perfurada e medindo o seu comprimento (Ma et al., 2023)

Após a calibração, o sistema ativa o seguimento ótico em tempo real, baseado numa câmara estereoscópica infravermelha que deteta dois *trackers* principais: um *tracker* fixado no paciente (*jaw tracker*) e outro no instrumento cirúrgico (*drill tracker*) (Figura 22). Este seguimento permite visualizar em direto no ecrã operatório a posição exata, a orientação (Figura 23), o eixo e a profundidade da broca em relação ao plano implantar virtual. O médico dentista pode assim corrigir imediatamente qualquer desvio angular ou direcional (Chen et al., 2025).



Figura 22: Componentes do sistema de navegação dinâmica X-Guide (X-Nav Technologies).
 (A) *Patient/Jaw tracker*: traqueador fixo no X-Clip que assegura o seguimento em tempo real dos movimentos da mandíbula; (B) *Drill tag*: adaptador com marcadores para calibração e localização da broca; (C) *Calibration disc*: disco de calibração para o alinhamento do comprimento e do eixo da broca; (D) *Through-hole calibration plate*: placa perfurada para verificação da calibração instrumental; (E) *Handpiece tracker*: suporte com marcadores fixado à peça de mão cirúrgica; (F) Chave de aperto: ferramenta metálica usada para apertar ou ajustar certos componentes; (G) Chave de calibração (aparafusador): ferramenta manual destinada à fixação/desfixação e montagem do sistema

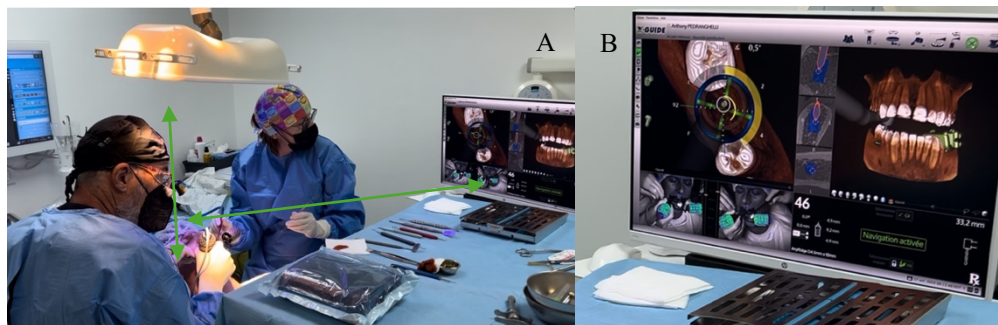


Figura 23: Exemplo de intervenção implantológica realizada com cirurgia guiada dinâmica. A) a equipa cirúrgica durante o procedimento com visualização em tempo real no ecrã operatório; B) a interface do software de navegação apresentando o planeamento virtual e o acompanhamento da posição da fresa em relação às estruturas anatómicas

2.3.2.3.Verificação e validação do sistema de navegação

Uma vez concluída a calibração, são realizadas várias etapas a fim de garantir a fiabilidade do sistema de navegação. O X-Clip é recolocado sobre os dentes do paciente e a câmara de navegação é ajustada de modo a incluir simultaneamente os instrumentos cirúrgicos e o dispositivo de rastreio no seu campo de visão. Em seguida, é efetuado um controlo sistémico para confirmar o correto posicionamento do X-Clip, a fixação adequada do rastreador cefálico e o alinhamento apropriado da câmara. Esta verificação permite ao profissional comparar em tempo real os movimentos da cabeça do paciente com a trajetória virtual da fresa exibida no ecrã, assegurando assim a concordância entre a situação clínica e o modelo digital. Quando esta correspondência é validada, a interface de navegação é ativada e o implante pode ser inserido sob orientação em tempo real, com um acompanhamento preciso da posição da fresa e do eixo implantar projetado (Ma et al., 2023).

2.3.2.4.Vantagens da cirurgia guiada por navegação dinâmica

A cirurgia guiada por navegação dinâmica apresenta numerosas vantagens que justificam a sua adoção crescente na implantologia. Permite, antes de mais, uma visualização em tempo real da posição do implante num campo operatório virtual, facilitando assim um controlo preciso ao longo de todo o procedimento. Ao contrário das guias estáticas, oferece uma flexibilidade intraoperatória valiosa: o eixo do implante pode ser ajustado a qualquer momento em função das limitações anatómicas encontradas.

Além disso, elimina a necessidade de fabricar uma guia física, reduzindo os riscos associados a erros de impressão ou de adaptação.

Esta técnica é igualmente indicada para zonas de acesso limitado, como os sectores posteriores ou as arcadas estreitas, permitindo a realização de cirurgias minimamente invasivas, nomeadamente sem elevação de retalho, o que contribui para a preservação dos tecidos moles (Marques-Guasch et al., 2023).

Outros benefícios incluem a redução do impacto dos erros humanos, menor esforço ergonómico para o profissional, bem como uma melhor acessibilidade para

pacientes com abertura da boca limitada (Tang et al., 2024). Trata-se ainda de uma ferramenta didática interessante para os profissionais em início de formação na implantologia.

Por fim, a navegação dinâmica demonstrou a sua eficácia na colocação imediata de implantes com carga estética imediata, bem como em contextos anatomicamente complexos, como cristas atróficas ou implantologia zigomática, onde a precisão e a acessibilidade são fatores críticos (Chen et al., 2025).

2.3.2.5.Desvantagens da cirurgia guiada por navegação dinâmica

Apesar das suas múltiplas vantagens, a cirurgia guiada por navegação dinâmica apresenta também algumas limitações. Um dos principais obstáculos à sua adoção é o custo elevado dos equipamentos necessários: câmara ótica, braço articulado, computador dedicado, *softwares* especializados e marcadores fiduciais.

Além disso, esta técnica exige uma curva de aprendizagem significativa. O profissional deve adaptar-se a trabalhar com uma visão indireta através de um ecrã, o que pode alterar os seus pontos de referência visuais habituais e requerer um período de adaptação não negligenciável.

Outra desvantagem importante diz respeito à necessidade imperativa de uma calibração inicial rigorosa antes de cada intervenção. Esta etapa é indispensável para garantir a precisão da navegação e baseia-se em métodos específicos como a *trace registration*, a *impression registration* ou a utilização de parafusos ósseos como pontos de referência.

Por fim, a fiabilidade do sistema depende estreitamente da qualidade dos dados obtidos por CBCT. Uma aquisição defeituosa ou imprecisa pode comprometer a exatidão da navegação, com potenciais repercussões clínicas graves (Chen et al., 2025).

2.3.2.6.Perspetivas de evolução

A cirurgia guiada por navegação dinâmica posiciona-se como um avanço significativo na implantologia, aliando precisão, segurança e adaptabilidade. Esta abordagem está destinada a desempenhar um papel cada vez mais central nos tratamentos complexos, conservadores ou com elevado impacto estético. No entanto, embora represente uma evolução importante em relação à cirurgia guiada estática, a sua adoção tem sido limitada, durante muito tempo, pelos custos elevados e pela complexidade da sua implementação. As recentes melhorias em termos de usabilidade e fiabilidade poderão, contudo, contribuir para a sua difusão mais ampla. Ainda assim, são necessários estudos adicionais para confirmar a sua superioridade clínica em diferentes situações terapêuticas (Bhalerao et al., 2024).

As perspetivas de evolução da navegação cirúrgica dinâmica na implantologia são promissoras, em particular graças aos avanços tecnológicos em curso. Uma das principais tendências é a miniaturização dos equipamentos e a redução dos custos, o que poderá tornar estes dispositivos acessíveis a um maior número de profissionais e unidades de saúde (D'haese et al., 2017).

Para além disso, a integração da navegação com outras tecnologias emergentes abre novas possibilidades clínicas. Verifica-se um interesse crescente na combinação com a robótica cirúrgica, a realidade aumentada permitindo uma visualização direta das estruturas no campo operatório e a inteligência artificial, que poderá assistir o planeamento e a execução dos tratamentos em tempo real (Tang et al., 2024). A longo prazo, uma fusão completa com os sistemas de conceção e fabrico assistidos por computador (CAD/CAM) poderá conduzir a percursos terapêuticos os totalmente digitais, desde o planeamento até à reconstrução protética.

Por fim, a navegação cirúrgica poderá também desempenhar um papel pedagógico relevante. Wang et al., 2021 sublinhou o seu interesse na formação de jovens cirurgiões, nomeadamente em procedimentos de extração complexos. Uma aplicação semelhante poderá ser considerada na implantologia, como ferramenta de aprendizagem interativa e segura (Oillic et al., 2023).

2.3.3. Cirurgia *flapless* guiada

A cirurgia implantar sem retalho, ou *flapless* (Figura 24), baseia-se na colocação de implantes sem elevação de um retalho mucoperióstico. Pode ser realizada à mão livre ou com o auxílio de guias cirúrgicas estáticas ou dinâmicas, no âmbito de um planejamento digital (Romandini et al., 2023). Esta abordagem minimamente invasiva visa preservar os tecidos moles e a vascularização óssea.



Figura 24: A cirurgia implantar sem retalho, ou *flapless* (Cattoni et al., 2021)

Indicações:

A cirurgia *flapless* exige determinadas condições anatómicas e técnicas:

- É necessária uma largura óssea mínima de 4 a 6 mm (Azevedo et al., 2024; Chandrshekhar et al., 2024);
- Uma faixa de gengiva queratinizada de pelo menos 2 mm (Chandrshekhar et al., 2024).

No caso de pacientes totalmente edêntulos com guias mucoso-suportados, alguns autores recomendam até 5 mm para garantir uma melhor estabilidade da guia e menor resiliência dos tecidos moles (Azevedo et al., 2024).

2.3.3.1.Vantagens

Vários estudos relatam que a abordagem *flapless* é particularmente adequada à colocação de implantes em cirurgia imediata com carga imediata, garantindo uma boa estabilidade inicial, previsibilidade estética e um elevado grau de satisfação do paciente (Chandrshekhhar et al., 2024; La Monaca et al., 2022). É também recomendada em pacientes com comorbidades, nos quais a elevação de um retalho pode estar contraindicada. Com efeito, esta técnica reduz a morbidade operatória, melhora o conforto pós-operatório e facilita a rápida retoma da higiene oral (Campos et al., 2024)

A cirurgia *flapless* está frequentemente associada a protocolos de carga imediata, nomeadamente em reabilitações totais. Graças à estabilidade primária obtida com o planeamento guiado, é possível colocar uma prótese provisória em poucas horas ou dias, sem necessidade de recorrer a uma cirurgia invasiva (La Monaca et al., 2022). Esta abordagem demonstrou excelente previsibilidade estética e funcional, reduzindo simultaneamente a duração total do tratamento.

2.3.3.2.Limitações e inconvenientes.

Apesar das suas vantagens, esta técnica apresenta algumas limitações. A ausência de visualização direta do osso aumenta o risco de mal posicionamento, perfuração cortical ou irrigação óssea insuficiente, especialmente em profissionais com pouca experiência (Azevedo et al., 2024; Chandrshekhhar et al., 2024). Além disso, é menos indicada em situações em que a crista óssea é irregular ou se encontra fortemente reabsorvida (Chandrshekhhar et al., 2024).

2.3.3.3.Flapless e guia cirúrgica

A precisão da cirurgia *flapless* pode, no entanto, ser reforçada através de um planeamento informático rigoroso e de uma guia cirúrgica bem-adaptado, o que permite compensar a ausência de visibilidade óssea e garantir resultados fiáveis do ponto de vista funcional e estético (Chandrshekhhar et al., 2024; Romandini et al., 2023). Quando

associada a um protocolo guiado, esta técnica permite reduzir significativamente o trauma cirúrgico, a duração da intervenção, o edema pós-operatório e a dor, preservando simultaneamente a integridade vascular dos tecidos peri-implantares (Romandini et al., 2023). A vascularização do periósteo e do plexo supraparietostico mantém-se intacta, o que favorece uma melhor cicatrização e limita as complicações (La Monaca et al., 2022).

2.4.Comparação cirurgia guiada VS cirurgia a mão livre

A evolução das tecnologias digitais em implantologia transformou profundamente as modalidades de colocação de implantes dentários. Face ao método tradicional realizado manualmente, as abordagens assistidas por computador sejam estáticas ou dinâmicas prometem um ganho em precisão, maior segurança operatória e uma organização otimizada das intervenções. Contudo, estes benefícios teóricos devem ser confrontados com a realidade clínica, económica e logística. Esta secção propõe uma análise comparativa crítica das três principais modalidades de colocação de implantes, com base nos dados atuais da literatura científica.

2.4.1. Precisão de colocação: diferenças significativas entre as técnicas

Diversos estudos confirmam que a cirurgia implantológica guiada, seja ela estática ou dinâmica, oferece uma precisão superior à técnica tradicional realizada à mão livre. As discrepâncias entre o planeamento virtual e a realidade clínica são significativamente maiores na técnica manual, especialmente nos eixos méso-distal e vestibulo-lingual (Berta et al., 2024; D'haese et al., 2017; Thangwarawut et al., 2022). Esta superioridade da cirurgia guiada assenta na sua capacidade de transferir com fidelidade o planeamento digital para o ambiente clínico.

A navegação dinâmica destaca-se particularmente pela sua precisão, equivalente à da guia estática, mas com maior flexibilidade operatória (Goyal et al., 2023; Lysenko et al., 2023). Vários estudos sublinham que essa precisão é mantida independentemente do nível de experiência do médico dentista, o que a torna uma ferramenta promissora para

a formação e segurança dos procedimentos (Chackartchi et al., 2022). Em comparação, a colocação à mão livre continua fortemente dependente da perícia do profissional e expõe a um risco acrescido de erros angulares ou direcionais, podendo comprometer o resultado protético ou originar complicações anatómicas (perfuração sinusal, lesão nervosa, etc.).

2.4.2. Acessibilidade, logística e curva de aprendizagem

A cirurgia guiada, especialmente na sua versão estática, implica constrangimentos logísticos relevantes: aquisição de CBCT, planeamento digital, fabrico da guia e, por vezes, duplicação protética. Exige também familiaridade com o fluxo digital e calibração dos dispositivos (Marques-Guasch et al., 2023; Tang et al., 2024). Estes requisitos traduzem-se num custo mais elevado, tanto para o profissional como para o paciente (Araujo-Corchado & Pardal-Peláez, 2022). No entanto, este custo continua relativamente acessível: cerca de 220 a 250 euros por uma guia estática, o que o torna uma solução economicamente viável e tecnicamente reproduzível em muitos consultórios (Kalaivani et al., 2020).

A navegação dinâmica, por sua vez, não exige a produção prévia de guias cirúrgicas, o que pode reduzir os prazos e oferecer uma flexibilidade intraoperatória valiosa (Goyal et al., 2023). Contudo, requer uma infraestrutura informática avançada, formação específica e adaptação ergonómica (trabalho com ecrã, calibração de instrumentos, etc.). Esta tecnologia implica também um investimento considerável, estimado entre 55 000 e 60 000 euros, o que constitui um entrave significativo à sua generalização. Além disso, a familiarização inicial com esta tecnologia pode representar um verdadeiro desafio para os profissionais, devido a uma curva de aprendizagem considerada complexa. A capacidade de utilizar eficazmente o sistema depende, assim, em grande parte, da familiaridade do clínico com as ferramentas digitais e da sua aptidão para integrar esta tecnologia na prática clínica (Kalaivani et al., 2020).

Em contrapartida, a colocação à mão livre continua a ser o método mais rápido de implementar, especialmente em situações de urgência ou em contextos com recursos técnicos limitados. No entanto, assenta exclusivamente no julgamento espacial do profissional, o que a torna mais arriscada para profissionais menos experientes.

2.4.3. Duração operatório e invasividade: vantagens concretas do guiamento

As técnicas guiadas permitem, em geral, uma redução do tempo operatório e um planeamento mais eficiente, com uma preparação otimizada de o leito implantar e, muitas vezes, a possibilidade de realizar cirurgias *flapless* (La Monaca et al., 2022). Isso contribui para uma melhor gestão do tempo em consultório e para uma redução da morbilidade pós-operatória. Dados de um estudo realizado por Graf et al., 2021, com base nos trabalhos de Amorfini et al., 2017, mostram que um protocolo completo incluindo diagnóstico, cirurgia e prótese requer, em média, 198 minutos com cirurgia guiada, contra 286 minutos com a técnica convencional, o que representa um ganho potencial de quase 1h30 por paciente. Esta melhoria da produtividade global ilustra a eficácia organizacional que a implantologia digital pode proporcionar. A navegação dinâmica, em particular, permite evitar alguns atrasos inerentes à confecção das guias, possibilitando ainda uma visualização em tempo real do posicionamento.

2.4.4. Complicações e segurança operatória: um risco melhor controlado graças ao digital

A colocação à mão livre apresenta um risco mais elevado de erros, sobretudo na ausência de visualização direta da anatomia subjacente durante a cirurgia *flapless* (Chackartchi et al., 2022). As complicações possíveis incluem perfurações corticais, lesões nervosas ou má orientação do implante. As técnicas guiadas permitem antecipar e evitar melhor esses erros, especialmente em zonas anatómicas críticas (Araujo-Corchado & Pardal-Peláez, 2022).

Contudo, a cirurgia guiada não está isenta de limitações. Foram relatados problemas específicos, como o aumento da geração de calor durante a perfuração com guias limitadoras, desgaste dos posicionadores, deposição de partículas metálicas no osso e limitações na irrigação, fatores que podem afetar a cicatrização e a osteointegração (Abuhajar et al., 2023). Estes aspetos devem ser considerados na escolha da técnica e no domínio do protocolo operatório.

Tabela 3: Comparação entre Técnicas de Cirurgia Implantar: Manual, Guiada Estática e Guiada Dinâmica

	Cirurgia manual	Cirurgia guiada estática	Cirurgia guiada dinâmica	Referências
Precisão	Dependente da experiência do profissional; geralmente menos precisa	Muito boa (erro horizontal ~1,2 mm; vertical ~0,5 mm)	Muito boa; semelhante à estática	(Li et al., 2024; Naeini et al., 2023)
Acessibilidade	Flexível; permite adaptações em tempo real	Facilita o acesso a áreas de risco; depende do bom ajuste da guia	Excelente; evita estruturas anatômicas críticas em tempo real	(Dioguardi et al., 2023)
Tempo operatório	Variável; muitas vezes mais demorada em casos complexos	Reduzido graças ao planejamento digital e técnica <i>flapless</i>	Reduzido graças ao planejamento digital e técnica <i>flapless</i> . Otimizado com experiência; depende do sistema de navegação utilizado	(Dioguardi et al., 2023)
Custo e logística	Baixo custo; menos equipamentos necessários	Alto; requer, CBCT, scanner intra-oral, <i>software</i> , impressão 3D da guia	Muito alto; CBCT, scanner intra-oral <i>software</i> , câmaras, sensores	(Dioguardi et al., 2023)
Adaptabilidade intra-operatória	Liberdade total de adaptação	Não permite alterações durante a cirurgia	Possibilidade de reposicionamento em tempo real	(Li et al., 2024)
Complicações	Menos complicações mecânicas; mais erros humanos	Fratura da guia, má adaptação, parafusos soltos, aumento de calor, desgaste dos posicionadores	Exige curva de aprendizado, erros de calibração	(Dioguardi et al., 2023; Li et al., 2024)
Reabsorção óssea marginal	Mais acentuada, mas comparável a longo prazo	Muito baixa (graças ao planejamento digital, guias bem estabilizadas, <i>flapless</i>)	Muito baixa (graças ao planejamento digital, <i>flapless</i>)	(Dioguardi et al., 2023; Naeini et al., 2023)
Taxa de sobrevivência dos implantes	>95% na maioria dos estudos	96–99% conforme os estudos	>97% em estudos bem conduzidos	(Dioguardi et al., 2023; Li et al., 2024; Naeini et al., 2023)

2.4.5. Precisão, rapidez, tecnologia, mas no fim os resultados para o paciente são realmente melhores?

Apesar das vantagens técnicas e cirúrgicas inegáveis dos sistemas guiados, várias revisões sublinham a ausência atual de provas formais quanto a uma superioridade clínica

a longo prazo em termos de sobrevivência dos implantes, remodelação óssea ou saúde peri-implantar (Dioguardi et al., 2023). Um estudo longitudinal recente com mais de 9 anos de seguimento confirma que a cirurgia implantológica assistida por computador (SCAIP) permite uma colocação mais previsível, mas que os resultados clínicos a longo prazo permanecem comparáveis aos obtidos com a cirurgia convencional: uma taxa de sobrevivência dos implantes de 97,1% após 9,1 anos, sem diferença significativa relativamente à técnica não guiada. Estes dados convidam à prudência na interpretação do desempenho das novas tecnologias: um procedimento mais preciso não garante necessariamente um melhor resultado global para o paciente. No entanto, as técnicas guiadas permitem uma maior previsibilidade, reduzem o trauma cirúrgico e melhoram frequentemente a experiência pós-operatória. Por exemplo, a cirurgia *flapless*, tornada mais segura através do guiamento, está associada a menor sangramento pós-operatório, redução da dor e do edema, e cicatrização mais rápida (Naeini et al., 2023).

Além disso, estas abordagens permitem aproveitar melhor os volumes ósseos disponíveis, evitar procedimentos complexos de regeneração e antecipar as limitações protéticas (La Monaca et al., 2022), o que contribui indiretamente para uma osteointegração mais segura e para a redução de falhas.

Em suma, nenhuma técnica se impõe como universalmente superior. A escolha entre cirurgia à mão livre, cirurgia guiada estática ou dinâmica deve ser individualizada em função do contexto clínico, da anatomia do paciente, das competências do profissional e dos meios disponíveis. Os dados atuais defendem uma integração progressiva das técnicas guiadas na prática diária, especialmente nos casos complexos, mantendo sempre em mente as limitações específicas de cada abordagem.

Na minha perspetiva enquanto futura profissional, a cirurgia guiada, nomeadamente a técnica estática, parece representar atualmente o melhor compromisso entre segurança, acessibilidade e reprodutibilidade na maioria dos casos. Isto não invalida, de forma alguma, a importância fundamental de dominar a colocação à mão livre, que considero uma competência básica indispensável adquirida desde a minha formação inicial. Contudo, estando ciente do crescente potencial das tecnologias digitais, continuarei a investir na minha formação e a manter-me atualizada relativamente às evoluções ligadas à cirurgia navegada dinâmica, pois estou convicta de que esta ocupará

um lugar cada vez mais central, e até indispensável, na nossa prática implantológica diária num futuro próximo.

III. CONCLUSÃO

A evolução da implantologia dentária, impulsionada pela digitalização dos processos clínicos, transformou profundamente a forma como os implantes são planejados e colocados. A cirurgia guiada, seja estática ou dinâmica, representa uma inovação decisiva ao permitir uma transposição precisa do planejamento virtual para a realidade clínica, oferecendo maior previsibilidade, segurança e conforto tanto para o profissional como para o paciente.

Através desta revisão narrativa, foi possível compreender que a cirurgia guiada estática se destaca pela sua elevada fiabilidade, especialmente em casos onde o suporte anatómico é estável. Já a navegação dinâmica, apesar de exigir um investimento inicial mais elevado e uma curva de aprendizagem considerável, apresenta vantagens significativas em termos de flexibilidade intraoperatória e adaptação em tempo real, revelando-se particularmente útil em situações clínicas complexas.

A comparação com a técnica convencional a mão livre evidencia ganhos objetivos com as abordagens digitais, especialmente no que diz respeito à precisão e à redução das complicações pós-operatórias. No entanto, é importante sublinhar que nenhuma técnica se apresenta como universalmente superior. O sucesso da reabilitação implantar depende de uma análise criteriosa do caso, da experiência do profissional e dos recursos disponíveis.

Conclui-se, portanto, que a cirurgia guiada deve ser encarada como uma ferramenta complementar valiosa, e não como uma substituta da competência clínica. O domínio dos fundamentos da implantologia tradicional continua essencial. Contudo, a incorporação progressiva das tecnologias digitais no quotidiano clínico é, sem dúvida, um passo necessário rumo a uma medicina dentária mais precisa, personalizada e centrada no paciente.

IV. BIBLIOGRAFIA

- Abraham, C. M. (2014). *Send Orders of Reprints at reprints@benthamscience.net 50 The Open Dentistry Journal* (Vol. 8). <https://opendentistryjournal.com/VOLUME/8/PAGE/50/>
- Adams, C. R., Ammoun, R., Deeb, G. R., & Bencharit, S. (2023). Influence of Metal Guide Sleeves on the Accuracy and Precision of Dental Implant Placement Using Guided Implant Surgery: An In Vitro Study. *Journal of Prosthodontics*, 32(1), 62–70. <https://doi.org/10.1111/jopr.13503>
- Amorfini, L., Migliorati, M., Drago, S., & Silvestrini-Biavati, A. (2017). Immediately Loaded Implants in Rehabilitation of the Maxilla: A Two-Year Randomized Clinical Trial of Guided Surgery versus Standard Procedure. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 19(2), 280–295. <https://doi.org/10.1111/cid.12459>
- Araujo-Corchado, E., & Pardal-Peláez, B. (2022). Computer-Guided Surgery for Dental Implant Placement: A Systematic Review. In *Prosthesis* (Vol. 4, Issue 4, pp. 540–553). MDPI. <https://doi.org/10.3390/prosthesis4040044>
- Azevedo, M., Correia, F., & Faria Almeida, R. (2024). Accuracy of Implant Guided Surgery in Fully Edentulous Patients: Prediction vs. Actual Outcome—Systematic Review. In *Journal of Clinical Medicine* (Vol. 13, Issue 17). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/jcm13175178>
- Bai, X., Wu, T., Zhu, Y., Yang, C., Cheng, T., Liu, Y., & Zhou, Y. (2024). Cone-wedge anchored surgical templates for stackable metal guide: a novel technique. *International Journal of Implant Dentistry*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40729-024-00539-w>
- Berta, G. M., Luigi, C., Miguel, P. D., & Carlos, B. M. J. (2024). Prospective Clinical Study on the Accuracy of Static Computer-Assisted Implant Surgery in Patients With Distal Free-End Implants. Conventional Versus CAD-CAM Surgical Guides. *Clinical Oral Implants Research*. <https://doi.org/10.1111/clr.14384>

- Bhalerao, A. A., Ayoub, A. F., & Usman, A. W. (2024). Application of Dynamic Navigation, Virtual Reality, and Universal Robot in Dental Implantology. *Indian Journal of Dental Research*, 35(3), 361–369. https://doi.org/10.4103/ijdr.ijdr_315_24
- Campos, P., Manfro, R., Coura, G., & Formiga, M. de C. (2024). Flapless Guided Dental Implant Surgery in a Systemically Compromised Patient: A Case Report. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.67582>
- Cappare, P., Sannino, G., Minoli, M., Montemezzi, P., & Ferrini, F. (2019). Conventional versus digital impressions for full arch screw-retained maxillary rehabilitations: A randomized clinical trial. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(5). <https://doi.org/10.3390/ijerph16050829>
- Carrico, C., Skrjanc, L., Kanduti, D., Deeb, G., & Deeb, J. G. (2024). Effect of guided implant placement learning experiences on freehand skills: A pilot study. *Clinical and Experimental Dental Research*, 10(2). <https://doi.org/10.1002/cre2.878>
- Cattoni, F., Chirico, L., Merlone, A., Manacorda, M., Vinci, R., & Gherlone, E. F. (2021). Digital smile designed computer-aided surgery versus traditional workflow in “all on four” rehabilitations: A randomized clinical trial with 4-years follow-up. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(7). <https://doi.org/10.3390/ijerph18073449>
- Chackartchi, T., Romanos, G. E., Parkanyi, L., Schwarz, F., & Sculean, A. (2022). Reducing errors in guided implant surgery to optimize treatment outcomes. In *Periodontology 2000* (Vol. 88, Issue 1, pp. 64–72). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/prd.12411>
- Chandrshekhar, V., Shetty, A., Hemavathi, U., Iyengar, A., Rodrigues, N. A., & Suryavanshi, S. (2024). A Comprehensive Analysis of Flapless and Conventional Flap Technique in Dental Implant Surgery - A Comparative Study. *Annals of Maxillofacial Surgery*, 14(2), 147–153. https://doi.org/10.4103/ams.ams_74_24
- Chen, C. S., Hsu, H., Kuo, Y. W., Kuo, H. Y., & Wang, C. W. (2025). Digital Workflow and Guided Surgery in Implant Therapy—Literature Review and Practical Tips to

- Optimize Precision. In *Clinical Implant Dentistry and Related Research* (Vol. 27, Issue 3). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/cid.70038>
- Cui, Z., Fang, Y., Mei, L., Zhang, B., Yu, B., Liu, J., Jiang, C., Sun, Y., Ma, L., Huang, J., Liu, Y., Zhao, Y., Lian, C., Ding, Z., Zhu, M., & Shen, D. (2022). A fully automatic AI system for tooth and alveolar bone segmentation from cone-beam CT images. *Nature Communications*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29637-2>
- D'haese, J., Ackhurst, J., Wismeijer, D., De Bruyn, H., & Tahmaseb, A. (2017). Current state of the art of computer-guided implant surgery. In *Periodontology 2000* (Vol. 73, Issue 1, pp. 121–133). Blackwell Munksgaard. <https://doi.org/10.1111/prd.12175>
- Diakonoff, H., & Pirnay, P. (2021). Medical litigation in oral implantology practice: About the device for use. *Medecine et Droit*, 2021(169), 64–67. <https://doi.org/10.1016/j.meddro.2021.04.001>
- Dioguardi, M., Spirito, F., Quarta, C., Sovereto, D., Basile, E., Ballini, A., Caloro, G. A., Troiano, G., Lo Muzio, L., & Mastrangelo, F. (2023). Guided Dental Implant Surgery: Systematic Review. In *Journal of Clinical Medicine* (Vol. 12, Issue 4). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/jcm12041490>
- Fiorillo, L., Meto, A., & Cicciù, M. (2023). Bioengineering Applied to Oral Implantology, a New Protocol: “Digital Guided Surgery.” *Prosthesis*, 5(1), 234–250. <https://doi.org/10.3390/prosthesis5010018>
- Flügge, T., Kramer, J., Nelson, K., Nahles, S., & Kernen, F. (2022). Digital implantology—a review of virtual planning software for guided implant surgery. Part II: Prosthetic set-up and virtual implant planning. In *BMC Oral Health* (Vol. 22, Issue 1). BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/s12903-022-02057-w>
- Gellée, T., Pomès, B., Goudot, P., & Lacoste, J.-P. (2022). *guide pratique d'implantologie* (E. Masson, Ed.; 2e edition).
- Gillot, L., Noharet, R., & Cannas, B. (2010). Guided surgery and presurgical prosthesis: Preliminary results of 33 fully edentulous maxillae treated in accordance with the

- nobelguide® protocol. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 12(SUPPL. 1). <https://doi.org/10.1111/j.1708-8208.2010.00236.x>
- Gonçalves Duarte, M., Acioli Filizola Germano, D., de Jesus Santana do Amaral, L., Radja Rodrigues de Lima, G., Stephany Lima de Paula, B., Perez Leyva Ataíde, J., Scavuzzi Carneiro da Cunha, R., Coelho de Ataíde Filho, A., Barreto Silva, L., & de Queiroz Marques Filho, E. (2025). GUIDED SURGERY IN IMPLANTOLOGY: A HISTORICAL RETROSPECTIVE Duarte et. *Al. Brazilian Journal of Implantology and Health Sciences*, 7(2), 2666–2678. <https://doi.org/10.36557/2674–8169.2025v7n2p2666-2678>
- Goyal, L., Sankar, H., Dewan, M., & Perambudhuru, Y. (2023). Dynamic Navigation in Dental Implantology. *Discoveries*, 11(4), e178. <https://doi.org/10.15190/d.2023.17>
- Graf, T., Keul, C., Wismeijer, D., & Güth, J. F. (2021). Time and costs related to computer-assisted versus non-computer-assisted implant planning and surgery. A systematic review. In *Clinical Oral Implants Research* (Vol. 32, Issue S21, pp. 303–317). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/clr.13862>
- Guida, F., BOLOVAN Cătălin TURLIUC, I., Radu, S., & Altarozzi, G. (2022). INTERNATIONAL ADVISORY BOARD REGULAR MEMBERS. In *Anul XXVII*, Nr (Vol. 1, Issue 41). <http://journals.indexcopernicus.com/karta.php?action=masterlist>
- Guillaume, B. (2016). Les implants dentaires : revue. In *Morphologie* (Vol. 100, Issue 331, pp. 189–198). Elsevier Masson SAS. <https://doi.org/10.1016/j.morpho.2016.02.002>
- Gupta, R., Gupta, N., Weber, K. k, & DDS. (2023). *Dental Implants*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK470448>
- Jeong, M., Radomski, K., Lopez, D., Liu, J. T., Lee, J. D., & Lee, S. J. (2024). Materials and Applications of 3D Printing Technology in Dentistry: An Overview. In *Dentistry Journal* (Vol. 12, Issue 1). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/dj12010001>
- Jorba-García, A., Bara-Casaus, J. J., Camps-Font, O., Sánchez-Garcés, M. Á., Figueiredo, R., & Valmaseda-Castellón, E. (2023). Accuracy of dental implant placement with

- or without the use of a dynamic navigation assisted system: A randomized clinical trial. *Clinical Oral Implants Research*, 34(5), 438–449. <https://doi.org/10.1111/clr.14050>
- Kalaivani, G., Balaji, V. R., Manikandan, D., & Rohini, G. (2020). Expectation and reality of guided implant surgery protocol using computer-assisted static and dynamic navigation system at present scenario: Evidence-based literature review. In *Journal of Indian Society of Periodontology* (Vol. 24, Issue 5, pp. 398–408). Wolters Kluwer Medknow Publications. https://doi.org/10.4103/jisp.jisp_92_20
- Kandavalli, S. R., Wang, Q., Ebrahimi, M., Gode, C., Djavanroodi, F., Attarilar, S., & Liu, S. (2021). A Brief Review on the Evolution of Metallic Dental Implants: History, Design, and Application. *Frontiers in Materials*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.646383>
- Kasradze, D., & Kubilius, R. (2025). Influence of guide support on the accuracy of static Computer-Assisted Implant Surgery (sCAIS) in partially edentulous cases using a keyless guiding system: an in vitro study. *BMC Oral Health*, 25(1). <https://doi.org/10.1186/s12903-025-05955-x>
- Kernen, F., Kramer, J., Wanner, L., Wismeijer, D., Nelson, K., & Flügge, T. (2020). A review of virtual planning software for guided implant surgery - Data import and visualization, drill guide design and manufacturing. In *BMC Oral Health* (Vol. 20, Issue 1). BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/s12903-020-01208-1>
- Khaohoen, A., Powcharoen, W., Sornsuwan, T., Chaijareenont, P., Rungsiyakull, C., & Rungsiyakull, P. (2024). Accuracy of implant placement with computer-aided static, dynamic, and robot-assisted surgery: a systematic review and meta-analysis of clinical trials. *BMC Oral Health*, 24(1), 359. <https://doi.org/10.1186/s12903-024-04033-y>
- Khourani, W. E., & Yamani, A. E. (2021). DIGITAL IMPLANT PLANNING: A BRIEF NARRATIVE REVIEW. *International Journal of Advanced Research*, 9(02), 869–873. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/12527>
- Kiatkroekkrai, P., Takolpuckdee, C., Subbalekha, K., Mattheos, N., & Pimkhaokham, A. (2020). Accuracy of implant position when placed using static computer-assisted

- implant surgical guides manufactured with two different optical scanning techniques: a randomized clinical trial. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 49(3), 377–383. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2019.08.019>
- Kim, S. Y., Shin, Y. S., Jung, H. D., Hwang, C. J., Baik, H. S., & Cha, J. Y. (2018). Precision and trueness of dental models manufactured with different 3-dimensional printing techniques. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 153(1), 144–153. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2017.05.025>
- Kobe, T., Fidler, A., Kuralt, M., Gašpirc, B., & Gašperšič, R. (2023). Retentive design of a small surgical guide for implant surgery: An in-vitro study. *Journal of Dentistry*, 128. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2022.104384>
- Kusum, C. K., Varshney, N., & Trivedi, A. (2022). Implant guides. *SRM Journal of Research in Dental Sciences*, 13(2), 64–67. https://doi.org/10.4103/srmjfds.srmjfds_23_22
- La Monaca, G., Pranno, N., Annibali, S., Di Carlo, S., Pompa, G., & Cristalli, M. P. (2022). Immediate flapless full-arch rehabilitation of edentulous jaws on 4 or 6 implants according to the prosthetic-driven planning and guided implant surgery: A retrospective study on clinical and radiographic outcomes up to 10 years of follow-up. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 24(6), 831–844. <https://doi.org/10.1111/cid.13134>
- Levy, P. (2022). *Cas clinique de chirurgie guidée : « C'est la prothèse qui guide l'implant et non le contraire. »*. <https://fr.dental-tribune.com/news/cas-clinique-de-chirurgie-guidee-cest-la-prothese-qui-guide-limplant-et-non-le-contre>
- Li, H., Eo, M. Y., Mustakim, K. R., & Kim, S. M. (2024). A 10-year follow-up study on clinical outcomes of dental implant rehabilitation using surgical guide. *Journal of the Korean Association of Oral and Maxillofacial Surgeons*, 50(2), 70–79. <https://doi.org/10.5125/jkaoms.2024.50.2.70>
- Lo Russo, L., Guida, L., Mariani, P., Ronsivalle, V., Gallo, C., Cicciù, M., & Laino, L. (2023). Effect of Fabrication Technology on the Accuracy of Surgical Guides for Dental-Implant Surgery. *Bioengineering*, 10(7), 875. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10070875>

- Lysenko, A. V., Yaremenko, A. I., Ivanov, V. M., Lyubimov, A. I., Leletkina, N. A., & Prokofeva, A. A. (2023). Comparison of Dental Implant Placement Accuracy Using a Static Surgical Guide, a Virtual Guide and a Manual Placement Method - An In-Vitro Study. *Annals of Maxillofacial Surgery*, 13(2), 158–162. https://doi.org/10.4103/ams.ams_100_23
- Ma, L., Ye, M., Wu, M., Chen, X., & Shen, S. (2023). A retrospective study of dynamic navigation system-assisted implant placement. *BMC Oral Health*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/s12903-023-03481-2>
- Marques, N. P., Pérez-de-Oliveira, M. E., Normando, A. G. C., Marques, N. C. T., Epstein, J. B., Migliorati, C. A., Martelli-Júnior, H., Ribeiro, A. C. P., Rocha, A. C., Brandão, T. B., Sánchez, F. G. V., Gueiros, L. A. M., Lopes, M. A., & Santos-Silva, A. R. (2023). Clinical outcomes of dental implants in head and neck cancer patients: An overview. In *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology* (Vol. 136, Issue 1, pp. 42–53). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.oooo.2023.01.006>
- Marques-Guasch, J., Bofarull-Ballús, A., Giralt-Hernando, M., Hernández-Alfaro, F., & Gargallo-Albiol, J. (2023). Dynamic Implant Surgery—An Accurate Alternative to Stereolithographic Guides—Systematic Review and Meta-Analysis. In *Dentistry Journal* (Vol. 11, Issue 6). MDPI. <https://doi.org/10.3390/dj11060150>
- Marquez Bautista, N., Meniz-García, C., López-Carriches, C., Sánchez-Labrador, L., Cortés-Bretón Brinkmann, J., & Madrigal Martínez-Pereda, C. (2024). Accuracy of Different Systems of Guided Implant Surgery and Methods for Quantification: A Systematic Review. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 14, Issue 24). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/app142411479>
- Mohammad, S. (2017). Dental implants. *National Journal of Maxillofacial Surgery*, 8(2), 87. https://doi.org/10.4103/njms.NJMS_79_17
- Morón-Conejo, B., Berrendero, S., Salido, M. P., Zarauz, C., & Pradíes, G. (2024). Accuracy of surgical guides manufactured with four different 3D printers. A comparative in vitro study. *Journal of Dentistry*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105226>

- Nacini, E. N., De Bruyn, H., Bronkhorst, E. M., & D'haese, J. (2023). Long-Term Effect of Guided Implant Surgery on Clinical Outcomes and Peri-Implantitis of Maxillary Implants—An Observational Cohort Study. *Journal of Clinical Medicine*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/jcm12134432>
- Nulty, A. (2024). A literature review on prosthetically designed guided implant placement and the factors influencing dental implant success. *British Dental Journal*, 236(3), 169–180. <https://doi.org/10.1038/s41415-024-7050-3>
- Oh, K. C., Shim, J. S., & Park, J. M. (2021). In vitro comparison between metal sleeve-free and metal sleeve-incorporated 3d-printed computer-assisted implant surgical guides. *Materials*, 14(3), 1–10. <https://doi.org/10.3390/ma14030615>
- Oilic, A., Varazzani, A., Fitouchi, B., Carlier, A., & Bouletreau, P. (2023). Navigation in oral surgery: a systematic review. *Journal of Oral Medicine and Oral Surgery*, 29(4). <https://doi.org/10.1051/mbcb/2023039>
- Ozan, O., Şeker, E., Çakmak, G., Guo, X., & Yilmaz, B. (2022). Effect of guide sleeve material, region, diameter, and number of times drills were used on the material loss from sleeves and drills used for surgical guides: An in vitro study. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 128(4), 746–753. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.12.036>
- Pal, T. (2015). Fundamentals and history of implant dentistry. *Journal of the International Clinical Dental Research Organization*, 7(3), 6. <https://doi.org/10.4103/2231-0754.172933>
- Peng, Y. Te, Tseng, C. C., Du, Y. C., Chen, Y. N., & Chang, C. H. (2017). A novel conversion method for radiographic guide into surgical guide. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 19(3), 447–457. <https://doi.org/10.1111/cid.12469>
- Raabe, C., Schuetz, T. S., Chappuis, V., Yilmaz, B., Abou-Ayash, S., & Couso-Queiruga, E. (2023). Accuracy of keyless vs drill-key implant systems for static computer-assisted implant surgery using two guide-hole designs compared to freehand implant placement: an in vitro study. *International Journal of Implant Dentistry*, 9(1), 4. <https://doi.org/10.1186/s40729-023-00470-6>

- Romandini, M., Ruales-Carrera, E., Sadilina, S., Hämmerle, C. H. F., & Sanz, M. (2023). Minimal invasiveness at dental implant placement: A systematic review with meta-analyses on flapless fully guided surgery. In *Periodontology 2000* (Vol. 91, Issue 1, pp. 89–112). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/prd.12440>
- Sartoretto, S. C., Shibli, J. A., Javid, K., Cotrim, K., Canabarro, A., Louro, R. S., Lowenstein, A., Mourão, C. F., & Moraschini, V. (2023). Comparing the Long-Term Success Rates of Tooth Preservation and Dental Implants: A Critical Review. In *Journal of Functional Biomaterials* (Vol. 14, Issue 3). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/jfb14030142>
- Sastre, T., Giacomelli, C., & Doix, D. (2018). *Spécial Empreinte optique*. 26–32.
- Scherer, M. D. (2014). *Are Radiographic Guides Necessary? A paradigm shift in implant site assessment, digital planning, and surgical guide fabrication using a novel impression technique with Green-Mousse®*. www.parkell.com
- Schubert, O., Schweiger, J., Stimmelmayer, M., Nold, E., & Güth, J.-F. (2019). Digital implant planning and guided implant surgery – workflow and reliability. *British Dental Journal*, 226(2), 101–108. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2019.44>
- Shah, N. P., Khanna, A., Pai, A. R., Sheth, V. H., & Raut, S. R. (2022). An evaluation of virtually planned and 3D-printed stereolithographic surgical guides from CBCT and digital scans: An in vitro study. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 128(3), 436–442. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.12.035>
- Shalash, M., & Zohny, A.-R. (2025). The application of artificial intelligence in full arch computer assisted implant surgery - A clinical study. *Digital Dentistry Journal*, 100005. <https://doi.org/10.1016/j.ddj.2025.100005>
- Shetty, S. R., Murray, C. A., Al Kawas, S., Jaser, S., Al-Rawi, N., Talaat, W., Narasimhan, S., Shetty, S., Adtani, P., & Hegde, S. (2023). Impact of fully guided implant planning software training on the knowledge acquisition and satisfaction of dental undergraduate students. *Medical Education Online*, 28(1). <https://doi.org/10.1080/10872981.2023.2239453>

- Shi, Y., Wang, J., Ma, C., Shen, J., Dong, X., & Lin, D. (2023). A systematic review of the accuracy of digital surgical guides for dental implantation. *International Journal of Implant Dentistry*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40729-023-00507-w>
- Son, K., & Lee, K.-B. (2020). A Novel Method for Precise Guided Hole Fabrication of Dental Implant Surgical Guide Fabricated with 3D Printing Technology. *Applied Sciences*, 11(1), 49. <https://doi.org/10.3390/app11010049>
- Tahmaseb, A., Wismeijer, D., Coucke, W., & Derksen, W. (2014). Computer technology applications in surgical implant dentistry: a systematic review. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 29 Suppl, 25–42. <https://doi.org/10.11607/jomi.2014suppl.g1.2>
- Takács, A., Marada, G., Turzó, K., Nagy, Á., Németh, O., Mijiritsky, E., Kivovics, M., & Mühl, A. (2023). Does implant drill design influence the accuracy of dental implant placement using static computer-assisted implant surgery? An in vitro study. *BMC Oral Health*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/s12903-023-03297-0>
- Tallarico, M., Czajkowska, M., Cicciù, M., Giardina, F., Minciarelli, A., Zadrozny, Ł., Park, C. J., & Meloni, S. M. (2021). Accuracy of surgical templates with and without metallic sleeves in case of partial arch restorations: A systematic review: Accuracy of Surgical Templates with and without Metallic Sleeves. In *Journal of Dentistry* (Vol. 115). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2021.103852>
- Tang, W. L., Chao, X. Y., Ye, Z., Liu, M. W., & Jiang, H. (2024). The Use of Dynamic Navigation Systems as a Component of Digital Dentistry. In *Journal of Dental Research* (Vol. 103, Issue 2, pp. 119–128). SAGE Publications Inc. <https://doi.org/10.1177/00220345231212811>
- Thangwarawut, P., Amornvit, P., Rokaya, D., & Kiattavorncharoen, S. (2022). Comparison of Different Types of Static Computer-Guided Implant Surgery in Varying Bone Inclinations. *Materials*, 15(9). <https://doi.org/10.3390/ma15093004>
- Todaro, C., Cerri, M., Isola, G., Manazza, A., Storelli, S., Rodriguez y Baena, R., & Lupi, S. M. (2023). Computer-Guided Osteotomy with Simultaneous Implant Placement and Immediately Loaded Full-Arch Fixed Restoration: A Case Report. *Prosthesis*, 5(1), 221–233. <https://doi.org/10.3390/prosthesis5010017>

- Wang, J., Zhang, W., Wu, S.-S., Guo, C.-B., & Cui, N.-H. (2021). 363 SCIENCE Navigation in bone-impacted premaxillary supernumerary tooth removal: a preliminary clinical trial. In *International Journal of Computerized Dentistry* (Vol. 24, Issue 4). <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34931772/>
- Wegmüller, L., Halbeisen, F., Sharma, N., Köhl, S., & Thieringer, F. M. (2021). Consumer vs. High-end 3D printers for guided implant surgery—An in vitro accuracy assessment study of different 3D printing technologies. *Journal of Clinical Medicine*, 10(21). <https://doi.org/10.3390/jcm10214894>
- Weiss, Charles. M., & Weiss, A. (2001). *Principles and practice of implant dentistry*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B0-323-00767-8/X5001-5>
- Wiedemann, T. G. (2024). Clinical Guideline for Zirconia Dental Implants: A Comprehensive and Critical Review and Update. *Journal of Clinical Medical Research*, 1–7. <https://doi.org/10.46889/jcmr.2024.5303>
- World Health Organization (WHO). (2025, March). *Oral health*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/oral-health>
- Wu, D., Zhou, L., Yang, J., Zhang, B., Lin, Y., Chen, J., Huang, W., & Chen, Y. (2020). Accuracy of dynamic navigation compared to static surgical guide for dental implant placement. *International Journal of Implant Dentistry*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s40729-020-00272-0>
- Yan, L., Xie, B., Li, Y., Liu, Z., Huang, Y., He, B., Qiu, Y., Luo, L., Yan, F., & Chen, F. (2025). Global burden of oral disorders with projections over the next 30 years. *Journal of Periodontology*. <https://doi.org/10.1002/JPER.24-0638>

