

# **INSTITUTO UNIVERSITÁRIO EGAS MONIZ**

## **MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA DENTÁRIA**

### **CIRURGIA GUIADA E CIRURGIA NAVEGADA VS CIRURGIA FREE HAND**

Trabalho submetido por

**José João Santos**

para a obtenção do grau de Mestre em Medicina Dentária

**setembro de 2025**



# **INSTITUTO UNIVERSITÁRIO EGAS MONIZ**

## **MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA DENTÁRIA**

### **CIRURGIA GUIADA E CIRURGIA NAVEGADA VS CIRURGIA FREE HAND**

Trabalho submetido por  
**José João Santos**  
para a obtenção do grau de Mestre em Medicina Dentária

Trabalho orientado por  
**Prof. Doutor Ricardo Alves**

**setembro de 2025**



## **AGRADECIMENTOS**

À Egas Moniz School of Health and Science, por me ter proporcionado a oportunidade de realizar o meu sonho, por todo o acompanhamento académico e por realizar grandes histórias inesquecíveis da minha vida.

Ao meu orientador, professor doutor Ricardo Alves, por todo o acompanhamento, decisões e apoio a nível de orientação da tese como todos os ensinamentos técnicos sobre diversas áreas.

Aos meus pais, um especial agradecimento, porque sem eles não seria possível concretizar o meu sonho. Queria agradecer-lhes por toda a educação que me deram, pelo enorme esforço que fizeram, pela dedicação, paciência e acompanhamento que tiveram durante toda a minha jornada universitária.

À Perio Team, por toda a ajuda, pela amizade e por todos os conhecimentos que me transmitiram nestes dois anos.

Aos meus amigos de habitação, que se tornaram nuns verdadeiros irmãos pois criamos e partilhamos inúmeros momentos e aventuras inesquecíveis durante 5 longos anos.

Aos meus amigos, que em 5 anos se tornaram em pessoas muito importantes com a partilha de amizade e amor.

À minha namorada e à sua família, pois houve muitos ensinamentos, muitas partilhas de amizade, amor e muitas aprendizagens. Uma verdadeira família.

Aos funcionários todos desta faculdade no qual tive todo o gosto de partilhar estes 5 anos incríveis e por me terem ajudado na integração da mesma.

À TinTuna que tive o privilégio de criar muito bons momentos e alegrias.



## RESUMO

A implantologia contemporânea tem sido transformada pela integração de tecnologias digitais no planejamento e execução cirúrgica. Esta revisão narrativa visa analisar comparativamente três técnicas de colocação de implantes dentários: técnica convencional *freehand*, cirurgia guiada estática e cirurgia navegada, com ênfase na precisão tridimensional, previsibilidade, tempo operatório, protocolo de carga, curva de aprendizagem e satisfação do paciente. São também exploradas as contribuições da inteligência artificial (IA) e da cirurgia robótica na prática clínica e na formação em implantologia.

A metodologia baseou-se numa revisão narrativa da literatura (2013–2025), incluindo revisões sistemáticas, meta-análises e ensaios clínicos, extraídos de bases de dados como o PubMed, Scopus e Web of Science.

Os dados mostram que as técnicas assistidas por tecnologia, especialmente a cirurgia navegada, oferecem maior precisão (desvios médios  $<0,7$  mm e  $<2^\circ$ ) em relação à técnica convencional (Chen et al., 2025; Wu et al., 2024). A IA reduz o tempo de planejamento e padroniza decisões clínicas com desempenho comparável ao de especialistas (Elgarba et al., 2024). A navegação dinâmica destaca-se também como ferramenta pedagógica, encurtando a curva de aprendizagem e permitindo bons resultados entre iniciantes (Wang et al., 2023).

Conclui-se que a tecnologia em implantologia melhora a precisão cirúrgica, a segurança e a eficácia formativa, representando uma mais-valia para o ensino e a prática clínica moderna.

**Palavras-chave:** Implantologia; Cirurgia Guiada; Cirurgia Navegada; Inteligência Artificial; Robótica; Formação Clínica.



## ABSTRACT

Contemporary implantology has been significantly shaped by the integration of digital technologies into surgical planning and execution. This dissertation offers a comparative analysis of three implant placement techniques—conventional (freehand), static guided surgery, and dynamic navigation—focusing on three-dimensional accuracy, predictability, operative time, loading protocols, learning curve, and patient satisfaction. Additionally, the roles of artificial intelligence (AI) and robotic-assisted surgery in clinical practice and surgical training are explored.

The methodology followed a narrative review of the literature (2013–2025), including systematic reviews, meta-analyses, and clinical trials sourced from PubMed, Scopus, and Web of Science. Inclusion criteria prioritized clinical applicability and methodological rigor.

Findings show that technology-assisted techniques—especially dynamic navigation and robotics—achieve superior accuracy, with mean deviations under 0.7 mm and angular errors below 2°, outperforming conventional methods. AI demonstrated efficiency in reducing planning time and standardizing clinical decisions, with outcomes comparable to those of experienced professionals. Dynamic navigation further emerged as a powerful pedagogical tool, shortening the learning curve and enabling novice clinicians to achieve expert-level performance.

It is concluded that digital technologies in implantology enhance surgical precision, patient safety, and clinical training outcomes, representing a valuable contribution to modern dental education and practice.

**Keywords:** Implantology; Guided Surgery, Dynamic Navigation; Artificial Intelligence; Robotics; Immediate Loading; Clinical Training.



## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>1.1. Contextualização.....</b>	<b>11</b>
<b>1.2. Objetivos.....</b>	<b>14</b>
<b>1.3. Metodologia.....</b>	<b>15</b>
<b>2. DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1. Implantes Dentários: Importância e Impacto na Qualidade de Vida.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2. Perspetiva histórica.....</b>	<b>18</b>
2.2.1. História da reabilitação oral.....	18
2.2.2. Perspetiva histórica das cirurgias com recurso a implantes.....	19
<b>2.3. Avanço tecnológico na colocação de implantes.....</b>	<b>20</b>
<b>2.4. Cirurgia <i>Free Hand</i>.....</b>	<b>21</b>
2.4.1. Indicações e contraindicações.....	21
2.4.2. Etapas da técnica <i>Free Hand</i> .....	22
2.4.2.1. Planeamento pré-operatório.....	22
2.4.2.2. Fase intra-operatória.....	22
2.4.3. Complicações possíveis.....	23
<b>2.5. Cirurgia Guiada.....</b>	<b>24</b>
2.5.1. Indicações e contraindicações.....	24
2.5.2. Etapas da técnica de Cirurgia Guiada.....	24
2.5.2.1. Planeamento pré-operatório.....	24
2.5.2.2. Fase Intra-operatória.....	25
2.5.3. Complicações Possíveis.....	26
<b>2.6. Cirurgia Navegada.....</b>	<b>26</b>
2.6.1. Indicações e contraindicações.....	27
2.6.2. Etapas da técnica de Cirurgia Navegada.....	28
2.6.2.1. Planeamento pré-operatório.....	28
2.6.2.2. Fase Intraoperatória.....	28
2.6.3. Principais Complicações.....	29
<b>2.7. Fase pós-operatória da Cirurgia Guiada, Navegada e <i>Free Hand</i>.....</b>	<b>30</b>

2.8.	Comparação entres as 3 técnicas cirúrgicas.....	31
2.9.	Comparação dos protocolos de carga imediata VS carga convencional ..	33
2.10.	Impacto na Qualidade de Vida e Satisfação do Paciente .....	35
2.11.	Inteligência Artificial em Cirurgia de Implantes Dentários .....	36
2.12.	Robótica em Implantologia .....	37
2.13.	Impacto da Navegação Dinâmica no Ensino e na Aprendizagem em Implantologia .....	38
3.	<i>CONCLUSÃO</i> .....	41
3.1.	Perspetivas futuras .....	42
	<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i> .....	43

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Comparação entre a técnica Free Hand, a Cirurgia Guiada Estática e a Cirurgia Navegada/Dinâmica em implantologia oral. ....	33
--	----



## **LISTA DE ABREVIATURAS**

**CBCT** | tomografia computadorizada de feixe cônico

**SCAIS** | static computer-assisted implant surgery

**DCAIS** | dynamic computer-assisted implant surgery

**OHRQoL** | qualidade de vida relacionada com a saúde oral

**IA** | inteligência artificial



## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. Contextualização**

A implantologia é a especialidade da medicina dentária dedicada à reabilitação de pacientes edêntulos ou parcialmente edêntulos, através da colocação de implantes dentários osteointegrados, com vista a restaurar a função mastigatória, a estética e a qualidade de vida. O conceito central é a osteointegração, que permite a ancoragem estável e previsível dos implantes no osso, de modo a estabelecer uma base biológica para reabilitações protéticas duradouras (Lang, 2019; Tagliareni & Clarkson, 2015). Esta, é atualmente uma das áreas mais dinâmicas da medicina dentária contemporânea, devido à integração de imagens tridimensionais, impressão 3D e inteligência artificial, que permitem planeamento cirúrgico altamente preciso e previsível. A utilização de fluxos digitais permite a integração de modelos faciais e intraorais com imagens de tomografia computadorizada de feixe cónico (CBCT), o que possibilita o planeamento virtual personalizado e a execução cirúrgica com precisão milimétrica, com a consequente redução de erros e riscos intraoperatórios (Chen et al., 2025; Lanis et al., 2024).

O edentulismo compromete significativamente a mastigação, uma vez que conduz à redução da eficiência mastigatória, limitação na escolha alimentar, deterioração do estado nutricional e aumento do risco de fragilidade e morbilidade geral. A perda dentária provoca igualmente o colapso do terço inferior da face, a perda de suporte labial e alterações no perfil, prejudicando a estética facial. A associação entre os fatores mencionados e a dificuldade de fala, bem como a instabilidade das próteses convencionais, tem um impacto negativo na autoestima e na qualidade de vida dos indivíduos, com efeitos adversos na saúde mental, na cognição e na integração social (Hunter et al., 2024). O envelhecimento populacional, em associação com a elevada prevalência de doenças periodontais, lesões de cárie não controlada e trauma, contribui diretamente para o aumento da incidência de edentulismo em faixas etárias mais avançadas. O acréscimo de fatores de risco ao longo da vida, tais como o controlo inadequado de doenças orais, a menor frequência de consultas dentárias, intensifica a perda dentária em idosos, sobretudo entre os mais frágeis e com menor acesso a cuidados preventivos (Leung & Chu, 2022).

Neste âmbito, verificou-se um aumento da procura de soluções reabilitadoras que apresentem funcionalidade, estética e durabilidade. Os implantes dentários estabeleceram-se como uma opção preferencial em relação às próteses removíveis

tradicionais, devido à sua capacidade de restaurar a função mastigatória, otimizar a estabilidade protética, preservar a estrutura óssea alveolar e proporcionar resultados estéticos mais próximos do estado natural dos dentes, com um impacto positivo na qualidade de vida e na autoestima dos pacientes (Duong et al., 2022; Garg & Klineberg, 2022).

Segundo Buser, Sennerby e De Bruyn (2017) e López-Píriz et al. (2019) o desenvolvimento dos implantes dentários modernos só foi possível graças às descobertas de Brånemark sobre a osteointegração na década de 1960, que permitiram a ancoragem estável e previsível dos implantes ao osso, revolucionando a reabilitação oral. Desde então, os progressos alcançados, nomeadamente no desenvolvimento de superfícies cirúrgicas modificadas, técnicas de regeneração óssea e protocolos de carga imediata, ampliaram as indicações e o sucesso clínico dos implantes (Buser, et al., 2017; López-Píriz et al., 2019; Pandey et al., 2022).

A precisão do posicionamento dos implantes é crucial para a estabilidade a longo prazo, a prevenção de danos em estruturas anatómicas vitais, o sucesso protético e a satisfação do paciente. Os desvios angulares e apicais significativos, com frequência observados na técnica *free hand*, elevam o risco de exposição de espirais do implante, proximidade inadequada com o seio maxilar ou nervo alveolar inferior, sendo suscetíveis de resultar em complicações como perda óssea peri-implantar, parestesias e até falha do implante. Adicionalmente, o desalinhamento compromete a emergência protética, o que dificulta a produção de próteses estéticas e funcionais. Além disso, pode gerar sobrecarga biomecânica, com conseqüente redução da longevidade do tratamento (Bover-Ramos et al., 2018).

Com o avanço da tecnologia digital, emergiram duas abordagens que visam otimizar a precisão e a previsibilidade do procedimento: a cirurgia guiada (static computer-assisted implant surgery – SCAIS) e a cirurgia navegada (dynamic computer-assisted implant surgery – DCAIS) (Chen et al., 2025; Lanis et al., 2024).

A cirurgia guiada é um procedimento que envolve a utilização de guias estereolitográficas impressas em 3D, criadas a partir de dados obtidos por CBCT e digitalização intraoral (Chen et al., 2025; Lanis et al., 2024). Estas guias orientam os instrumentos cirúrgicos durante o procedimento, permitindo uma execução fidedigna ao

planeamento virtual, com elevada precisão e menor risco de desvios anatómicos (Chandran K R et al., 2023; Jaemsuwan et al., 2023).

Em contrapartida, a cirurgia navegada utiliza sistemas de rastreamento ótico ou eletromagnético e visualização em tempo real, fornecendo ao cirurgião um retorno contínuo sobre a posição e angulação do implante em relação ao planeamento (Chen et al., 2025; Lanis et al., 2024). Esta tecnologia, inspirada nos sistemas de navegação utilizados em neurocirurgia e ortopedia, representa um avanço significativo em termos de controlo intraoperatório, permitindo adaptações dinâmicas durante a intervenção e reduzindo o risco de desvios indesejados, especialmente em pacientes com anatomia complexa (Bover-Ramos et al., 2018; Chandran K R et al., 2023; Jaemsuwan et al., 2023).

Estudos recentes evidenciaram que a cirurgia guiada e a navegada apresentam uma superioridade em termos de precisão tridimensional em comparação com a técnica *free hand*, demonstrando menores desvios ao nível da região coronal e do eixo do implante (Mahardawi et al., 2025; Takács et al., 2023; Yotpibulwong et al., 2023). Num ensaio clínico randomizado, constatou-se que a cirurgia totalmente guiada exibe um menor desvio angular e apical quando comparada com as abordagens *free hand* e *pilot-drill guided*, o que confirma a elevada fiabilidade da técnica (Mahardawi et al., 2025; Takács et al., 2023).

De forma análoga, a cirurgia navegada demonstrou uma redução significativa dos desvios angulares, inclusive quando utilizada por operadores inexperientes, sugerindo um potencial relevante para o ensino e formação clínica em implantologia (Pimkhaokham et al., 2024; Werny et al., 2025). Estes resultados sugerem que, mesmo em mãos menos experientes, é possível alcançar uma precisão comparável à de cirurgiões experientes, reduzindo a dependência da curva de aprendizagem tradicional (Wang et al., 2023)

Contudo, apesar da maior precisão associada às abordagens digitais, estas não estão isentas de limitações. Os custos elevados, a complexidade técnica aumentada, o tempo de preparação pré-operatória e a necessidade de equipamentos e softwares específicos podem dificultar a sua implementação generalizada, sobretudo em contextos clínicos com recursos limitados (Chen et al., 2025; Jorba-García et al., 2023; Werny et al., 2025).

Além disso, a dependência de software e hardware especializados pode representar uma barreira logística e económica, exigindo formação contínua e aumentando a probabilidade de falhas técnicas (ex. erros de calibração, imprecisão na fabricação de guias, mau funcionamento de sistemas de navegação). A flexibilidade intraoperatória também pode ser comprometida, especialmente na cirurgia guiada estática, que não permite adaptações anatómicas inesperadas, ao passo que a cirurgia navegada dinâmica (DCAIS), embora mais adaptável, apresenta uma curva de aprendizagem mais longa e maior tempo cirúrgico em operadores inexperientes (Jorba-García et al., 2023; Khaohoen et al., 2025)

Embora ainda se encontrem em fase de consolidação, estas abordagens têm vindo a produzir uma transformação significativa na prática clínica quotidiana, ao conferirem maior previsibilidade, segurança e conforto, tanto para o clínico como para o paciente. Contudo, é de suma importância o desenvolvimento de ensaios clínicos longitudinais, com amostras robustas e protocolos padronizados, que permitam avaliar o impacto destas técnicas na longevidade dos implantes, nos resultados funcionais e na relação custo-benefício. Num horizonte temporal de médio prazo, antevê-se uma integração progressiva com sistemas de inteligência artificial e tecnologias robóticas, o que poderá potenciar uma maior precisão operatória, reduzir a variabilidade interindividual e democratizar o acesso a intervenções cirúrgicas complexas com elevada fiabilidade.

## 1.2. Objetivos

O objetivo geral foi avaliar comparativamente a precisão, segurança, eficiência operatória e aplicabilidade clínica das técnicas de cirurgia guiada, cirurgia navegada e cirurgia *free hand* na colocação de implantes dentários, com base na evidência científica disponível.

Especificamente:

- Descrever e caracterizar os princípios técnicos, indicações, limitações e fluxos operatórios das três abordagens: *free hand*, guiada e navegada.
- Comparar a precisão tridimensional (desvios angulares, apicais e coronais) entre as técnicas.
- Avaliar o tempo operatório, taxa de complicações e previsibilidade protética associadas a cada técnica.

- Discutir os fatores económicos, logísticos e tecnológicos que influenciam a preferência de cada método em ambiente clínico real.
- Identificar lacunas na literatura e propor linhas de investigação futuras que possam contribuir para a otimização das abordagens assistidas por computador.

### **1.3. Metodologia**

A presente revisão narrativa baseia-se na pesquisa bibliográfica que foi realizada recorrendo às bases de dados PubMed, Scopus, Cochrane, Web of Science e Google Scholar.

Foram incluídos artigos científicos publicados em português, inglês e espanhol, que abordassem, direta ou indiretamente, a comparação entre as técnicas referidas. A pesquisa utilizou palavras-chave e descritores livres, combinados com operadores booleanos (AND, OR), incluindo os seguintes termos: “implantes dentários”, “cirurgia guiada”, “cirurgia navegada”, “cirurgia freehand”. Foram incluídos estudos que apresentassem dados sobre precisão, técnica cirúrgica ou comparação entre abordagens. Foram excluídos artigos duplicados, estudos não relacionados com implantologia, e, artigos que não estavam nas línguas anteriormente referidas. Os estudos selecionados foram analisados qualitativamente e os dados extraídos foram organizados e discutidos nos capítulos seguintes.



## **2. DESENVOLVIMENTO**

### **2.1. Implantes Dentários: Importância e Impacto na Qualidade de Vida**

A perda dentária, total ou parcial, continua a ser extremamente prevalente a nível mundial, e afeta não só populações envelhecidas, mas também adultos jovens, em consequência de traumatismos, lesões de cárie avançadas ou doenças periodontais. Esta condição, conhecida como edentulismo, não é apenas uma alteração estética, mas uma condição patológica complexa com implicações funcionais, psicológicas e sociais profundas. A ausência de dentes pode afetar a mastigação, causar alterações fonéticas, provocar a perda de suporte labial e o colapso da dimensão vertical, resultando num envelhecimento precoce da aparência facial, bem como numa possível diminuição da autoestima e da qualidade de vida (Garg & Klineberg, 2022; Jabr et al., 2024; Srinivasan et al., 2023).

Neste contexto, os implantes dentários afirmam-se como uma solução de excelência para a reabilitação oral. A sua introdução revolucionou a prática da medicina dentária, uma vez que proporciona aos pacientes uma alternativa fixa, funcional e esteticamente satisfatória às próteses removíveis convencionais, o que resulta numa melhoria significativa da qualidade de vida relacionada com a saúde oral.

A importância dos implantes dentários reside não apenas na sua função reabilitadora, mas também no seu impacto global na saúde e bem-estar do paciente. Estudos como os de Duong et al. (2022), Fillion et al. (2013), Garg e Klineberg (2022), Nickenig et al. (2016, 2024) e Reissmann et al. (2017) confirmam que a reabilitação com implantes dentários proporciona melhorias clínicas, funcionais e psicossociais substanciais, nomeadamente uma diminuição dos *scores* de impacto negativo na qualidade de vida relacionada com a saúde oral (OHRQoL), sobretudo em pacientes com edentulismo total. Os benefícios incluem melhorias significativas na mastigação, estabilidade protética, estética facial, conforto funcional e autoestima, que se revelam consistentes ao longo do tempo e em diferentes contextos clínicos. Estes resultados apoiam o consenso crescente de que a terapia com implantes dentários deve ser preferida na reabilitação oral moderna de pacientes edêntulos, sempre que clinicamente viável e indicado.

Além disso, após a extração dentária, ocorre uma reabsorção fisiológica do osso alveolar, devido à ausência do estímulo funcional transmitido pelas raízes dentárias. Os

implantes dentários ajudam a prevenir em parte essa reabsorção óssea, ao restabelecerem a transmissão das cargas de mastigação ao osso, o que promove um estímulo mecânico que favorece a manutenção do volume ósseo, sobretudo nas regiões onde os implantes são instalados e carregados funcionalmente (Alrajhi, Askar, Habib, & Elsyad, 2020).

Adicionalmente, os implantes possibilitam um planeamento mais personalizado e adaptado às necessidades e expectativas de cada paciente, o que contribui para uma abordagem mais centrada na pessoa. Ao combinarem tecnologia, biocompatibilidade e durabilidade, os implantes dentários tornaram-se a pedra angular da reabilitação oral contemporânea e a sua aplicação continua a aumentar à medida que as técnicas cirúrgicas se tornam mais precisas e menos invasivas (Chen et al., 2025; Lanis et al., 2024; Wu, Chen, Kong, & Liu, 2023).

Nos últimos anos, tem-se assistido a um aumento exponencial da procura de soluções de reabilitação sobre implantes, impulsionado não só pelo envelhecimento da população, mas também pela maior acessibilidade aos tratamentos, pelo progresso tecnológico e por uma crescente atenção à estética e à funcionalidade oral como componentes essenciais da saúde geral. Neste contexto, a eficácia e a previsibilidade dos implantes, quando integrados em planos de tratamento bem estruturados, fazem deles o padrão de excelência da medicina dentária reabilitadora do século XXI (Duong et al., 2022; Lang, 2019; Srinivasan et al., 2023).

## **2.2. Perspetiva histórica**

### **2.2.1. História da reabilitação oral**

A reabilitação oral, enquanto prática clínica destinada a restaurar a função mastigatória, fonética e estética, tem raízes que remontam à antiguidade, com registos de substituição de dentes perdidos por materiais como marfim, ossos e dentes de animais em civilizações como a egípcia, a etrusca e a romana. O uso de fios de ouro e próteses dentárias em ouro também foi descrito, sendo que os etruscos se distinguiram pelo uso de bandas de ouro soldadas em anéis para fixação de dentes artificiais, enquanto outras culturas recorriam a fios de ouro (Loevy & Kowitz, 1997).

Esta história acompanha a evolução da Medicina Dentária desde as suas origens, com avanços notáveis tanto em conceitos teóricos como em técnicas práticas. Num

primeiro momento, o conceito de reabilitação oral encontrava-se limitado à substituição de dentes perdidos por próteses removíveis, que visavam restaurar funções básicas de mastigação e estética. Todavia, estas próteses apresentavam limitações funcionais e de aceitação psicossocial (Xie, Ding, & Yang, 2015).

No século XVIII, verificaram-se progressos no domínio das próteses de porcelana e das bases de metais preciosos (Powers, 2006). O século XIX foi marcado pela popularização das próteses removíveis, com a introdução de minerais vulcânicos como base, o que tornou o tratamento mais acessível (Stephens, 2023).

No século XX, a reabilitação oral evoluiu com o desenvolvimento de materiais acrílicos e técnicas de moldagem mais precisas, que permitiram a produção de próteses totais e parciais removíveis com melhor adaptação e estética. A partir da década de 1950, as próteses fixas (pontes e coroas) adquiriram maior proeminência, especialmente com o desenvolvimento dos cimentos dentários e das ligas metálicas. O conceito de reabilitação oral evoluiu para abranger não apenas a restauração da função mastigatória, mas também a estética, a fonética e o bem-estar psicossocial do paciente (Christensen, 2004; Franks, 1976).

Carlsson & Omar (2010) destacam que, mesmo com o surgimento de novas tecnologias, as próteses removíveis e fixas convencionais continuam a ser opções fundamentais, especialmente em contextos de limitação socioeconómica ou contra-indicações para tratamentos mais avançados. A reabilitação oral, portanto, evoluiu de soluções elementares para abordagens integradas e multidisciplinares, mantendo-se, contudo, o foco na restauração da função e qualidade de vida do paciente.

### **2.2.2. Perspetiva histórica das cirurgias com recurso a implantes**

A história dos procedimentos cirúrgicos relacionados com implantes dentários pode ser segmentada em marcos evolutivos distintos. As primeiras referências a tentativas de implantes remontam a civilizações antigas, contudo, os avanços clínicos substanciais ocorreram no século XX. Até à década de 1960, os implantes subperiósticos e laminares apresentavam resultados clínicos inconsistentes e uma elevada taxa de insucesso, devido à ausência de integração óssea previsível (Buser, et al., 2017; Block, 2018; Loginoff, Majos, & Elgalal, 2024).

O grande marco ocorreu na década de 1960, com a descrição do fenômeno da osteointegração por Per-Ingvar Brånemark, que envolveu a utilização de implantes de titânio. Este marco estabeleceu os fundamentos científicos para o sucesso dos implantes intraósseos modernos. A partir dos anos 1980, a técnica de Brånemark foi amplamente difundida, com protocolos cirúrgicos padronizados e taxas de sucesso superiores a 90%. Durante as décadas de 1990 e 2000, verificaram-se progressos significativos em técnicas de regeneração óssea guiada, elevação de seio maxilar e enxertos, resultando no alargamento das indicações cirúrgicas para pacientes com perda óssea substancial (Buser, et al., 2017; Chong, Chu, Dam, & Ong, 1999; Lang, 2019; López-Píriz et al., 2019).

Segundo López-Píriz et al. (2019) e Saito, Aichelmann-Reidy e Oates (2020) mais recentemente, a evolução dos desenhos de superfície dos implantes (superfícies moderadamente rugosas) permitiu protocolos de carga imediata e instalação precoce, além de uma melhoria da previsibilidade da osteointegração. O desenvolvimento da tomografia computadorizada de feixe cônico (CBCT) e do planejamento digital tridimensional revolucionou o planejamento e a execução cirúrgica, tornando viável a cirurgia guiada e as técnicas minimamente invasivas, como a cirurgia sem retalho (D'haese et al., 2017; Saeidi Pour et al., 2019).

Atualmente, a cirurgia de implantes é um procedimento que se caracteriza por uma abordagem personalizada, integração de tecnologias digitais e foco em resultados estéticos e funcionais. A manutenção dos tecidos peri-implantares e a prevenção de complicações, como a peri-implantite, são aspectos que continuam a ser alvo de preocupação (Di Gianfilippo et al., 2022).

### **2.3. Avanço tecnológico na colocação de implantes**

Os progressos tecnológicos mais recentes no âmbito da colocação de implantes dentários concentram-se principalmente na integração de fluxos digitais, cirurgia guiada por computador e robótica. A utilização de CBCT em associação com programas de planejamento virtual permite a obtenção de uma localização tridimensional precisa dos implantes, através de uma abordagem proteticamente guiada, que proporciona uma maior previsibilidade estética e funcional (Buser, et al., 2017; Chen et al., 2025).

A cirurgia guiada pode ser realizada por meio de guias estáticas, ou por navegação dinâmica (D'haese et al., 2017; Lanis et al., 2024). Mais recentemente, a cirurgia robótica (RAIS) tem sido introduzida, oferecendo orientação visual e tátil durante o procedimento, com potencial para maior precisão e padronização (Lanis et al., 2024; Rawal, 2022).

Ademais, observaram-se progressos em superfícies de implantes (moderadamente rugosas), protocolos de carga imediata, técnicas minimamente invasivas (cirurgia sem retalho) e utilização de materiais alternativos, como a zircônia, visando aprimorar a estética e reduzir complicações peri-implantares (Buser, et al., 2017; López-Píriz et al., 2019). O fluxo digital facilita a comunicação entre diferentes especialidades e a personalização do tratamento, reduzindo erros e otimizando resultados (Chen et al., 2025).

Estas inovações refletem uma tendência para uma maior precisão, previsibilidade e segurança na cirurgia de implantes, com um impacto positivo nos desfechos clínicos e na experiência do paciente.

## **2.4. Cirurgia *Free Hand***

A técnica *free hand* para cirurgia de implantes dentários consiste na instalação do implante sem o recurso a guias cirúrgicas físicas ou sistemas computadorizados. O procedimento assenta num planeamento clínico e imagiológico prévio, idealmente com CBCT, permitindo avaliar a disponibilidade óssea, a localização de estruturas anatómicas vitais e as condições protéticas. A marcação do local de implante é efetuada intraoralmente, com base em referências anatómicas, tais como os dentes adjacentes (Tagliareni & Clarkson, 2015).

### **2.4.1. Indicações e contraindicações**

As indicações para a utilização da técnica *free hand* na instalação intraoperatória de implantes dentários incluem casos unitários em áreas com dentes adjacentes, presença de referências anatómicas claras, boa disponibilidade óssea e experiência significativa do cirurgião. A precisão é maior em casos de implantes únicos e melhora à medida que o médico dentista adquire experiência. As situações de extração e implante imediato também podem ser adequadas, desde que haja estabilidade primária e uma anatomia favorável (Choi et al., 2017; Werny et al., 2025; Smitkarn et al., 2019).

As contraindicações incluem casos de múltiplos implantes em áreas edêntulas extensas, ausência de referências anatômicas (como em maxilares totalmente edêntulos), proximidade de estruturas anatômicas críticas (seio maxilar, nervo alveolar inferior), anatomia óssea complexa, necessidade de elevada precisão estética ou funcional e inexperiência do médico dentista. Nestes casos, as técnicas guiadas (estáticas ou dinâmicas) são preferíveis, devido à maior precisão e segurança (Choi et al., 2017; Werny et al., 2025; Chen et al., 2025).

## **2.4.2. Etapas da técnica *Free Hand***

### **2.4.2.1. Planeamento pré-operatório**

No planeamento pré-operatório da técnica *free hand*, são incluídas as seguintes etapas fundamentais: uma anamnese, uma avaliação clínica detalhada, uma análise de exames de imagem convencionais (radiografias panorâmicas e periapicais) e, quando indicado, um CBCT. O CBCT é particularmente aconselhada em casos complexos, uma vez que possibilita a visualização tridimensional do rebordo alveolar, a identificação precisa de estruturas anatômicas críticas e a mensuração do volume ósseo, o que otimiza a segurança e a previsibilidade do procedimento (Ganz, 2011; Jacobs & Quirynen, 2014; Omami & Al Yafi, 2019).

A seleção do local, diâmetro e comprimento do implante é efetuada com base na análise das imagens obtidas, tendo em consideração a relação com os dentes adjacentes, o espaço protético, a distância de estruturas vitais (seio maxilar, nervo alveolar inferior) e a necessidade de enxertos ósseos. Em situações rotineiras, as radiografias convencionais podem ser suficientes, contudo, a CBCT aumenta a precisão do planeamento, sobretudo em áreas de anatomia complexa ou reabilitações múltiplas (Deeb et al., 2017; Ganz, 2011).

### **2.4.2.2. Fase intra-operatória**

Os passos fundamentais da fase intraoperatória da técnica *free hand* para instalação de implantes dentários compreendem: a aplicação de anestesia local, a incisão e o descolamento do retalho para exposição óssea, a marcação visual do local de inserção, a perfuração sequencial com brocas de diâmetro progressivo sob irrigação, o controlo

visual e tátil da direção, profundidade e angulação, a instalação do implante e a sutura do retalho (Choi et al., 2017; Tang et al., 2019).

Os fatores que influenciam a precisão e a segurança do procedimento podem ser divididos em três categorias: a presença de dentes adjacentes, que servem como referência anatômica e reduzem os desvios; a localização do implante, que pode ser quadrante e região; e a experiência do cirurgião, pois a precisão do posicionamento tridimensional do implante depende da avaliação visual e tátil intraoperatória. Médicos dentistas experientes apresentam menor margem de erro, especialmente em casos unitários e com referências anatômicas claras, enquanto casos edêntulos extensos ou múltiplos implantes apresentam maior risco de desvios e podem beneficiar de técnicas guiadas (Choi et al., 2017). A complexidade do caso é outro fator a ter em conta. A precisão é superior em casos unitários com dentes adjacentes e inferior em áreas edêntulas extensas ou múltiplos implantes (Che net al., 2023; Gargallo-Albiol et al., 2020; Smitkarn et al., 2019).

### **2.4.3. Complicações possíveis**

Segundo Arisan et al. (2013), Wanner et al. (2013) e Patel e Clarkson (2021) as possíveis complicações associadas à técnica *free hand* para a instalação de implantes dentários incluem, durante a fase intraoperatória, desvios no posicionamento do implante (incluindo má posição tridimensional, contacto inadequado com os dentes adjacentes, distância insuficiente entre implantes e falta de paralelismo), perfuração de estruturas anatômicas críticas (como o nervo alveolar inferior ou o seio maxilar), hemorragia excessiva e, em casos raros, fratura da mandíbula ou deslocação do implante para o seio maxilar.

No período pós-operatório, as complicações mais comuns são dor, edema, hemorragia, infecção local (incluindo abscesso e deiscência do retalho), parestesia, falha precoce do implante e, a longo prazo, mucosite e peri-implantite. A incidência de complicações biológicas e mecânicas é semelhante à observada em técnicas guiadas, no entanto, a taxa de erros de posicionamento é significativamente maior na técnica *free hand*, podendo afetar o resultado estético e funcional, sobretudo em casos complexos (Askar et al., 2019; Patel & Clarkson, 2021; Yogui et al., 2021).

## **2.5. Cirurgia Guiada**

A cirurgia guiada em implantologia é definida como a colocação de implantes dentários utilizando guias cirúrgicas físicas (estáticas) ou sistemas de navegação computadorizada (dinâmicos), baseados em planejamento virtual pré-operatório com integração de CBCT e modelos digitais. A guia cirúrgica transfere com precisão o planejamento tridimensional para o campo operatório, orientando a posição, angulação e profundidade do implante durante a osteotomia e a instalação (D’haese et al., 2017; Chen et al., 2025).

### **2.5.1. Indicações e contraindicações**

As indicações para a utilização da cirurgia guiada estática em implantologia incluem casos em que a precisão tridimensional da colocação do implante é crítica, por exemplo, em áreas estéticas, na proximidade de estruturas anatómicas vitais, em reabilitações múltiplas, em pacientes totalmente edêntulos, quando se pretende uma cirurgia minimamente invasiva (sem abertura de retalho) ou quando se pretende otimizar o planejamento protético e a previsibilidade do resultado. A cirurgia guiada estática também é indicada para facilitar a execução por profissionais menos experientes e para permitir protocolos de carga imediata em situações selecionadas (Chen et al., 2025; Chackartchi et al., 2022; D’haese et al., 2017).

As contraindicações incluem limitações de abertura bucal que impeçam o posicionamento correto do guia, rebordos ósseos muito irregulares ou com volume ósseo insuficiente para a estabilização da guia, mobilidade excessiva dos tecidos de suporte (mucosa ou dentes), presença de infecção ativa no local e situações em que o custo, o tempo de preparação ou o acesso à tecnologia inviabilizem a utilização do método. Além disso, a cirurgia guiada estática pode não ser a opção mais adequada em casos que requeiram uma adaptação intraoperatória significativa, dado que a flexibilidade é limitada em comparação com a técnica *free hand* (Chen et al., 2025; Chackartchi et al., 2022; D’haese et al., 2017).

### **2.5.2. Etapas da técnica de Cirurgia Guiada**

#### **2.5.2.1. Planejamento pré-operatório**

Os passos recomendados antes da cirurgia de implantes dentários guiada por computador incluem a obtenção de imagens tridimensionais de alta resolução,

preferencialmente CBCT, bem como o scaneamento intraoral ou a digitalização de modelos para o registo da anatomia dentária e gengival. Estes dados são integrados em programas informáticos de planeamento virtual, que permitem o posicionamento tridimensional do implante de forma proteticamente guiada, tendo em conta o volume ósseo, as estruturas anatómicas críticas e os requisitos protéticos futuros (D'haese et al., 2017; Chackartchi, Romanos, Parkanyi, Schwarz, & Sculean, 2022; Tatakis, Chien, & Parashis, 2019).

O planeamento é revisto e aprovado pelo médico dentista que vai operar e, quando necessário pelo protésico. Após validação, é confeccionada uma guia cirúrgica física (estática) por impressão 3D ou fresagem CAD/CAM. A guia é testada para verificar a sua adaptação e estabilidade antes da cirurgia e é preparado um kit cirúrgico específico, conforme o sistema de implante e o protocolo da guia (Gargallo-Albiol, Barootchi, Marqués-Guasch, & Wang, 2020; Alevizakos, Mitov, Stoetzer, & von See, 2019).

#### **2.5.2.2. Fase Intra-operatória**

Os passos intraoperatórios da cirurgia guiada estática para implantes dentários começam com a verificação da adaptação e estabilidade da guia cirúrgica na arcada do paciente, garantindo que não haja mobilidade nem interferências. A guia, previamente confeccionada com base no planeamento virtual, é posicionada e fixada, podendo ser suportada por dentes, mucosa ou osso, conforme o caso clínico. A sequência de perfuração óssea é então realizada através dos cilindros da guia, utilizando brocas específicas e limitadores de profundidade, de acordo com o protocolo do sistema do implante e o planeamento digital, garantindo o controlo da direção, angulação e profundidade da osteotomia (Chen et al., 2025; D'haese et al., 2017; Vercruyssen et al., 2014).

Após a preparação da base óssea, o implante é instalado com a guia ainda em posição (cirurgia totalmente guiada) ou, noutros protocolos, após a sua remoção (cirurgia parcialmente guiada). O controlo visual e tátil é limitado, sendo fundamental seguir rigorosamente a sequência das brocas e a utilização dos limitadores para evitar desvios. O procedimento pode ser realizado com ou sem levantamento de retalho, consoante o planeamento e o tipo de guia. No final, verifica-se a estabilidade primária do implante e, se indicado, procede-se à instalação de componentes protéticos provisórios (Chen et al., 2025; D'haese et al., 2017; Vercruyssen et al., 2014).

A literatura demonstra que a cirurgia guiada estática reduz significativamente os desvios tridimensionais do implante em relação ao planejado, em comparação com a técnica *free hand*, especialmente em termos de precisão na plataforma, ápice e angulação, sendo recomendada em casos que exigem alta previsibilidade e segurança (Chandran K R et al., 2023; Chen et al., 2025; Gargallo-Albiol et al., 2020).

### **2.5.3. Complicações Possíveis**

As possíveis complicações inerentes à cirurgia guiada estática são, de um modo geral, análogas às observadas na técnica convencional *free hand*, incluindo complicações de natureza biológica (infecção, abertura do retalho, falha de osteointegração) e mecânica (fratura de componentes, afrouxamento de parafusos). Não se observam discrepâncias substanciais na incidência de complicações biológicas ou mecânicas, perda óssea marginal ou taxa de sobrevivência do implante entre as duas técnicas, conforme demonstrado em revisões sistemáticas e meta-análises de ensaios clínicos randomizados como os de Tattan et al. (2020) e Yogui et al. (2021).

A principal distinção reside na exatidão do posicionamento do implante. A técnica cirúrgica com guia estática, quando comparada com a técnica *free hand*, reduz significativamente o risco de complicações associadas ao mau posicionamento, tais como o contacto inadequado com dentes adjacentes, a distância inter-implantar insuficiente, a falta de paralelismo e o risco de lesão de estruturas anatómicas críticas (Chandran K R et al., 2023; Arisan et al., 2013). Não obstante, a cirurgia guiada estática pode acarretar complicações específicas, tais como falha de adaptação da guia, limitação de abertura bucal, dificuldade de irrigação adequada durante a perfuração e a acumulação de erros em cada etapa do fluxo digital. Se não forem rigorosamente controladas, estas complicações podem ter um impacto negativo no resultado final (Tatakis et al., 2019; Mozer, 2020).

## **2.6. Cirurgia Navegada**

A cirurgia navegada em medicina dentária, também conhecida como cirurgia guiada dinâmica, é um campo que envolve a aplicação de tecnologias digitais, tais como a navegação dinâmica, a realidade aumentada e os sistemas computadorizados, para planejamento e execução precisa de procedimentos cirúrgicos. Esta abordagem tem vindo

a ser extensivamente aplicada em implantologia, cirurgia endodôntica e reabilitação oral, possibilitando uma maior precisão na colocação de implantes, a minimização de complicações e a realização de procedimentos minimamente invasivos (Landaeta-Quinones, Hernandez, & Zarroug, 2018; D'haese et al., 2017; Mai, Dam, & Lee, 2023).

No âmbito da implantologia, a navegação pode assumir uma conformação estática, com guias cirúrgicas fundamentadas em planeamento virtual, ou dinâmica, com sistemas de rastreamento em tempo real. A navegação dinâmica possibilita ajustes intraoperatórios e uma maior flexibilidade, revelando-se especialmente útil em casos complexos ou em regiões anatómicas desafiadoras (D'haese et al., 2017; Ewers et al., 2005; Ng, Ho, & Wexler, 2005; Lopes, de Araújo Nobre, & Santos, 2020).

### **2.6.1. Indicações e contraindicações**

As indicações para a realização de cirurgia navegada em medicina dentária incluem procedimentos que exigem elevada precisão anatômica, como a colocação de implantes em áreas com proximidade a estruturas críticas (nervo alveolar inferior, seio maxilar), reconstrução de defeitos ósseos, cirurgia ortognática, tratamento de fraturas complexas, remoção de corpos estranhos, ressecção de tumores e reconstrução orbitária. A navegação é especialmente aconselhada em casos de anatomia alterada, ausência de marcos anatómicos ou quando o acesso cirúrgico é limitado, uma vez que permite um planeamento tridimensional e uma execução em tempo real, aumentando a segurança e a previsibilidade (Landaeta-Quinones et al., 2018; Azarmehr et al., 2017; Collyer, 2010).

Já Collyer (2010) e Ewers et al. (2005) afirmam que as contraindicações relativas incluem situações em que não é possível obter imagens de alta qualidade para o planeamento (por exemplo, pacientes com contraindicação a radiações ionizantes), movimentação intraoperatória significativa dos tecidos que comprometa a precisão do registo, impossibilidade de fixação de marcadores de referência, ou quando o custo e a complexidade técnica não justificam o benefício clínico esperado. Adicionalmente, a curva de aprendizagem e a necessidade de infraestruturas tecnológicas adequadas podem limitar a sua utilização em ambientes com recursos limitados.

A decisão relativa à utilização da navegação deve sempre ponderar o equilíbrio entre o benefício clínico esperado e o investimento técnico e financeiro, sendo mais

indicada em procedimentos de maior complexidade ou risco anatômico (Landaeta-Quinones et al. 2018; Azarmehr et al., 2017).

## **2.6.2. Etapas da técnica de Cirurgia Navegada**

### **2.6.2.1. Planeamento pré-operatório**

No âmbito da fase pré-operatória da cirurgia navegada em medicina dentária, é imperativo considerar os passos-chave e as respetivas considerações, nomeadamente:

**Seleção do paciente:** A navegação é recomendada para procedimentos que requerem alta precisão, como a colocação de implantes próximos a estruturas anatómicas críticas, anatomia alterada ou acesso cirúrgico restrito. Os pacientes devem ser avaliados quanto à sua capacidade de permanecer imóveis durante a aquisição de imagens e o procedimento em si, bem como quanto à ausência de contraindicações para os exames de imagem necessários (D'haese et al., 2017; Ewers et al., 2005).

**Exigências imagiológicas:** É fundamental obter imagens tridimensionais de alta resolução. Estas imagens são, habitualmente, obtidas por CBCT ou, em protocolos específicos, por ressonância magnética. A qualidade da imagem é um fator crucial para o sucesso do planeamento virtual e da navegação. Em determinadas situações, a utilização de marcadores de referência durante o processo de aquisição de imagens pode ser obrigatória para a subsequente realização de registos e calibrações (Pinter et al., 2022; Leontiev et al., 2022).

**Protocolos de planeamento:** O planeamento virtual envolve a segmentação das imagens, a identificação de estruturas anatómicas relevantes e a definição da posição ideal dos implantes ou do trajeto cirúrgico. Esta definição é efetuada tendo em consideração os requisitos protéticos e as limitações anatómicas. O software de navegação possibilita a simulação do procedimento e a exportação de dados para guias cirúrgicas (estáticas) ou para sistemas de navegação dinâmica. A calibração do sistema e o registo de imagem do paciente constituem etapas críticas para garantir a precisão intraoperatória (Pinter et al., 2022; Leontiev et al., 2022).

### **2.6.2.2. Fase Intraoperatória**

Durante o período intraoperatório da intervenção cirúrgica assistida por tecnologia de navegação em medicina dentária, os passos fundamentais envolvem a

calibração e o registo do sistema de navegação, a fixação dos marcadores de referência ao paciente ou ao campo operatório e a verificação da correspondência entre o planeamento virtual e a anatomia real. A navegação dinâmica, por sua vez, utiliza sensores óticos ou eletromagnéticos para rastrear, em tempo real, a posição dos instrumentos cirúrgicos em relação ao paciente, exibindo continuamente a trajetória planeada e a posição do instrumento na tela do sistema, o que permite ajustes imediatos durante a execução do procedimento (Pinter et al., 2022; Matvijenko & Borusevičius, 2025).

A precisão do procedimento está condicionada à realização de uma calibração inicial correta, à estabilidade dos marcadores e à ausência de movimentação significativa do paciente. O médico dentista opera com base num plano virtual, que lhe permite visualizar em tempo real a profundidade, a angulação e a posição do instrumento, minimizando os desvios e reduzindo o risco de lesão a estruturas críticas. A navegação é especialmente útil em casos de anatomia complexa ou acesso restrito, conforme indicado na fase pré-operatória (Azarmehr et al., 2017).

No final do procedimento, a precisão pode ser avaliada através da comparação entre o planeado e o obtido, geralmente por meio de imagens pós-operatórias. A literatura demonstra que a navegação dinâmica reduz significativamente os desvios em relação à técnica *free hand*, sendo comparável à cirurgia guiada estática, desde que os protocolos de calibração e registo sejam rigorosamente seguidos (Pinter et al., 2022; Matvijenko & Borusevičius, 2025).

### **2.6.3. Principais Complicações**

As principais complicações associadas à cirurgia navegada em implantologia incluem:

Mal posicionamento do implante: Apesar de a navegação dinâmica aumentar a precisão, ainda podem ocorrer desvios na posição, profundidade e angulação do implante, especialmente se houver erros de calibração, fusão de imagens ou falhas técnicas durante o procedimento. Estes desvios podem ultrapassar 1–2 mm e até 8° de angulação em casos extremos, conduzindo a risco de dano em estruturas anatómicas adjacentes, como nervos ou seio maxilar (Wei et al., 2021; Kang et al., 2024; Block, 2023; Matvijenko & Borusevičius, 2025).

Falhas técnicas do sistema de navegação: Podem ocorrer eventos adversos relacionados com o equipamento, como perda de rastreamento, problemas de calibração ou falhas de software, que interrompem o procedimento ou resultam em posicionamento incorreto do implante. Estes eventos requerem atenção imediata e podem, em casos raros, levar à falha do implante (Block, 2023; Wu et al., 2022).

Complicações intraoperatórias: Incluem perfuração da cortical óssea, exposição de raízes adjacentes e lesão de nervos ou vasos, sobretudo quando há acumulação de erros durante o planeamento digital, a fusão de imagens ou a execução cirúrgica (Wu et al., 2022; Tatakis et al., 2019; Block, 2023).

Falha do implante: Apesar de a taxa de falha ser baixa (cerca de 1%), esta pode ocorrer devido a mal posicionamento, infeção ou problemas mecânicos associados à utilização inadequada do sistema de navegação (Wu et al., 2022; Pellegrino et al., 2021; Aghaloo et al., 2023).

Dependência da curva de aprendizagem: A precisão e a segurança da cirurgia navegada dependem fortemente da experiência do operador. Erros humanos, como má calibração ou utilização inadequada do sistema, aumentam o risco de complicações (Block, 2023; Matvijenko & Borusevičius, 2025; Tatakis et al., 2019).

## **2.7. Fase pós-operatória da Cirurgia Guiada, Navegada e *Free Hand***

Os pontos fundamentais da fase subsequente à intervenção cirúrgica, no âmbito da técnica dos três tipos cirúrgicos para colocação de implantes, abrangem recomendações de cuidados, possíveis complicações e protocolos de acompanhamento.

Os cuidados recomendados incluem a administração de analgésicos adequados (paracetamol ou AINEs, conforme a tolerância do paciente e a ausência de contraindicações), uma higiene oral rigorosa com escovagem suave e o uso de antissépticos orais (como a clorexidina a 0,12% por 7 a 14 dias), a restrição de atividades físicas intensas nas primeiras 48 a 72 horas, a aplicação de gelo local nas primeiras horas para controlo do edema e a ingestão de uma dieta líquida e fria nas primeiras 24 a 48 horas. A administração de antibióticos profiláticos é recomendada em situações de risco

aumentado, embora não seja uma prática padrão para todos os pacientes (Bryce, Bomfim, & Bassi, 2014<sup>a</sup>; Bryce, Bomfim, & Bassi, 2014b).

O acompanhamento pós-operatório deve incluir uma reavaliação clínica entre os 7 e os 10 dias, para remoção das suturas (se aplicável) e monitorização da cicatrização. Adicionalmente, devem ser realizadas avaliações consecutivas para deteção precoce de complicações e confirmação da osteointegração antes da reabilitação protética. O acompanhamento radiográfico é recomendado para monitorizar a estabilidade óssea peri-implantar (Askar et al., 2019; Camps-Font et al., 2015; Patel & Clarkson, 2021).

## **2.8. Comparação entres as 3 técnicas cirúrgicas**

A análise comparativa entre as diversas abordagens cirúrgicas na implantologia, nomeadamente a técnica *free hand*, a cirurgia guiada estática e a navegação dinâmica, possibilita a compreensão dos detalhes em termos de precisão, custo, tempo operatório, eficácia e recuperação pós-operatória, aspetos fundamentais na seleção do protocolo mais adequado para cada caso clínico.

A técnica *free hand* é caracterizada pela sua acessibilidade e rapidez. O tempo cirúrgico é, de um modo geral, mais curto, uma vez que não há a colocação de guias ou calibração de sistemas. Esta circunstância torna-a ideal para casos simples e com boas referências anatómicas (Wang et al., 2023).

No entanto, apresenta uma maior variabilidade no posicionamento tridimensional dos implantes. Os estudos demonstram uma média de desvios de 1,1–1,3 mm na plataforma, 1,7–2,1 mm no ápice e 6–7° de desvio angular. Estes dados evidenciam um risco aumentado do mau posicionamento e complicações, especialmente em pacientes edêntulos (Werny et al., 2025; Jorba-García et al., 2023).

Por outro lado, a cirurgia guiada estática permite uma elevada precisão, sobretudo no controlo do desvio coronal. A utilização de guias estereolitográficas planeadas digitalmente permite a transferência com fidelidade do plano virtual para o campo operatório, reduzindo os erros (Shi et al., 2025). Apesar da celeridade intrínseca do procedimento, o período dedicado ao planeamento e fabrico da guia é substancial. Apresenta uma flexibilidade intraoperatória reduzida, sendo mais suscetível a variações

anatômicas inesperadas. Os custos, associados à aquisição de CBCT, software e fabrico da guia são moderados (Khaohoen et al., 2025; Kang et al., 2024).

A cirurgia navegada/dinâmica, tem uma maior flexibilidade intra-operatória, o que se torna numa das vantagens deste sistema. Este sistema proporciona benefícios em desvios axiais e angulares, facultando a possibilidade de ajustar o trajeto em tempo real com base na imagem em tempo real (Yu et al., 2023). Esta é particularmente útil em regiões de difícil acesso ou em casos de abertura oral limitada. Todavia, é exigida uma curva de aprendizagem mais extensa, um período intraoperatório mais longo e um maior investimento em equipamento e formação. O seu custo é o mais elevado entre as três abordagens (Shi et al., 2025).

Relativamente à eficácia clínica, não se observam discrepâncias estatisticamente relevantes entre as técnicas no que diz respeito à taxa de sobrevivência do implante, perda óssea marginal ou incidência de complicações biológicas, desde que devidamente indicadas e executadas (Yogui et al., 2021; Aghaloo et al., 2023). De forma análoga, a fase de recuperação pós-operatória apresenta semelhanças entre as três abordagens, com níveis comparativos de dor, edema e satisfação dos pacientes (Jorba-García et al., 2023).

A seleção da técnica deve, portanto, ser orientada pela complexidade do caso, perfil anatómico, experiência do médico dentista, disponibilidade de recursos tecnológicos e preferências do paciente. Em contextos clínicos com elevada exigência estética ou risco anatómico, as técnicas guiadas proporcionam uma maior previsibilidade. Em contraste, a técnica *free hand* mantém a sua aplicabilidade em contextos de reabilitação simples, quando executada por profissionais experientes.

**Tabela 1:** Comparação entre a técnica Free Hand, a Cirurgia Guiada Estática e a Cirurgia Navegada/Dinâmica em implantologia oral.

<b>Critério</b>	<b><i>FREE HAND</i></b>	<b>CIRURGIA GUIADA ESTÁTICA</b>	<b>CIRURGIA NAVEGADA</b>
<b>Precisão tridimensional</b>	Baixa a moderada	Elevada (desvio coronal controlado)	Elevada (desvios angulares/apicais)
<b>Tempo cirúrgico</b>	Mais curto	Moderado	Mais longo
<b>Tempo de preparação</b>	Mínimo	Elevado (planeamento e guia)	Moderado a elevado (calibração)
<b>Flexibilidade intraoperatória</b>	Elevada	Reduzida	Elevada
<b>Custo</b>	Menor	Intermédio	Elevado
<b>Curva de aprendizagem</b>	Elevada	Moderada	Baixa a moderada
<b>Recuperação pós-operatória</b>	Sem diferenças significativas		
<b>Indicações principais</b>	Casos simples	Múltiplos implantes, zonas críticas	Anatomias complexas, edentulismo total

**Nota:** Fonte: Elaborado pelo autor com base em Khaohoen et al. (2025), Kang et al. (2024), Werny et al. (2025), Shi et al. (2025), Wang et al. (2023), Jorba-García et al. (2023), Jaemsuwan et al. (2023), Yotpibulwong et al. (2023), Gargallo-Albiol et al. (2020), Yu et al. (2023), Yogui et al. (2021), Aghaloo et al. (2023), Mahardawi et al. (2025), Younes et al. (2019).

### **2.9. Comparação dos protocolos de carga imediata VS carga convencional**

Os protocolos de carga imediata e convencional apresentam taxas de sobrevivência semelhantes em diversas situações clínicas, desde que exista uma seleção criteriosa dos casos, seja garantida a estabilidade primária do implante, geralmente definida por torque de inserção igual ou superior a 30 Ncm ou valores de ISQ entre 60 e 65, e não haja necessidade de enxertos ósseos simultâneos (Chen et al., 2019; Esposito et al., 2013; Papaspyridakos et al., 2014; Sanz-Sánchez et al., 2015).

Não obstante, a carga imediata pode estar associada a um risco ligeiramente superior de falha, sobretudo em casos unitários e em pacientes com fatores de risco sistêmicos ou historial de doença periodontal (Chen et al., 2019; Hammoudeh et al., 2025).

No âmbito da técnica *free hand*, a exatidão da colocação do implante é significativamente influenciada pela experiência do médico dentista. Esta dependência pode comprometer os resultados da carga imediata, sobretudo em zonas estéticas ou de acesso difícil, aumentando o risco de insucessos e complicações (Gjelvold et al., 2020; Khaohoen et al., 2025). Nestas circunstâncias, os protocolos de carga convencional demonstram-se mais seguros, especialmente quando executados por médicos dentistas com menos experiência.

As técnicas guiada (estática) e navegada (dinâmica) demonstram superioridade em termos de precisão tridimensional, permitindo um posicionamento mais previsível dos implantes. Esta precisão permite a aplicação de carga imediata, mesmo em zonas críticas, como o setor anterior, ou em reabilitações com múltiplos implantes (Gjelvold et al., 2020; Pozzi et al., 2021). A integração do planeamento digital com a navegação dinâmica possibilita uma execução clínica mais precisa e controlada, o que se traduz em resultados estéticos e funcionais superiores, sobretudo em reabilitações unitárias na região anterior (Pozzi et al., 2021).

A inteligência artificial tem sido explorada como ferramenta de apoio ao planeamento cirúrgico. O seu potencial reside na redução da variabilidade individual, na otimização do posicionamento virtual dos implantes e na diminuição do tempo necessário para o planeamento. Contudo, até ao momento, não existem grandes evidências que sugiram um impacto direto da utilização de inteligência artificial nas taxas de sobrevivência dos implantes (Pozzi et al., 2021).

A implantologia robótica constitui um avanço tecnológico substancial, proporcionando um nível de precisão que excede significativamente as técnicas navegadas. Esta maior precisão poderá favorecer a previsibilidade dos protocolos de carga imediata. No entanto, a evidência clínica disponível sobre os desfechos a longo prazo continua limitada, o que justifica uma abordagem cautelosa na sua implementação generalizada (Khaohoen et al., 2025).

Em suma, os protocolos de carga imediata são seguros e previsíveis quando aplicados em casos bem selecionados, com estabilidade primária confirmada e ausência de contraindicações anatómicas ou sistémicas. A exatidão da colocação do implante constitui

um fator determinante para o êxito destes casos, sendo significativamente beneficiada pelas abordagens digitais, designadamente as técnicas guiadas e navegadas.

### **2.10. Impacto na Qualidade de Vida e Satisfação do Paciente**

As diferentes técnicas cirúrgicas para a colocação de implantes dentários, cirurgia guiada (estática), cirurgia navegada (dinâmica) e técnica *free hand*, não demonstram diferenças clinicamente relevantes no impacto sobre a qualidade de vida do paciente nem na satisfação no pós-operatório imediato ou em avaliações de curto e médio prazo.

Segundo estudos randomizados e revisões sistemáticas, independentemente da técnica utilizada, os pacientes apresentam, com frequência, níveis semelhantes de dor, edema, consumo de analgésicos, limitações funcionais e satisfação global com o procedimento (Engkawong et al., 2021; Jorba-García et al., 2023; Shi et al., 2025). A maioria dos indivíduos considera o desconforto pós-operatório aceitável e demonstra elevada satisfação, independentemente do método cirúrgico adotado.

Em estudos que avaliam a OHRQoL, utilizando o questionário OHIP-49, não são observadas diferenças significativas entre a cirurgia guiada e a técnica convencional após um ano de acompanhamento (Vercruyssen et al., 2014). Pequenas discrepâncias podem ser observadas em períodos muito precoces, como uma recuperação ligeiramente mais rápida aos três dias com cirurgia guiada. No entanto, tais efeitos deixam de se manifestar a médio e longo prazo (Engkawong et al., 2021).

Deste modo, apesar do aumento da precisão tridimensional do posicionamento dos implantes proporcionado pelas técnicas assistidas por computador, não existe evidência de que promovam melhorias superiores em termos de qualidade de vida ou satisfação do paciente em comparação com a técnica convencional, desde que esta seja corretamente executada.

A decisão clínica deve, portanto, considerar os fatores anatómicos e a experiência do médico dentista, em vez de se basear exclusivamente em expectativas de melhoria da percepção subjetiva do doente. (Jorba-García et al., 2023; Engkawong et al., 2021; Vercruyssen et al., 2014).

### 2.11. Inteligência Artificial em Cirurgia de Implantes Dentários

A inteligência artificial (IA) tem vindo a assumir um papel cada vez mais relevante na implantologia oral, sobretudo nas fases de planeamento e execução de cirurgias assistidas por computador. Em protocolos de cirurgia guiada e navegada, a IA contribui para uma segmentação anatómica precisa, identificação de estruturas críticas e definição do posicionamento ideal do implante. Estes sistemas evidenciam uma precisão comparável à dos especialistas humanos, apresentando maior consistência entre e dentro dos médicos dentistas. Deste modo, promovem o aumento da reprodutibilidade e da eficiência do planeamento em relação ao método manual (Elgarba, Fontenele, Mangano & Jacobs, 2024; Elgarba, Fontenele, Du et al., 2025; Ma et al., 2025; Vázquez-Sebrango et al., 2025).

Estudos recentes demonstram que a aplicação de IA pode reduzir o tempo de planeamento em mais de 50% e apresentar uma elevada taxa de aceitação clínica. Em mais de 89% dos casos analisados, os planos produzidos por IA foram considerados clinicamente aceitáveis e a seleção das dimensões dos implantes foi semelhante à dos especialistas (Elgarba, Fontenele, Mangano & Jacobs, 2024; Ma et al., 2025).

A aplicação da IA na técnica *free hand* encontra-se limitada à fase de diagnóstico e planeamento, auxiliando na classificação da densidade óssea, na simulação pré-operatória e na análise de risco. Contudo, o impacto direto na execução cirúrgica continua a ser limitado, uma vez que a precisão do procedimento depende fundamentalmente da perícia do médico dentista (Elgarba et al., 2024; Schwendicke, Samek & Krois, 2020).

Nas cirurgias assistidas por tecnologia de IA, esta apresenta um potencial promissor na fase intraoperatória, ao possibilitar a introdução de feedback em tempo real, o que pode contribuir para a redução de desvios e minimização de complicações anatómicas (Miragall et al., 2023).

Relativamente aos desfechos clínicos, os dados sugerem que a IA melhora a precisão do posicionamento dos implantes, o que pode contribuir para a redução de complicações protéticas e anatómicas. Contudo, até ao momento, não existem evidências robustas de que estas melhorias influenciem de forma significativa a qualidade de vida dos pacientes ou os níveis de satisfação pós-operatória, que continuam elevados independentemente da

técnica utilizada, desde que corretamente executada (Moraschini et al., 2025; Vázquez-Sebrango et al., 2025).

É ainda relevante salientar que a curva de aprendizagem das cirurgias assistidas por IA tende a ser mais curta do que a observada nas abordagens convencionais. Esta evolução possibilita que médicos dentistas com menor experiência alcancem resultados planejados virtualmente com um nível de precisão comparável ao de especialistas experientes (Elgarba et al., 2024; Ma et al., 2025).

## **2.12. Robótica em Implantologia**

A tecnologia robótica tem vindo a ser aplicada de forma crescente na implantologia oral, através de sistemas colaborativos (cobots) e robôs autónomos que realizam a osteotomia e a instalação do implante com base num planeamento digital prévio, sob supervisão do cirurgião. Estes sistemas operam com navegação ótica, controlo háptico e visão computacional, permitindo a orientação em tempo real da instrumentação. A integração referida permite reduzir a variabilidade manual e o erro humano (Alqutaibi et al., 2023; Yang et al., 2023; Chen et al., 2023).

A cirurgia robótica permite alcançar um nível de precisão notável. Os estudos demonstram uma média de desvios na plataforma e no ápice entre 0,5 mm e 0,7 mm, bem como desvios angulares entre 1° e 2°. Estes resultados superam os obtidos com a técnica *free hand* e, em vários casos, também com as abordagens guiada estática e navegada dinâmica, especialmente no controlo angular tridimensional (Chen et al., 2025; Shi et al., 2025). Conforme demonstrado por meta-análises recentes, a robótica apresenta a menor margem de erro entre todas as técnicas assistidas por computador (Khan et al., 2024; Wu et al., 2024; Khaohoen et al., 2025).

Relativamente aos desfechos clínicos, os estudos demonstram que a qualidade de vida e a satisfação do paciente não diferem significativamente entre a cirurgia robótica, as técnicas assistidas por computador (guiada ou navegada) e a técnica convencional *free hand*, desde que os implantes sejam corretamente posicionados. Os níveis de dor, o tempo de cicatrização e os resultados relatados pelos pacientes são globalmente semelhantes, embora se verifiquem ligeiras vantagens transitórias nas abordagens menos invasivas (Shi et al., 2024; Moraschini et al., 2025).

A curva de aprendizagem associada à cirurgia robótica tende a ser mais curta do que nas abordagens convencionais, permitindo que os cirurgiões com menor experiência atinjam rapidamente níveis elevados de precisão (Shi et al., 2025). Contudo, o tempo operatório pode ser superior, em virtude da necessidade de calibração e configuração do sistema. A adoção clínica generalizada continua limitada por fatores como o custo e a complexidade operacional (Chen et al., 2025; Wang et al., 2023).

### **2.13. Impacto da Navegação Dinâmica no Ensino e na Aprendizagem em Implantologia**

A cirurgia com navegação dinâmica tem revelado um impacto relevante na formação e capacitação em implantologia, sobretudo no que diz respeito à curva de aprendizagem de estudantes e profissionais em início de carreira. A evidência científica predominante indica que esta tecnologia reduz substancialmente a dependência da experiência prévia do operador para obter precisão no posicionamento dos implantes. Esta evidência permite concluir que iniciantes podem alcançar níveis de precisão tridimensional e angular comparáveis aos de profissionais experientes (Jorba-García et al., 2019; Wang et al., 2023;).

Os estudos realizados demonstram que a utilização da navegação dinâmica por parte de estudantes e clínicos com menor experiência resulta em melhorias significativas e rápidas na precisão cirúrgica. As discrepâncias no desempenho entre médicos dentistas experientes e iniciantes são significativamente reduzidas, em contraste com a técnica convencional, na qual a experiência continua a ser um fator determinante para o sucesso clínico (Wang et al., 2023; Jorba-García et al., 2019).

A literatura também sublinha que a curva de aprendizagem para atingir proficiência em navegação dinâmica é relativamente curta. Após poucas sessões práticas, o tempo operatório tende a diminuir, enquanto a autoconfiança dos formandos aumenta, sem comprometer a precisão cirúrgica (Block et al., 2017). Além disso, a navegação dinâmica oferece vantagens didáticas importantes no contexto do ensino, ao fornecer feedback visual em tempo real, minimizar erros críticos e permitir uma maior uniformidade de desempenho entre utilizadores com diferentes níveis de experiência (Wang et al., 2024).

É relevante notar que, embora o tempo cirúrgico inicial possa ser mais prolongado devido à familiarização com o sistema de navegação, este tende a reduzir-se progressivamente à medida que o operador supera a curva de aprendizagem e se adapta ao fluxo digital (Wang et al., 2024; Wang et al., 2023).



### 3. CONCLUSÃO

Com base na análise crítica da literatura científica disponível, conclui-se que todas as técnicas cirúrgicas avaliadas, técnica convencional (*freehand*), cirurgia guiada estática e cirurgia navegada dinâmica, são viáveis e apresentam elevadas taxas de sucesso clínico, desde que aplicadas com rigor e critério.

No entanto, as abordagens assistidas por tecnologia demonstram claras vantagens em parâmetros técnicos e formativos relevantes.

A navegação dinâmica e a cirurgia robótica destacam-se pela superior precisão tridimensional e controlo angular, com desvios significativamente menores face à técnica convencional. Estas tecnologias contribuem para uma execução mais previsível dos procedimentos, com benefícios evidentes em protocolos de carga imediata, onde a estabilidade e a precisão são cruciais para o sucesso do implante. A IA mostrou-se eficaz na automatização do planeamento cirúrgico, reduzindo o tempo e a variabilidade entre médicos dentistas, ainda que o seu impacto direto nos desfechos clínicos a longo prazo careça de mais validação.

Adicionalmente, as técnicas tecnologicamente assistidas revelaram uma curva de aprendizagem mais curta, permitindo a profissionais menos experientes atingirem rapidamente um desempenho comparável ao de especialistas. Esta característica traduz-se numa oportunidade pedagógica valiosa, com implicações significativas para o ensino clínico em implantologia. Embora a qualidade de vida e a satisfação dos pacientes se mantenham elevadas com todas as abordagens, os ganhos em precisão, segurança e padronização justificam plenamente a adoção progressiva destas inovações.

Em síntese, a tecnologia aplicada à implantologia não substitui o conhecimento clínico, mas amplia a sua eficácia e fiabilidade, posicionando-se como um aliado indispensável na prática dentária contemporânea e na formação de excelência de futuros profissionais.

### **3.1. Perspetivas futuras**

A evolução tecnológica em implantologia está longe de atingir o seu limite, sendo previsível que nos próximos anos surjam inovações ainda mais sofisticadas, tanto na vertente clínica como na pedagógica. Com base na análise desenvolvida nesta revisão narrativa, identificam-se várias linhas de investigação e desenvolvimento com elevado potencial.

Em primeiro lugar, a integração mais profunda da inteligência artificial no planeamento cirúrgico poderá permitir automatizações mais robustas, personalizadas e adaptativas. A aplicação de algoritmos de aprendizagem mecânicas ao histórico clínico dos pacientes poderá facilitar a identificação de riscos, prever complicações e recomendar protocolos individualizados com base em grandes volumes de dados clínicos. No entanto, será necessário validar esses sistemas em ensaios clínicos de longo prazo com amostras representativas.

A cirurgia robótica, apesar de promissora, ainda enfrenta limitações operacionais e económicas. O futuro passará pela miniaturização dos equipamentos, pela redução de custos e pela integração com plataformas de navegação dinâmica e inteligência artificial, criando sistemas híbridos de suporte à decisão e execução cirúrgica. Ensaio clínicos multicêntricos serão fundamentais para estabelecer a segurança, eficácia e custo-benefício desta abordagem.

Do ponto de vista educacional, as técnicas de navegação dinâmica deverão ser incorporadas de forma mais sistemática nos currículos de formação em implantologia. Estudos longitudinais poderão avaliar o impacto destas tecnologias na retenção de competências cirúrgicas e na qualidade dos cuidados prestados por recém-formados.

Por fim, a criação de protocolos clínicos integrados, baseados em fluxos digitais completos (CBCT, CAD/CAM, IA, robótica), representa uma fronteira promissora para a padronização e otimização da implantologia moderna.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Alevizakos, V., Mitov, G., Stoetzer, M., & von See, C. (2019). A retrospective study of the accuracy of template-guided versus freehand implant placement: A nonradiologic method. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology*, 128(3), 220–226. <https://doi.org/10.1016/j.oooo.2019.01.009>

Alqutaibi, A. Y., Hamadallah, H. H., Abu Zaid, B., Aloufi, A. M., & Tarawah, R. A. (2023). Applications of robots in implant dentistry: A scoping review. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2023.11.019>

Alrajhi, M. S., Askar, O., Habib, A. A., & Elsyad, M. A. (2020). Maxillary bone resorption with conventional dentures and four-implant-supported fixed prosthesis opposed by distal-extension partial dentures: A preliminary 5-year retrospective study. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 35(4), 816–823. <https://doi.org/10.11607/jomi.8075>

Arisan, V., Karabuda, C. Z., Mumcu, E., & Özdemir, T. (2013). Implant positioning errors in freehand and computer-aided placement methods: A single-blind clinical comparative study. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 28(1), 190–204. <https://doi.org/10.11607/jomi.2691>

Askar, H., Di Gianfilippo, R., Ravida, A., Tattan, M., Majzoub, J., & Wang, H. L. (2019). Incidence and severity of postoperative complications following oral, periodontal, and implant surgeries: A retrospective study. *Journal of Periodontology*, 90(11), 1270–1278. <https://doi.org/10.1002/JPER.18-0658>

Azarmehr, I., Stokbro, K., Bell, R. B., & Thygesen, T. (2017). Surgical navigation: A systematic review of indications, treatments, and outcomes in oral and maxillofacial surgery. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 75(9), 1987–2005. <https://doi.org/10.1016/j.joms.2017.01.004>

Block, M. S. (2018). Dental implants: The last 100 years. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 76(1), 11–26. <https://doi.org/10.1016/j.joms.2017.08.045>

Block, M. S., Emery, R. W., Lank, K., & Ryan, J. (2017). Implant placement accuracy using dynamic navigation. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 32(1), 92–99. <https://doi.org/10.11607/jomi.5004>

Bover-Ramos, F., Viña-Almunia, J., Cervera-Ballester, J., Peñarrocha-Diago, M., & García-Mira, B. (2018). Accuracy of implant placement with computer-guided surgery: A systematic review and meta-analysis comparing cadaver, clinical, and in vitro studies. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 33(1), 101–115. <https://doi.org/10.11607/jomi.5556>

Bryce, G., Bomfim, D. I., & Bassi, G. S. (2014). Pre- and post-operative management of dental implant placement. Part 2: Management of early-presenting complications. *British Dental Journal*, 217(4), 171–176. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2014.702>

Bryce, G., Bomfim, D. I., & Bassi, G. S. (2014). Pre- and post-operative management of dental implant placement. Part 1: Management of post-operative pain. *British Dental Journal*, 217(3), 123–127. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2014.650>

Buser, D., Sennerby, L., & De Bruyn, H. (2017). Modern implant dentistry based on osseointegration: 50 years of progress, current trends and open questions. *Periodontology 2000*, 73(1), 7–21. <https://doi.org/10.1111/prd.12185>

Camps-Font, O., Figueiredo, R., Valmaseda-Castellón, E., & Gay-Escoda, C. (2015). Postoperative infections after dental implant placement: Prevalence, clinical features, and treatment. *Implant Dentistry*, 24(6), 713–719. <https://doi.org/10.1097/ID.0000000000000325>

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>

Chandran K R, S., Goyal, M., Mittal, N., & George, J. S. (2023). Accuracy of freehand versus guided immediate implant placement: A randomized controlled trial. *Journal of Dentistry*, 136, 104620. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104620>

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>

Chen, J., Cai, M., Yang, J., Aldhohrah, T., & Wang, Y. (2019). Immediate versus early or conventional loading dental implants with fixed prostheses: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled clinical trials. *The Journal of prosthetic dentistry*, 122(6), 516–536. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2019.05.013>

Chen, J., Wang, Y., Bai, Y., et al. (2025). Accuracy, safety, and efficiency in robotic-assisted vs. freehand dental implant surgery: A 6-month follow-up randomized controlled trial. *Clinical Oral Implants Research*, 36(5), 662–670. <https://doi.org/10.1111/clr.14413>

Chen, W., Al-Taezi, K. A., Chu, C. H., et al. (2023). Accuracy of dental implant placement with a robotic system in partially edentulous patients: A prospective, single-arm clinical trial. *Clinical Oral Implants Research*, 34(7), 707–718. <https://doi.org/10.1111/clr.14083>

Chong, W. L., Chu, S. A., Dam, J. G., & Ong, K. S. (1999). Oral rehabilitation using dental implants and guided bone regeneration. *Annals of the Academy of Medicine, Singapore*, 28(5), 697–703

Collyer, J. (2010). Stereotactic navigation in oral and maxillofacial surgery. *The British Journal of Oral & Maxillofacial Surgery*, 48(2), 79–83. <https://doi.org/10.1016/j.bjoms.2009.04.037>

D'haese, J., Ackhurst, J., Wismeijer, D., De Bruyn, H., & Tahmaseb, A. (2017). Current state of the art of computer-guided implant surgery. *Periodontology 2000*, 73(1), 121–133. <https://doi.org/10.1111/prd.12175>

Deeb, G., Antonos, L., Tack, S., Carrico, C., Laskin, D., & Deeb, J. G. (2017). Is Cone-Beam Computed Tomography Always Necessary for Dental Implant Placement?. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 75(2), 285–289. <https://doi.org/10.1016/j.joms.2016.11.005>

Di Gianfilippo, R., Chambrone, L., Prato, G. P., Nevins, M., & Franceschi, D. (2022). Paradigm shifts in the evolution of implant therapy. *The International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry*, 42(5), 605–612. <https://doi.org/10.11607/prd.6188>

Duong, H. Y., Rocuzzo, A., Stähli, A., Salvi, G. E., Lang, N. P., & Sculean, A. (2022). Oral health-related quality of life of patients rehabilitated with fixed and removable implant-supported dental prostheses. *Periodontology 2000*, 88(1), 201–237. <https://doi.org/10.1111/prd.12419>

Elgarba, B. M., Fontenele, R. C., Du, X., et al. (2025). Artificial intelligence versus human intelligence in presurgical implant planning: A preclinical validation. *Clinical Oral Implants Research*, 36(7), 835–845. <https://doi.org/10.1111/clr.14429>

Elgarba, B. M., Fontenele, R. C., Mangano, F., & Jacobs, R. (2024). Novel AI-based automated virtual implant placement: Artificial versus human intelligence. *Journal of Dentistry*, 147, 105146. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105146>

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>

Engkawong, S., Mattheos, N., Pisarnurakit, P. P., Pimkhaokham, A., & Subbalekha, K. (2021). Comparing patient-reported outcomes and experiences among static, dynamic computer-aided, and conventional freehand dental implant placement: A randomized clinical trial. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 23(5), 660–670. <https://doi.org/10.1111/cid.13030>

Esposito, M., Grusovin, M. G., Maghaireh, H., & Worthington, H. V. (2013). Interventions for replacing missing teeth: Different times for loading dental implants. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2013(3), CD003878. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD003878.pub5>

Ewers, R., Schicho, K., Undt, G., Wanschitz, F., Truppe, M., Seemann, R., & Wagner, A. (2005). Basic research and 12 years of clinical experience in computer-assisted navigation technology: A review. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 34(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2004.03.018>

Fillion, M., Aubazac, D., Bessadet, M., Allègre, M., & Nicolas, E. (2013). The impact of implant treatment on oral health related quality of life in a private dental practice: A prospective cohort study. *Health and Quality of Life Outcomes*, 11, 197. <https://doi.org/10.1186/1477-7525-11-197>

Ganz, S. D. (2011). Cone beam computed tomography-assisted treatment planning concepts. *Dental Clinics of North America*, 55(3), 515–viii. <https://doi.org/10.1016/j.cden.2011.02.019>

Garg, P., & Klineberg, I. (2022). Benefits of contemporary rehabilitation of edentulism: A statement. *The International Journal of Prosthodontics*, 35(5), 575–580. <https://doi.org/10.11607/ijp.8211>

Gargallo-Albiol, J., Barootchi, S., Marqués-Guasch, J., & Wang, H. L. (2020). Fully guided versus half-guided and freehand implant placement: Systematic review and meta-analysis. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 35(6), 1159–1169. <https://doi.org/10.11607/jomi.7942>

Gjelvold, B., Kisch, J., Mohammed, D. J. H., et al. (2020). Immediate loading of single implants, guided surgery, and intraoral scanning: A nonrandomized study. *The International Journal of Prosthodontics*, 33(5), 513–522. <https://doi.org/10.11607/ijp.6701>

Hammoudeh, H. S., Lang, L. A., Saponaro, P. C., et al. (2025). Effect of implant loading protocols and associated factors on the success rate of implant therapy: A retrospective clinical study. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.12.005>

Hunter, E., De Moura Brito, L., Piyasena, P., Petrauskiene, E., Congdon, N., Tsakos, G., Virgili, G., Mathur, M., Woodside, J. V., Leles, C., & McKenna, G. (2024). Impact of edentulism on community-dwelling adults in low-income, middle-income and high-income countries: A systematic review. *BMJ Open*, 14(12), e085479. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2024-085479>

Jabr, C. L., Oliveira, L. P., Pero, A. C., de Assis Mollo Júnior, F., & Filho, J. N. A. (2024). Masticatory performance, self-perception of oral health, oral health-related quality of life

and nutritional status of completely edentulous elderly patients submitted to different rehabilitation treatments: A cross-sectional study. *Journal of Oral Rehabilitation*, 51(4), 724–732. <https://doi.org/10.1111/joor.13640>

Jacobs, R., & Quirynen, M. (2014). Dental cone beam computed tomography: Justification for use in planning oral implant placement. *Periodontology* 2000, 66(1), 203–213. <https://doi.org/10.1111/prd.12051>

Jaemsuwan, S., Arunjaroen suk, S., Kaboosaya, B., Subbalekha, K., Mattheos, N., & Pimkhaokham, A. (2023). Comparison of the accuracy of implant position among freehand implant placement, static and dynamic computer-assisted implant surgery in fully edentulous patients: A non-randomized prospective study. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 52(2), 264–271. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2022.05.009>

Jorba-García, A., Bara-Casaus, J. J., Camps-Font, O., Sánchez-Garcés, M. Á., Figueiredo, R., & Valmaseda-Castellón, E. (2023). Accuracy of dental implant placement with or without the use of a dynamic navigation assisted system: A randomized clinical trial. *Clinical Oral Implants Research*, 34(5), 438–449. <https://doi.org/10.1111/clr.14050>

Jorba-García, A., Figueiredo, R., González-Barnadas, A., Camps-Font, O., & Valmaseda-Castellón, E. (2019). Accuracy and the role of experience in dynamic computer guided dental implant surgery: An in-vitro study. *Medicina Oral, Patología Oral y Cirugía Bucal*, 24(1), e76–e83. <https://doi.org/10.4317/medoral.22785>

Kang, S., Hou, Y., Cao, J., et al. (2024). Comparison of implantation accuracy among different navigated approaches: A systematic review and network meta-analysis. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, (3), 455–467. <https://doi.org/10.11607/jomi.10381>

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., Yoda, N., Rungsiyakull, C., & Rungsiyakull, P. (2025). Accuracy in dental implant placement: A systematic review and meta-analysis comparing computer-assisted (static, dynamic, robotics) and noncomputer-assisted (freehand, conventional guide) approaches. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 134(1), 91.e1–91.e25. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.03.038>
- Landaeta-Quinones, C. G., Hernandez, N., & Zarroug, N. K. (2018). Computer-assisted surgery: Applications in dentistry and oral and maxillofacial surgery. *Dental Clinics of North America*, 62(3), 403–420. <https://doi.org/10.1016/j.cden.2018.03.009>
- Lang, N. P. (2019). Oral implants: The paradigm shift in restorative dentistry. *Journal of Dental Research*, 98(12), 1287–1293. <https://doi.org/10.1177/0022034519853574>
- Lanis, A., Peña-Cardelles, J. F., Negreiros, W. M., Hamilton, A., & Gallucci, G. O. (2024). Impact of digital technologies on implant surgery in fully edentulous patients: A scoping review. *Clinical Oral Implants Research*, 35(8), 1000–1010. <https://doi.org/10.1111/clr.14268>
- Leontiev, W., Connert, T., Weiger, R., Krastl, G., & Magni, E. (2022). Dynamic navigation in endodontics: Guided access cavity preparation by means of a miniaturized navigation system. *Journal of Visualized Experiments: JoVE*, (183), e63687. <https://doi.org/10.3791/63687>
- Leung, K. C., & Chu, C. H. (2022). Dental care for older adults. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(1), 214. <https://doi.org/10.3390/ijerph20010214>
- Loevy, H. T., & Kowitz, A. A. (1997). The dawn of dentistry: Dentistry among the Etruscans. *International Dental Journal*, 47(5), 279–284. <https://doi.org/10.1002/j.1875-595x.1997.tb00790.x>
- Loginoff, J., Majos, A., & Elgalal, M. (2024). The evolution of custom subperiosteal implants for treatment of partial or complete edentulism in patients with severe alveolar ridge atrophy. *Journal of Clinical Medicine*, 13(12), 3582. <https://doi.org/10.3390/jcm13123582>

Lopes, A., de Araújo Nobre, M., & Santos, D. (2020). The workflow of a new dynamic navigation system for the insertion of dental implants in the rehabilitation of edentulous jaws: Report of two cases. *Journal of Clinical Medicine*, 9(2), 421. <https://doi.org/10.3390/jcm9020421>

López-Píriz, R., Cabal, B., Goyos-Ball, L., Fernández, A., Bartolomé, J. F., Moya, J. S., & Torrecillas, R. (2019). Current state-of-the-art and future perspectives of the three main modern implant-dentistry concerns: Aesthetic requirements, mechanical properties, and peri-implantitis prevention. *Journal of Biomedical Materials Research. Part A*, 107(7), 1466–1475. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.36661>

Ma, H., Wu, Y., Bai, H., et al. (2025). Preclinical investigation of artificial intelligence-assisted implant surgery planning for single tooth defects: A case series study. *Journal of Oral Rehabilitation*. <https://doi.org/10.1111/joor.14009>

Mahardawi, B., Jiaranuchart, S., Arunjarosuk, S., Dhanesuan, K., Mattheos, N., & Pimkhaokham, A. (2025). The accuracy of dental implant placement with different methods of computer-assisted implant surgery: A network meta-analysis of clinical studies. *Clinical Oral Implants Research*, 36(1), 1–16. <https://doi.org/10.1111/clr.14357>

Mai, H. N., Dam, V. V., & Lee, D. H. (2023). Accuracy of augmented reality-assisted navigation in dental implant surgery: Systematic review and meta-analysis. *Journal of Medical Internet Research*, 25, e42040. <https://doi.org/10.2196/42040>

Matvijenko, K., & Borusevičius, R. (2025). Comparison of dynamic navigation systems in dental implantology: A systematic literature review of in vitro studies. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 54(7), 647–656. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2025.02.005>

Miragall, M. F., Knoedler, S., Kauke-Navarro, M., et al. (2023). Face the future—Artificial intelligence in oral and maxillofacial surgery. *Journal of Clinical Medicine*, 12(21), 6843. <https://doi.org/10.3390/jcm12216843>

Moraschini, V., de Almeida, D. C. F., Louro, R. S., et al. (2025). Accuracy of artificial intelligence in implant dentistry: A scoping review with systematic evidence mapping.

The Journal of Prosthetic Dentistry, 133(6), 1461.e1–1461.e10.  
<https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.05.030>

Mozer, P. S. (2020). Accuracy and deviation analysis of static and robotic guided implant surgery: A case study. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 35(5), e86–e90. <https://doi.org/10.11607/jomi.8231>

Ng, F. C., Ho, K. H., & Wexler, A. (2005). Computer-assisted navigational surgery enhances safety in dental implantology. *Annals of the Academy of Medicine, Singapore*, 34(5), 383–388.

Nickenig, H. J., Terheyden, H., Reich, R. H., Kreppel, M., Linz, C., & Lentzen, M. P. (2024). Oral health-related quality of life (OHRQoL) and implant therapy: A prospective multicenter study of preoperative, intermediate, and posttreatment assessment. *Journal of Cranio-Maxillo-Facial Surgery*, 52(1), 59–64. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2023.08.003>

Nickenig, H. J., Wichmann, M., Terheyden, H., & Kreppel, M. (2016). Oral health-related quality of life and implant therapy: A prospective multicenter study of preoperative, intermediate, and posttreatment assessment. *Journal of Cranio-Maxillo-Facial Surgery*, 44(6), 753–757. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2016.02.014>

Omami, G., & Al Yafi, F. (2019). Should Cone Beam Computed Tomography Be Routinely Obtained in Implant Planning?. *Dental Clinics of North America*, 63(3), 363–379. <https://doi.org/10.1016/j.cden.2019.02.005>

Pandey, C., Rokaya, D., & Bhattarai, B. P. (2022). Contemporary concepts in osseointegration of dental implants: A review. *BioMed Research International*, 2022, 6170452. <https://doi.org/10.1155/2022/6170452>

Papaspyridakos, P., Chen, C. J., Chuang, S. K., & Weber, H. P. (2014). Implant loading protocols for edentulous patients with fixed prostheses: A systematic review and meta-analysis. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 29(Suppl), 256–270. <https://doi.org/10.11607/jomi.2014suppl.g4.3>

Patel, R., & Clarkson, E. (2021). Implant surgery update for the general practitioner: Dealing with common postimplant surgery complications. *Dental Clinics of North America*, 65(1), 125–134. <https://doi.org/10.1016/j.cden.2020.09.010>

Pimkhaokham, A., Chow, J., Pozzi, A., Arunjarosuk, S., Subbalehka, K., & Mattheos, N. (2024). Computer-assisted and robotic implant surgery: Assessing the outcome measures of accuracy and educational implications. *Clinical Oral Implants Research*, 35(8), 939–953. <https://doi.org/10.1111/clr.14213>

Pinter, G. T., Decker, R., Szenasi, G., Barabas, P., & Huszar, T. (2022). Dynamic navigation for dental implant placement. *Journal of Visualized Experiments: JoVE*, (187), e63400. <https://doi.org/10.3791/63400>

Powers, N. (2006). Archaeological evidence for dental innovation: An eighteenth century porcelain dental prosthesis belonging to Archbishop Arthur Richard Dillon. *British Dental Journal*, 201(7), 459–463. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.4814117>

Pozzi, A., Arcuri, L., Carosi, P., Nardi, A., & Kan, J. (2021). Clinical and radiological outcomes of novel digital workflow and dynamic navigation for single-implant immediate loading in aesthetic zone: 1-year prospective case series. *Clinical Oral Implants Research*, 32(12), 1397–1410. <https://doi.org/10.1111/clr.13839>

Qian, X., Vánkos, B., Kelemen, K., et al. (2025). Comparison of implant placement and loading protocols for single anterior maxillary implants: A systematic review and network meta-analysis. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 133(3), 677–688. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.05.033>

Rawal, S. (2022). Guided innovations: Robot-assisted dental implant surgery. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 127(5), 673–674. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2022.03.029>

Reissmann, D. R., Dard, M., Lamprecht, R., Struppek, J., & Heydecke, G. (2017). Oral health-related quality of life in subjects with implant-supported prostheses: A systematic review. *Journal of Dentistry*, 65, 22–40. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2017.08.003>

Saeidi Pour, R., Freitas Rafael, C., Engler, M. L. P. D., Edelhoff, D., Klaus, G., Prandtner, O., Berthold, M., & Liebermann, A. (2019). Historical development of root analogue

implants: a review of published papers. *The British journal of oral & maxillofacial surgery*, 57(6), 496–504.

Saito, H., Aichelmann-Reidy, M. B., & Oates, T. W. (2020). Advances in implant therapy in North America: Improved outcomes and application in the compromised dentition. *Periodontology 2000*, 82(1), 225–237. <https://doi.org/10.1111/prd.12319>

Sanz-Sánchez, I., Sanz-Martín, I., Figuero, E., & Sanz, M. (2015). Clinical efficacy of immediate implant loading protocols compared to conventional loading depending on the type of the restoration: A systematic review. *Clinical Oral Implants Research*, 26(8), 964–982. <https://doi.org/10.1111/clr.12428>

Schubert, O., Schweiger, J., Stimmelmayer, M., Nold, E., & Güth, J. F. (2019). Digital implant planning and guided implant surgery – workflow and reliability. *British Dental Journal*, 226(2), 101–108. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2019.44>

Schwendicke, F., Samek, W., & Krois, J. (2020). Artificial intelligence in dentistry: Chances and challenges. *Journal of Dental Research*, 99(7), 769–774. <https://doi.org/10.1177/0022034520915714>

Shi, J. Y., Liu, B. L., Wu, X. Y., et al. (2024). Improved positional accuracy of dental implant placement using a haptic and machine-vision-controlled collaborative surgery robot: A pilot randomized controlled trial. *Journal of Clinical Periodontology*, 51(1), 24–32. <https://doi.org/10.1111/jcpe.13893>

Shi, J. Y., Wu, X. Y., Lv, X. L., Li, J. X., Huang, H., & Zhang, Y. H. (2025). Comparison of implant precision with robots, navigation, or static guides. *Journal of Dental Research*, 104(1), 37–44. <https://doi.org/10.1177/00220345241285566>

Smitkarn, P., Subbalekha, K., Mattheos, N., & Pimkhaokham, A. (2019). The accuracy of single-tooth implants placed using fully digital-guided surgery and freehand implant surgery. *Journal of Clinical Periodontology*, 46(9), 949–957. <https://doi.org/10.1111/jcpe.13160>

Srinivasan, M., Kamnoedboon, P., Angst, L., & Müller, F. (2023). Oral function in completely edentulous patients rehabilitated with implant-supported dental prostheses: A

systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Implants Research*, 34(Suppl 26), 196–239. <https://doi.org/10.1111/clr.14068>

Stephens, C. (2023). A brief history of the development and use of vulcanised rubber in dentistry. *British Dental Journal*, 234(8), 607–610. <https://doi.org/10.1038/s41415-023-5735-7>

Tagliareni, J. M., & Clarkson, E. (2015). Basic concepts and techniques of dental implants. *Dental Clinics of North America*, 59(2), 255–264. <https://doi.org/10.1016/j.cden.2014.10.005>

Takács, A., Hardi, E., Cavalcante, B. G. N., Szabó, B., Kispélyi, B., Joób-Fancsaly, Á., Mikulás, K., Varga, G., Hegyi, P., & Kivovics, M. (2023). Advancing accuracy in guided implant placement: A comprehensive meta-analysis: Meta-analysis evaluation of the accuracy of available implant placement methods. *Journal of Dentistry*, 139, 104748. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104748>

Tatakis, D. N., Chien, H. H., & Parashis, A. O. (2019). Guided implant surgery risks and their prevention. *Periodontology 2000*, 81(1), 194–208. <https://doi.org/10.1111/prd.12292>

Tattan, M., Chambrone, L., González-Martín, O., & Avila-Ortiz, G. (2020). Static computer-aided, partially guided, and free-handed implant placement: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Clinical Oral Implants Research*, 31(10), 889–916. <https://doi.org/10.1111/clr.13635>

Vázquez-Sebrango, G., Anitua, E., Macía, I., & Arganda-Carreras, I. (2025). The role of artificial intelligence in implant dentistry: A systematic review. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2025.04.005>

Vercruyssen, M., Fortin, T., Widmann, G., Jacobs, R., & Quirynen, M. (2014). Different techniques of static/dynamic guided implant surgery: Modalities and indications. *Periodontology 2000*, 66(1), 214–227. <https://doi.org/10.1111/prd.12056>

Vercruyssen, M., van de Wiele, G., Teughels, W., Coucke, W., Quirynen, M. (2014). Implant- and patient-centred outcomes of guided surgery, a 1-year follow-up: An RCT

comparing guided surgery with conventional implant placement. *Journal of Clinical Periodontology*, 41(12), 1154–1160. <https://doi.org/10.1111/jcpe.12305>

Wang, W., Zhuang, M., Tao, B., Wang, F., & Wu, Y. (2024). Learning curve of dynamic navigation-assisted zygomatic implant surgery: An in vitro study. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 132(1), 178.e1–178.e12. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.03.037>

Wang, X., Shujaat, S., Meeus, J., Shaheen, E., Legrand, P., Lahoud, P., Gerhardt, M. D. N., & Jacobs, R. (2023). Performance of novice versus experienced surgeons for dental implant placement with freehand, static guided and dynamic navigation approaches. *Scientific Reports*, 13(1), 2598. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29633-6>

Wanner, L., Manegold-Brauer, G., & Brauer, H. U. (2013). Review of unusual intraoperative and postoperative complications associated with endosseous implant placement. *Quintessence International*, 44(10), 773–781. <https://doi.org/10.3290/j.qi.a29936>

Werny, J. G., Fan, S., Diaz, L., Al-Nawas, B., Sagheb, K., Gielisch, M., & Schiegnitz, E. (2025). Evaluation of the accuracy, surgical time, and learning curve of freehand, static, and dynamic computer-assisted implant surgery in an in vitro study. *Clinical Oral Implants Research*, 36(5), 555–565. <https://doi.org/10.1111/clr.14403>

Wu, H., Chen, X., Kong, L., & Liu, P. (2023). Mechanical and biological properties of titanium and its alloys for oral implant with preparation techniques: A review. *Materials (Basel, Switzerland)*, 16(21), 6860. <https://doi.org/10.3390/ma16216860>

Wu, X. Y., Shi, J. Y., Qiao, S. C., Tonetti, M. S., & Lai, H. C. (2024). Accuracy of robotic surgery for dental implant placement: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Implants Research*, 35(6), 598–608. <https://doi.org/10.1111/clr.14255>

Xie, Q., Ding, T., & Yang, G. (2015). Rehabilitation of oral function with removable dentures--still an option? *Journal of Oral Rehabilitation*, 42(3), 234–242. <https://doi.org/10.1111/joor.12246>

Yang, S., Chen, J., Li, A., et al. (2023). Accuracy of autonomous robotic surgery for single-tooth implant placement: A case series. *Journal of Dentistry*, 132, 104451. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104451>

Yogui, F. C., Verri, F. R., de Luna Gomes, J. M., Lemos, C. A. A., Cruz, R. S., & Pellizzer, E. P. (2021). Comparison between computer-guided and freehand dental implant placement surgery: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 50(2), 242–250. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2020.08.004>

Yotpibulwong, T., Arunjaroen suk, S., Kaboosaya, B., Sinpitaksakul, P., Arksornnukit, M., Mattheos, N., & Pimkhaokham, A. (2023). Accuracy of implant placement with a combined use of static and dynamic computer-assisted implant surgery in single tooth space: A randomized controlled trial. *Clinical Oral Implants Research*, 34(4), 330–341. <https://doi.org/10.1111/clr.14043>

Yu, X., Tao, B., Wang, F., & Wu, Y. (2023). Accuracy assessment of dynamic navigation during implant placement: A systematic review and meta-analysis of clinical studies in the last 10 years. *Journal of Dentistry*, 135, 104567. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104567>