

INSTITUTO UNIVERSITÁRIO EGAS MONIZ

MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA DENTÁRIA

GUIAS CIRÚRGICAS EM REABILITAÇÃO ORAL COM IMPLANTES

Trabalho submetido por

Charlotte Josué

para a obtenção do grau de Mestre em Medicina Dentária

julho de 2026

INSTITUTO UNIVERSITÁRIO EGAS MONIZ

MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA DENTÁRIA

GUIAS CIRÚRGICAS EM REABILITAÇÃO ORAL COM IMPLANTES

Trabalho submetido por

Charlotte Josué

para a obtenção do grau de **Mestre** em Medicina Dentária

Trabalho orientado por

Prof. Doutor António Mano Azul

julho de 2026

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor António Mano Azul pela orientação prestada ao longo desta tese e pela confiança que em mim depositou. Agradeço ainda os ensinamentos transmitidos ao longo destes dois últimos anos e o contributo que tiveram para o meu percurso académico.

Agradeço à Egas Moniz School of Health and Science pela oportunidade de estudar em condições de excelência, pela qualidade do seu ensino e pelo seu empenhamento na nossa formação.

Agradeço a todo o corpo docente da clínica de cirurgia por me transmitir tanto conhecimento e por despertar minha paixão pela cirurgia.

À mes parents, vous avez été ma plus grande force et mon plus gros soutien depuis le début. Merci infiniment pour votre dévotion, votre confiance, vos sacrifices et l'amour immense dont vous m'avez entourée à chaque étape de mon parcours ; ma réussite est la vôtre, et votre fierté fait la mienne. Maman, merci d'être cette femme inspirante que j'admire profondément. Tu m'as appris, par la force de ton exemple, à regarder loin, à rêver grand et à ne jamais craindre mes ambitions. Papa, merci de m'avoir transmis la vocation pour ce beau métier. Tu m'as appris, par ta passion, ton exigence et tes précieux conseils, à aimer ce que je fais et à m'y engager avec conviction. Tu es un modèle et une source d'inspiration pour moi, et j'espère devenir un jour aussi brillante que toi.

À ma sœur, merci d'être une si belle partie de ma vie. Mon pilier pour toujours.

À toute ma famille, merci pour votre confiance et votre soutien indéfectible durant toutes ces années.

À Joséphine, merci pour ces cinq années à tout vivre et partager ensemble. Lisbonne n'aurait pas été pareil sans toi.

À mes amis de Lisbonne, merci de faire partie de ma vie, vous êtes ma famille de cœur et ma famille lisboète. Merci pour toutes nos aventures vécues ensemble, votre soutien infaillible et pour tous ces beaux souvenirs créés, indélébiles.

À mes amis de France, merci d'être vous, merci de faire partie de ma vie depuis tant d'années, vous êtes ma famille de cœur. Merci pour votre soutien malgré la distance, merci à tous d'être venus me voir et d'avoir partagé cette folle aventure lisboète.

Declaração de Honra

Código | IMP-EM-EI-111_01

Declaro, por minha honra, que o presente trabalho académico é original e foi elaborado por mim própria, não se tendo recorrido a quaisquer outras fontes, para além das indicadas, usadas, adotadas literalmente ou adaptados a partir dos seus originais (em fontes impressas, não impressas ou na internet) e encontram-se adequados, identificados e citados, com observância das convenções do trabalho académico em vigor.

Mais declaro que este Trabalho de Projeto final, Guias cirúrgicas em Reabilitação oral com implantes não foi apresentada, para efeitos de avaliação, a qualquer outra entidade ou instituição, para além da(s) diretamente envolvida(s) na sua elaboração, e que os conteúdos das versões impressa e eletrónica são inteiramente coincidentes.

Declaro, igualmente, encontrar-me ciente de que a inclusão, neste texto, de qualquer falsa declaração terá consequências legais.

Data: 17/06/2026

Declaração Conflito de Interesses (DCI)

Código | IMP-EM-EI-110_01

Eu, Charlotte Josué, referente ao Trabalho de Projeto final Guias cirúrgicas em Reabilitação oral com implantes, declaro que não possuo conflitos de interesse de ordem pessoal, comercial, académica, político ou financeiro.

Data: 17/06/2026

Declaração de Financiamento

Código | IMP-EM-EI-113_01

Eu, Charlotte Josué, referente ao Trabalho de Projeto final Guias cirúrgicas em Reabilitação oral com implantes declaro que o meu trabalho não se encontra financiado.

Declaração de Ética e Registo

Código | IMP-EM-EI-112_01

Eu, Charlotte Josué referente ao Trabalho de Projeto final Guias cirúrgicas em Reabilitação oral com implantes declaro que o meu trabalho se encontra aprovado pela Comissão de ética de Egas Moniz sob o número ou identificação de registo: *não aplicável*

Data: 17/06/2026

Declaração de Disponibilidade de Dados

Código | IMP-EM-EI-150

A presente Declaração de Disponibilidade de Dados reflete o compromisso do Instituto Universitário Egas Moniz em promover a transparência, a reprodutibilidade científica e o acesso aberto aos dados gerados no âmbito dos projetos a decorrer nesta IES, em conformidade com os princípios éticos e legais aplicáveis e com os princípios FAIR. Esta declaração estabelece as condições e as diretrizes para o acesso, o compartilhamento e a reutilização dos dados, garantindo que sejam utilizados de forma responsável e em benefício da comunidade científica e da sociedade.

A seguinte tabela apresenta diferentes opções de partilha de dados, incluindo exemplos de formatos e níveis de acessibilidade. Deverá selecionar a(s) opção(ões) que melhor se adequa(m) ao seu projeto, assegurando o cumprimento das diretrizes éticas e científicas aplicáveis.

Tabela 1: Exemplos de declarações de disponibilidade de dados. Onde aparece [nome do repositório, por exemplo, "pure"] deve ser preenchido

Disponibilidade de dados	Modelo de declaração de disponibilidade de dados	Política de partilha	Assinale com "x"
Dados disponíveis num repositório público que emite conjuntos de dados com DOIs	Os dados que apoiam as conclusões deste estudo estão disponíveis em [nome do repositório, por exemplo, "pure"] em http://doi.org/[doi] , número de referência [número de referência].	Partilha geral sem pedido	
Dados abertamente disponíveis num repositório público que não emite DOIs	Os dados que apoiam as conclusões deste estudo estão disponíveis em [nome do repositório] em [URL], número de referência [número de referência].	Partilha geral sem pedido	
Dados derivados de recursos do domínio público	Os dados que apoiam as conclusões deste estudo estão disponíveis em [nome do repositório] em [URL/DOI], número de referência [número de referência]. Estes dados foram obtidos a partir dos seguintes recursos disponíveis no domínio público: [listar recursos e URLs]	Partilha geral sem pedido	

Declaração de Disponibilidade de Dados

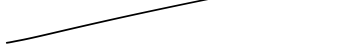
Código | IMP-EM-EI-150

Disponibilidade de dados	Modelo de declaração de disponibilidade de dados	Política de partilha	Assinale com "x"
Dados disponíveis no artigo ou nos seus materiais suplementares	Os autores confirmam que os dados que suportam as conclusões deste estudo estão disponíveis no artigo [e/ou] nos seus materiais suplementares.	Básico, partilhar a pedido	
Dados gerados numa instalação central de grande escala, disponíveis mediante pedido	Os dados em bruto foram gerados em [nome da instalação]. Os dados derivados que suportam as conclusões deste estudo estão disponíveis junto do autor correspondente [iniciais], mediante pedido.	Básico, partilhar a pedido	
Embargo dos dados devido a restrições comerciais	Os dados que suportam os resultados estarão disponíveis em [nome do repositório] em [URL / ligação DOI] após um embargo de [6 meses] a partir da data de publicação para permitir a comercialização dos resultados da investigação.	Básico, Partilhar a pedido	
Dados disponíveis a pedido devido a restrições de privacidade/éticas	Os dados que sustentam as conclusões deste estudo estão disponíveis mediante pedido ao autor correspondente, [iniciais]. Os dados não estão disponíveis ao público devido a [restrições, por exemplo, o facto de conterem informações que podem comprometer a privacidade dos participantes na investigação].	Básico, Partilhar a pedido	
Dados sujeitos a restrições de terceiros	Os dados que suportam as conclusões deste estudo estão disponíveis [junto de] [terceiros]. Aplicam-se restrições à disponibilidade destes dados, que foram utilizados sob licença para este estudo. Os dados estão disponíveis [através dos autores / no URL] com a permissão de [terceiros].	Básico, Partilhar a pedido	

Declaração de Disponibilidade de Dados

Código | IMP-EM-EI-150

Disponibilidade de dados	Modelo de declaração de disponibilidade de dados	Política de partilha	Assinale com "x"
Dados disponíveis a pedido dos autores	Os dados que suportam as conclusões deste estudo estão disponíveis junto do autor correspondente, [iniciais do autor], mediante pedido razoável.	Básico, Partilhar a pedido	x
Partilha de dados não aplicável - não foram gerados novos dados	A partilha de dados não é aplicável a este artigo, uma vez que não foram criados ou analisados novos dados neste estudo.	-	
Dados não digitais disponíveis	Os dados não digitais que suportam este estudo são conservados em [adicionar local].	Básicos	
Dados não disponíveis devido a restrições [éticas/legais/comerciais]	Devido à natureza da investigação, os dados de apoio [éticos/legais/comerciais] não estão disponíveis.	-	
Dados não disponíveis - consentimento do participante	Os participantes neste estudo não deram consentimento escrito para que os seus dados fossem partilhados publicamente, pelo que, devido à natureza sensível da investigação, os dados de apoio não estão disponíveis.	-	

O Orientando: 
 O Orientador: 
 O Coorientador (se aplicável): 

Data: 11/06/2026

Data: 11/06/2026

Data: 15/06/2026

RESUMO

A reabilitação oral consolidou-se, nas últimas décadas, como uma das soluções fundamentais na reabilitação oral. A integração das tecnologias digitais no planeamento e na execução cirúrgica transformou profundamente a prática clínica, permitindo uma abordagem mais previsível, menos invasiva e melhor adaptada às exigências estéticas e funcionais dos pacientes (Alauddin et al., 2021). Neste contexto, a cirurgia guiada representa um avanço significativo, ao possibilitar a transferência do planeamento virtual para o ato operatório através de guias cirúrgicas concebidas e fabricadas digitalmente (Kernen et al., 2020).

Embora estas soluções prometam elevada precisão no posicionamento dos implantes, observa-se ainda uma variabilidade na sua fiabilidade, dependente de diferentes situações clínicas. Segundo Unsal et al. (2020), apesar dos benefícios associados às guias cirúrgicas CAD/CAM — como maior segurança anatómica e previsibilidade —, persistem limitações relacionadas com a adaptação das guias, o controlo do espaço operatório e a transferência exata do planeamento virtual para o campo clínico. As discrepâncias entre a posição planeada e a posição efetivamente obtida sugerem a influência de múltiplos fatores, nomeadamente relacionados com o paciente, o tipo de suporte da guia, a morfologia óssea e as condições operatórias (Lo Russo et al., 2023). Compreender de forma aprofundada estes parâmetros é essencial para otimizar a eficácia da cirurgia guiada e assegurar a previsibilidade dos resultados clínicos (Flügge et al., 2022).

Esta revisão narrativa da literatura tem como objetivo analisar os fatores clínicos suscetíveis de influenciar a precisão das guias cirúrgicas em implantologia oral, com base nas evidências disponíveis na investigação contemporânea. Pretende-se identificar as tendências gerais observadas na literatura, reconhecer as limitações atuais desta técnica e contribuir para uma reflexão abrangente sobre as condições clínicas que favorecem uma utilização mais fiável destas tecnologias na reabilitação oral.

Palavras-chave: guias cirúrgicas; fatores clínicos; cirurgia guiada; precisão

ABSTRACT

Oral rehabilitation has established itself, over recent decades, as one of the fundamental solutions in oral rehabilitation. The integration of digital technologies into surgical planning and execution has profoundly transformed clinical practice, enabling a more predictable, less invasive approach that is better adapted to patients' aesthetic and functional demands (Alauddin et al., 2021). In this context, guided surgery represents a significant advance, as it allows the transfer of virtual planning to the operative procedure through surgically guided templates designed and manufactured digitally (Kernen et al., 2020).

Although these solutions promise high precision in implant placement, variability in their reliability is still observed, depending on different clinical situations. According to Unsal et al. (2020), despite the benefits associated with CAD/CAM surgical guides — such as greater anatomical safety and predictability — limitations remain regarding guide adaptation, control of the operative space, and the accurate transfer of virtual planning to the clinical field. Discrepancies between the planned position and the position actually achieved suggest the influence of multiple factors, namely those related to the patient, the type of guide support, bone morphology, and operative conditions (Lo Russo et al., 2023). A thorough understanding of these parameters is essential to optimize the effectiveness of guided surgery and ensure the predictability of clinical outcomes (Flügge et al., 2022).

This narrative literature review aims to analyze the clinical factors likely to influence the accuracy of surgical guides in oral implantology, based on the evidence available in contemporary research. It seeks to identify the general trends observed in the literature, recognize the current limitations of this technique, and contribute to a comprehensive reflection on the clinical conditions that favor a more reliable use of these technologies in oral rehabilitation.

Keywords : surgical guides; clinical factors; guided surgery; accuracy

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABELAS	9
ÍNDICE DE SIGLAS.....	11
I- INTRODUÇÃO.....	13
II- DESENVOLVIMENTO	17
A – Planamento digital e concepção das guias cirúrgicas.....	17
A1 – Fundamentos do planeamento digital em implantologia	17
1.1. Evolução histórica da implantologia oral	17
1.2. Definição de implantes	17
1.3. Integração das tecnologias digitais	18
1.4. O conceito de fluxo digital (“ <i>digital workflow</i> ”)	19
1.5. Impacto da transformação digital na prática clínica	21
A2 – Software de planamento e design protético virtual	23
2.1. Planamento protético e integração dos dados radiográficos	23
2.2. Fusão dos ficheiros DICOM/STL e calibração digital	27
2.3. Fontes de erro no planeamento virtual	29
2.4. Relevância clínica da precisão no fluxo digital.....	31
A3 – Fabrico das guias cirúrgicas: dimensão industrial.....	32
3.1. Tecnologias de fabrico	32
3.2. Tolerâncias mecânicas e controlo de qualidade	35
3.3. Influência do material e do método de produção na precisão	36
B – Aplicação clínica das guias cirúrgicas.....	37
B1 – Tipologia e classificação das guias cirúrgicas.....	37
1.1. Definição e função clínica das guias cirúrgicas	37
1.2. Classificação das guias segundo o método de orientação	38
1.3. Classificação das guias segundo o tipo de suporte	40
1.4. Critérios de seleção do tipo de guia	41
1.5. Influência da tipologia na precisão	43
B2 – Fatores clínicos que influenciam a precisão	44
2.1. Fatores anatómicos e densidade óssea	44
2.2. Região operatória: “Maxilar vs Mandibular”	46
2.3. Complexidade do caso	48
2.3.1. Implante unitário	48
2.3.2. Implante em caso de reabilitação parcial	50
2.3.3. Implante em caso de reabilitação total	51
2.4. Experiência do cirurgião e manipulação da guia.....	52
2.5. Mobilidade dos tecidos moles e estabilidade intraoperatória	54
B3 – Correlação entre planeamento virtual e resultado clínico.....	54
3.1. Métodos de medição da precisão (CBCT pós-operatório, STL)	54
3.2. Tolerâncias mecânicas e controlo de qualidade	56
3.3. Influência do material e do método de produção na precisão	57
3.4. Validação e esterilização das guias cirúrgicas	59
C- Análise crítica, vantagens, limitações e perspetivas	61

C1 – Benefícios e limitações da cirurgia guiada	61
1.1. Vantagens clínicas	61
1.2. Limitações clínicas e operatórias.....	62
1.3. Influência do contexto clínico na precisão	62
C2 – Perspetivas futuras da implantologia digital	63
2.1. Integração da inteligência artificial e navegação robótica	63
2.2. Desenvolvimento de protocolos padronizados	63
2.3. O futuro da cirurgia guiada: entre precisão e personalização	64
III. CONCLUSÃO	67
IV- BIBLIOGRAFIA	69

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 : ELABORAÇÃO DE GUIAS CIRÚRGICAS EM SOFTWARES DE PLANEAMENTO IMPLANTAR (KERNEN ET AL., 2020).	23
FIGURA 2 : FLUXO DE TRABALHO DA COLOCAÇÃO DE IMPLANTES COM GUIAS CIRÚRGICAS DIGITAIS PROTETICAMENTE ORIENTADAS (ABAD-CORONEL ET AL., 2024).....	26
FIGURA 3 : FLUXO DE CIRURGIA GUIADA EM EDENTULISMO PARCIAL: DO PLANEAMENTO VIRTUAL À TRANSFERÊNCIA INTRAORAL COM GUIA DENTO-SUPORTADA.	38
FIGURA 4 : CIRURGIA COM PROTOCOLO PARCIALMENTE GUIADO (ZHOU ET AL., 2026).	49
FIGURA 5 : GUIA CIRÚRGICA COM PINO DE FIXAÇÃO E AJUSTE DA GUIA IMPRESSA INTRA ORALMENTE DURANTE A CIRURGIA (CHRABIEH ET AL., 2024).	50
FIGURA 6 : GUIA CIRÚRGICA OSSO-SUPORTADA COM FIXAÇÃO POR PINOS/PARAFUSOS EM DOENTE TOTALMENTE EDÊNTULO (BJELICA ET AL., 2026).....	52

INDICE DE TABELAS

TABELA 1: FLUXO DE TRABALHO DIGITAL PARA O PLANEAMENTO PRE-OPERATORIO DA CIRURGIA IMPLANTAR GUIADA (ADAPTADO DE (FLÜGGE ET AL., 2022))...... 20

TABELA 2 : COMPARAÇÃO ENTRE SLA E DLP NA PRODUÇÃO DE GUIAS CIRÚRGICAS (ADAPTADO DE JEONG ET AL., 2024). 33

TABELA 3 : VANTAGENS E LIMITAÇÕES DAS GUIAS SEGUNDO OS DIFERENTES TIPO DE SUPORTE. 40

ÍNDICE DE SIGLAS

3D : Tridimensional

CAD : desenho assistido por computador

CAD/CAM : Desenho e fabrico assistidos por computador

CAIS : Cirurgia implantar assistida por computador

CAM : Fabrico assistido por computador

CBCT : Tomografia computadorizada de feixe cónico

DCAIS : Cirurgia implantar dinâmica assistida por computador

DICOM : *Digital Imaging and Communications in Medicine*

DLP : Processamento Digital de Luz

IC : Contactos interproximais

IT : Tempo de impressão

OC : Contactos oclusais

ROI : Região de interesse

RMS : *Root mean square*

SCAIS : Cirurgia implantar estática assistida por computador

SLA : Estereolitografia

STL : Ficheiro de malha tridimensional de superfície

UV : Ultravioleta

VAS : Escala visual analógica

I- INTRODUÇÃO

Os implantes dentários afirmaram-se, nas últimas décadas, como uma solução de eleição na reabilitação oral de pacientes parcial ou totalmente edêntulos, permitindo restabelecer função mastigatória, estética e qualidade de vida (Kafedzhieva et al., 2025). Podem ser definidos como estruturas de material aloplástico inseridas nos tecidos orais, colocadas abaixo do periósteo, com a finalidade de proporcionar retenção e suporte para próteses fixas ou removíveis (Gupta, Gupta & Weber, 2024). Graças à evolução dos desenhos implantares, das superfícies e dos protocolos cirúrgicos e protéticos, as taxas de sobrevivência a 10 anos podem ultrapassar os 97%, embora revisões sistemáticas apontem para valores globais próximos de 96% (Buser et al., 2012; Howe et al., 2019). Além disso, a terapêutica implantar associa-se a melhor preservação óssea e a menor risco de cárie ou de problemas endodônticos nos dentes adjacentes, quando comparada com alternativas protéticas convencionais (Gupta, Gupta & Weber, 2024).

Apesar desta previsibilidade, a colocação de implantes continua a exigir controlo rigoroso da posição tridimensional. Pequenos desvios em angulação, profundidade ou localização podem comprometer o espaço protético, dificultar a reabilitação planeada e aumentar o risco de complicações, sobretudo em zonas de maior exigência anatómica. A precisão da transferência do planeamento para o ato cirúrgico mantém-se, por isso, um aspeto crítico da implantologia.

Neste contexto, a transformação digital assumiu particular relevância. A utilização da tomografia computadorizada de feixe cónico (CBCT), dos scanners intraorais, dos modelos tridimensionais e dos softwares de planeamento alterou profundamente a forma como os casos implantológicos são avaliados, planeados e executados na prática clínica (Kafedzhieva et al., 2025; Wang et al., 2024). Estas ferramentas constituem a base da implantologia digital contemporânea e têm contribuído para um planeamento mais previsível e orientado pela prótese (Kafedzhieva et al., 2025; Wang et al., 2024).

A partir desta evolução consolidou-se o conceito de *digital workflow* em implantologia oral. Os ficheiros obtidos por CBCT e scanners intraorais são integrados em softwares de planeamento, permitindo o posicionamento virtual dos implantes e,

quando indicado, a confecção de guias cirúrgicas para transferir o plano digital para o campo operatório. Chen et al. (2025) mostram que este processo pode reduzir os desvios entre a posição planeada e a efetivamente obtida, desde que sejam asseguradas etapas críticas como a qualidade dos dados, a calibração e a validação do plano virtual. A cirurgia guiada tornou-se, assim, um elemento central deste fluxo, ao permitir maior controlo da posição tridimensional dos implantes.

Ainda assim, a precisão e a eficácia da colocação do implante não são absolutas. Estudos que comparam a cirurgia *freehand* com a cirurgia assistida por computador mostram melhor precisão global com abordagens guiadas, embora persistam discrepâncias mensuráveis entre o planeamento virtual e a realidade cirúrgica (Werny et al., 2025). A literatura indica igualmente que as guias derivadas do planeamento protético tendem a apresentar elevada precisão, mas os desvios variam consoante o tipo de suporte, o sistema e o protocolo adotado (Abad-Coronel et al., 2024). Em situações de colocação imediata, são ainda descritos fatores influenciadores relacionados com a anatomia local e com o protocolo cirúrgico, reforçando a importância do contexto clínico na precisão obtida (Xing et al., 2025).

Em síntese, o objetivo desta tese é explorar quais são os fatores clínicos que influenciam a precisão dos guias cirúrgicos em implantologia oral. Parte-se do reconhecimento de que, apesar dos avanços do planeamento digital e da cirurgia guiada, subsistem variáveis clínicas suscetíveis de condicionar a fidelidade entre o planeado e o obtido. Numa primeira parte, serão abordados os fundamentos do planeamento digital em implantologia e o processo de conceção das guias cirúrgicas. De seguida, a análise centrar-se-á na aplicação clínica destas guias, com particular enfoque na precisão obtida e nos resultados descritos na literatura. Por fim, será desenvolvida uma análise crítica das vantagens, limitações e perspetivas da cirurgia guiada, bem como das suas implicações para a prática clínica.

O presente trabalho enquadra-se principalmente no Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 3 – Saúde de Qualidade, promovendo maior segurança e previsibilidade terapêutica, relaciona-se com o ODS 4 – Educação de Qualidade, pela produção científica, e com o ODS 9 – Inovação e Infraestruturas, pela integração de tecnologias digitais na prática clínica.

II- DESENVOLVIMENTO

A – Planamento digital e concepção das guias cirúrgicas

A1 – Fundamentos do planeamento digital em implantologia

1.1. Evolução histórica da implantologia oral

A evolução da implantologia oral moderna pode ser compreendida como um percurso marcado por três grandes marcos: a consolidação biológica da osteointegração, o desenvolvimento progressivo de materiais e desenhos de implantes mais previsíveis e, mais recentemente, a incorporação de tecnologias digitais no diagnóstico, planeamento e execução cirúrgica. Revisões atuais continuam a reconhecer a contribuição determinante de Per-Ingvar Brånemark na introdução do conceito de osteointegração e na sua disseminação clínica, que transformou a substituição dentária num tratamento reabilitador com base científica sólida e aplicabilidade global (Agarwal et al., 2024; Rawat et al., 2024).

Do ponto de vista biológico, estes autores descrevem que a viragem decisiva teve origem na descoberta, na década de 1950, de que o titânio podia estabelecer uma ligação íntima com o osso, fenómeno que viria a ser designado por osteointegração. Esta observação abriu caminho à transposição do conhecimento experimental para a prática clínica e culminou na introdução de implantes dentários em titânio em 1965, marco frequentemente referido como fundador da implantologia moderna baseada em osteointegração (Agarwal et al., 2024).

1.2. Definição de implantes

Um implante dentário corresponde a um dispositivo médico implantável para substituir um dente de falta, concebida com materiais biocompatíveis, que é colocada cirurgicamente no osso do maxilar ou da mandíbula. A partir dessa fixação, cria-se um suporte mecânico que permite reter e sustentar diferentes tipos de próteses, quer fixas (coroas ou pontes), quer removíveis (Gupta et al., 2023). Por desempenhar a função da raiz do dente perdido, é habitualmente designado como uma “raiz artificial” e constitui, atualmente, uma alternativa terapêutica de uso corrente na reabilitação de espaços edêntulos.

Os implantes dentários podem contribuir para uma reabilitação oral global do paciente, ao melhorar a eficiência mastigatória. A previsibilidade deste tratamento

assenta no princípio da osseointegração, entendida como uma ligação direta, estrutural e funcional entre osso vivo e a superfície de um implante endósseo sob carga (Pandey et al., 2022). A sua utilização tem sido ainda associada à preservação do osso alveolar, ajudando a limitar a reabsorção após a perda dentária, e pode proporcionar ganhos estéticos relevantes, sobretudo na região anterior.

Adicionalmente, ao evitar, em determinados casos, a necessidade de envolver dentes adjacentes na reabilitação, pode facilitar a manutenção da higiene oral e reduzir o risco de problemas nesses dentes, com reflexo na qualidade de vida e no bem-estar dos pacientes. Atualmente, os implantes dentários são amplamente reconhecidos como uma opção terapêutica previsível para reabilitações fixas, devido à sua durabilidade, integração biológica e às elevadas taxas de sobrevivência reportadas a longo prazo, frequentemente superiores a 90% aos 10 anos em estudos longitudinais (Gupta et al., 2023).

A evolução da implantologia em medicina dentária, evidenciada pelos indicadores atuais de crescimento e utilização clínica, reflete uma consolidação progressiva desta área na reabilitação oral moderna, em continuidade com os trabalhos pioneiros de Brånemark. Este percurso tem estado intimamente ligado ao desenvolvimento tecnológico, destacando-se a introdução da tomografia volumétrica de feixe cónico (CBCT) e o aparecimento de softwares de planeamento tridimensional, conciliando de forma mais rigorosa as exigências anatómicas e protéticas. Mais recentemente, a cirurgia guiada e a cirurgia navegada reforçaram esse fluxo digital ao possibilitarem a transferência do planeamento virtual para o ato operatório, contribuindo para uma colocação implantar mais precisa e reproduzível, com ganhos relevantes em segurança, previsibilidade e qualidade estética e funcional, respeitando simultaneamente estruturas anatómicas sensíveis (Marques-Guasch et al., 2023).

1.3. Integração das tecnologias digitais

Ao longo da última década, a implantologia dentária tem sido profundamente impactada pela adoção de tecnologias digitais, que vieram reorganizar o tratamento implantar desde a fase de diagnóstico e planeamento até à execução cirúrgica e à reabilitação protética. A incorporação da tomografia computadorizada e do Dentascan, particularmente do CBCT, enquanto ferramenta de imagiologia 3D, e a evolução dos sistemas de desenho e fabrico assistidos por computador (CAD/CAM) traduziram-se

numa alteração substancial do paradigma clínico em implantologia. Este processo tem sido associado a ganhos em precisão e previsibilidade, além de apoiar a comunicação clínica e a adaptação do plano terapêutico às necessidades específicas de cada paciente (Kafedzhieva et al., 2025).

Entre os principais recursos deste processo incluem-se a CBCT, o scanner intraoral e os sistemas de desenho e fabrico assistidos por computador (CAD/CAM), que tornam possível um fluxo de trabalho digital no qual o planeamento orienta a osteotomia e a colocação do implante com maior controlo. Esta abordagem pode ser executada com recurso a cirurgia assistida por computador, quer através de guias estáticas (sCAIS), quer através de navegação dinâmica (dCAIS) (Werny et al., 2025).

Na prática, esta transformação assenta na integração de três pilares: imagiologia 3D (CBCT), aquisição digital da arcada (scanners intraorais) e fabrico digital (CAD/CAM e impressão 3D). Em conjunto, estas ferramentas permitem combinar informação anatómica e protética num ambiente virtual, facilitando um planeamento mais estruturado e orientado pela reabilitação (Kafedzhieva et al., 2025).

A CBCT possibilita uma avaliação tridimensional do volume ósseo e da relação com estruturas anatómicas relevantes, contribuindo para um planeamento mais seguro e previsível. Por sua vez, os scanners intraorais simplificam a obtenção de modelos digitais e melhoram a comunicação clínica e laboratorial, apoiando a definição do plano protético e a sua integração no planeamento implantar (Alauddin et al., 2021; Kafedzhieva et al., 2025).

Finalmente, os sistemas CAD/CAM e as tecnologias de fabrico digital permitem materializar o planeamento em soluções clínicas, como restaurações provisórias ou definitivas e, quando indicado, modelos e guias cirúrgicas produzidos por impressão 3D, reduzindo etapas intermédias e promovendo maior padronização do processo. Assim, mais do que a simples adoção de equipamentos, a implantologia digital traduz-se numa mudança de método: decisões baseadas em dados integrados, melhor visualização do caso e maior controlo das etapas que conduzem ao resultado final (Kafedzhieva et al., 2025).

1.4. O conceito de fluxo digital (“*digital workflow*”)

Em implantologia oral, o *digital workflow* pode ser definido como um fluxo de trabalho integrado e sequencial, baseado na aquisição e combinação de dados digitais

do paciente (por exemplo, CBCT e digitalização intraoral), no planeamento virtual e na transferência desse planeamento para a execução clínica — cirúrgica e protética — com o objetivo de aumentar o controlo, a previsibilidade e a consistência do tratamento (Kafedzhieva et al., 2025). No contexto do planeamento pré-operatório para cirurgia guiada, este fluxo inclui a aquisição e o processamento de dados digitais, seguido de etapas de desenho assistido por computador (CAD) e de fabrico assistido por computador (CAM), permitindo converter o plano virtual em dispositivos e procedimentos clinicamente executáveis (Flügge et al., 2022).

Tabela 1: Fluxo de trabalho digital para o planeamento pré-operatório da cirurgia implantar guiada (adaptado de (Flügge et al., 2022)).

Etapas	Título	Conteúdo
1	Aquisição de dados	• Osso: CBCT • Superfície mucosa e dentes remanescentes: modelo dentário virtual
2	Importação e pré-processamento dos dados	• Modelo dentário virtual • Dados CBCT • Segmentação • Registo (fusão/alinhamento)
3	CAD	• Set-up protético virtual • Posicionamento virtual do implante • Desenho da guia de perfuração
4	CAM	• Produção da guia (central ou em consultório) • Fresagem • Impressão 3D

O *digital workflow* do planeamento pré-operatório para cirurgia guiada pode ser descrito de forma sequencial em quatro etapas principais: aquisição de dados, importação e pré-processamento, CAD e CAM (Flügge et al., 2022).

- (1) Aquisição de dados. Numa fase inicial, o CBCT tem sobretudo uma aplicação diagnóstica, permitindo caracterizar o padrão de reabsorção óssea, identificar estruturas anatómicas vitais e avaliar o volume de osso alveolar remanescente, informações essenciais para um planeamento seguro (Alauddin et al., 2021).
- (2) Importação e pré-processamento. Os dados recolhidos são importados para o software Destacan, onde se procede à segmentação da CBCT e ao registo/alinhamento entre o volume radiográfico e o modelo dentário virtual. Esta etapa é crítica, uma vez que a qualidade da segmentação e do registo condiciona a fidelidade do paciente virtual e, por consequência, do planeamento (Flügge et al., 2022).
- (3) CAD. Com os dados integrados, realiza-se o *set-up* protético virtual e o posicionamento do implante de forma proteticamente guiada, seguindo-se o desenho da guia cirúrgica (*drill guide design*), que visa transferir o plano para a fase operatória (Flügge et al., 2022).
- (4) CAM. Por fim, o desenho da guia é materializado através de fabrico assistido por computador, quer por fresagem quer por impressão 3D, podendo a produção ser realizada em centro de fabrico ou em ambiente clínico/laboratorial, dependendo do sistema adotado (Flügge et al., 2022).

A qualidade do resultado depende do rigor em cada etapa: erros na aquisição, no processamento ou na integração dos dados podem propagar-se e afetar o desfecho protético. Acresce que a exatidão não é determinada apenas pelo scanner intraoral, mas também pela forma como a informação é tratada e interpretada pelo sistema CAD, existindo variabilidade entre diferentes combinações de dispositivos e plataformas (Alauddin et al., 2021).

1.5. Impacto da transformação digital na prática clínica

A transformação digital na implantologia oral represente, na prática, uma reorganização do trabalho clínico e laboratorial, com efeitos diretos na eficiência, na previsibilidade do resultado protético e na experiência do paciente. Em particular, a utilização de scanners intraorais e de softwares dedicados tende a reduzir etapas intermédias e a acelerar a obtenção de modelos virtuais, quando comparada com a impressão convencional (Alauddin et al., 2021).

As técnicas de impressão convencionais envolvem múltiplas etapas e estão, por isso, mais expostas a fontes de erro com possível repercussão no resultado protético. A digitalização intraoral, ao permitir a obtenção de modelos tridimensionais virtuais, reduz a dependência desses passos, pode encurtar o procedimento, facilitar a comunicação entre clínico, técnico e paciente e diminuir riscos associados ao manuseamento de materiais. No entanto, a exatidão final não depende apenas do scanner, mas também do processamento dos dados no sistema CAD, existindo variabilidade entre diferentes combinações de scanners e softwares (Alauddin et al., 2021). Além disso, a redução do tempo de consulta representa uma vantagem económica para o consultório, ao diminuir o custo por hora e melhorar a percepção do tratamento e a satisfação do paciente (Corsalini et al., 2024).

Do ponto de vista do planeamento, a evolução dos softwares tem implicações clínicas importantes. Os sistemas atuais incluem funcionalidades como segmentação automática de estruturas e ferramentas de visualização do volume radiográfico em cortes e modelos tridimensionais, contribuindo para um planeamento mais sistemático e potencialmente mais seguro (Kernen et al., 2020). A integração do *set-up* protético com a anatomia individual permite posicionar virtualmente os implantes em imagens seccionais e em modelos tridimensionais reconstruídos a partir da CBCT, reforçando uma abordagem proteticamente guiada (Flügge et al., 2022). O *set-up* protético corresponde à simulação virtual da futura reabilitação e serve de referência para o desenho da guia cirúrgica, permitindo transferir para o campo operatório a posição tridimensional do implante planeada no software. Além disso, o software deve possibilitar a seleção de diferentes sistemas de implantes e o ajuste de parâmetros como comprimento, diâmetro, inclinação, rotação e profundidade, de acordo com as exigências anatómicas e protéticas do caso (Kernen et al., 2020).

Corsalini et al. (2024) compararam três *workflows* para a confecção de coroas unitárias sobre implantes, avaliando contactos interproximais (IC), contactos oclusais (OC), tempo de impressão (IT) e conforto do paciente, medido por escala visual analógica (VAS). A relevância dos IC relaciona-se com benefícios clínicos como menor impactação alimentar, menor sobrecarga mecânica e maior satisfação do paciente. O *workflow* totalmente digital apresentou melhor desempenho em IC ($p = 0,0003$) e OC ($p = 0,0009$). No mesmo estudo, o tempo médio de impressão foi substancialmente inferior no fluxo totalmente digital ($\approx 101,6$ s) em comparação com

os workflows convencionais ($\approx 361\text{--}363$ s), com diferença significativa ($p < 0,0001$), sendo também superior o conforto reportado pelo paciente (VAS; $p < 0,0001$) (Corsalini et al., 2024).

A2 – Software de planeamento e design protético virtual

2.1. Planamento protético e integração dos dados radiográficos

O planeamento protético constitui um elemento central e o ponto de partida da implantologia digital. Graças à integração das tecnologias digitais, pode-se agora ter um trabalho totalmente digitalizado desde a aquisição de dados e o planeamento virtual até à conceção e fabrico da guia cirúrgica. O *set-up* define o resultado protético e orienta a posição do implante; a CBCT valida a viabilidade anatómica. Por isso, vamos recorrer ao registo de dados radiográficos, nomeadamente à CBCT, que disponibiliza um volume tridimensional (DICOM) útil para avaliar o osso disponível e a proximidade a estruturas anatómicas relevantes para a segurança do procedimento (Flügge et al., 2022).

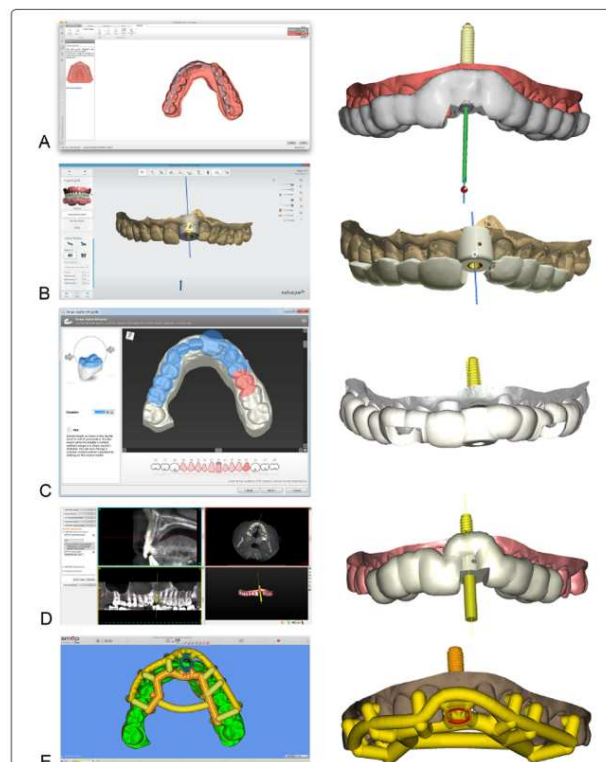


Figura 1 : Elaboração de guias cirúrgicas em softwares de planeamento implantar (Kernen et al., 2020).

No pré-operatório, para garantir uma boa precisão, devem ser considerados fatores anatómicos como o seio maxilar e raízes dos dentes vizinhas. Também devem ser

considerados a quantidade óssea (vertical e horizontal) e a qualidade óssea. Em paralelo, o software deve disponibilizar bibliotecas de diferentes sistemas de implantes e permitir ajustar parâmetros como tipo de implante, o comprimento, o diâmetro e a orientação (inclinação/rotação), para que a escolha do implante seja coerente com as limitações anatómicas e com o objetivo protético (Flügge et al., 2022).

No pós-operatório, a CBCT pode ser utilizada para controlo da execução, sobretudo em contextos de cirurgia guiada, permitindo comparar o planeamento virtual com a posição final do implante, quantificar desvios lineares e angulares e identificar padrões de discrepância e discutir, com base em evidência objetiva, se as diferenças se relacionam com limitações do guia, com o registo de dados ou com fatores clínicos do caso. Esta análise contribui para avaliar a precisão do protocolo, identificar possíveis fontes de discrepância e melhorar a reprodutibilidade do workflow em casos futuros (Flügge et al., 2022).

Com todos estes fatores, a CBCT assume-se como um recurso essencial no planeamento atual dos tratamentos implantológicos guiados, particularmente em casos complexos, nos quais é necessária uma análise rigorosa dos volumes ósseos e da proximidade às estruturas anatómicas adjacentes.

Enquanto o CBCT descreve a anatomia interna, a digitalização intraoral fornece a informação de superfície necessária para construir um planeamento orientado pela prótese. De facto, o scanner intraoral complementa a informação anatómica da CBCT ao fornecer um registo detalhado das superfícies dentárias e dos tecidos moles, gerando modelos tridimensionais (STL) que podem ser integrados no planeamento proteticamente orientado. Na prática, o objetivo desta etapa é captar com fidelidade a arcada e a relação oclusal, de forma que o *set-up* protético e o planeamento implantar sejam construídos sobre uma representação digital consistente do caso (Alauddin et al., 2021).

Além disso, o scanner intraoral reforça a previsibilidade do planeamento ao fornecer modelos de superfície úteis para a componente protética e oclusal, mas a sua contribuição depende da qualidade da aquisição e da integração dos ficheiros no ecossistema digital.

Para o planeamento, com base na combinação entre o *set-up* protético e a anatomia individual, os implantes são então posicionados virtualmente em imagens

seccionais e em modelos tridimensionais reconstruídos a partir do volume radiográfico. O software apoia este processo com ferramentas de medição, permitindo verificar distâncias entre implantes planeados e a sua relação com estruturas anatómicas críticas (Flügge et al., 2022).

Em reabilitações mais extensas, como nas reabilitações totais, a literatura descreve a possibilidade de um *workflow* totalmente digital, integrando aquisição de dados, planeamento e execução protética. Contudo, também é salientado que, nestes casos, a sobreposição dos diferentes ficheiros e a acumulação de pequenas imprecisões ao longo das etapas podem condicionar o resultado final, reforçando a necessidade de validação cuidadosa do planeamento antes da execução clínica (Auduc et al., 2025).

Neste enquadramento, o protocolo proteticamente guiado baseia-se no planeamento virtual do implante em software 3D a partir de dois elementos essenciais: o encerramento (ou ficheiro do *set-up* protético) dos dentes a repor e a CBCT. Este permite definir a posição tridimensional do implante em função de critérios estéticos, funcionais e anatómicos da futura reabilitação, reforçando uma lógica verdadeiramente orientada pela prótese (Abad-Coronel et al., 2024).

A mesma revisão sistemática descreve que a forma de transferência desse planeamento para o campo operatório pode variar consoante o tipo de guia e o protocolo cirúrgico — desde abordagens totalmente guiadas até protocolos apenas parcialmente guiados — e sugere que a cirurgia estática totalmente guiada tende a apresentar maior exatidão na reprodução da posição planeada.

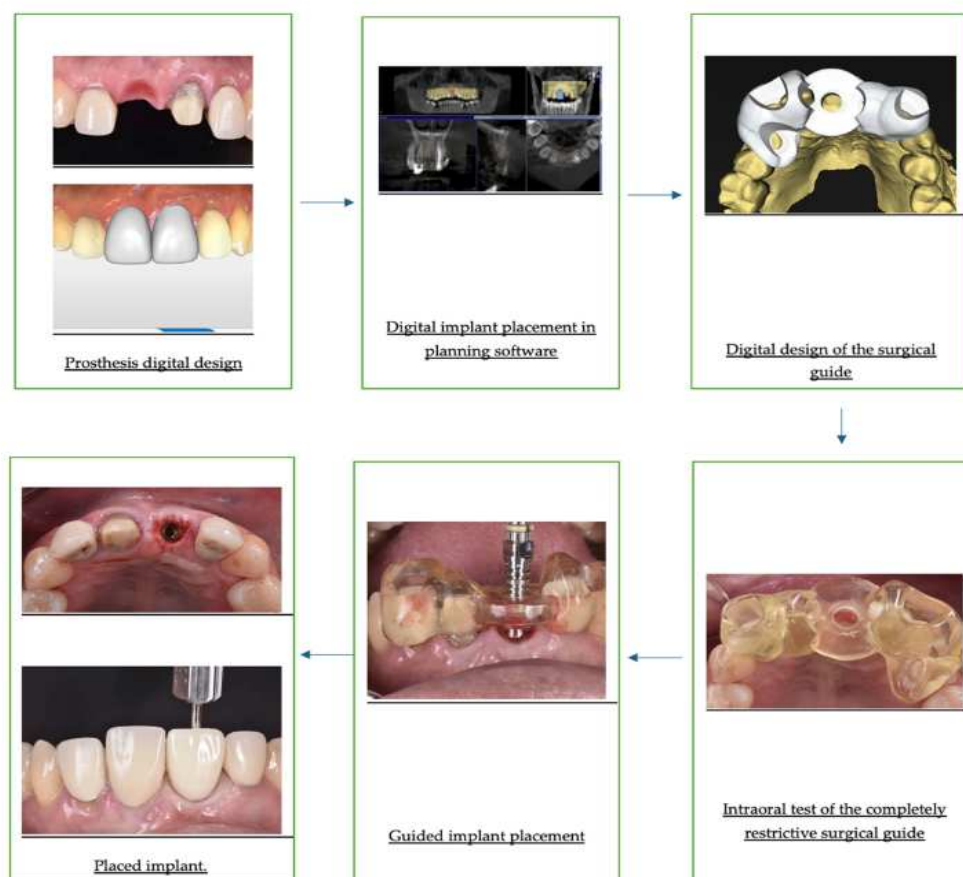


Figura 2 : Fluxo de trabalho da colocação de implantes com guias cirúrgicas digitais proteticamente orientadas, adaptado de Abad-Coronel et al., 2024.

Segundo Abad-Coronel et al. (2024), nos estudos incluídos nesta revisão os desvios apicais reportados foram globalmente reduzidos (não excedendo 1,03 mm), pelo que os autores sugerem a adoção de uma margem de segurança mínima de 1,5 mm no planeamento digital. Ainda assim, mesmo quando os desvios reportados são globalmente reduzidos, os autores salientam a necessidade de considerar margens de segurança no planeamento e de interpretar a precisão à luz do contexto clínico e do tipo de suporte da guia, dado que a performance pode variar entre guias dento-suportadas, muco-suportadas e osteo-suportadas (Abad-Coronel et al., 2024).

A consistência deste planeamento depende, contudo, da articulação entre os dados radiográficos e os modelos de superfície, razão pela qual a fusão e calibração dos ficheiros será aprofundada no ponto seguinte.

2.2. Fusão dos ficheiros DICOM/STL e calibração digital

O planeamento digital em implantologia baseia-se na fusão de dois tipos de ficheiros: o DICOM, obtido a partir da CBCT, e o STL, gerado pela digitalização intraoral ou extra oral. Esta integração permite reunir, num mesmo modelo virtual, a informação anatómica interna e as referências de superfície externa necessárias ao planeamento protético. Assim, obtém-se uma visão global e mais completa do paciente, facilitando decisões mais seguras e coerentes (Kernen et al., 2020; Todaro et al., 2023).

2.2.1. O ficheiro DICOM

O ficheiro DICOM resulta da aquisição volumétrica por CBCT e constitui a base imagiológica do planeamento digital, por permitir representar a anatomia interna do paciente em três dimensões e importar essa informação para softwares específicos de planeamento implantar. Na prática, este volume radiográfico é exportado e utilizado no ambiente digital para integrar a avaliação anatómica com a fase de desenho e planeamento em 3D, como ilustrado em protocolos clínicos em que o DICOM é transferido para software dedicado antes da fase de conceção do caso (Todaro et al., 2023). Estes ficheiros ajudam para avaliar as estruturas internas como os seios maxilares, os nervos, e o nível do volume osso maxilar e mandibular (Berta et al., 2025).

Para além disso, o ficheiro DICOM contribui de forma direta para a precisão do planeamento implantar, ao permitir que o posicionamento tridimensional do implante seja definido com base em referências anatómicas mensuráveis. A leitura volumétrica em diferentes planos facilita a verificação sistemática de margens de segurança em relação a estruturas críticas e reduz decisões “por aproximação”, sobretudo em zonas com anatomia limitada ou em reabilitações mais complexas. Em protocolos de cirurgia guiada, esta etapa tem implicações práticas: ao integrar a CBCT no software de planeamento, é possível antecipar trajetos, profundidade e relação com estruturas adjacentes antes da execução, reforçando o controlo do procedimento e a consistência da transferência do plano para o ato clínico (Todaro et al., 2023). Contudo, esta precisão começa na fiabilidade do próprio volume radiográfico, uma vez que fatores como o tamanho do voxel, a presença de artefactos metálicos, o movimento do paciente e os parâmetros de aquisição podem degradar a qualidade da

imagem e, consequentemente, afetar a robustez do modelo anatômico utilizado no planeamento (Marquez Bautista et al., 2024).

Assim, o DICOM não é apenas um ficheiro de imagem, é a base sobre a qual se valida a viabilidade anatômica do plano e se constrói a previsibilidade do posicionamento implantar em ambiente digital (Marquez Bautista et al., 2024; Todaro et al., 2023).

2.2.2. O ficheiro STL

O ficheiro STL corresponde a um modelo tridimensional de superfície, obtido por digitalização intraoral ou por digitalização laboratorial de modelos. Este ficheiro descreve a anatomia de estruturas externas relevante para o planeamento protético como contornos dentários, tecidos moles e relações oclusais (Todaro et al., 2023). É este modelo de superfície que permite construir e validar referências protéticas, discutir emergências e orientar o planeamento para um resultado reabilitador coerente (Digital Technologies in Dental Implant Planning, 2024).

2.2.3. A Fusão dos ficheiros DICOM/ STL

O STL torna-se particularmente relevante quando é integrado com a CBCT: após a importação do DICOM, o alinhamento com os STL obtidos por digitalização intraoral permite construir um caso virtual completo e, em seguida, orientar etapas clínicas como a preparação cirúrgica. Esta articulação entre anatomia interna e referências de superfície é especialmente útil em reabilitações complexas, onde o planeamento tem de conciliar simultaneamente segurança anatômica e exigências protéticas (Todaro et al., 2023).

Esta fusão tem uma consequência direta na qualidade do planeamento: o implante deixa de ser planeado apenas no osso e passa a ser planeado em função do resultado protético, validado simultaneamente contra limites anatômicos. Em termos práticos, isto significa que o operador pode alinhar objetivos estéticos e funcionais com restrições anatômicas e, a partir daí, preparar a transferência do plano para a fase operatória (Kernen et al., 2020; Digital Technologies in Dental Implant Planning, 2024).

Depois de assegurado o alinhamento entre os ficheiros DICOM e STL, a sua integração no software de planeamento permite construir um modelo tridimensional consistente do caso e realizar a simulação pré-cirúrgica com maior rigor. Nesta etapa,

o posicionamento do implante pode ser definido conciliando a anatomia interna revelada pela CBCT com os objetivos protéticos da reabilitação, o que tende a favorecer uma colocação mais controlada e clinicamente coerente (Berta et al., 2024).

2.2.4. A calibração digital

A calibração digital é um conjunto de técnicas que permitem ajustar um sistema numérico. Na prática, a calibração serve para reduzir a margem de erro acumulado ao longo do fluxo digital. Ou seja, se o clínico “confia” no paciente virtual para decidir o eixo, a profundidade e a posição do implante, então tem de confirmar previamente que o modelo digital representa o caso real com fidelidade. Isto inclui validar a qualidade dos dados, a consistência das medições, e a plausibilidade do planeamento, evitando que pequenas imprecisões iniciais se traduzam em desvios na execução clínica (Kernen et al., 2020; Marquez Bautista et al., 2024).

A ligação com os ficheiros DICOM e STL é direta: a calibração é o momento em que se confirma que a fusão entre o volume radiográfico (DICOM) e o modelo de superfície (STL) foi feita de forma rigorosa. Se o alinhamento entre estes ficheiros estiver deslocado, se houver distorções na aquisição ou se a integração no software não for consistente, o planeamento pode ficar “correto no ecrã”, mas incorreto no doente. Além disso, como descrito Marquez Bautista et al., 2024, a literatura aponta que fatores técnicos que afetam a qualidade do volume CBCT e a fiabilidade do registo ou da sobreposição podem limitar a robustez do planeamento e da sua validação, reforçando a necessidade de calibração e controlo antes da transferência para a fase cirúrgica.

2.3. Fontes de erro no planeamento virtual

A precisão de um plano virtual é o resultado de uma cadeia sequencial de vários fatores. Assim, cada etapa deve ser analisada, porque podem ocorrer erros em qualquer ponto do processo, com impacto direto na posição final do implante. O planeamento virtual baseia-se, tipicamente, na integração de um volume radiográfico (CBCT) com um modelo de superfície (STL), obtido por scanner intraoral ou digitalização laboratorial. Nesta fase inicial, qualquer degradação dos dados de origem pode comprometer a fiabilidade do planeamento. No caso do CBCT, um problema particularmente relevante é a presença de artefactos gerados por restaurações radiopacas, que distorcem o volume e reduzem a fiabilidade das referências usadas

para alinhar os conjuntos de dados. Neste contexto, foi demonstrado que o erro de registo aumenta quando se utiliza um registo sem marcadores (markerless) à medida que cresce o número de coroas, com incrementos mensuráveis por cada coroa adicionada e uma previsão de erros superiores em arcadas altamente restauradas (Biun et al., 2023).

A etapa de fusão e calibração entre o CBCT e o STL é, por isso, crítica: qualquer desalinhamento nesta fase altera a relação espacial entre a anatomia óssea representada no CBCT e a superfície que servirá de suporte e referência para a guia, introduzindo um erro estrutural no próprio plano. Em arcadas com múltiplas restaurações radiopacas, a distorção do volume radiográfico torna este registo menos fiável, o que ajuda a explicar a maior probabilidade de discrepâncias entre o planeado e o obtido, mesmo quando as etapas subsequentes são executadas corretamente (Biun et al., 2023).

Quanto ao scanner intraoral, a literatura mostra que a exatidão do STL não depende apenas do dispositivo, mas de um conjunto de fatores técnicos e procedimentais. A revisão de Grande et al. (2025) descreve que a exatidão dos scans em implantologia é multifatorial, envolvendo variáveis relacionadas com o scanner e o software (incluindo o processo de reconstrução e “*image stitching*”), com o scan body (design, material e tolerâncias), com o operador, e com etapas laboratoriais como o *matching* entre a malha digital do scan body e o respetivo ficheiro de biblioteca. Assim, desvios na representação da superfície, particularmente cumulativos em reabilitações extensas, e erros na referência digital dos scan bodies podem introduzir discrepâncias na posição virtual, afetando a coerência protético-cirúrgica do plano (Grande et al., 2025).

Mesmo quando o planeamento digital aparenta ser correto, a sua previsibilidade depende do modo como é transferido para a cirurgia. A literatura reforça que não existe uma cirurgia guiada “perfeita” e que são observados desvios entre o posicionamento planeado e o posicionamento efetivamente obtido, com tendência para maiores discrepâncias em estudos clínicos do que em estudos in vitro, devido à existência de variáveis menos controláveis em contexto real (Unsal et al., 2020).

Dentro do *workflow*, um ponto técnico capaz de introduzir erro antes mesmo da cirurgia é a imprecisão de fabrico da guia. Russo et al. (2023) explicam que essas

imprecisões podem contribuir para o erro potencial na posição final do implante e, por isso, propõem um controlo de qualidade pré-operatório: a guia fresada é digitalizada e comparada com o respetivo modelo CAD num software de metrologia, avaliando-se o exatidão da superfície interna como indicador de adaptação aos tecidos de suporte e os desvios lineares e angulares associados ao sistema da manga (*sleeve*), a partir da definição do plano de entrada e do eixo da manga num sistema de coordenadas local (Russo et al., 2023).

Além disso, após medir os desvios lineares e angulares do eixo e considerando parâmetros conhecidos como o afastamento do cilindro da guia o comprimento do implante, podem estimar-se erros lineares potenciais ao nível da plataforma e do ápice por fórmulas geométricas. No entanto, estes valores representam apenas a componente atribuível ao fabrico da guia, podendo ser enganadores se forem interpretados como a precisão final, uma vez que o posicionamento real do implante é afetado pelo erro cumulativo ao longo de todas as etapas do procedimento (Russo et al., 2023).

Em síntese, como o erro é cumulativo, a previsibilidade do resultado exige controlo e verificação sistemática em cada etapa do fluxo digital, de modo a minimizar discrepâncias entre o planeado e o resultado.

2.4. Relevância clínica da precisão no fluxo digital

A relevância clínica da precisão no fluxo digital depende, em primeiro lugar, da capacidade de transferir para a cavidade oral a posição do implante definida no planeamento virtual. A literatura sublinha que esta transferência do software para a boca do doente constitui o passo mais crítico para alcançar o resultado pré-operatório e que a ausência total de desvio é um objetivo irrealista; por isso, a discrepância entre o planeado e o executado deve ser avaliada através de parâmetros de desvio linear e angular (Marquez Bautista et al., 2024).

No planeamento prosteticamente guiado, o protocolo baseia-se no planeamento virtual em software 3D e requer a integração de um encerramento com um CBCT, incorporando critérios estéticos, funcionais e anatómicos da futura prótese para definir a posição tridimensional do implante. A precisão pode variar consoante o tipo de guia, sendo estas classificadas segundo o nível de guiamento (parcial ou total) e a possibilidade de alterações intraoperatórias (estática ou dinâmica) (Al et al., n.d.).

É referido que a cirurgia estática totalmente guiada tende a proporcionar uma posição mais precisa e uma transferência mais exata da posição planeada para o ambiente clínico; contudo, é salientada a necessidade de sintetizar criticamente a evidência para confirmar se a superioridade em precisão se traduz em maior eficácia do tratamento implantar. Nos estudos revistos, os desvios reportados foram reduzidos, com desvio apical global não excedendo 1,03 mm, e é sugerida a adoção de uma zona de segurança mínima de 1,5 mm no planeamento digital (Abad-Coronel et al., 2024). Assim, a precisão deve ser interpretada com um requisito de previsibilidade e de segurança do procedimento, sem implicar automaticamente maior eficácia clínica global.

A3 – Fabrico das guias cirúrgicas: dimensão industrial

3.1. Tecnologias de fabrico

No contexto da cirurgia guiada, a guia cirúrgica é um dispositivo industrial que materializa, no bloco operatório, a intenção do planeamento virtual. Após a fase de desenho no software, a produção da guia insere-se num processo CAD-CAM, podendo ser realizada de forma descentralizada (produção in-house) ou externalizada/centralizada, consoante o ecossistema do software e o modelo de fabrico associado. Kernén et al. (2020) descrevem este segmento do fluxo como parte integrante da cadeia de produção, salientando que a etapa CAM pode estar sob controlo direto do utilizador ou ser executada por entidades externas, o que tem implicações na rastreabilidade, no controlo do processo e na padronização do produto final (Kernén et al., 2020). Em termos práticos, isto significa que a “dimensão industrial” não é neutra: o local de fabrico condiciona a repetibilidade do dispositivo e a consistência entre o que é projetado (CAD) e o que é efetivamente produzido (CAM).

A estereolitografia (SLA) e o Processamento Digital de Luz (DLP) são tecnologias de impressão 3D muito semelhantes, na medida em que ambas constroem o objeto por camadas a partir de uma plataforma de construção que é imersa num reservatório contendo resina líquida fotopolimerizável. A diferença central entre estes métodos está na fonte de luz utilizada para polimerizar a resina: na SLA, um laser ultravioleta (UV) traça o padrão correspondente a cada secção transversal do objeto, enquanto na DLP um projetor de luz digital expõe a totalidade dessa secção transversal de uma só vez. Estas tecnologias têm como uma das suas principais

aplicações em medicina dentária a produção de guias cirúrgicas, sendo ainda referido que a crescente acessibilidade económica dos sistemas de impressão 3D tem permitido a alguns clínicos produzir as suas próprias guias (Morón-Conejo et al., 2024).

Tabela 2 : Comparação entre SLA e DLP na produção de guias cirúrgicas (adaptado de Jeong et al., 2024).

Critérios	estereolitografia (SLA)	Processamento Digital de Luz (DLP)
Princípio	Construção por camada em tanque com resina fotopolimerizavel	Construção por camada em tanque com resina fotopolimerizavel
Fonte de luz	Laser UV	Projetor de luz digital
Velocidade	Velocidade inferior em comparação com DLP	Maior velocidade; resolução condicionada pelo tamanho do voxel
Vantagens	○ Redução de erros ○ Preciso e altamente preciso ○ Velocidade de produção rápida ○ Acomodar projetos complexos ○ Muitas opções de material	○ Redução de erros ○ Preciso e altamente preciso ○ Alta velocidade ○ Acomodar projetos complexos ○ Muitas opções de material
Desvantagens	○ Produção mais lenta ○ Pós-processamento elevado	○ Qualidade potencialmente inferior ○ Limitada pelo tamanho do voxel

Do ponto de vista tecnológico, a produção das guias pode seguir duas abordagens principais: fabrico subtrativo e fabrico aditivo. O fabrico subtrativo, tipicamente por fresagem, baseia-se na remoção de material a partir de um bloco (por exemplo, blocos de resina), até se obter a geometria final. O fabrico aditivo, por sua vez, recorre à produção por camadas (*“layer-by-layer”*), frequentemente enquadrada

na prototipagem rápida, permitindo produzir geometrias complexas diretamente a partir do ficheiro CAD (Kernen et al., 2020). Na implantologia, esta transição para tecnologias aditivas está intimamente ligada à consolidação do planeamento digital: as guias passaram de soluções tradicionalmente desenhadas com base em radiografias bidimensionais para dispositivos projetados em CAD a partir da integração de CBCT e scans intraorais e posteriormente produzidos por impressão 3D, com impacto direto na precisão geométrica e na adaptação à anatomia do doente (Jeong et al., 2024).

A partir deste enquadramento, importa distinguir as abordagens de fabrico subtrativo e aditivo. No fabrico subtrativo, a guia é obtida por remoção de material (por exemplo, por fresagem), enquanto no fabrico aditivo a geometria final é construída por deposição/cura sucessiva de camadas, permitindo produzir formas complexas diretamente a partir do ficheiro CAD. Esta evolução tem impacto na forma como as guias são concebidas e produzidas: a literatura descreve que as guias tradicionais eram frequentemente desenhadas com base em radiografias panorâmicas bidimensionais, o que podia comprometer a exatidão devido a distorção e resolução limitada; com a integração de CBCT e digitalizações intraorais no desenho em CAD e a impressão 3D, a precisão dos guias fabricados no fluxo digital é descrita como significativamente melhorada (Jeong et al., 2024).

No âmbito do fabrico aditivo aplicado a guias estáticas, a estereolitografia (SLA) é referida como uma das tecnologias mais comuns para produção de guias cirúrgicas em protocolo CAD-CAM, recorrendo a resinas específicas (Alauddin et al., 2021). Esta produção, contudo, não termina na impressão: após a fabricação inicial do corpo da guia, é descrita a colocação de uma manga metálica (*metal sleeve*) fornecida pelos fabricantes, selecionada de acordo com o tamanho do implante e parâmetros como diâmetro, comprimento e profundidade de colocação. Além disso, muitos fabricantes exigem a utilização de uma guia e/ou de um kit de osteotomia guiada específico, o que evidencia que a guia integra frequentemente um sistema fechado de componentes e instrumentação, condicionando escolhas industriais e operatórias (Alauddin et al., 2021). Assim, do ponto de vista material e funcional, a guia não é apenas um corpo impresso em resina: inclui tipicamente uma interface metálica de precisão e depende da compatibilidade com o sistema de cirurgia guiada adotado.

Em termos de desempenho geométrico, Jeong et al. (2024) reportam que guias impressas por SLA podem apresentar melhor precisão do que guias tradicionais: foram descritos desvios médios de 2,1 mm à entrada e 1,5 mm no vértice para guias tradicionais, em contraste com 0,9 mm à entrada e 1,0 mm no vértice para guias impressas em 3D por SLA. Para além da precisão, são ainda apontadas vantagens operatórias e de implementação, como menor custo de investimento, menor tempo cirúrgico, simplificação do processo e melhor adaptação à geometria do doente. Estes dados reforçam a ideia de que a escolha do método de fabrico não é apenas uma decisão técnica, mas um determinante industrial da fidelidade com que o planeamento é transferido para o dispositivo final (Jeong et al., 2024).

3.2. Tolerâncias mecânicas e controlo de qualidade

No âmbito da cirurgia implantar assistida por computador (CAIS), falar de tolerâncias mecânicas e controlo de qualidade implica aceitar um ponto de partida simples: a cirurgia guiada melhora a previsibilidade, mas não elimina o erro. Mesmo quando comparadas com a abordagem *freehand* tanto a cirurgia estática (SCAIS) como a cirurgia dinâmica (DCAIS) continuam a apresentar desvios angulares mensuráveis, frequentemente na ordem de alguns graus, com valores globais reportados entre 2° e 6° (Werny et al., 2025). Esta realidade tem impacto direto na lógica industrial, porque significa que o resultado final não depende apenas da qualidade do planeamento digital, mas também da consistência mecânica do sistema que transfere esse planeamento para o campo operatório.

Neste contexto, as tolerâncias devem ser entendidas como “folgas permitidas” ao longo da cadeia guia–instrumentação. se existirem variações relevantes na adaptação da guia ao suporte dentário, na estabilidade do conjunto durante a fresagem, ou na interface entre o mancho e a instrumentação, o erro torna-se cumulativo e pode aproximar-se de limites clinicamente relevantes. por isso, o controlo de qualidade deve centrar-se em assegurar repetibilidade: a mesma guia, produzida com o mesmo *workflow*, deve comportar-se de forma consistente entre unidades e entre lotes, e o conjunto deve manter estabilidade durante o ato cirúrgico. A necessidade de margens de segurança reforça esta abordagem. considerando que são descritos desvios apicais na ordem de 1–2 mm em abordagens CAIS recomenda-se a adoção de uma margem de segurança de 2 mm para reduzir o risco cirúrgico, sobretudo em proximidade de estruturas anatómicas nobres. Assim, numa perspetiva

industrial, o controlo de qualidade não é um detalhe “extra”: é o mecanismo prático que permite limitar a variabilidade do sistema e manter o erro dentro de limites previsíveis, convertendo ganhos estatísticos de precisão em segurança clínica (Werny et al., 2025).

3.3. Influência do material e do método de produção na precisão

A precisão de guias cirúrgicas não deve ser interpretada como um atributo fixo associado exclusivamente à tecnologia de fabrico (SLA, DLP), mas como o resultado de um *workflow* completo, desde a impressão até ao pós-processamento e preparação para utilização. Este enquadramento é essencial porque a relevância clínica da precisão não é homogénea em toda a geometria da guia: discrepâncias pequenas podem ser pouco significativas em zonas periféricas, mas tornam-se críticas nas superfícies de apoio e na região do orifício-guia, onde se determinam o assentamento, a retenção e a direção efetiva de perfuração (Morón-Conejo et al., 2024).

Morón-Conejo et al. compararam quatro workflows de fabricante (três DLP e um SLA) e demonstraram que o desempenho varia consoante a zona analisada. Na avaliação global, os grupos DLP apresentaram melhor a exatidão do que o grupo SLA; por exemplo, valores de *trueness* (RMS) de $103,4 \pm 20,7 \mu\text{m}$ e $102,9 \pm 6,9 \mu\text{m}$ contrastaram com $130,6 \pm 9,4 \mu\text{m}$ no grupo SLA. Contudo, ao restringir a análise à região de interesse (ROI), o grupo SLA apresentou o melhor resultado ($49,5 \pm 9,0 \mu\text{m}$), enquanto alguns grupos DLP revelaram valores superiores (Morón-Conejo et al., 2024). Esta diferença é clinicamente e industrialmente relevante: um workflow pode apresentar melhor desempenho em métricas globais e, ainda assim, não ser o mais favorável na zona que condiciona diretamente a estabilidade e a direção de perfuração (Morón-Conejo et al., 2024).

Para além da exatidão, a robustez do *workflow* deve ser avaliada pela reprodutibilidade, uma vez que etapas com maior componente manual (remoção de suportes, acabamento e pós-cura) podem introduzir variação dimensional e comprometer a previsibilidade. Do ponto de vista funcional, isto traduz-se na necessidade de controlar, de forma direcionada, parâmetros que governam o comportamento intraoperatório — em particular, as áreas de apoio e as características geométricas do orifício-guia (Morón-Conejo et al., 2024).

Para além do método de produção, o material e as etapas subsequentes podem alterar a estabilidade dimensional após o fabrico. Alshammari et al. avaliaram guias impressas em resina NextDent SG submetidas a protocolos de desinfeção/esterilização, com medições aos 0, 3 e 7 dias por sobreposição tridimensional e valores de RMS. Os autores observaram um efeito significativo do tempo na estabilidade dimensional e diferenças entre protocolos: o ciclo de autoclave a 121 °C apresentou alterações RMS inferiores às do ciclo a 134 °C ($p = 0,045$), e protocolos com álcool isopropílico a 99% estiveram associados a alterações superiores em determinados momentos de avaliação (Alshammari et al., 2025). Numa perspetiva de controlo de qualidade, estes dados reforçam que a precisão não termina na impressão: agentes químicos, ciclos térmicos e o intervalo até à utilização podem influenciar a geometria final, pelo que é necessária padronização do protocolo e controlo das condições temporais até ao uso clínico.

Em síntese, a evidência disponível sustenta que a precisão industrial das guias resulta da interação entre *workflow* e material: diferentes *workflows* geram perfis distintos de exatidão global e, sobretudo, de desempenho na ROI e em parâmetros funcionais associados ao orifício-guia; e a estabilidade dimensional pode ser afetada por procedimentos pós-produção e pelo fator tempo, exigindo critérios de aceitação e verificação orientados para variáveis com impacto direto na função (Morón-Conejo et al., 2024; Alshammari et al., 2025).

B – Aplicação clínica das guias cirúrgicas

B1 – Tipologia e classificação das guias cirúrgicas

1.1. Definição e função clínica das guias cirúrgicas

Em implantologia, a guia cirúrgica é um dispositivo médico personalizado concebido a partir do planeamento digital (por exemplo, CBCT, e outros exames imagiológicos e modelos de superfície), que materializa no doente a informação virtual e a transpõe para a situação clínica real durante a colocação de um ou mais implantes. A sua função é orientar a instrumentação e/ou a inserção do implante, reproduzindo no campo operatório a posição e a trajetória definidas no software, com o objetivo de aumentar a previsibilidade e a precisão do procedimento (Dutta et al., 2025). Esta orientação é estabelecida em função de critérios anatómicos, como o volume ósseo disponível, a proximidade de estruturas nervosas e a relação com dentes adjacentes

— e de critérios protéticos — como o eixo de inserção, o ponto de emergência e as exigências funcionais e estéticas. Assim, a utilização de guias cirúrgicas permite passar de uma abordagem não guiada, mais dependente da destreza do operador, para uma cirurgia baseada num planeamento prévio reproduzível e clinicamente coerente com o projeto protético.

A função é guiar a colocação do implante de acordo com o planeamento, garantindo controlo da trajetória das brocas e, por isso, maior exactidão do procedimento. Na abordagem estática, essa função é cumprida por uma guia “ou stent” fixado ao dente ou à mucosa, que serve de suporte físico para colocar o implante com a ajuda da própria guia. Na navegação dinâmica, a função é assegurar orientação em tempo real: sensores de movimento e marcadores fiduciários acompanham simultaneamente as brocas e o doente durante a perfuração, permitindo ajustar a execução no momento. Em ambos os casos, o uso de guias tem particular importância porque melhora a precisão não só em operadores experientes, mas também em operadores menos experientes (Dutta et al., 2025).

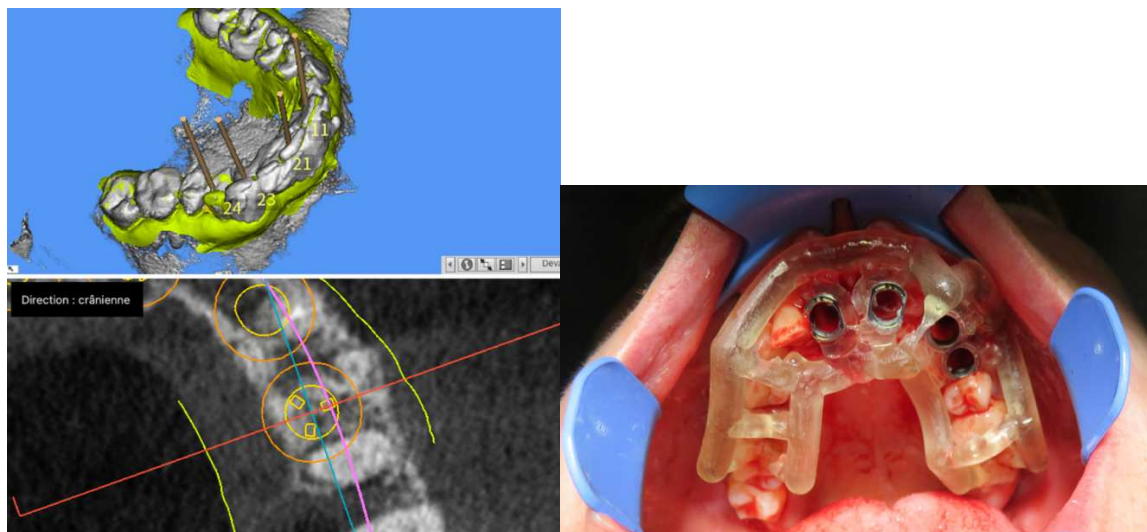


Figura 3 : Fluxo de cirurgia guiada em edentulismo parcial: do planeamento virtual à transferência intraoral com guia dento-suportada.

1.2. Classificação das guias segundo o método de orientação

As abordagens de cirurgia implantar assistida por computador (CAIS) foram desenvolvidas em implantologia para aumentar a precisão e a fiabilidade na transposição do planeamento digital pré-operatório para a execução intraoperatória, contribuindo para melhores resultados clínicos e maior previsibilidade do

procedimento (Werny et al., 2025). Existe a guia estática (SCAIS) e a guia dinâmica (DCAIS).

A guia estática (SCAIS) recorre a guias estereolitográficas que se apoiam em dentes, osso ou mucosa e que orientam a perfuração e a inserção do implante. Esta modalidade insere-se na lógica do CAIS, introduzido em implantologia com a finalidade de reduzir as discrepâncias entre a posição do implante planeada virtualmente e a posição efetivamente obtida durante a cirurgia (Jorba-García et al., 2021).

Na cirurgia guiada estática, a orientação da instrumentação depende de uma interface mecânica entre a broca e o sistema de guia. Esta abordagem “assenta no encaixe” de uma porção da broca de osteotomia no cilindro da guia ou no respetivo adaptador, evidenciando que o conjunto cilindro/adaptador funciona como elemento determinante para conduzir a perfuração segundo a trajetória prevista. Além disso, os autores referem que o cilindro metálico pode fornecer um eixo mais definido para a direção da broca, contribuindo assim para o controlo da angulação durante a preparação do leito implantar. Neste enquadramento, estes componentes metálicos surgem como um elemento frequentemente integrado no protocolo de cirurgia guiada, não apenas por conveniência, mas porque, segundo os autores, a necessidade de cilindros específicos compatíveis com brocas e adaptadores constitui uma das razões para alguns clínicos não utilizarem cirurgia guiada estática; adicionalmente, indicam que a maioria das empresas de implantes e softwares de planeamento exige a utilização desses cilindros como parte do protocolo (Adams et al., 2023).

A guia dinâmica (DCAIS) pode ser definida como um sistema em que a instrumentação e o implante são monitorizados em tempo real, através de um marcador de referência, e essa informação é continuamente correlacionada com o plano virtual tridimensional pré-operatório obtido a partir de CBCT, permitindo guiar a execução durante o ato cirúrgico (Jorba-García et al., 2021).

A cirurgia guiada dinâmica resulta da sua capacidade de controlo intraoperatório: estes sistemas permitem a verificação em tempo real da exatidão da posição, o que possibilita ao clínico adaptar o planeamento durante a cirurgia se necessário. Além disso, como não dependem de uma tala (*splint*), não existe necessidade de um conjunto específico de brocas ou instrumentos dedicados, e a perceção do cirurgião relativamente à sequência de perfuração e à colocação do

implante não é condicionada por um dispositivo físico. Outra vantagem funcional apontada é a aplicabilidade a praticamente todos os doentes, ao contrário dos sistemas estáticos, que podem não ser adequados em situações de abertura oral limitada (Jorba-García et al., 2021).

1.3. Classificação das guias segundo o tipo de suporte

Tabela 3 : Vantagens e limitações das guias segundo os diferentes tipo de suporte.

Tipo de guia	Vantagens	Limitações
Dentossuportada	Utiliza os dentes remanescentes como superfície de suporte, o que surge associado a resultados de elevada precisão em estas guias (Kalaivani et al., 2020).	Construção por camada em tanque com resina fotopolimerizável
Mucossuportada	Permite a utilização de guias em doentes totalmente desdentados (Kalaivani et al., 2020).	Projetor de luz digital
Osteossuportada	Apoio direto no osso após elevação de retalho mucoperiósteo, permitindo utilização quando o suporte dentário ou mucoso não é a referência principal (Kalaivani et al., 2020).	Maior velocidade; resolução condicionada pelo tamanho do voxel
Suporte especial (mini-implantes/pinos)	Utiliza mini-implantes/pinos para suportar a guia. A maior exactidão foi observada quando mini-implantes foram usados como referência de suporte para a tomografia (Kalaivani et al., 2020).	Limitações específicas não detalhadas no excerto disponível (Kalaivani et al., 2020).

A classificação das guias cirúrgicas pode ser realizada de acordo com as superfícies que lhes fornecem suporte. Nesta perspetiva, existe guias

dentossuportadas, mucossuportadas, osteossuportadas e guias com suportes especiais (Kalaivani et al., 2020).

As guias dentossuportadas são suportadas exclusivamente pelos dentes remanescentes naturais ou com reabilitações fixas suportadas por dentes ou por implantes (Jorba-Garcia et al., 2025).

As guias mucossuportadas são suportadas exclusivamente pelo na mucosa. Esta situação é típica de doentes totalmente desdentados, podendo ser utilizada com ou sem elementos de fixação (Jorba-Garcia et al., 2025).

As guias osteossuportadas são suportadas exclusivamente sobre no osso, após a elevação de um retalho de espessura total, podendo ser utilizada com ou sem elementos de fixação (Jorba-Garcia et al., 2025).

A guia com apoio especial caracteriza-se por não depender de um único tipo de apoio, combinando diferentes tecidos para estabilização. Pode, por exemplo, assentar simultaneamente em dentes e mucosa em casos de edentulismo Kennedy classe I, ou ser mucossuportada em edentulismo total com reforço de fixação por pinos de ancoragem óssea (Jorba-Garcia et al., 2025).

1.4. Critérios de seleção do tipo de guia

A seleção do tipo de guia deve ser coerente com o contexto clínico do sítio implantar e com os seus determinantes anatómicos e biológicos, nomeadamente a necessidade de respeitar distâncias de segurança a estruturas críticas, assegurar estabilidade primária e criar condições adequadas para a cicatrização dos tecidos duros e moles (Jorba-García et al., 2025).

Esta seleção pode ser operacionalizada, em primeiro lugar, pelo tipo de suporte disponível e pela condição de edentulismo do doente, uma vez que estes fatores influenciam a estabilidade do assentamento e a discrepância entre a posição planeada e a posição obtida. Em contexto clínico comparativo entre guias dentossuportadas, mucossuportadas e osteossuportadas, as guias dentossuportadas apresentaram os menores desvios, enquanto as mucossuportadas exibiram os maiores desvios, com desempenho particularmente menos favorável na mandíbula. As guias osteossuportadas situaram-se entre estes extremos, com resultados descritos como clinicamente aceitáveis (markiewicz e nowicki, 2025). Ainda assim, foi referido que as guias osteossuportadas tendem a apresentar maior inexatidão, enquanto abordagens

que utilizam mini-implantes como referência de suporte para a tomografia foram associadas a maior exatidão (Kalaivani et al., 2020). Neste enquadramento, a presença de suporte dentário tende a favorecer a utilização de guias dentossuportadas, ao passo que, em mandíbula edêntula, a consideração de um suporte osteossuportado torna-se pertinente quando o objetivo principal é maximizar a estabilidade do sistema de guia (markiewicz e nowicki, 2025).

Em doentes completamente edêntulos, a seleção do tipo de guia é condicionada pela necessidade de garantir estabilidade durante todas as etapas cirúrgicas. A ausência de suporte dentário elimina um ponto de referência rígido e aumenta a vulnerabilidade a micromovimentos do dispositivo, sobretudo quando o apoio é feito em tecidos moles. Neste cenário, torna-se determinante a forma como o sistema controla a resiliência da mucosa e como assegura uma base estável para a instrumentação. Num protocolo totalmente guiado com guias osteossuportadas do tipo *stackable* (modular), é descrita a utilização de uma guia base fixada diretamente ao osso com pinos, que funciona como fundação rígida para componentes empilháveis usados sequencialmente na preparação do leito e na inserção do implante. Esta arquitetura modular permite que cada fase se apoie na mesma referência rígida, reduzindo a dependência do assentamento sobre mucosa. No estudo, esta opção é enquadrada como estratégia para eliminar a influência da resiliência mucosa e aumentar a previsibilidade em reabilitações de arcada completa, sendo ainda referida a utilidade do protocolo para facilitar o ajuste passivo de próteses aparafusadas suportadas por barra. A precisão foi avaliada e os desvios observados foram compatíveis com os limiares de segurança clínica definidos pelos autores, sendo apresentado como um protocolo clinicamente fiável nesse contexto (bjelica et al., 2026).

A possibilidade de correção intraoperatória é um critério de seleção distinto e relevante, sobretudo em situações em que se antecipa necessidade de adaptar a trajetória durante a cirurgia. A abordagem estática, pela sua própria natureza, transfere para o momento pré-operatório a decisão da posição e da angulação, sem permitir alterações ao plano durante o ato cirúrgico. No mesmo enquadramento, são descritas limitações práticas das guias estáticas que pesam na seleção: o processo de fabrico é mais moroso e dispendioso, existe dependência da abertura bucal do doente, é referido risco de sobreaquecimento, e a impossibilidade de ajustar o plano

intraoperatoriamente mantém-se como limitação central. Em contraste, a navegação dinâmica é apresentada como um sistema com visualização e controle em tempo real, permitindo ajustes imediatos durante a preparação do leito e a colocação do implante. Num estudo retrospectivo na região anterior (62 doentes; 102 implantes), são reportados desvios médios baixos e não se observaram diferenças estatisticamente significativas entre colocações imediatas e tardias, o que sustenta a sua aplicabilidade em ambos os cenários dentro desse desenho de estudo. No entanto, a seleção deve integrar também a exigência técnica do método: é salientada uma curva de aprendizagem acentuada e é referido que, tipicamente, serão necessários cerca de 20 casos para atingir competência básica com sistemas de navegação dinâmica, tornando a experiência do operador um fator prático de decisão (ma et al., 2025).

A opção entre cirurgia guiada estática e navegação dinâmica pode ser orientada por constrangimentos do doente e do procedimento. Na abordagem estática, são descritas limitações relevantes para a decisão clínica, incluindo a impossibilidade de ajustes intraoperatórios e a dependência da abertura bucal, além de fatores de custo/tempo e risco de sobreaquecimento. A navegação dinâmica, por contraste, é apresentada como permitindo visualização e ajustes em tempo real, embora com curva de aprendizagem, referindo-se cerca de 20 casos para competência básica (ma et al., 2025).

1.5. Influência da tipologia na precisão

Para discutir a influência da tipologia na precisão, importa começar por uma definição operatória e mensurável: a precisão corresponde à discrepância entre a posição planeada e a posição obtida, quantificada por desvios lineares ao nível do colo/entrada (coronal) e do ápice, por desvio angular entre os eixos do implante planeado e colocado e, em alguns protocolos, por desvio em profundidade ao longo do eixo do implante (Markiewicz e Nowicki, 2025; Ma et al., 2025). Com esta grelha, a tipologia passa a ser interpretada pelo efeito que produz nesses desvios. O fator mais diretamente associado à precisão é o tipo de suporte da guia: em comparação clínica entre guias dentossuportadas, mucossuportadas e osteossuportadas, as dentossuportadas apresentam maior precisão em casos parcialmente edêntulos, enquanto as mucossuportadas tendem a resultados menos favoráveis, sobretudo na mandíbula, e as osteossuportadas situam-se como alternativa com exatidão clinicamente aceitável em cenários edêntulos exigentes (Markiewicz & Nowicki, 2025)

Em seguida, a tipologia também se expressa no método de orientação, distinguindo-se a transferência mecânica pré-planeada da abordagem estática do controlo intraoperatório próprio da navegação dinâmica. A vantagem da tecnologia de navegação reside na capacidade de controlar com precisão a profundidade, a posição e a angulação na colocação do implante (Markiewicz e Nowicki, 2025). No estudo retrospectivo na região anterior, sob navegação dinâmica, não se observaram diferenças estatisticamente significativas entre colocações imediatas e tardias, o que sustenta um desempenho semelhante entre estes dois timings no mesmo contexto anatómico, embora o método seja descrito como tecnicamente exigente e associado a curva de aprendizagem (Ma et al., 2025).

Por fim, mesmo na cirurgia guiada estática, a precisão não depende apenas do tipo de guia, mas também do desenho e do fabrico, porque estes condicionam o ajuste, a rigidez e a estabilidade do dispositivo ao longo das etapas cirúrgicas. A precisão da colocação do implante é diretamente influenciada pelo desenho e pelo fabrico da guia cirúrgica. Inexatidões no processo de fabrico podem comprometer a execução intraoperatória e aumentar o risco de complicações. Um exemplo de tipologia orientada para aumentar a rigidez é o sistema osteossuportado "stackable", no qual uma guia base fixada ao osso com pinos serve de fundação para componentes empilháveis ao longo do procedimento; neste protocolo totalmente guiado, foram reportados desvios médios baixos, enquadrando-se a arquitetura do dispositivo como um elemento que contribui para a minimização de desvios em reabilitações totais (Bjelica et al., 2026). Consequentemente, a tipologia influencia a precisão por três vias complementares: a estabilidade do suporte, o mecanismo de orientação (estático vs dinâmico) e a qualidade do dispositivo (desenho e fabrico) (Markiewicz e Nowicki, 2025; Ma et al., 2025; Bjelica et al., 2026).

B2 – Fatores clínicos que influenciam a precisão

2.1. Fatores anatómicos e densidade óssea

Os fatores anatómicos influenciam a precisão porque condicionam a geometria do leito implantar, a orientação disponível durante a perfuração e a estabilidade alcançável no momento da inserção. Em cirurgia guiada, esta influência não se reduz apenas à região anterior ou posterior. No estudo de Markiewicz e Nowicki, a análise por localização, anterior ou posterior, não evidenciou diferenças regionais

estatisticamente significativas dentro dos grupos clínicos avaliados. Esta observação é relevante porque sugere que a região, por si só, não explica as discrepâncias entre o planejado e o obtido, sendo necessário considerar o contexto anatômico e o tipo de referência de suporte disponível em cada caso. O mesmo trabalho enfatiza que o planejamento deve articular objetivos protéticos e constrangimentos anatômicos, uma vez que desvios significativos podem comprometer o resultado protético, com impacto funcional e estético. Neste enquadramento, a seleção do suporte do guia é apresentada como dependente das condições anatômicas: em situações com suporte dentário estável, a precisão tende a ser superior, enquanto em contextos edêntulos a escolha do suporte torna-se crítica, porque a estabilidade do assentamento passa a ser um determinante direto dos desvios observados (Markiewicz e Nowicki, 2025).

Na zona estética anterior, a anatomia local torna-se especialmente determinante, sobretudo em implantologia imediata. Ma descreve que a implantação imediata é desafiante devido à morfologia alveolar pós-extração ser altamente individualizada, destacando a inclinação da parede vestibular/palatina e o volume do osso palatino. Estas características podem favorecer uma angulação indesejada do implante e comprometer a estabilidade primária. O texto acrescenta que, mesmo quando se utilizam sistemas capazes de obter boa estabilidade inicial, persiste a dificuldade imposta pela assimetria óssea lábio palatina (Ma et al., 2025). Assim, a previsibilidade não depende apenas do protocolo, mas também da geometria e assimetria do leito implantar na região estética.

A densidade óssea, quando analisada de forma explícita, mostra um efeito mensurável na precisão, sobretudo no controlo do posicionamento coronal. No estudo de Streichfuss, a análise multivariada demonstrou influência significativa da densidade óssea na deviação coronal ($p < 0,01$). Além disso, nos sítios posteriores, foram observadas deviações coronais 3D significativamente mais baixas em osso mole ($p < 0,01$) e quando foi utilizada inserção totalmente guiada ($p < 0,01$). Esta relação é particularmente informativa porque sugere que, em osso mole, a técnica pode compensar parte do risco de desvio, desde que o protocolo ofereça um grau elevado de guiamento na fase de inserção. No mesmo estudo, as deviações apicais e angulares foram influenciadas significativamente pelo protocolo de inserção ($p \leq 0,03$) e pela presença de pontos de referência de dentes vizinhos ($p < 0,01$). No sítio anterior, é referido que a deviação coronal pode beneficiar de vista direta do campo

cirúrgico, enquanto a precisão apical e angular 3d beneficia de um elevado grau de guiamento ($p < 0,01$). Em termos práticos, o texto sintetiza que a constituição óssea (densidade, forma óssea e cavidades de extração) e a técnica de inserção influenciam a precisão, em particular, em osso mole, a precisão beneficiou de inserção totalmente guiada. É também descrito que, em regiões com menor orientação visual do eixo implantar, como quando o eixo das peças vizinhas é fortemente divergente, tendem a observar-se desvios mais elevados, que podem ser minimizados por inserção guiada. Para a implantação imediata na região anterior, a vista direta mostrou-se vantajosa para posicionar a ombreira do implante, mas com prejuízo da precisão da angulação e do desvio do ápice, o que reforça que a “melhoria” da precisão pode ser específica do parâmetro avaliado e do ponto de referência considerado (Streitchfuss et al., 2025).

Por fim, importa reconhecer limitações relevantes para interpretar estes resultados em termos de fatores anatómicos. Os fatores locais potencialmente influentes nos desvios, como a espessura do osso cortical cervical, não foram avaliados. Além disso, foram excluídos casos com estabilidade primária inferior a 25 ncm, o que pode enviesar os resultados ao omitir situações de maior risco de desvio, o que é particularmente relevante quando se discute densidade e/ou qualidade óssea (Ma et al., 2025). As características da guia cirúrgica também influenciam a precisão. Em guias dento-suportadas, o erro tende a diminuir à medida que aumenta o número de dentes de apoio, sendo particularmente reduzido quando existe suporte dentário bilateral (Shi et al., 2023). Já nas guias muco-suportadas, o número de pinos de fixação pode afetar o desvio angular, verificando-se que um maior número de pinos está associado a menor erro de posicionamento (Zhou et al., 2018).

2.2. Região operatória: “Maxilar vs Mandibular”

A região operatória influencia a precisão quando se compara a maxila e a mandíbula, porque as discrepâncias entre o planeado e o obtido não têm o mesmo impacto em todas as arcadas. No estudo clínico de Markiewicz e Nowicki, a colocação foi significativamente mais precisa na maxila do que na mandíbula ao nível coronal, com desvio médio de 0,443 mm na maxila versus 0,755 mm na mandíbula ($p = 0,010$). Ao nível apical observou-se a mesma direção de diferença, com valores médios de 0,562 mm na maxila e 0,981 mm na mandíbula, embora sem significância estatística ($p = 0,086$). Estes números devem ser lidos como medidas da discrepância linear entre a posição planeada e a posição alcançada: valores mais elevados

correspondem a maior afastamento do planeamento e, portanto, a menor exatidão na transferência do plano para o campo cirúrgico. Esta diferença é clinicamente relevante porque, na mandíbula, o próprio artigo salienta o risco de dano do nervo alveolar inferior em caso de colocação inadequada, sobretudo em mandíbulas edêntulas atroficas. Neste enquadramento, a escolha do suporte do guia é apresentada como dependente das condições anatómicas e da necessidade de estabilidade: em casos parcialmente edêntulos, as guias dentossuportadas associam-se a maior precisão; já em cenários edêntulos, as mucossuportadas evidenciam resultados menos favoráveis na mandíbula, enquanto as osteossuportadas mantêm exatidão clinicamente aceitável e são apontadas como preferíveis nesse contexto exigente (Markiewicz e Nowicki, 2025).

A precisão das guias cirúrgicas é descrita como a ausência de desvio entre a posição real do implante e a posição previamente planeada, sendo estes desvios influenciados por múltiplos determinantes clínicos, incluindo o estado ósseo do doente, os tecidos moles e a complexidade anatómica local (Gong et al., 2024). No contexto da comparação “maxila vs mandíbula”, esta perspetiva ajuda a interpretar por que motivo a arcada pode condicionar a previsibilidade. De facto, as diferenças regionais do osso e do enquadramento anatómico alteram a estabilidade inicial e a margem de segurança disponível. Em particular, é referido que, na região posterior mandibular, a espessura do osso cortical é geralmente mais substancial do que noutras divisões da cavidade oral e que essa espessura influencia de forma relevante a estabilidade primária do implante. Assim, num cenário em que a colocação ocorre na mandíbula — sobretudo em setores posteriores e/ou com menor tolerância ao erro — as condições ósseas tendem a assumir maior peso como fator que pode influenciar a precisão da colocação quando se utilizam guias dentossuportadas (Gong et al., 2024).

Para além dos dados obtidos com guias estáticas, a literatura com navegação dinâmica sugere que o efeito “maxila vs mandíbula” pode manifestar-se de forma diferente consoante o parâmetro analisado. No estudo prospetivo de Younis et al., foi observado que, no grupo *freehand* (mãos livres), o desvio angular foi significativamente mais elevado em implantes maxilares do que em implantes mandibulares ($p = 0,01$). No grupo com guia cirúrgica, os implantes maxilares apresentaram desvios de profundidade significativamente mais elevados ao nível da

plataforma ($p = 0,004$) e ao nível apical ($p = 0,007$). Já no grupo de navegação dinâmica, a arcada (maxila vs mandíbula) não mostrou influência estatisticamente significativa nos valores de desvio. Em conjunto, estes resultados reforçam que a comparação maxila vs mandíbula deve ser interpretada em função do método de orientação (guia estática, navegação dinâmica ou *mãos livres*) e do tipo de desvio considerado (angular vs linear/profundidade), evitando generalizações únicas para todas as métricas (Younis et al., 2024).

2.3. Complexidade do caso

A complexidade de um caso pode emergir ao longo de todo o fluxo clínico, desde o planeamento com a fabricação numérica da guia até à execução e à avaliação pós-operatória com a restauração protética. Em cirurgia guiada, a precisão é avaliada pela discrepância entre a posição planeada e a posição efetivamente obtida, recorrendo a parâmetros lineares e angulares. No estudo de Tia et al., a técnica foi avaliada pela diferença entre a posição real (CBCT pós-operatório) e a posição planeada, quantificando desvio mesio-distal, erro de profundidade e desvio do eixo/angulação. Para além da precisão, os autores consideraram desfechos clínicos como complicações biológicas, falhas implantares (mobilidade/removal por perda óssea marginal ou infeção), falhas protéticas, estética e satisfação do doente (Tia et al., 2025).

Adicionalmente, os fatores anatómicos — como volume ósseo limitado, padrões de reabsorção da crista, proximidade de estruturas vitais e curvatura anatómica — podem introduzir desafios relevantes e complexidade no planeamento e aumentar a exigência do controlo pré, intra e post operatório (Alshadidi et al., 2026).

2.3.1. Implante unitário

O caso unitário é muitas vezes visto como o cenário “mais simples”, mas isso só é verdade quando existem referências estáveis e condições favoráveis para posicionar e manter a guia sem micromovimentos. A complexidade aumenta quando o implante é colocado em zonas com menos suporte e menos referências dentárias. É mais complexo porque a guia passa a ter menor estabilidade e a orientação do eixo torna-se mais dependente do controlo intraoperatório. No estudo retrospectivo de Zhou et al., foram avaliados 75 casos de implante posterior único (pré-molar/molar, maxila ou mandíbula) executados com guia dentossuportada e protocolo parcialmente

guiado, em que a guia era utilizada apenas durante a perfuração. A precisão foi avaliada comparando CBCT pré- e pós-operatório, com medição de desvios 3D coronais, apicais e angulares. Para melhorar a estabilidade, as guias foram desenhadas para cobrir 4 a 6 dentes. Mesmo assim, o estudo mostrou que o contexto “extremidade livre” não se comporta como um unitário “simples”: observaram-se diferenças significativas entre implantes colocados em extremidade livre e em situação não extremidade livre, ao nível da entrada, do ápice e do ângulo. A interpretação apresentada é coerente com um mecanismo clínico intuitivo: menos dentes adjacentes disponíveis significa menor suporte e menor referência, o que facilita micromovimentos da guia e aumenta a probabilidade de desvio do eixo durante a perfuração. Menos dentes adjacentes disponíveis significa menor suporte e menor referência, podendo comprometer a correspondência entre o implante planejado e o implante efetivamente colocado (Zhou et al., 2026).

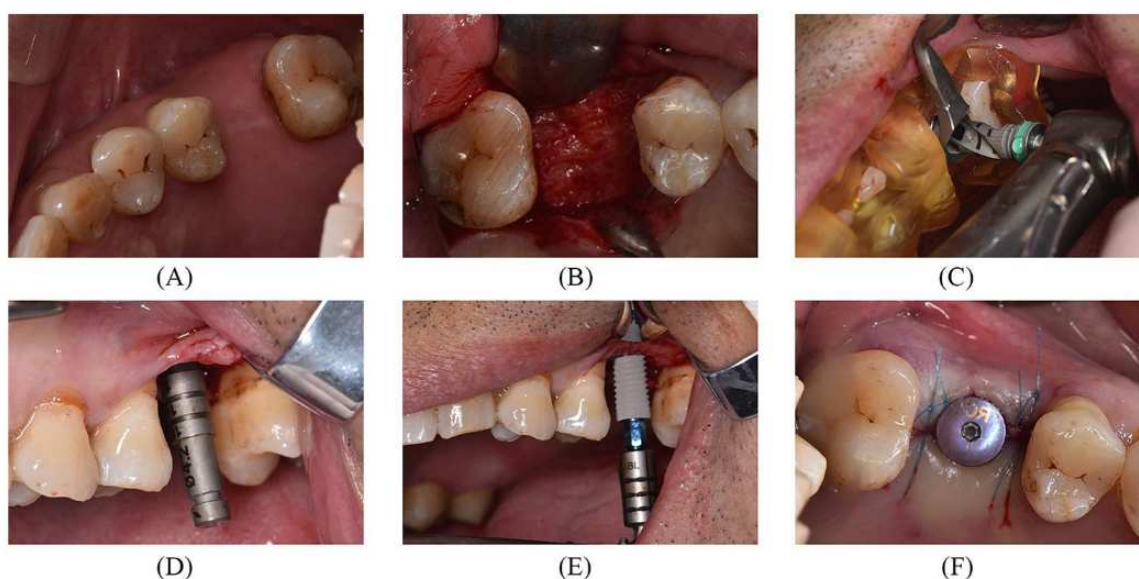


Figura 4 : Cirurgia com protocolo parcialmente guiado adaptado de Zhou et al., 2026.

- (a) Vista oclusal pré-operatória.
- (b) Vista oclusal após a elevação do retalho.
- (c) Sequência de perfuração para o implante com a guia cirúrgica.
- (d) Direção do alvéolo preparado.
- (e) Inserção do implante após perfuração contínua.
- (f) Instalação do pilar de cicatrização.

Um segundo aspeto que ajuda a perceber a complexidade do unitário é que, mesmo quando o número de implantes é reduzido, o resultado pode depender de variáveis do doente e do controlo do procedimento. Tia et al. avaliaram doentes parcialmente edêntulos que necessitavam de um implante ou, no máximo, dois, com

guias dentossuportadas e protocolo totalmente guiado. A precisão foi medida por desvio mesio-distal ao nível do ombro, erro de profundidade e desvio do eixo, e aos seis meses foi descrita evolução favorável, sem complicações e sem falhas implantares ou protéticas, com elevada satisfação funcional e estética. No entanto, os próprios autores salientam fatores que podem afetar a precisão, mesmo em cenários de baixa complexidade numérica: abertura bucal limitada, presença ou ausência de suporte dentário suficiente para a guia e movimentos súbitos durante o procedimento. Referem ainda que a escolha entre retalho aberto e abordagem sem mãos e a experiência do operador podem interferir no controlo do posicionamento (Tia et al., 2025)

Assim, a complexidade do caso unitário não é inexistente; ela resulta da interação entre suporte disponível, estabilidade da guia e condições clínicas que podem tornar a transferência do planeamento mais ou menos previsível (Tia et al., 2025).

2.3.2. Implante em caso de reabilitação parcial

O edentulismo parcial refere-se à ausência de um ou mais dentes naturais numa arcada dentária que se mantém intacta. A colocação de implantes nestes casos é particularmente crítica, porque um pequeno detalhe pode ter consequências significativas. De facto, desvios ou angulações mínimas, tanto a nível apical como coronal, podem conduzir a complicações. Isto pode resultar em contornos gengivais comprometidos, problemas oclusais ou perda óssea associada a peri-implantite. Toda a precisão necessária para uma colocação bem-sucedida do implante está relacionada com as condições anatómicas, a experiência do dentista e o método cirúrgico seleccionado(Alshadidi et al., 2026).



Figura 5 : Guia cirúrgica com pino de fixação e ajuste da guia impressa intra oralmente durante a cirurgia adaptado de Chrabieh et al., 2024.

Além disso, a extensão do espaço edêntulo tende a influenciar diretamente o grau de distorção e, consequentemente, a precisão obtida. Em vez de se assumir um valor de precisão para todos os contextos, importa reconhecer que os desvios podem variar conforme o padrão de edentulismo, existindo diferenças relevantes entre situações de edentulismo total e parcial. Deste modo, a magnitude do desvio depende do tipo de edentulismo: quanto maior for o espaço edêntulo, maior tende a ser a imprecisão no posicionamento implantar em cirurgia guiada e então, maior é o risco de ter complicações (Chrabieh et al., 2024).

Esta relação está também condicionada pelo tipo de tecido que suporta a guia cirúrgica. Por exemplo, guias dento-suportadas e muco-suportadas demonstram, em geral, melhor estabilidade e maior precisão do que guias osso-suportadas. Adicionalmente, um espaço inter-arcos reduzido pode dificultar a inserção livre das brocas nos manchões, induzindo pressão e potencial flexão da guia, o que contribui para desvios. Entre outras fontes de erro descritas encontram-se os artefactos em CBCT, a técnica de sobreposição/registo de dados, o comprimento do implante e o próprio desenho da guia cirúrgica. Apesar de a maior parte da distorção ser frequentemente atribuída à fase cirúrgica, o processo de fabrico CAD/CAM, quando devidamente controlado, não tende a gerar deformações mensuráveis. Assim, o controlo rigoroso dos parâmetros associados à distorção contribui para reduzir a magnitude das inexatidões na cirurgia implantar guiada com implantes parciais (Chrabieh et al., 2024).

2.3.3. Implante em caso de reabilitação total

A reabilitação implantar em doentes totalmente edêntulos é intrinsecamente mais complexa, porque exige a reposição simultânea da função e da estética em toda a arcada, com impacto direto no resultado protético caso ocorram erros. Ao contrário das situações parciais, a ausência de referências dentárias estáveis dificulta o posicionamento e a validação clínica do assentamento da guia cirúrgica, enquanto a resiliência da mucosa varia entre doentes e constitui uma fonte relevante de instabilidade. Neste contexto, as guias cirúrgicas muco-suportadas, embora menos invasivas, estão mais expostas a micro-movimentos e basculação intraoperatória devido à compressibilidade dos tecidos moles, o que pode aumentar os desvios, sobretudo na região posterior mandibular. Isto é particularmente relevante na

mandíbula, onde as margens de segurança são menores e as limitações de acesso podem amplificar o impacto de pequenas angulações (Bjelica et al., 2026).

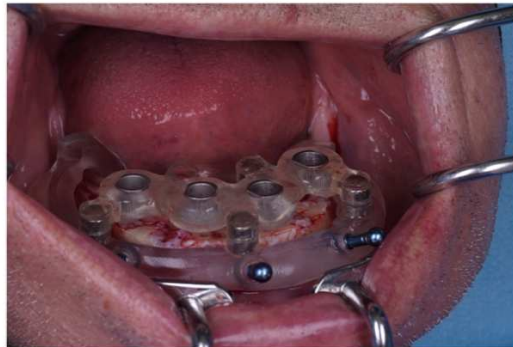


Figura 6 : Guia cirúrgica osso-suportada com fixação por pinos/parafusos em doente totalmente edêntulo adaptado de Bjelica et al., 2026.

Estas discrepâncias não são um pormenor técnico, mas um problema protético real. Numa reabilitação “*full-arch*” (total), pequenas imprecisões lineares ou angulares podem comprometer a passividade do encaixe da restauração final, particularmente quando se recorrem a reabilitações aparafusadas e/ou estruturas tipo barra, nas quais a acumulação de erros entre vários implantes se torna crítica. Para mitigar esta complexidade biomecânica, têm sido propostos protocolos mais rígidos, incluindo sistemas osso-suportados, que utilizam uma base fixada ao osso com pinos após elevação de retalho e servem de fundação estável para módulos sequenciais (redução óssea, preparação do leito implantar e inserção dos implantes). Esta abordagem, no entanto, aumenta a exigência operatória (retalho, colocação de pinos e sequência multi-etapas), ao trocar cirurgia menos invasiva por maior controlo mecânico, com o objetivo de reduzir o erro associado à resiliência mucosa. Em termos clínicos, este racional é consistente com a evidência de que protocolos osso-suportados empilháveis podem alcançar elevada precisão em maxila e mandíbula totalmente edêntulas, reforçando que, no edentulismo total, a dificuldade não é apenas “usar uma guia”, mas garantir uma fixação rígida e reproduzível que assegure a trajetória planeada e o ajuste passivo protético (Bjelica et al., 2026).

2.4. Experiência do cirurgião e manipulação da guia

Colocar implantes com precisão na posição prevista e, sobretudo, antecipar como essa posição condiciona a prótese final pode ser particularmente exigente para operadores com experiência limitada. A cirurgia guiada, baseada num planeamento virtual tridimensional (3D) pré-operatório da prótese e dos implantes, foi proposta para

minimizar a possibilidade de grandes discrepâncias durante a colocação, ao transferir para o campo operatório uma trajetória previamente definida (Carrico et al., 2024). Para além da componente geométrica, estas técnicas podem melhorar o *feedback* háptico, a percepção espacial e apoiar o desenvolvimento da coordenação olho–mão necessária ao posicionamento e à orientação da broca, aspeto crítico em reabilitações extensas suportadas por múltiplos implantes, nas quais o espaçamento e a angulação corretos são determinantes protéticos (Block et al., 2017; Deeb et al., 2017; Tahmaseb et al., 2018). Em protocolos totalmente guiados, foi reportado que não se observaram diferenças significativas de desvio atribuíveis ao nível de experiência do cirurgião, sugerindo uma menor influência do operador na precisão final (Bose et al., 2025).

Apesar disso, a previsibilidade do protocolo totalmente guiado continua dependente da execução clínica, isto é, de como a guia é efetivamente manuseada durante o ato operatório. Fatores ligados ao operador, como a postura e a posição de trabalho, a capacidade de visualização tridimensional e a pressão aplicada durante a osteotomia, podem influenciar o desvio final mesmo quando existe um plano virtual e uma guia física. Assim, a manipulação da guia deve ser entendida como um conjunto de controlos intraoperatórios que sustentam a transferência do planeamento: confirmar o assentamento completo e estável antes de iniciar a perfuração, manter o controlo durante o uso dos manchões e evitar pressão excessiva que possa induzir deslocação ou alterar a trajetória prevista (Carrico et al., 2024).

Adicionalmente, a experiência clínica inclui reconhecer quando o protocolo guiado deixa de ser exequível e ativar um plano alternativo de forma segura. Complicações operatórias inesperadas, como fratura da guia ou falha da navegação, bem como limitações práticas (abertura bucal, custos e equipamento disponível), podem tornar a cirurgia guiada impraticável, exigindo que o operador recorra às suas competências de visualização e execução em *freehand* (mãos livres) (Carrico et al., 2024). Embora a precisão do *freehand* (mãos livres) possa ser suficiente na maioria das situações clínicas, pode representar um desafio para operadores sem experiência. Além disso, apesar de existirem dados que apontam a experiência do praticante como um fator importante na precisão do *freehand* (mãos livres), permanece limitada a evidência sobre a quantidade de treino necessária para garantir previsibilidade (Carrico et al., 2024). Neste enquadramento, a comparação entre abordagens mãos livres, pilot-drilled (técnica guiada apenas pela perfuração piloto) e

totalmente guiada permite sustentar a existência de estratégias intermédias quando o protocolo totalmente guiado não pode ser cumprido (Alshadidi et al., 2026).

2.5. Mobilidade dos tecidos moles e estabilidade intraoperatória

A mobilidade dos tecidos moles é um determinante central da estabilidade intraoperatória quando se recorre a guias muco-suportadas. A mucosa, membrana que reveste as cavidades do organismo, é resiliente e compressível, pelo que a guia muco-suportada nunca é rígida como um apoio dentário. Porque a mucosa é descrita como um suporte elástico e passível de deformação, podendo interferir com a transferência fiel do planeamento para o campo operatório (Shi et al., 2023). Nesta perspetiva, a previsibilidade do guiamento não depende apenas da geometria do desenho digital, mas também da capacidade do conjunto guia-suporte em manter a sua posição durante a sequência cirúrgica, num contexto em que os tecidos vivos não se comportam como estruturas rígidas. Shi et al. sublinham ainda que diferenças entre resultados *in vitro* e *in vivo* podem ser explicadas, em parte, por modelos experimentais apresentarem propriedades mecânicas mais simples do que os tecidos moles reais, reforçando a relevância clínica do comportamento da mucosa para a precisão obtida (Shi et al., 2023).

Esta limitação traduz-se em consequências mensuráveis quando se comparam suportes distintos, sendo o tipo de suporte identificado como um fator crítico para a precisão. Markiewicz et al. mostram que as guias muco-suportadas se associam a menor precisão e maiores desvios, ao passo que abordagens mais estáveis, como as guias osso-suportadas, podem fornecer resultados clinicamente aceitáveis e são apontadas como preferíveis na mandíbula edêntula, onde a estabilidade é particularmente desafiante. Em paralelo, a síntese de Shi et al. reforça que a acurácia não é determinada apenas pela categoria “muco-” versus dento- ou osso-suportada, mas também por aspetos do desenho e da fixação do sistema de guia, precisamente porque estes elementos condicionam a estabilidade do conjunto durante a cirurgia e, por consequência, o desvio final (Shi et al., 2023).

B3 – Correlação entre planeamento virtual e resultado clínico

3.1. Métodos de medição da precisão (CBCT pós-operatório, STL)

A medição da precisão em cirurgia implantar guiada não corresponde necessariamente a um único método, porque pode incidir sobre diferentes momentos

do fluxo digital. No estudo clínico prospetivo de García-Mira Berta et al., a avaliação foi feita ao nível do resultado cirúrgico final, ou seja, através da comparação entre o planeamento virtual e a posição realmente obtida dos implantes após a cirurgia. Para isso, os autores recorreram à realização de um CBCT pós-operatório, efetuado 10 dias depois da colocação implantar, e à sua sobreposição com o CBCT pré-operatório no *software* “codiagnostix”, o que permitiu quantificar desvios horizontal coronário, horizontal apical, vertical e angular. Esta abordagem permite um ponto de vista global da cirurgia implantar em que avalia a transferência entre o planeamento virtual para o resultado clínico (Berta et al., 2025).

A medição da precisão também pode ser realizada numa fase pré-operatória, incidindo não sobre a posição final do implante, mas sobre a exatidão da própria guia cirúrgica. Neste caso, a análise baseia-se na comparação entre o ficheiro digital de referência, correspondente ao modelo CAD da guia, e o ficheiro STL obtido após a digitalização da guia já fabricada. Esta metodologia permite avaliar a fidelidade dimensional do dispositivo produzido, nomeadamente a adaptação da sua superfície interna e os desvios lineares e angulares ao nível do alojamento da manga. Assim, não se trata de uma medição clínica direta do resultado pós-operatório, mas sim duma avaliação metrológica da qualidade de fabrico da guia e da sua possível contribuição para o erro global potencial da posição implantar obtida (Lo Russo et al., 2023).

Em conjunto, estes dois métodos mostram que a avaliação da precisão em cirurgia implantar guiada não se limita a um único momento nem a um único tipo de análise. Por um lado, a comparação entre CBCT pré- e pós-operatório permite medir a correspondência entre o planeamento virtual e a posição efetivamente obtida dos implantes, fornecendo uma apreciação clínica do resultado final. Por outro lado, a comparação entre o modelo CAD da guia e o ficheiro STL resultante da sua digitalização permite avaliar a fidelidade dimensional do dispositivo antes da cirurgia, identificando possíveis desvios suscetíveis de influenciar a transferência do planeamento para o ato operatório. Assim, os dois artigos abordam a precisão segundo perspetivas diferentes, mas complementares: um ao nível do resultado clínico alcançado, o outro ao nível da exatidão de fabrico da guia cirúrgica. Esta complementaridade é particularmente importante, pois permite compreender que a correlação entre planeamento virtual e resultado clínico depende não só da execução

cirúrgica, mas também da qualidade do dispositivo que serve de intermediário entre o plano digital e a sua concretização clínica.

3.2. Tolerâncias mecânicas e controlo de qualidade

No fabrico das guias cirúrgicas, a precisão final não depende apenas da qualidade do planeamento virtual, mas também da fidelidade com que esse planeamento é convertido num dispositivo físico. A revisão de Kernén et al. mostra que os diferentes sistemas de planeamento não oferecem o mesmo grau de flexibilidade no desenho e na produção das guias, uma vez que apenas alguns permitem ao utilizador definir parâmetros como a superfície de apoio, a espessura do material, a tolerância entre a superfície dentária e a guia, ou ainda a tolerância de inserção das mangas. Além disso, nem todos os sistemas possibilitam o desenho individualizado e o fabrico in-house, o que evidencia que a própria estrutura do workflow pode introduzir variabilidade técnica desde a fase de conceção (Kernén et al., 2020).

Esta questão torna-se particularmente relevante porque a guia cirúrgica funciona como interface física entre o planeamento digital e a execução clínica. Assim, a adaptação ao suporte, a extensão da superfície de assentamento, o tipo de desenho da guia e a relação mecânica com as mangas não são aspetos meramente secundários, mas elementos que condicionam a estabilidade do dispositivo e a transferência do trajeto planeado para o ato cirúrgico. Kernén et al. salientam, aliás, que os sistemas diferem quanto às estruturas de suporte aceites, ao tipo de guiamento disponível e ao grau de intervenção do utilizador no desenho final da guia, o que reforça a ideia de que a previsibilidade mecânica não é uniforme entre plataformas (Kernén et al., 2020).

Esta perspetiva é reforçada pelos dados experimentais de Morón-Conejo et al., que compararam guias cirúrgicas produzidas com quatro impressoras 3D diferentes a partir do mesmo ficheiro STL. Os autores avaliaram a precisão da superfície global, da região de interesse — correspondente à superfície oclusal e ao orifício de guiamento —, bem como a repetibilidade entre diferentes lotes, o diâmetro do orifício e a sua orientação nos eixos x, y e z. Os resultados mostraram diferenças entre grupos ao nível da *trueness* e da precisão, tanto na zona global como na região de interesse, demonstrando que o *workflow* de fabrico influencia efetivamente a exatidão da guia produzida (Morón-Conejo et al., 2024). A região de interesse merece atenção

particular, porque é precisamente essa área que determina o assentamento e a retenção da guia, bem como a posição do implante quando se analisa o orifício de guiamento. No mesmo estudo, os autores verificaram que os grupos DLP apresentaram melhor precisão global, enquanto o grupo SLA obteve melhores resultados na região de interesse. Observaram ainda elevada reprodutibilidade entre lotes nessa mesma região, embora com diferenças entre *workflows*, e identificaram o diâmetro do orifício como um fator crítico para a adaptação do tubo metálico, capaz de afetar o desempenho cirúrgico. Do mesmo modo, referem que a direção do orifício de guiamento pode influenciar a posição final do implante, razão pela qual consideram essencial analisar as dimensões finais da guia e a orientação desse orifício (Morón-Conejo et al., 2024).

Deste modo, as tolerâncias mecânicas e o controlo de qualidade devem ser entendidos como componentes centrais do fabrico das guias cirúrgicas. Mesmo quando o planeamento digital é rigoroso, a passagem para o dispositivo físico pode introduzir variações relacionadas com o sistema utilizado, com os parâmetros de desenho e com o próprio processo de produção. Por essa razão, a avaliação crítica da fidelidade dimensional da guia, da sua repetibilidade e das características do orifício de guiamento torna-se essencial para limitar discrepâncias e reforçar a fiabilidade da transferência entre o planeamento virtual e a sua concretização clínica (Kernen et al., 2020; Morón-Conejo et al., 2024).

3.3. Influência do material e do método de produção na precisão

A precisão das guias cirúrgicas não depende apenas do planeamento digital, mas também das propriedades do material e das características do método de produção utilizado para fabricar o dispositivo. Assim, duas guias obtidas a partir do mesmo desenho digital podem não apresentar a mesma exatidão final se forem produzidas por *workflows* diferentes. Esta ideia é particularmente relevante em cirurgia guiada, porque a fidelidade dimensional da guia condiciona a transferência clínica do planeamento para o ato operatório. No estudo de Morón-Conejo et al., todas as guias foram produzidas a partir do mesmo ficheiro STL, mas com quatro impressoras 3D diferentes e segundo os protocolos específicos de cada fabricante, tendo-se verificado diferenças entre grupos ao nível da “*trueness*” e da precisão, tanto na superfície global como na região de interesse. Estes dados mostram, assim, que a

simples identidade do desenho digital não garante a obtenção de guias com o mesmo grau de exatidão (Morón-Conejo et al., 2024).

A influência do método de produção torna-se ainda mais evidente quando se analisam as diferenças entre fabrico aditivo e subtrativo. No estudo de Kessler et al., a precisão da posição implantar foi superior com guias fresadas quando comparadas com guias impressas em 3D numa situação de extremidade livre sem suporte distal. Nas guias fresadas, a precisão foi influenciada apenas pela posição dentária, ao passo que, nas guias impressas, a posição final do implante foi influenciada pela posição dentária, pela altura da manga e pela extensão do suporte dentário. Segundo os autores, a maior homogeneidade do material e o nível mais elevado de polimerização associados ao fabrico CAD/CAM poderão explicar a maior rigidez destas guias e a sua menor deformação sob carga mecânica durante a preparação do leito implantar (Kessler et al., 2021).

Para além do método de produção, o próprio material parece desempenhar um papel importante na precisão da orientação. Kessler et al. referem que os materiais impressos em 3D, geralmente à base de metacrilatos, podem apresentar propriedades físicas inferiores às dos materiais fresados, em parte devido à anisotropia induzida durante a polimerização inicial. Neste contexto, um módulo de elasticidade mais baixo pode favorecer a deformação da guia durante a instrumentação cirúrgica, comprometendo a precisão da colocação implantar. De forma coerente com esta hipótese, a análise estatística revelou menor probabilidade de desvio vertical linear superior a 1 mm nos materiais com módulo de elasticidade mais elevado, o que sugere que a rigidez do material pode atenuar, pelo menos em parte, os efeitos negativos de outras condições menos favoráveis da orientação (Kessler et al., 2021).

Os resultados de Morón-Conejo et al. reforçam esta perspetiva ao mostrarem que a exatidão final depende não só da tecnologia de impressão utilizada, mas também da interação entre impressora, resina e pós-processamento dentro de cada *workflow* de produção. Neste sentido, a influência do material e do método de produção na precisão não deve ser entendida como uma questão meramente laboratorial, mas como um fator suscetível de interferir com a fidelidade da transferência entre o planeamento virtual e o resultado clínico obtido (Morón-Conejo et al., 2024).

Do ponto de vista clínico, esta questão é particularmente importante porque as diferenças de exatidão não se distribuem de forma uniforme por toda a guia. Morón-Conejo et al. mostraram que a região de interesse, correspondente à superfície oclusal e ao orifício de guiamento. É especialmente relevante, por determinar o assentamento e a retenção da guia, bem como a posição do implante quando se analisa o orifício de guiamento. Os autores identificaram ainda o diâmetro do orifício como um fator crítico para a adaptação do tubo metálico e referem que a sua direção pode influenciar a posição final do implante. Deste modo, a influência do material e do método de produção na precisão não deve ser entendida como uma questão meramente laboratorial, mas como um fator suscetível de interferir com a fidelidade da transferência entre o planeamento virtual e o resultado clínico obtido (Morón-Conejo et al., 2024).

Estes dados mostram que a precisão das guias cirúrgicas resulta da articulação entre o desenho digital, o material utilizado e o método de produção escolhido. Mesmo quando o planeamento virtual é idêntico, diferenças no processo de fabrico e nas propriedades mecânicas dos materiais podem alterar a fidelidade dimensional da guia e, conseqüentemente, influenciar a precisão clínica do guiamento. Assim, a escolha do *workflow* de produção não deve ser vista como uma etapa meramente técnica, mas como um determinante real da previsibilidade da cirurgia implantar guiada (Kessler et al., 2021; Morón-Conejo et al., 2024).

3.4. Validação e esterilização das guias cirúrgicas

Uma guia cirúrgica não deve apenas ser corretamente planeada e bem fabricada; deve também ser validada antes da cirurgia e submetida a um protocolo de esterilização que não comprometa a sua fidelidade dimensional nem a sua função de guiamento. Antes da sua utilização clínica, a guia cirúrgica deve ser verificada quanto à manutenção da sua estabilidade dimensional após esterilização. Neste contexto, Lo Russo et al. avaliaram o efeito da esterilização em autoclave através da comparação entre a guia antes e depois do procedimento, analisando a superfície interna em contacto com dentes ou mucosa, bem como os alojamentos das mangas e a sua orientação. Os autores observaram diferenças reduzidas entre T0 e T1 e concluíram que os efeitos da esterilização em autoclave sobre a estabilidade das guias impressas em 3D permaneceram limitados e clinicamente insignificantes, sugerindo que a guia

pode manter características compatíveis com o uso clínico após este protocolo (Lo Russo et al., 2025).

Embora a guia cirúrgica seja fabricada individualmente em laboratório dentário para utilização única num determinado doente, pode ainda ser contaminada por múltiplas fontes ao longo do processo de fabrico laboratorial. Por essa razão, a sua esterilização é obrigatória. Esta etapa permite reduzir o risco de infeção quando a guia entra em contacto com a ferida cirúrgica aberta, com o fluxo sanguíneo e/ou com o osso exposto do doente. Assim, para minimizar o risco de infeção e de complicações pós-operatórias, bem como para favorecer o sucesso da cirurgia e do implante, as guias cirúrgicas devem ser consideradas dispositivos médicos de classe IIb que, para proteção do doente, do dentista e de terceiros, devem ser utilizadas em condições de esterilidade (Yazigi et al., 2023).

Em prática dentária, têm sido utilizadas diferentes metodologias de esterilização, nomeadamente a esterilização por calor seco, a esterilização a vapor e a esterilização por radiação, como a irradiação gama e os raios X. Contudo, a esterilização a vapor continua a ser o método mais frequentemente utilizado em clínica dentária, devido ao seu baixo custo, à sua praticabilidade e à eficácia esterilizadora reconhecida (Yazigi et al., 2023; Lo Russo et al., 2025).

Esta técnica não é totalmente neutra do ponto de vista dimensional e mecânico. Com efeito, a esterilização a vapor (autoclave) pode não só provocar alterações geométricas e dimensionais, como também interferir com as propriedades mecânicas da guia. Neste sentido, apesar de ser indispensável para garantir a segurança microbiológica do procedimento, a esterilização pode constituir um fator potencial de comprometimento da precisão do dispositivo. Assim, qualquer alteração induzida por esta etapa poderá afetar o ajustamento da guia, a estabilidade das suas interfaces críticas e, conseqüentemente, a fidelidade da transferência do planeamento para o ato cirúrgico. Acresce que a esterilização em autoclave das guias cirúrgicas merece particular atenção, uma vez que poderá ter um impacto significativo na precisão do dispositivo, sobretudo no que respeita ao volume e às dimensões da sua superfície (Yazigi et al., 2023; Lo Russo et al., 2025).

C- Análise crítica, vantagens, limitações e perspectivas

C1 – Benefícios e limitações da cirurgia guiada

1.1. Vantagens clínicas

A cirurgia guiada representa uma evolução relevante na implantologia oral, que visa reforçar a coerência entre o posicionamento implantar previamente definido e a sua execução clínica, promovendo uma articulação mais consistente e maior coesão entre a fase protética e a fase cirúrgica do tratamento. A sua principal vantagem clínica reside na possibilidade de reduzir a variabilidade do ato operatório e de aproximar o resultado obtido do planeamento inicialmente estabelecido (Chackartchi et al., 2022; Tahmaseb et al., 2018).

A cirurgia guiada pode simplificar o procedimento cirúrgico, reduzir o tempo operatório e diminuir os erros de posicionamento durante a inserção implantar, reforçando o seu interesse clínico enquanto ferramenta de orientação tridimensional e de controlo da execução cirúrgica (Lo Russo et al., 2025).

Contudo, esta previsibilidade não depende apenas da utilização da guia em si, mas também de fatores clínicos que condicionam a sua precisão durante o procedimento. Entre estes, destacam-se o tipo de suporte da guia, a sua estabilidade intraoperatória, a condição de edentulismo parcial ou total e a região operatória, maxilar ou mandibular, uma vez que estes elementos podem influenciar a estabilidade do sistema e a fidelidade entre o planeado e o obtido. Os casos parcialmente edêntulos tendem a apresentar maior precisão do que os totalmente edêntulos, e que as guias dento-suportadas são geralmente mais precisas do que as muco-suportadas, enquanto as guias osso-suportadas podem constituir uma alternativa clinicamente aceitável em mandíbulas edêntulas. Em situações edêntulas, a adaptação do tipo de suporte ao contexto clínico pode melhorar a previsibilidade, sendo as guias muco-suportadas mais aceitáveis em alguns casos maxilares, enquanto a escolha do suporte se torna particularmente crítica em contextos mandibulares mais exigentes (Shi et al., 2023; Markiewicz et al., 2025).

Paralelamente, a precisão não é determinada apenas pela categoria de suporte, mas também por aspetos relacionados com a conceção e a fixação da guia, uma vez que estes elementos influenciam a estabilidade do conjunto durante a cirurgia e, consequentemente, o desvio final entre o planeado e o obtido (Shi et al., 2023).

1.2. Limitações clínicas e operatórias

Apesar das vantagens da cirurgia guiada, a sua precisão pode ser limitada por fatores clínicos que comprometem a estabilidade da guia e a adaptação ao contexto intraoperatório. As guias muco-suportadas tendem a apresentar menor precisão e maiores desvios do que as dento-suportadas, sobretudo em casos edêntulos, onde a estabilidade é mais difícil de assegurar (Shi et al., 2023).

Na mandíbula edêntula, as guias muco-suportadas estão associadas aos resultados menos favoráveis, ao passo que as guias osso-suportadas revelam um desempenho claramente superior e clinicamente mais aceitável, o que reforça a importância da seleção do suporte em função do contexto clínico. Do mesmo modo, a maxila tende a apresentar condições mais favoráveis de precisão do que a mandíbula, confirmando que a região operatória também pode constituir uma limitação clínica relevante (Markiewicz et al., 2025). Além disso, a ausência de visualização direta do osso em determinados protocolos pode dificultar a apreciação da anatomia real durante a cirurgia, sobretudo em cristas irregulares ou fortemente reabsorvidas, aumentando o risco de desvios de posicionamento (Azevedo et al., 2024).

1.3. Influência do contexto clínico na precisão

A precisão da cirurgia guiada varia em função do contexto clínico, da arcada e do tipo de suporte da guia. Nos casos parcialmente edêntulos, as guias dento-suportadas tendem a proporcionar maior precisão, beneficiando da estabilidade conferida pelo apoio dentário. Já nos casos totalmente edêntulos, o tipo de suporte torna-se um fator determinante, podendo as guias muco-suportadas apresentar resultados aceitáveis na maxila, mas revelando menor precisão na mandíbula, onde as guias osso-suportadas surgem como a opção mais favorável (Markiewicz et al., 2025). A maxila tende ainda a apresentar maior precisão do que a mandíbula, o que confirma a influência da região operatória no resultado obtido. Esta variabilidade é clinicamente relevante, uma vez que desvios significativos entre o planejado e o obtido podem comprometer o resultado protético e, em contextos mandibulares desfavoráveis, aumentar o risco de lesão de estruturas anatómicas nobres. A precisão depende também da concepção e do fabrico da guia, reforçando que a previsibilidade

da cirurgia guiada resulta da adequação do suporte e do protocolo ao contexto clínico específico (Markiewicz et al., 2025).

C2 – Perspetivas futuras da implantologia digital

2.1. Integração da inteligência artificial e navegação robótica

A evolução da implantologia digital aponta para uma integração progressiva entre a inteligência artificial e os sistemas de cirurgia assistida por computador. A inteligência artificial tem sido aplicada sobretudo à segmentação automática de marcos anatómicos e à criação do paciente virtual, contribuindo para uma maior consistência, rapidez e previsibilidade na preparação do caso. No entanto, embora alguns softwares já integrem etapas parcialmente automatizadas ainda não existe um protocolo de planeamento implantar totalmente automatizado e cientificamente validado para uso clínico corrente (Elgarba et al., 2024).

No plano cirúrgico, a navegação dinâmica e a cirurgia robot-assistida representam o prolongamento intraoperatório desta lógica digital. A revisão sistemática de Khaohoen et al. mostra que a cirurgia implantar assistida por computador permite, de forma geral, uma colocação precisa dos implantes nas três dimensões. Entre os sistemas analisados, a abordagem robot-assistida tendeu a apresentar os menores desvios coronais, apicais e angulares, sugerindo um potencial importante em termos de precisão e reprodutibilidade. Ainda assim, os próprios autores salientam que a evidência clínica disponível para os sistemas robóticos permanece reduzida, pelo que estes resultados devem ser interpretados com prudência até que estudos adicionais consolidem o seu valor clínico (Khaohoen et al., 2024).

Assim, as perspetivas futuras da implantologia digital parecem assentar menos numa substituição do clínico e mais numa cooperação crescente entre inteligência artificial, navegação cirúrgica e controlo humano especializado (Elgarba et al., 2024; Khaohoen et al., 2024).

2.2. Desenvolvimento de protocolos padronizados

Para que a implantologia digital se torne mais previsível e reprodutível no futuro, será necessário desenvolver protocolos mais padronizados. Com efeito, a precisão da

cirurgia guiada não depende apenas do planeamento virtual, mas do encadeamento de múltiplas etapas clínicas e digitais, desde a aquisição dos dados até à transferência efetiva do plano para o campo operatório. A discrepância final entre a posição planeada e a posição obtida resulta frequentemente da acumulação de erros ao longo do processo, o que reforça a importância de abordagens mais uniformizadas e controladas (Chackartchi et al., 2022).

Segundo Chackartchi et al. (2022), esta calibração é particularmente crítica em dois momentos: na transferência dos dados do paciente para o software e, posteriormente, na transferência do planeamento digital para a boca do paciente. Cada uma destas transições pode introduzir desvios, nomeadamente durante o registo e a sobreposição de imagens, o posicionamento da guia e a sua estabilidade tridimensional durante o ato cirúrgico. Por isso, a previsibilidade do tratamento depende não apenas da tecnologia utilizada, mas também da padronização rigorosa destas etapas intermédias (Chackartchi et al., 2022).

A revisão sistemática de Shi et al. (2023) confirma igualmente que a exatidão cirúrgica pode variar em função de vários parâmetros técnicos da própria guia, incluindo o tipo de suporte, o método de fabrico e determinados elementos de desenho, como os parafusos de fixação e as “sleeves”. As guias dento-suportadas tendem a apresentar maior exatidão, enquanto as guias muco-suportadas revelam resultados clínicos menos favoráveis, sobretudo devido à complexidade mecânica dos tecidos moles em condições reais. Além disso, o método de fabrico e o desenho da guia podem influenciar o desvio final, o que demonstra que a obtenção de resultados mais consistentes exigirá protocolos técnicos mais uniformes e mais definidos (Shi et al., 2023).

2.3. O futuro da cirurgia guiada: entre precisão e personalização

No futuro, a cirurgia guiada tenderá provavelmente a ser valorizada pela sua integração em fluxos de trabalho cada vez mais personalizados. A exatidão do posicionamento implantar só adquire verdadeiro significado clínico quando faz parte de um plano de tratamento global, orientado pela prótese e adaptado às características anatómicas, funcionais e restauradoras de cada paciente. Assim, mais do que procurar apenas reduzir desvios, a evolução da cirurgia guiada parece apontar

para uma utilização mais individualizada, ajustada à complexidade clínica, ao tipo de reabilitação prevista e às exigências específicas de cada caso (Sadilina et al., 2025; Yeo et al., 2025).

Nesta perspetiva, o seu interesse futuro poderá residir na capacidade de articular de forma mais coerente as diferentes etapas do tratamento, desde a planificação digital até à execução cirúrgica. A cirurgia guiada poderá, assim, afirmar-se como uma ferramenta particularmente útil em abordagens mais exigentes, nomeadamente quando se pretende associar previsibilidade protética, menor invasividade e maior controlo da execução clínica. Deste modo, a personalização não dependerá apenas do tipo de guia ou da tecnologia utilizada, mas também da forma como todo o workflow é estruturado em função das necessidades do paciente, da dificuldade anatómica e dos objetivos terapêuticos da reabilitação (Sadilina et al., 2025; Yeo et al., 2025).

Por fim, a consolidação futura da cirurgia guiada dependerá também da forma como os seus benefícios forem demonstrados para além da precisão técnica. Segundo Yeo et al. (2025), quando a análise se limita ao nível da intervenção cirúrgica isolada, os benefícios para o paciente nem sempre se tornam evidentes. Por isso, as perspetivas futuras desta abordagem parecem passar por uma avaliação mais ampla, centrada no tratamento como um todo, incluindo os resultados clínicos, os PROMs e a relação custo-benefício. Neste sentido, o futuro da cirurgia guiada parece situar-se na articulação entre precisão, personalização e validação clínica orientada para benefícios concretos e sustentáveis para o paciente (Yeo et al., 2025; Sadilina et al., 2025).

III. CONCLUSÃO

A cirurgia guiada em implantologia oral afirmou-se como uma abordagem relevante para melhorar a previsibilidade da colocação de implantes e reforçar a coerência entre o planeamento protético e a execução cirúrgica. No entanto, a sua utilização não pode ser dissociada de uma análise rigorosa dos fatores clínicos e biológicos que condicionam a precisão final do procedimento. Entre esses fatores, assumem particular importância a anatomia do local implantar, a densidade óssea, a região operatória, o tipo de suporte da guia, a estabilidade intraoperatória e a complexidade do caso.

Estes elementos influenciam diretamente a fidelidade entre o planeamento virtual e a posição efetiva do implante, mesmo quando o protocolo digital é corretamente seguido. A precisão obtida depende, por isso, não apenas da tecnologia utilizada, mas também das condições biológicas do doente e do controlo exercido em cada etapa do *workflow* digital. Apesar dos progressos observados no planeamento digital, no fabrico das guias e na transferência clínica do plano cirúrgico, permanecem limitações que impedem considerar esta abordagem como isenta de erro. A existência de desvios, ainda que geralmente reduzidos, obriga a uma utilização criteriosa destas ferramentas, sustentada por planeamento adequado, seleção correta do tipo de guia e conhecimento das limitações inerentes ao contexto clínico.

Deste modo, a cirurgia guiada em implantologia oral deve ser entendida como um recurso de elevado valor na reabilitação oral, desde que integrada numa abordagem clínica rigorosa, individualizada e sustentada por fundamentos biológicos sólidos. Mais do que uma simples expressão de inovação tecnológica, o seu verdadeiro potencial reside na capacidade de articular precisão digital, discernimento clínico e adaptação às particularidades de cada caso, contribuindo para uma prática mais segura e para a longevidade dos resultados obtidos.

IV- BIBLIOGRAFIA

Abad-Coronel, C., Vandeweghe, S., Vela Cervantes, M. D., Tobar Lara, M. J., Mena Córdova, N., & Aliaga, P. (2024). Accuracy of implant placement using digital prosthetically-derived surgical guides: A systematic review. *Applied Sciences*, 14(16), 7422. <https://doi.org/10.3390/app14167422>

Alauddin, M. S., Baharuddin, A. S., & Mohd Ghazali, M. I. (2021). The modern and digital transformation of oral health care: A mini review. *Healthcare (Basel, Switzerland)*, 9(2), 118. <https://doi.org/10.3390/healthcare9020118>

Alshadidi, A. A. F., Aldosari, L. I. N., Alshehri, A. H. A., Binduhayym, R. I. H., Kondaveeti, R., Gurumurthy, V., & Vaddamanu, S. K. (2026). The efficacy of freehand, pilot drilled and fully guided implant surgery in partially edentulous patients: A randomized control trial. *PLOS ONE*, 21(1), e0341894. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0341894>

Alshammari, S. M., Alhaddad, A. J., Marghalani, T. Y., Babeer, W. A., & Abuzinadah, S. H. (2025). Dimensional accuracy of a sterilized and disinfected 3D-printed surgical guide: An in vitro study. *Microorganisms*, 13(11), 2457. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13112457>

Auduc, C., Douillard, T., Nicolas, E., & El Osta, N. (2025). Fully digital workflow in full-arch implant rehabilitation: A descriptive methodological review. *Prosthesis*, 7(4), 85. <https://doi.org/10.3390/prosthesis7040085>

Azevedo, M., Correia, F., & Faria Almeida, R. (2024). Accuracy of implant guided surgery in fully edentulous patients: Prediction vs. actual outcome-systematic review. *Journal of Clinical Medicine*, 13(17), 5178. <https://doi.org/10.3390/jcm13175178>

Berta, G. M., Luigi, C., Miguel, P. D., & Carlos, B. J. (2025). 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*, 36(3), 314–324. <https://doi.org/10.1111/clr.14384>

Biun, J., Dudhia, R., & Arora, H. (2023). The in-vitro accuracy of fiducial marker-based versus markerless registration of an intraoral scan with a cone-beam computed tomography scan in the presence of restoration artifact. *Clinical Oral Implants Research*, 34(11), 1257–1266. <https://doi.org/10.1111/clr.14166> *Bibliografia 69/75*
Guias cirúrgicas em reabilitação oral com os implantes

Bjelica, R., Smojver, I., Stojić, L., Vuletić, M., Katanec, T., & Gabrić, D. (2026). Accuracy of fully guided implant placement using bone-supported stackable surgical guides in completely edentulous patients—A retrospective study. *Journal of Clinical Medicine*, 15(2), 652. <https://doi.org/10.3390/jcm15020652>

Block, M. S., Emery, R. W., Cullum, D. R., & Sheikh, A. (2017). Implant placement is more accurate using dynamic navigation. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery: Official Journal of the American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons*, 75(7), 1377–1386. <https://doi.org/10.1016/j.joms.2017.02.026>

Böse, M. W. H., Atay, E., Beuer, F., Bruhnke, M., Pieralli, S., & Herklotz, I. (2025). Accuracy of two static computer-assisted implant surgery systems in partially edentulous patients: A randomized clinical trial using intraoral scan data. *Journal of Dentistry*, 159, 105814. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2025.105814>

Buser, D., Janner, S. F. M., Wittneben, J.-G., Brägger, U., Ramseier, C. A., & Salvi, G. E. (2012). 10-year survival and success rates of 511 titanium implants with a sandblasted and acid-etched surface: A retrospective study in 303 partially edentulous patients. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 14(6), 839–851. <https://doi.org/10.1111/j.1708-8208.2012.00456.x>

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), e878. <https://doi.org/10.1002/cre2.878>

Chackartchi, T., Romanos, G. E., Parkanyi, L., Schwarz, F., & Sculean, A. (2022). Reducing errors in guided implant surgery to optimize treatment outcomes. *Periodontology 2000*, 88(1), 64–72. <https://doi.org/10.1111/prd.12411>

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. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 27(3), e70038. <https://doi.org/10.1111/cid.70038>

Chrabieh, E., Hanna, C., Mrad, S., Rameh, S., Bassil, J., & Zaarour, J. (2024). Accuracy of computer-guided implant surgery in partially edentulous patients: A prospective observational study. *International Journal of Implant Dentistry*, 10(1), 36. <https://doi.org/10.1186/s40729-024-00552-z> 70/75

Corsalini, M., Barile, G., Ranieri, F., Morea, E., Corsalini, T., Capodiferro, S., & Palumbo, R. R. (2024). Comparison between conventional and digital workflow in implant prosthetic rehabilitation: A randomized controlled trial. *Journal of Functional Biomaterials*, 15(6), 149. <https://doi.org/10.3390/jfb15060149>

Deeb, G. R., Allen, R. K., Hall, V. P., Whitley, D., 3rd, Laskin, D. M., & Bencharit, S. (2017). How accurate are implant surgical guides produced with desktop stereolithographic 3-dimensional printers? *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery: Official Journal of the American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons*, 75(12), 2559.e1–2559.e8. <https://doi.org/10.1016/j.joms.2017.08.001>

Dutta, D., Mohanty, A. K., Raut, A., Pal, D., Mahato, M., Jain, A., & Sarkar, D. F. (2025). Comparison of accuracy of dental implant placement between freehand and guided implant surgery-A systematic review and meta-analysis. *Journal of Maxillofacial and Oral Surgery*, 24(4), 865–876. <https://doi.org/10.1007/s12663-025-02579-0>

Elgarba, B. M., Fontenele, R. C., Tarce, M., & Jacobs, R. (2024). Artificial intelligence serving pre-surgical digital implant planning: A scoping review. *Journal of Dentistry*, 143, 104862. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.104862>

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. *BMC Oral Health*, 22(1), 23. <https://doi.org/10.1186/s12903-022-02057-w>

Grande, F., Nuytens, P., Zahabiyoun, S., Iocca, O., Catapano, S., & Mijiritsky, E. (2025). Factors influencing the intraoral implant scan accuracy: A review of the literature. *Journal of Dentistry*, 161, 105973. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2025.105973>

Gupta, R., Gupta, N., & Weber, K. K. (2025). Dental implants. In StatPearls. StatPearls Publishing.

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. *Dentistry Journal*, 12(1), 1. <https://doi.org/10.3390/dj12010001> *Bibliografia* 71/75

Jorba-García, A., González-Barnadas, A., Camps-Font, O., Figueiredo, R., & Valmaseda-Castellón, E. (2021). Accuracy assessment of dynamic computer-aided implant placement: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Investigations*, 25(5), 2479–2494. <https://doi.org/10.1007/s00784-021-03833-8>

Kafedzhieva, A., Vlahova, A., & Chuchulska, B. (2025). Digital technologies in implantology: A narrative review. *Bioengineering (Basel)*, 12(9), 927. <https://doi.org/10.3390/bioengineering12090927>

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. *Journal of Indian Society of Periodontology*, 24(5), 398–408. https://doi.org/10.4103/jisp.jisp_92_20

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. *BMC Oral Health*, 20(1), 251. <https://doi.org/10.1186/s12903-020-01208-1>

Khan, M., Javed, F., Haji, Z., & Ghafoor, R. (2024). Comparison of the positional accuracy of robotic guided dental implant placement with static guided and dynamic navigation systems: A systematic review and meta-analysis. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 132(4), 746.e1–746.e8. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.02.015>

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, 359. <https://doi.org/10.1186/s12903-024-04033-y>

Lo Russo, L., Ercoli, C., Guida, L., Merli, M., & Laino, L. (2023). Surgical guides for dental implants: Measurement of the accuracy using a freeware metrology software program. *Journal of Prosthodontic Research*, 67(2), 300–304. https://doi.org/10.2186/jpr.JPR_D_22_00069

Lo Russo, L., Mariani, P., Ercoli, C., Caprio, G., Park, J.-M., Laino, L., et al. (2025). Effects of autoclave sterilization on the dimensional stability of implant surgical guides: A 3D in vitro analysis. *Journal of Prosthodontics*, 1–8. <https://doi.org/10.1111/jopr.14049> 72/75

Ma, F., Wei, T., Du, Y., Wu, B., & Sun, F. (2025). Accuracy of dynamic navigation for immediate and delayed anterior dental implant placement: A retrospective study. *BMC Oral Health*, 25(1), 1858. <https://doi.org/10.1186/s12903-025-07226->

Markiewicz, M., & Nowicki, A. A. (2025). Accuracy of computer-guided dental implant placement: A clinical comparison of three surgical guide types. *Journal of Clinical Medicine*, 14(24), 8652. <https://doi.org/10.3390/jcm14248652>

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. *Dentistry Journal*, 11(6), 150. <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. *Applied Sciences*, 14(24), 11479. <https://doi.org/10.3390/app142411479>

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, 105226. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105226>

Pandey, C., Rokaya, D., Bhattarai, B. P., et al. (2022). Contemporary concepts in osseointegration of dental implants. *International Journal of Dentistry*, 2022, 6170452.

Sadilina, S., Vietor, K., Doliveux, R., Siu, A., Chen, Z., Al-Nawas, B., Mattheos, N., & Pozzi, A. (2025). Beyond accuracy: Clinical outcomes of computer assisted implant surgery. *Clinical and Experimental Dental Research*, 11, e70129. <https://doi.org/10.1002/cre2.70129>

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), 38. <https://doi.org/10.1186/s40729-023-00507-w>

Streichfuss, C., Wolfart, S., & Waltenberger, L. (2025). Influence of bone density and guide protocol on the accuracy of self-cutting implants using static guided implant placement-An in vitro study. *Clinical Oral Implants Research*, 36(10), 1248–1260. <https://doi.org/10.1111/clr.14470>

Tahmaseb, A., Wu, V., Wismeijer, D., Coucke, W., & Evans, C. (2018). The accuracy of static computer-aided implant surgery: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Implants Research*, 29(Suppl. 16), 416–435. <https://doi.org/10.1111/clr.13346>

Tia, M., Guerriero, A. T., Carnevale, A., Fioretti, I., Spagnuolo, G., Sammartino, G., & Gasparro, R. (2025). Positional accuracy of dental implants placed by means of fully guided technique in partially edentulous patients: A retrospective study. *Clinical and Experimental Dental Research*, 11(3), e70144. <https://doi.org/10.1002/cre2.70144>

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., Wang, B., Liu, Y. Y., Luo, Y. L., Wu, Y. Y., Xiang, L., Yang, X. M., Qu, Y. L., Tian, T. R., & Man, Y. (2024). Recent advances in digital technology in implant dentistry. *Journal of Dental Research*, 103(8), 787–799. <https://doi.org/10.1177/00220345241253794>

Werny, J. G., Frank, K., Fan, S., Sagheb, K., Al-Nawas, B., Narh, C. T., & Schiegnitz, E. (2025). Freehand vs. computer-aided implant surgery: A systematic review and meta-analysis-part 1: Accuracy of planned and placed implant position. *International Journal of Implant Dentistry*, 11(1), 35. <https://doi.org/10.1186/s40729-025-00622-w>

Xing, Q., Lin, J., & Lyu, M. (2025). The accuracy of immediate implantation guided by digital templates and potential influencing factors: A systematic review. *International Dental Journal*, 75(2), 439–452. <https://doi.org/10.1016/j.identj.2024.10.010>

Yazigi, C., Chaar, M. S., Busch, R., & Kern, M. (2023). The effect of sterilization on the accuracy and fit of 3D-printed surgical guides. *Materials (Basel, Switzerland)*, 16(15), 5305. <https://doi.org/10.3390/ma16155305>

Yeo, X. H., Fan, S., Chantler, J. G. M., Chow, J., Pimkhaokham, A., & Mattheos, N. (2025). Static-computer assisted implant surgery: Where are we now? *Australian Dental Journal*, 70(Suppl. 1), S129–S145. <https://doi.org/10.1111/adj.70007>

Yeo, X. H., Uei, L. J., Yi, M., Kungsadalpipob, K., Subbalehka, K., Al-Nawas, B., & Mattheos, N. (2025). Computer-assisted implant surgery: Patients' experience and perspectives. *Clinical and Experimental Dental Research*, 11, e70143. <https://doi.org/10.1002/cre2.70143>

Younis, H., Lv, C., Xu, B., Zhou, H., Du, L., Liao, L., Zhao, N., Long, W., Elayah, S. A., Chang, X., & He, L. (2024). Accuracy of dynamic navigation compared to static surgical guides and the freehand approach in implant placement: A prospective clinical study. *Head & Face Medicine*, 20(1), 30. <https://doi.org/10.1186/s13005-024-00433-1>

Zhou, W., Feng, G., Luo, Z., Xu, L., Cao, Y., & Song, K. (2026). Comparison of the accuracy of guided implant surgery between two implant-planning software: A retrospective cohort study. *Frontiers in Oral Health*, 6, 1729521. <https://doi.org/10.3389/froh.2025.1729521> *Bibliografia* 75/75