



UNIVERSITÀ DI GENOVA

CHIRURGIA IMPLANTARE COMPUTER-GUIDATA: ACCURATEZZA, VANTAGGI, LIMITI E IMPLICAZIONI CLINICHE

Corso di Laurea Magistrale a ciclo unico in
ODONTOIATRIA E PROTESI DENTARIA

Relatore:
Prof. Davide Nocentini

Candidato
Francesco Sacchi

Correlatore:
Prof. Paolo Pesce

ANNO ACCADEMICO:

2025/2026

Nel dubbio,
sorridi sempre.

INDICE

1. INTRODUZIONE	5
1.1 IL DENTE GRAVEMENTE DANNEGGIATO: DALLA PROSPETTIVA CONSERVATIVA ALLA SOSTITUZIONE IMPLANTARE	5
1.2 LE ORIGINI DELL'IMPLANTOLOGIA	6
1.3 IL CONCETTO DI "OSTEOINTEGRAZIONE"	7
1.4 GUARIGIONE DEL SITO POST-ESTRATTIVO E PRESUPPOSTI BIOLOGICI DELLA CHIRURGIA IMPLANTARE	10
1.5 ASPETTI BIOMECCANICI DELL'IMPLANTOLOGIA	12
1.6 LA CHIRURGIA IMPLANTARE A MANO LIBERA	14
1.7 LA CHIRURGIA MODERNA COMPUTER-GUIDATA	15
1.8 CONFRONTO TRA CHIRURGIA COMPUTER-GUIDATA STATICA E DINAMICA	19
1.9 FENOTIPO GENGIVALE, MUCOSA PALATALE E GESTIONE DEI TESSUTI MOLLI	21
2. OBIETTIVI DELLA TESI	25
3. MATERIALI E METODI	26
3.1 DISEGNO DELLO STUDIO	26
3.2 FONTI BIBLIOGRAFICHE E DATABASE CONSULTATI	27
3.3 STRATEGIA DI RICERCA BIBLIOGRAFICA	28
3.4 CRITERI TEMPORALI DELLA RICERCA	31
3.5 CRITERI DI INCLUSIONE	31
3.6 CRITERI DI ESCLUSIONE	33
3.7 SINTESI DELLA STRATEGIA DI RICERCA	34
3.8 PROCESSO DI SELEZIONE DEGLI ARTICOLI	40
3.9 ESTRAZIONE E ORGANIZZAZIONE DELLE INFORMAZIONI	40
3.10 VALUTAZIONE CRITICA DELLE EVIDENZE	41
3.11 OUTCOME CONSIDERATI	42
3.12 SINTESI DEI DATI	44
3.13 CONSIDERAZIONI METODOLOGICHE FINALI	45

4. RISULTATI	46
4.1 DEVIAZIONE CORONALE	46
4.2 DEVIAZIONE APICALE	50
4.3 DEVIAZIONE ANGOLARE	52
4.4 DEVIAZIONE VERTICALE E CONTROLLO IN PROFONDITÀ	54
4.5 SOPRAVVIVENZA IMPLANTARE	56
4.6 RIMODELLAMENTO OSSEO MARGINALE (MARGINAL BONE LEVEL / MARGINAL BONE LOSS)	58
4.7 COMPLICANZE INTRAOPERATORIE E POSTOPERATORIE	61
4.8 TEMPI DI PIANIFICAZIONE ED ESECUTIVI	65
4.9 COSTI ECONOMICI	68
4.10 OUTCOME ESTETICI	71
5. DISCUSSIONE	74
5.1 PIANIFICAZIONE DIGITALE E TRASFERIMENTO DELLA POSIZIONE IMPLANTARE NELLA sCAIS	74
5.2 DISCUSSIONE DEGLI OUTCOME PRIMARI: ACCURATEZZA TRIDIMENSIONALE	76
5.3 FATTORI CHE MODIFICANO L'ACCURATEZZA: TECNICA CHIRURGICA, TIPO DI SUPPORTO DELLA DIMA, TIPO DI EDENTULIA, TIPO DI FABBRICAZIONE DELLA DIMA E ARCATA	79
5.4 DISCUSSIONE DEGLI OUTCOME SECONDARI	82
5.5 SINTESI CRITICA ED IMPLICAZIONI CLINICHE	85
6. CONCLUSIONI	87
7. BIBLIOGRAFIA	90

1. INTRODUZIONE

1.1 IL DENTE GRAVEMENTE DANNEGGIATO: DALLA PROSPETTIVA CONSERVATIVA ALLA SOSTITUZIONE IMPLANTARE

La gestione del dente gravemente danneggiato rappresenta uno dei temi più delicati dell'odontoiatria restaurativa contemporanea. In presenza di un elemento con ampia perdita di sostanza coronale, eventuale compromissione endodontica, riduzione della resistenza biomeccanica e necessità di riabilitazione protesica, il clinico non deve limitarsi a scegliere tra mantenimento ed estrazione, ma è chiamato a formulare una valutazione prognostica globale. Tale giudizio deve integrare qualità del trattamento endodontico, quantità di struttura residua, restaurabilità, supporto parodontale, distribuzione dei carichi, esigenze estetiche e costo biologico complessivo del piano di trattamento. In questa prospettiva, endodonzia e implantologia non devono essere considerate alternative rigidamente contrapposte, ma strategie terapeutiche complementari, da selezionare in modo razionale in base alle caratteristiche del singolo caso [1].

Per molti decenni la conservazione del dente naturale ha rappresentato l'obiettivo prioritario dell'odontoiatria. La letteratura ha documentato che un dente correttamente trattato endodonticamente, adeguatamente restaurato e inserito in un contesto parodontale favorevole può mantenere funzione e stabilità clinica per periodi molto lunghi [2-5]. Molven et al. hanno mostrato, con un follow-up di 20–27 anni, che la grande maggioranza delle radici trattate presentava condizioni periapicali normali al controllo finale [2]. Analogamente, Valderhaug et al., nello studio a 25 anni sui denti restaurati con corona, hanno evidenziato una bassa incidenza di lesioni periapicali e una sopravvivenza favorevole anche negli elementi già trattati endodonticamente, purché la qualità del trattamento e del restauro fosse adeguata [3]. Le revisioni sistematiche successive di Ng et al. e Burns et al. hanno confermato che gli

esiti del trattamento canalare primario rimangono elevati, pur con variabilità legata ai criteri di successo adottati e alla presenza di lesioni periapicali iniziali [4,5].

Tuttavia, la guarigione endodontica non coincide automaticamente con una prognosi favorevole di mantenimento nel lungo termine. Un dente può risultare stabile dal punto di vista periapicale, ma essere strutturalmente indebolito, poco restaurabile o esposto a rischio di frattura corono-radicolare. La prognosi complessiva dipende infatti dalla presenza di ferula sufficiente, dalla quantità di tessuto residuo, dalla qualità del restauro definitivo, dallo stato parodontale e dal controllo dei carichi occlusali. Di conseguenza, il confronto clinicamente corretto non è tra “endodonzia” e “impianto” in senso astratto, ma tra la prognosi reale di un dente recuperabile e quella della sua eventuale sostituzione con un impianto singolo [1].

Quando il mantenimento del dente non appare più prevedibile, la riabilitazione implantare rappresenta una soluzione ampiamente documentata e, in molti casi, altamente efficace. Anche in questo scenario, però, il successo non dipende esclusivamente dall’atto chirurgico di inserimento della vite implantare, ma da un insieme di fattori biologici, protesici e biomeccanici che devono essere correttamente interpretati fin dalla fase diagnostica [1]. In questo contesto decisionale una corretta pianificazione tridimensionale del sito implantare rappresenta un passaggio cruciale che oggi può essere affrontato con strumenti digitali avanzati quali, ad esempio, CBCT, scanner e chirurgia computer-guidata. Questi ultimi rappresentano proprio l’argomento su cui verte questa tesi.

1.2 LE ORIGINI DELL’IMPLANTOLOGIA

L’implantologia moderna è il risultato di una lunga evoluzione storica. Secondo la ricostruzione di Abraham, tentativi di sostituzione o stabilizzazione dentaria sono documentati già nelle civiltà antiche: gli Egizi utilizzavano fili d’oro, gli Etruschi e i Fenici impiegavano legature e sostituti

di origine animale, mentre nella civiltà Maya sono stati rinvenuti reperti compatibili con l'uso di frammenti di conchiglia come sostituti dentari [6]. Pur essendo lontanissime dai principi biologici e biomeccanici odierni, queste testimonianze dimostrano che il bisogno di rimpiazzare elementi mancanti accompagna l'uomo da secoli.

Lo sviluppo dell'implantologia scientifica si colloca tuttavia tra il XIX e il XX secolo, quando si passa da tentativi empirici a dispositivi pensati per interagire in modo più stabile con l'osso. Abraham ricorda, tra le tappe più rilevanti, i contributi di Maggiolo, Greenfield, Strock, Formiggini, Zepponi, Linkow e di altri pionieri che hanno introdotto nel tempo impianti sottoperiosteali, impianti a lama e infine impianti endosseali [6]. Parallelamente si è evoluta anche la concezione della superficie implantare: dalle superfici macchinate si è progressivamente passati a superfici mordenzate, sabbiolate e trattate chimicamente, fino all'introduzione di rivestimenti come idrossiapatite, fluoruri e altre modificazioni volte a migliorare l'interazione con il tessuto osseo [6].

La storia dell'implantologia, quindi, non coincide soltanto con l'evoluzione della forma dell'impianto, ma anche con il progressivo affinamento dei materiali e delle superfici. Questo passaggio è fondamentale perché sposta il focus dalla semplice ritenzione meccanica alla qualità dell'interfaccia biologica. In altri termini, l'implantologia smette gradualmente di essere un tentativo di "ancoraggio artificiale" e diventa una disciplina biologicamente fondata, nella quale il comportamento dei tessuti peri-implantari assume un ruolo centrale [6,7].

1.3 IL CONCETTO DI "OSTEOINTEGRAZIONE"

Il vero punto di svolta nella storia dell'implantologia moderna è rappresentato dal concetto di "osteointegrazione" introdotto da Brånemark. Nel suo lavoro del 1983, l'autore definisce l'osteointegrazione come una "connessione diretta, strutturale e funzionale tra osso vitale e superficie implantare

sottoposta a carico”. Questa definizione segna il passaggio da una concezione prevalentemente meccanica dell’impianto a una concezione biologica, nella quale il titanio non è considerato un semplice materiale tollerato dall’organismo, ma un substrato capace di instaurare un’interazione stabile e duratura con il tessuto osseo [7].

Il background sperimentale di questa scoperta nasce dagli studi di Brånemark sulla microcircolazione ossea. Prima ancora dell’applicazione odontoiatrica, il gruppo svedese condusse esperimenti nel coniglio per osservare la vascolarizzazione del tessuto osseo e del midollo. Nelle ricostruzioni storiche successive viene descritto come Brånemark avesse inizialmente studiato la fibula del coniglio e, successivamente, utilizzato camere ottiche in titanio inserite nella tibia del coniglio per analizzare in vivo i fenomeni microcircolatori e la guarigione ossea. L’osservazione decisiva fu che tali dispositivi in titanio non potevano essere rimossi senza danneggiare l’osso circostante, poiché il tessuto osseo era cresciuto a stretto contatto con la loro superficie. Proprio questa evidenza sperimentale portò alla formulazione del concetto di osteointegrazione [7,11].

Questa scoperta ebbe una portata rivoluzionaria poiché dimostrò che il titanio possedeva caratteristiche di biocompatibilità e stabilità interfacciale tali da consentire un contatto diretto e duraturo con l’osso vivente. Da quel momento, l’osteointegrazione è diventata il fondamento biologico dell’implantologia contemporanea, influenzando profondamente la progettazione implantare, i protocolli chirurgici, i tempi di carico e l’intera filosofia riabilitativa [7].

Il processo di osteointegrazione può essere influenzato anche dalla precisione con cui l’impianto viene inserito: una preparazione più controllata del sito implantare e una posizione più coerente con il progetto protesico possono infatti favorire una migliore stabilità nelle prime fasi di guarigione rispetto all’inserimento a mano libera. In uno studio randomizzato condotto su pazienti parzialmente edentuli, Alshadidi et al. hanno confrontato l’inserimento implantare a mano libera, l’inserimento con guida della sola fresa pilota e l’inserimento completamente guidato, valutando anche la

stabilità implantare mediante analisi della frequenza di risonanza e indice di stabilità implantare. Questa metodica, non invasiva, misura la rigidità dell'interfaccia osso-impianto attraverso un piccolo trasduttore applicato temporaneamente all'impianto; il risultato viene espresso come indice di stabilità implantare, su una scala numerica generalmente compresa tra 1 e 100 nella quale valori più elevati indicano una maggiore stabilità. Tale parametro permette di seguire nel tempo il passaggio dalla stabilità primaria, legata soprattutto all'ancoraggio meccanico iniziale nell'osso, alla stabilità secondaria, progressivamente sostenuta dai processi biologici di guarigione e osteointegrazione. Il gruppo trattato con tecnica completamente guidata ha mostrato un aumento più favorevole della stabilità nel tempo e un minor numero di fallimenti precoci rispetto al gruppo trattato a mano libera. Gli autori interpretano questo dato come espressione di una stabilità biologica più favorevole nelle prime fasi di guarigione. È tuttavia importante precisare che si tratta di un parametro clinico-strumentale e non di una dimostrazione istologica diretta di maggiore contatto tra osso e impianto. Il possibile vantaggio prognostico della chirurgia guidata deve quindi essere interpretato come conseguenza indiretta di una preparazione del sito implantare più controllata, di un posizionamento più coerente con il progetto protesico e di una distribuzione biomeccanica dei carichi più favorevole [12].

La comprensione dell'osteointegrazione ha inoltre guidato l'evoluzione delle superfici implantari. Abraham sottolinea come la ricerca si sia progressivamente orientata verso trattamenti superficiali capaci di favorire più rapidamente la colonizzazione biologica e l'ancoraggio osseo, passando dalle superfici macchinate a superfici sabbiolate, mordenzate, ossidate e rivestite. In questa prospettiva, la superficie implantare non rappresenta un dettaglio secondario, ma una componente in grado di modulare la risposta biologica iniziale e di influenzare la qualità dell'integrazione ossea [6].

A questo aspetto si collega anche la più recente interpretazione biomeccanica proposta da Li et al., secondo cui il successo dell'osteointegrazione non dipende soltanto dalla composizione chimica o dalla rugosità superficiale, ma anche dalle proprietà meccaniche del materiale implantare, come rigidità,

modulo elastico, porosità e microarchitettura. Secondo questa review, leghe di titanio a più basso modulo elastico e strutture porose possono migliorare il trasferimento del carico e favorire la formazione ossea e la crescita ossea all'interno delle strutture porose, pur richiedendo ulteriori conferme cliniche a lungo termine prima di una piena applicazione routinaria [10].

L'osteointegrazione, pertanto, non deve essere interpretata come un evento statico o esclusivamente istologico, ma come un processo dinamico nel quale qualità del sito ricevente, tecnica chirurgica, condizioni di carico, proprietà del materiale e caratteristiche della superficie implantare concorrono insieme a determinare la stabilità clinica nel tempo [6,7,10,11].

1.4 GUARIGIONE DEL SITO POST-ESTRATTIVO E PRESUPPOSTI BIOLOGICI DELLA CHIRURGIA IMPLANTARE

La perdita di un elemento dentario apre una seconda fase decisionale altrettanto importante: la gestione del sito post-estrattivo. Hämmerle, Araújo e Simion hanno evidenziato come l'alveolo post-estrattivo vada incontro a un fisiologico rimodellamento, con una riduzione media orizzontale della cresta di circa 3,8 mm e verticale di circa 1,24 mm nei sei mesi successivi all'estrazione [8]. Tali modificazioni interessano soprattutto la parete vestibolare e rappresentano uno dei principali limiti biologici alla sostituzione implantare immediata o differita, soprattutto nelle aree ad elevata richiesta estetica.

Questo fenomeno spiega perché la chirurgia implantare moderna debba essere pianificata secondo una logica biologica e protesicamente guidata. Il timing di inserimento, la preservazione dell'alveolo, la presenza o meno di difetti di parete, la gestione dei tessuti molli e la tridimensionalità del futuro restauro influenzano in modo significativo il risultato finale [8]. L'impianto immediato, pur associato a elevate percentuali di sopravvivenza, non è infatti

sufficiente da solo a prevenire il riassorbimento della parete vestibolare né a garantire il mantenimento del profilo mucoso [8,14].

La chirurgia implantare, quindi, non può essere considerata un semplice atto sostitutivo. Essa deve essere inserita in una pianificazione che tenga conto della guarigione dell'alveolo, della quantità di osso disponibile, del profilo di emergenza protesico e della stabilità dei tessuti peri-implantari nel medio-lungo periodo [8,13,14].

Nel sito post-estrattivo questo collegamento tra diagnosi e atto chirurgico assume un valore ancora maggiore, perché l'alveolo presenta pareti residue non sempre simmetriche e l'osteotomia può essere condizionata dalla morfologia della radice estratta. In un trial randomizzato, Chandran et al. hanno mostrato che l'inserimento immediato con guida statica determina deviazioni minori rispetto alla tecnica freehand in alveoli post-estrattivi, sostenendo l'utilità della guida quando è necessario rispettare la parete vestibolare, le radici contigue e l'asse protesico. Coerentemente, lo studio in vitro di Pitman et al. ha evidenziato che il livello di guida influenza l'accuratezza negli impianti immediati, con prestazioni più favorevoli nei protocolli completamente guidati rispetto alla guida della sola fresa pilota (pilot-drilled) e alla tecnica a mano libera (freehand). La revisione sistematica di Xing et al. conferma che l'inserimento immediato mediante dime chirurgiche progettate al computer permette di ottenere un'accuratezza clinicamente accettabile indipendentemente dal tipo di guida, dal protocollo chirurgico, dalla fabbricazione della dima, dell'anatomia locale e dalla qualità della pianificazione [15-17].

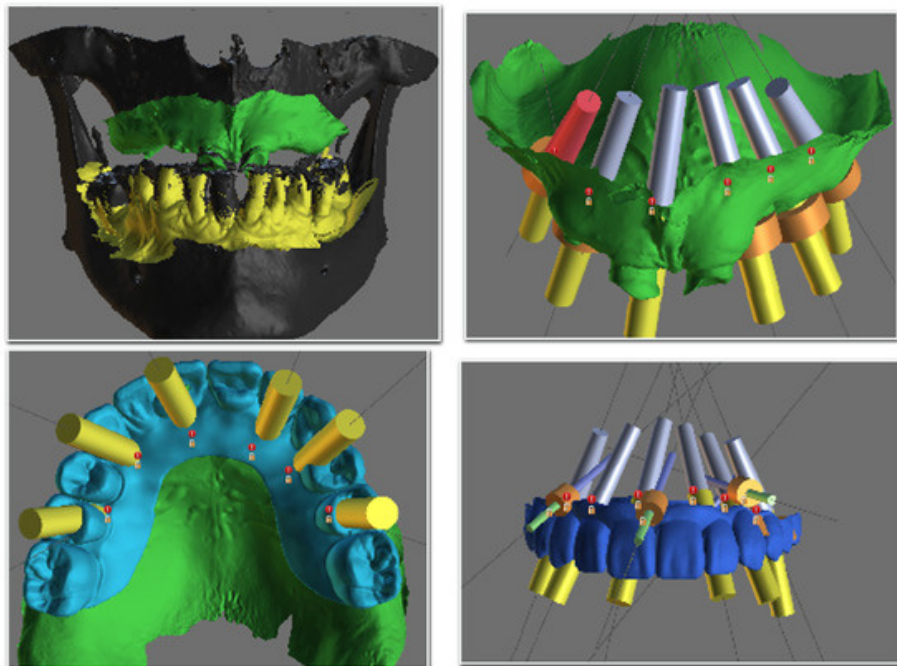


Figura 1. Pianificazione digitale implantare e definizione protesicamente guidata della traiettoria di inserimento. Fonte: adattata da Markiewicz e Nowicki, 2025 [27], Fig. 1.

1.5 ASPETTI BIOMECCANICI DELL'IMPLANTOLOGIA

Tra i presupposti dell'implantologia contemporanea, la biomeccanica riveste un ruolo centrale. Brunski ha mostrato che il successo implantare dipende dalla capacità dell'impianto di sopportare le forze occlusali e di trasmetterle in maniera compatibile ai tessuti circostanti [9]. Di fatto a differenza del dente naturale, che beneficia del legamento parodontale come elemento ammortizzante e propriocettivo, l'impianto trasferisce le forze direttamente all'osso. Di conseguenza asse implantare, quantità e qualità dell'osso, macrodesign della fixture e configurazione protesica influenzano in modo diretto la distribuzione degli stress e la stabilità dell'interfaccia osso-impianto [9].

La revisione narrativa di Li et al. aggiorna questo quadro, sottolineando che la biomeccanica implantare dipende anche dalle proprietà del materiale. Gli autori evidenziano che leghe di titanio a più basso modulo elastico e strutture porose possono migliorare il trasferimento del carico e favorire la crescita ossea all'interno delle strutture porose, aumentando quindi l'area di contatto osso-impianto. Allo stesso tempo segnalano che, nonostante i risultati promettenti, sono ancora necessari studi in vivo e osservazionali a lungo termine prima di considerare questi materiali come sostituti consolidati dei tradizionali impianti in titanio [10].

Dal punto di vista clinico, ciò significa che la stabilità implantare non va interpretata come il solo risultato dell'inserimento chirurgico o della torque iniziale, ma come l'esito di un equilibrio dinamico tra geometria dell'impianto, qualità meccanica del materiale, carico funzionale e risposta biologica del tessuto osseo [9,10]. Questa impostazione biomeccanica è particolarmente rilevante quando si passa dalla chirurgia convenzionale alla chirurgia guidata, perché l'accuratezza del posizionamento influenza direttamente l'asse di carico e la futura stabilità protesica.

In chiave biomeccanica, il vantaggio della chirurgia computer-guidata non deve essere inteso come un aumento automatico della sopravvivenza implantare, ma come un migliore controllo dell'asse di inserimento, della profondità e della posizione tridimensionale della fixture. Questo controllo riduce il rischio di emergenze protesiche sfavorevoli, abutment eccessivamente angolati e distribuzione non ideale dei carichi. Nella revisione sistematica e meta-analisi di Werny et al., la tecnica freehand ha mostrato deviazioni medie maggiori rispetto ai protocolli di chirurgia computer-guidati: 7,46° di deviazione angolare, 1,56 mm al punto di ingresso e 2,22 mm all'apice, rispetto a 2,57°, 0,72 mm e 0,88 mm nei protocolli statici completamente guidati. Lo studio clinico randomizzato di Lops et al. ha inoltre mostrato che una chirurgia statica guidata, anche se eseguita da un operatore meno esperto, può ottenere nel tempo un rimodellamento osseo

marginale non superiore rispetto a una chirurgia a mano libera eseguita da un operatore esperto. Questo dato suggerisce che la pianificazione digitale possa rendere più standardizzabile il posizionamento implantare, purché il caso sia correttamente selezionato e il flusso di lavoro sia rigoroso [18,19].

1.6 LA CHIRURGIA IMPLANTARE A MANO LIBERA

Storicamente, il posizionamento implantare è sempre stato eseguito in modalità convenzionale ossia a mano libera: il chirurgo dopo aver preparato il sito osteotomico inserisce la fixture basandosi sull'esame clinico, sulla documentazione radiografica bidimensionale o tridimensionale e sulla propria esperienza. Questo approccio conserva un ruolo clinico, soprattutto nei casi anatomici semplici, perché consente flessibilità intraoperatoria e permette di adattare la strategia alle condizioni riscontrate durante l'intervento [20,21].

La CBCT d'altro canto rappresenta uno strumento diagnostico essenziale perché consente di valutare volume osseo, rapporti con strutture anatomiche come: seno mascellare, canale mandibolare, radici adiacenti e concavità vestibolo-linguali. Tuttavia, guardare la CBCT e poi eseguire un intervento implantare non equivale a trasferire automaticamente nel campo operatorio l'asse, la profondità e la posizione tridimensionale pianificati. In assenza di una guida fisica o dinamica, il clinico deve tradurre mentalmente le sezioni radiologiche in un gesto chirurgico reale, con possibili errori di orientamento, soprattutto nei settori posteriori, in presenza di limitata apertura orale, creste sottili, difetti ossei, spazi protesici ridotti o necessità di emergenza protesica molto precisa [22].

Le difficoltà diventano ancora più evidenti quando la chirurgia viene eseguita con accesso limitato o flapless: la ridotta esposizione dei tessuti può diminuire la morbilità, ma impedisce la visualizzazione diretta della topografia ossea

sottostante. In queste condizioni il rischio non è soltanto anatomico, cioè avvicinarsi eccessivamente a strutture nobili, ma anche protesico e biomeccanico: una minima deviazione dell'asse implantare può modificare il profilo di emergenza, complicare la realizzazione del restauro, aumentare la necessità di abutment angolati e alterare la distribuzione dei carichi [22,23].

Da questa criticità nasce il razionale della chirurgia computer-guidata: non come semplice tecnologia aggiuntiva, ma come strumento per collegare diagnosi tridimensionale, progetto protesico e atto chirurgico. La guida statica o la navigazione dinamica consentono infatti di trasferire con maggiore coerenza la posizione virtualmente pianificata alla sede chirurgica, riducendo la dipendenza all'interpretazione intraoperatoria dell'operatore e contribuendo ad una prognosi più favorevole in termini funzionali, biologici ed estetici [20-23].

1.7 LA CHIRURGIA MODERNA COMPUTER-GUIDATA

La chirurgia implantare computer-guidata nasce quindi dall'esigenza di rendere più prevedibile il trasferimento del piano diagnostico-protesico al campo operatorio. Attraverso l'integrazione tra CBCT, scansioni intraorali o modelli digitali, ceratura diagnostica/progetto protesico in un software di pianificazione implantare, il clinico può definire virtualmente non solo sede, inclinazione e profondità dell'impianto, ma anche diametro, lunghezza, relazione con le strutture anatomiche, posizione rispetto al futuro margine protesico e profilo di emergenza. Il passaggio fondamentale non è semplicemente “vedere” l'osso in tre dimensioni, ma trasformare l'informazione diagnostica in una traiettoria chirurgica protesicamente orientata e riproducibile [20-22].

Dal punto di vista operativo, le metodiche computer-guidate comprendono principalmente la chirurgia statica, basata su dime chirurgiche che guidano le frese e, nei protocolli completamente guidati, anche l'inserimento dell'impianto; la chirurgia dinamica, nella quale un sistema di navigazione mostra in tempo reale la posizione degli strumenti rispetto alla pianificazione; e i sistemi robot-assistiti, che introducono un ulteriore livello di controllo della traiettoria. Queste tecniche non eliminano il ruolo del chirurgo, ma ne supportano il gesto, aumentando la coerenza tra piano virtuale, asse implantare e posizione finale della fixture [24-26].

I principali vantaggi clinici riguardano l'accuratezza tridimensionale, la possibilità di pianificazione realmente protesicamente guidata, il migliore controllo dei margini di sicurezza rispetto a strutture anatomiche critiche e, nei casi selezionati, l'esecuzione di approcci flapless meno invasivi. Romandini et al. hanno sottolineato che l'associazione tra approccio flapless e chirurgia completamente guidata può ridurre invasività, dolore e morbidità post-operatoria, preservando al tempo stesso l'accuratezza rispetto alla posizione pianificata; gli stessi autori ricordano però che la chirurgia guidata non è priva di errore e richiede un workflow rigoroso [23].

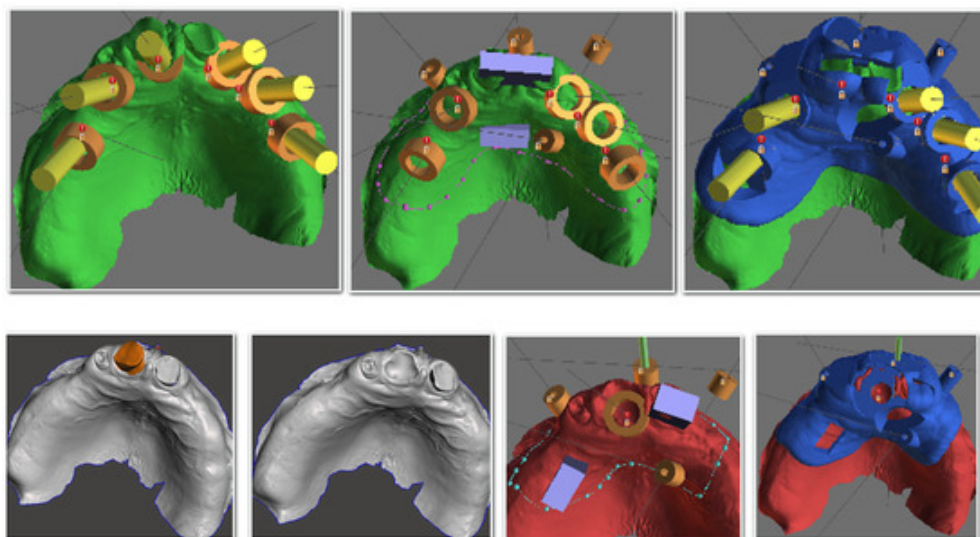


Figura 2. Progettazione CAD di dime chirurgiche statiche in differenti condizioni cliniche e con differenti supporti. Fonte: adattata da Markiewicz e Nowicki, 2025 [27], Fig. 2.

In termini quantitativi, la meta-analisi clinica di Khaohoen et al., comprendente 67 studi, ha riportato una deviazione media globale di 1,11 mm al punto di ingresso, 1,40 mm all'apice e 3,51° di deviazione angolare. Nella stessa analisi, i valori medi erano pari a 1,11 mm/1,44 mm/3,58° per i sistemi statici, 1,18 mm/1,36 mm/3,51° per i sistemi dinamici e 0,81 mm/0,77 mm/1,71° per i sistemi robot-assistiti, rispettivamente a livello coronale, apicale e angolare [26]. Questi dati confermano che la guida migliora la trasferibilità del piano, ma impongono comunque di mantenere margini di sicurezza clinici adeguati.

La meta-analisi di Takács et al., basata su studi in vitro, ha confermato che i sistemi robot-assistiti e la chirurgia statica computer-assistita forniscono le prestazioni più accurate; tra le procedure statiche, il protocollo completamente guidato è risultato il più preciso, mentre il posizionamento a mano libera è associato al maggior numero di deviazioni [25]. Anche il tipo di supporto della guida incide sull'accuratezza: nello studio clinico di Markiewicz e Nowicki, le guide dento-supportate hanno mostrato la massima precisione, le mucoso-supportate la minore, soprattutto in mandibola, mentre le guide osseo-supportate hanno mantenuto risultati clinicamente accettabili. Gli autori riportano deviazioni medie di 0,443 mm al collo implantare e 0,562 mm all'apice nel mascellare, rispetto a 0,755 mm e 0,981 mm in mandibola [27].

Questi valori devono però essere interpretati con prudenza: una buona accuratezza della chirurgia computer-guidata non equivale a una perfezione assoluta. La guida riduce l'errore medio, ma non lo annulla, perché ogni fase del flusso di lavoro può introdurre piccole discrepanze: acquisizione radiologica, sovrapposizione dei file, progettazione e adattamento della dima, tolleranza tra boccia e frese, stabilità del supporto, apertura orale, irrigazione e controllo clinico dell'operatore. Per questo motivo la chirurgia guidata non deve indurre a pianificare un impianto a ridosso di strutture anatomiche nobili come, ad esempio, il nervo alveolare inferiore: anche quando si utilizza una

dima o un sistema di navigazione, devono sempre essere mantenuti margini di sicurezza adeguati [24-27].

Il possibile vantaggio estetico della chirurgia guidata deriva soprattutto dal controllo della posizione tridimensionale dell'impianto nella zona estetica: un asse corretto, una profondità adeguata e una relazione favorevole con la parete vestibolare e con il futuro profilo di emergenza facilitano la stabilità dei tessuti molli e la realizzazione di una protesi più armonica. Fürhauser et al. hanno valutato impianti singoli flapless nel mascellare anteriore trattati con chirurgia guidata, mettendo in relazione accuratezza tridimensionale e Pink Esthetic Score; lo studio supporta l'idea che il trasferimento preciso della pianificazione sia rilevante per l'estetica del profilo mucoso peri-implantare [28]. Più recentemente, Heng et al., in uno studio trasversale su impianti in area estetica con follow-up medio di circa quattro anni dopo il carico, hanno osservato che gli impianti posizionati con chirurgia implantare computer-assistita ottenevano valori di Pink Esthetic Score significativamente superiori rispetto al posizionamento a mano libera, oltre a migliori livelli ossei marginali, pur senza differenze sostanziali negli indici di infiammazione peri-implantare [29]. Questi dati non autorizzano a considerare la chirurgia guidata una garanzia estetica assoluta, ma rafforzano il concetto che la precisione tridimensionale dell'impianto può contribuire alla preservazione del contorno mucoso, alla gestione del profilo di emergenza e alla riduzione di errori difficilmente correggibili nella fase protesica [28,29].

Il valore prognostico della chirurgia guidata deve quindi essere interpretato in senso realistico: essa aumenta accuratezza, sicurezza e prevedibilità, e può contribuire anche al risultato estetico quando il progetto implantare è correttamente integrato con il piano protesico e con la gestione dei tessuti duri e molli [20,21,25,26,28,29]. Tuttavia non sostituisce diagnosi, selezione del caso, qualità della CBCT, corretta sovrapposizione dei file DICOM/STL, stabilità della guida, controllo dell'apertura orale, irrigazione, sequenza di frese e competenza dell'operatore. La chirurgia computer guidata inoltre

richiede tempi e costi aggiuntivi nella fase di pianificazione e fabbricazione della dima; tali costi possono però essere compensati, soprattutto nei casi complessi o multipli, da una maggiore efficienza chirurgica e protesica e da una migliore corrispondenza tra progetto e risultato finale [30-32].

1.8 CONFRONTO TRA CHIRURGIA COMPUTER- GUIDATA STATICA E DINAMICA

All'interno della chirurgia implantare computer-guidata è utile distinguere tra chirurgia statica e chirurgia dinamica. Entrambe hanno l'obiettivo di trasferire al campo operatorio la posizione implantare progettata al computer, ma lo fanno con modalità differenti. La chirurgia statica utilizza una dima chirurgica costruita prima dell'intervento; mentre la chirurgia dinamica utilizza un sistema di navigazione che consente di seguire in tempo reale la posizione della fresa rispetto al progetto virtuale [24].

Nella chirurgia statica, la dima può essere dento-supportata, mucoso-supportata o osteo-supportata e guida fisicamente le frese nella direzione preventivata, nei protocolli completamente guidati anche l'inserimento dell'impianto avviene attraverso la dima stessa. Il vantaggio principale è la possibilità di trasferire in modo semplice e ripetibile la pianificazione digitale, con un flusso di lavoro relativamente standardizzabile e una buona predicibilità soprattutto nei pazienti parzialmente edentuli. I limiti sono rappresentati dalla dipendenza dell'adattamento della dima, dalla stabilità del supporto, dallo spazio intraorale disponibile, dalla profondità della boccia guida e dalla impossibilità di modificare la traiettoria durante l'intervento senza ripianificare il caso [24,25].

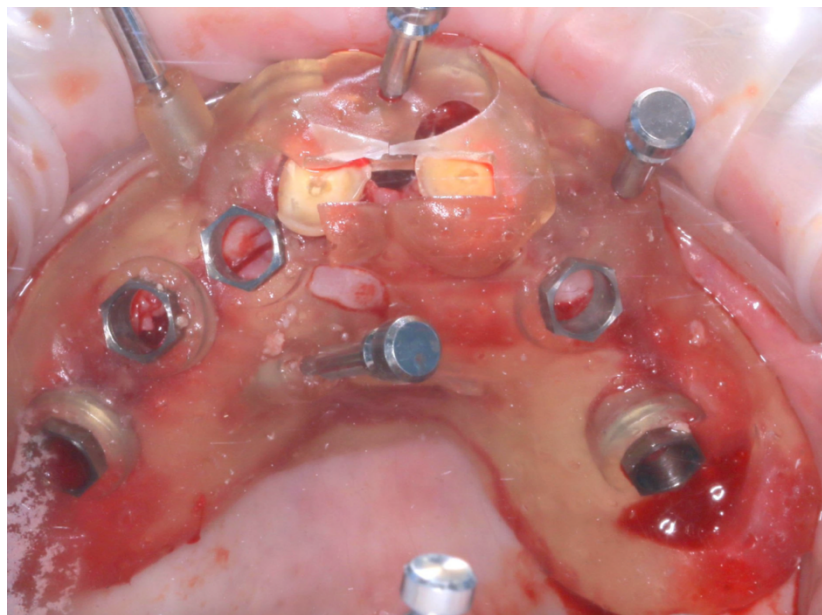


Figura 1ter. Applicazione clinica di una dima chirurgica dento-supportata durante la preparazione del sito implantare. Fonte: Markiewicz e Nowicki, 2025 [27], Fig. 3.

La chirurgia dinamica, invece, non si basa su una dima fisica che vincola il tragitto della fresa, ma su un sistema di tracciamento ottico o elettromagnetico che mostra sul monitor, in tempo reale, posizione, inclinazione e profondità dello strumento rispetto alla pianificazione. Questo approccio offre maggiore flessibilità intraoperatoria, può essere utile quando l'apertura orale è limitata o quando la dima statica risulta ingombrante, e permette al chirurgo di correggere la traiettoria durante l'intervento. Tuttavia richiede calibrazione accurata, controllo visivo costante del monitor, coordinazione occhio-mano, curva di apprendimento e verifica continua della precisione del sistema [24].

Dal punto di vista dell'accuratezza, le evidenze disponibili indicano che entrambe le metodiche migliorano il trasferimento del piano implanto-protesico rispetto alla tecnica convenzionale freehand, ma nessuna delle due può essere considerata priva di errore. La meta-analisi di Takács et al. ha mostrato che, negli studi in vitro, la chirurgia statica completamente guidata e i sistemi robot-assistiti presentano le prestazioni più favorevoli, mentre la chirurgia dinamica raggiunge risultati clinicamente validi, ma più sensibili all'esperienza dell'operatore e alla qualità della calibrazione. I dati clinici di

Khaohoen et al. confermano valori medi di deviazione contenuti sia per i sistemi statici sia per quelli dinamici, ma evidenziano comunque la presenza di discrepanze coronali, apicali e angolari che impongono il mantenimento di margini di sicurezza anatomici [25,26].

La scelta tra chirurgia statica e chirurgia dinamica non deve essere interpretata come una gerarchia tecnologica, ma come una decisione clinica guidata dalle caratteristiche del caso, dall'esperienza dell'operatore e dalle condizioni anatomiche e protesiche. In questo senso, entrambe le metodiche rappresentano strumenti complementari nell'ambito della chirurgia implantare computer-guidata, il cui vantaggio reale dipende dalla corretta integrazione tra diagnosi, pianificazione e controllo del flusso digitale [24,25].

1.9 FENOTIPO GENGIVALE, MUCOSA PALATALE E GESTIONE DEI TESSUTI MOLLI

Negli ultimi anni è emerso con chiarezza che il successo della terapia implantare non coincide con la sola osteointegrazione. La stabilità dei tessuti molli peri-implantari influenza l'esito estetico, il comfort nelle manovre di igiene, il controllo dell'infiammazione e il mantenimento del profilo mucoso. Per questo il fenotipo peri-implantare viene oggi descritto attraverso larghezza della mucosa cheratinizzata (KMW), spessore mucoso (MT), altezza del tessuto sopracrestale (STH) e spessore osseo vestibolare [33-35,43].

Le revisioni sistematiche disponibili indicano che le procedure di incremento dei tessuti molli possono migliorare selettivamente questi parametri. L'aumento della mucosa cheratinizzata, mediante lembo spostato apicalmente o vestiboloplastica associato a innesto gengivale libero, innesto connettivale o matrici collageniche, può determinare incrementi medi di KMW di circa

1,4-3,3 mm. Gli innesti connettivali subepiteliali restano tra le tecniche meglio documentate per aumentare volume e spessore dei tessuti peri-implantari [33-35].

Un riferimento clinico ricorrente è la soglia di circa 2 mm di mucosa cheratinizzata. Pur non essendo un valore assoluto valido per ogni paziente, siti con KMW <2 mm sono più spesso associati ad accumulo di placca, sanguinamento al sondaggio, infiammazione e discomfort durante lo spazzolamento. In questo senso la presenza di una banda adeguata di mucosa cheratinizzata va interpretata come un fattore favorevole per igiene domiciliare e stabilità peri-implantare [39,40,44,45].

Accanto alla larghezza, anche lo spessore mucoso ha rilievo biologico e protesico. Tessuti sottili (fenotipo parodontale festonato) sono più vulnerabili a rimodellamento osseo crestale, trasparenza dei materiali, recessioni e questo ha un impatto maggiore soprattutto in area estetica. La letteratura considera “fenotipo parodontale spesso” quando la mucosa ha uno spessore intorno a 2 mm e questa è la condizione più favorevole per la stabilità tissutale e un mascheramento delle componenti protesiche; il platform switching, da solo, non sembra compensare completamente un fenotipo mucoso sottile [35,41-43].

Il concetto di fenotipo gengivale integra quindi la componente mucosa e la componente ossea. Müller et al. e Fu et al. hanno evidenziato l'esistenza di fenotipi parodontali differenti e una relazione tra spessore gengivale vestibolare e morfologia ossea sottostante. In ambito mucogengivale, Yaman et al. hanno mostrato che lo spessore medio della mucosa palatale è di circa $2,55 \pm 0,49$ mm, con maggiore disponibilità nelle regioni premolari e progressivo aumento verso il rafe palatino; questo dato è utile nella pianificazione dei prelievi di tessuto connettivo [36-38].

Nella zona estetica, infine, la gestione dei tessuti molli è determinante perché il risultato non può essere misurato solo in termini di sopravvivenza implantare. Kois e Kan hanno sottolineato la necessità di preservare o ricostruire architettura ossea e gengivale del dente da sostituire; in linea con questo concetto, la meta-analisi di Wu et al. sugli impianti immediati con innesto osseo in area estetica ha riportato una recessione media di 0,33 mm a 1 anno e 0,54 mm a 5 anni, con sopravvivenza implantare complessiva del 97,8%. La gestione dei tessuti molli rappresenta quindi una determinante primaria nella stabilità biologica ed estetica del risultato [13,14].

Da qui si può capire che il collegamento tra fenotipo peri-implantare e chirurgia computer-guidata è particolarmente importante nelle aree estetiche. Un impianto posizionato troppo vestibolarmente, troppo coronale o con asse non favorevole può ridurre il supporto dei tessuti molli, aumentare il rischio di recessione o trasparenza delle componenti protesiche e rendere più difficile la costruzione di un profilo di emergenza armonico. La chirurgia computer-guidata consente, invece, di integrare la valutazione dell'osso corticale vestibolare, dello spessore dei tessuti molli, della futura corona e del margine mucoso in un unico progetto protesicamente orientato. Gli studi di Fürhauser et al. e Heng et al. indicano che, nel mascellare anteriore e nella zona estetica, la chirurgia computer-guidata può associarsi a migliori risultati estetici, misurati anche mediante il Pink Esthetic Score, rispetto al posizionamento a mano libera. Una recente sintesi critica di Sadilina et al. conferma che l'evidenza a favore dell'accuratezza della chirurgia computer-guidata è solida, mentre quella sugli esiti estetici è promettente ma ancora più limitata; per questo il vantaggio estetico va interpretato come conseguenza di una pianificazione più precisa e non come garanzia automatica di risultato [28, 29, 46, 53, 55].

La chirurgia computer-guidata rappresenta oggi uno snodo fondamentale dell'implantologia moderna, poiché consente di integrare diagnosi tridimensionale, pianificazione chirurgica e progetto protesico in un unico

percorso. Il suo valore non risiede esclusivamente nel miglioramento dell'accuratezza dell'inserimento implantare, ma soprattutto nella possibilità di definire in anticipo il risultato finale, valutando virtualmente posizione implantare, asse protesico, profilo di emergenza e relazione con i tessuti duri e molli peri-implantari.

In questo contesto, la logica terapeutica si è progressivamente modificata: mentre nella chirurgia a mano libera era spesso la protesi ad adattarsi alla posizione dell'impianto, nella pianificazione computer-guidata è il progetto protesico a guidare il posizionamento implantare. Questa inversione di prospettiva consente di ridurre i compromessi funzionali, biomeccanici ed estetici, migliorando la prevedibilità del trattamento.

Alla luce di queste considerazioni, la chirurgia implantare computer-guidata si configura non come una semplice evoluzione tecnologica, ma come un cambiamento concettuale nel modo di pianificare ed eseguire la terapia implantare. In questo scenario si inserisce il presente lavoro, volto ad analizzare criticamente ruolo, vantaggi e limiti di tali metodiche rispetto alla tecnica convenzionale a mano libera.

2. OBIETTIVI DELLA TESI

La presente tesi si propone di analizzare e confrontare i principali approcci alla chirurgia implantare, con particolare riferimento alla tecnica convenzionale a mano libera (freehand) e alla chirurgia implantare computer-guidata, nelle sue declinazioni statica e dinamica.

Partendo dai presupposti biologici dell'osseointegrazione e dai principi biomeccanici della riabilitazione implanto-protesica, l'obiettivo del lavoro è valutare criticamente il grado di accuratezza tridimensionale, predicibilità e trasferibilità clinica dei diversi protocolli chirurgici, con particolare attenzione alle deviazioni tra pianificazione virtuale e risultato clinico effettivo.

In particolare, il lavoro si propone di:

- analizzare il ruolo della pianificazione digitale nel migliorare il posizionamento implantare;
- valutare l'impatto della chirurgia computer-guidata sul controllo dell'asse implantare, della profondità e della posizione tridimensionale;
- confrontare vantaggi e limiti delle tecniche guidate rispetto alla chirurgia convenzionale, in termini di sicurezza, riproducibilità ed esiti clinici;
- identificare i principali fattori che influenzano l'accuratezza e le possibili fonti di errore lungo il flusso digitale.

L'obiettivo finale è definire il ruolo attuale e i limiti reali della chirurgia computer-guidata nella moderna pratica implantologica, individuandone gli ambiti di maggiore indicazione clinica.

3. MATERIALI E METODI

3.1 DISEGNO DELLO STUDIO

Il presente lavoro è stato impostato come una revisione narrativa della letteratura scientifica, con l'obiettivo di analizzare il ruolo della chirurgia implantare computer-guidata nella moderna implantologia orale. In particolare, l'attenzione è stata rivolta al confronto tra chirurgia implantare convenzionale a mano libera (freehand), chirurgia computer-guidata statica e chirurgia computer-guidata dinamica, valutando vantaggi, limiti e indicazioni cliniche dei diversi approcci.

La scelta di una revisione narrativa è stata ritenuta coerente con la finalità della tesi. L'obiettivo del lavoro, infatti, non è stato quello di produrre una nuova revisione sistematica o una meta-analisi quantitativa, ma di costruire un quadro critico delle conoscenze disponibili, integrando dati provenienti da studi clinici, studi multicentrici, trial randomizzati, revisioni sistematiche, meta-analisi, studi in vitro e articoli di riferimento.

La ricerca bibliografica è stata orientata a comprendere sia i fondamenti biologici e biomeccanici dell'implantologia, sia gli aspetti più specifici legati alla chirurgia computer-guidata. Sono stati quindi considerati temi quali "osteointegrazione", "guarigione del sito post-estrattivo", "biomeccanica implantare", "pianificazione tridimensionale", "accuratezza del posizionamento implantare", "chirurgia statica", "navigazione dinamica", "chirurgia flapless", "gestione dei tessuti molli peri-implantari" e "risultati estetici".

Per quanto riguarda la parte più strettamente tecnologica, che è il focus della tesi, cioè la chirurgia computer-guidata mediante sistemi statici o di navigazione dinamica e l'accuratezza del posizionamento implantare, è stata

data priorità alla letteratura più recente, in particolare agli studi pubblicati negli ultimi dieci anni (dal 2017 in poi).

3.2 FONTI BIBLIOGRAFICHE E DATABASE CONSULTATI

La ricerca bibliografica è stata condotta tra dicembre 2025 e maggio 2026 attraverso la consultazione di database scientifici di ambito biomedico e odontoiatrico, selezionati per rilevanza scientifica, ampiezza di indicizzazione e disponibilità di letteratura in ambito implantologico. I principali database utilizzati sono stati PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, Cochrane Library e Google Scholar.

PubMed/MEDLINE è stato utilizzato come database principale, poiché rappresenta una delle fonti più affidabili e complete per la ricerca di articoli scientifici in ambito medico, odontoiatrico e implantologico. Attraverso PubMed sono stati identificati studi clinici, revisioni sistematiche, meta-analisi e trial randomizzati relativi alla chirurgia implantare guidata, alla pianificazione digitale, alla CBCT e all'accuratezza del posizionamento implantare.

Scopus e Web of Science sono stati utilizzati come database complementari, con lo scopo di ampliare la ricerca, verificare la presenza di articoli non immediatamente reperibili tramite PubMed e individuare lavori recenti o particolarmente citati. Questi database sono stati utili soprattutto per approfondire il confronto tra chirurgia freehand, chirurgia statica computer-guidata e chirurgia dinamica.

La Cochrane Library è stata consultata per identificare revisioni sistematiche di elevato livello metodologico, in particolare su temi come sostituzione implantare, outcome clinici e procedure chirurgiche in implantologia.

Google Scholar è stato utilizzato come strumento integrativo. Il suo impiego non ha sostituito la consultazione dei database scientifici principali, ma ha permesso di rintracciare articoli non facilmente reperibili, verificare citazioni bibliografiche, recuperare versioni full text e individuare lavori citati all'interno di revisioni sistematiche e meta-analisi.

È stata inoltre eseguita una ricerca manuale delle bibliografie degli articoli più rilevanti. Questa procedura ha consentito di identificare ulteriori pubblicazioni pertinenti, non emerse direttamente dalle prime ricerche elettroniche, ma utili per completare l'inquadramento dell'argomento.

Per alcuni aspetti di carattere generale, come i principi biomeccanici dell'implantologia, la pianificazione implanto-protetica e la chirurgia implantare contemporanea, sono stati presi in considerazione anche testi specialistici e manuali di riferimento.

3.3 STRATEGIA DI RICERCA BIBLIOGRAFICA

La ricerca bibliografica è stata condotta utilizzando prevalentemente parole chiave in lingua inglese, poiché la maggior parte della letteratura scientifica internazionale in ambito implantologico è pubblicata in inglese.

Le parole chiave sono state selezionate in base all'argomento principale della tesi e combinate tra loro mediante operatori booleani AND e OR. L'operatore OR è stato utilizzato per includere sinonimi o termini affini, mentre l'operatore AND è stato impiegato per restringere la ricerca e individuare articoli più specificamente pertinenti.

Le principali aree tematiche investigate hanno riguardato la chirurgia implantare computer-guidata, la chirurgia convenzionale a mano libera, l'accuratezza del posizionamento implantare, la pianificazione digitale, la

chirurgia flapless, la navigazione dinamica e gli outcome biologici ed estetici correlati alla terapia implantare.

Le principali parole chiave utilizzate sono riportate nella Tabella 1.

Tabella 1.

Area tematica	Principali parole chiave utilizzate
Chirurgia implantare computer-guidata	guided implant surgery; computer-guided implant surgery; computer-assisted implant surgery; computer-aided implant surgery
Chirurgia guidata statica	static guided surgery; static computer-assisted implant surgery; s-CAIS; fully guided implant surgery; pilot-guided implant surgery
Chirurgia guidata dinamica	dynamic navigation; dynamic computer-assisted implant surgery; d-CAIS; navigation-guided implant surgery
Chirurgia convenzionale	freehand implant placement; free-handed implant surgery; conventional implant placement
Accuratezza del posizionamento implantare	implant accuracy; implant deviation; angular deviation; coronal deviation; apical deviation; vertical deviation
Pianificazione digitale	digital implant planning; CBCT; cone-beam computed tomography; intraoral scan; DICOM/STL matching
Guide chirurgiche	surgical guide; surgical template; guided implant placement

Area tematica	Principali parole chiave utilizzate
Tecniche chirurgiche implantari	flapless guided surgery; immediate implant placement; implant placement
Outcome biologici ed estetici	peri-implant soft tissue; esthetic outcome; Pink Esthetic Score; peri-implant mucosa
Implantologia generale	dental implants; dental implantation; implant prosthodontics

Le stringhe di ricerca sono state progressivamente affinate in funzione del database consultato e degli obiettivi specifici della ricerca bibliografica. In PubMed, quando disponibili, sono stati utilizzati anche termini MeSH pertinenti, tra cui “Dental Implants”, “Dental Implantation”, “Computer-Assisted Surgery” e “Cone-Beam Computed Tomography”.

Tra le principali combinazioni utilizzate rientrano:

- (“guided implant surgery” OR “computer-guided implant surgery”) AND “implant accuracy”;
- “computer-guided implant surgery” AND “implant placement” AND “deviation”;
- (“freehand implant placement” OR “conventional implant placement”) AND “computer-guided implant surgery”;
- “static guided surgery” AND “dynamic navigation” AND “dental implants”.

3.4 CRITERI TEMPORALI DELLA RICERCA

Per le ricerche rivolte alla chirurgia implantare computer-guidata e al confronto delle accuratezze tra la tecnica chirurgica a mano libera (freehand), la chirurgia statica e la chirurgia dinamica, sono stati privilegiati gli articoli pubblicati negli ultimi dieci anni.

Questa scelta è stata motivata dalla rapida evoluzione delle tecnologie digitali applicate all'implantologia. Software di pianificazione, sistemi CBCT, scanner intraorali, metodiche di sovrapposizione dei file DICOM/STL, tecniche di stampa 3D delle dime chirurgiche e sistemi di navigazione dinamica hanno subito un'evoluzione significativa negli ultimi anni. Per questo motivo, gli studi più recenti sono stati considerati maggiormente rappresentativi della pratica clinica attuale.

Sono stati tuttavia inclusi anche lavori più datati quando ritenuti fondamentali per l'inquadramento dell'argomento. Questo criterio è stato applicato solamente agli studi relativi all'osteointegrazione, alla biomeccanica implantare, alla guarigione del sito post-estrattivo e alla prognosi del dente trattato endodonticamente.

In questo modo è stato possibile integrare i principi biologici e clinici consolidati con le evidenze più recenti relative alle tecnologie digitali e alla chirurgia guidata.

3.5 CRITERI DI INCLUSIONE

Sono stati inclusi articoli scientifici pertinenti agli obiettivi della tesi e coerenti con il tema della chirurgia implantare guidata.

In particolare, sono stati considerati eleggibili articoli, quali:

- Studi clinici prospettici;
- Studi clinici retrospettivi;

- Trial randomizzati controllati;
- Revisioni sistematiche;
- Meta-analisi;
- Revisioni narrative di particolare rilevanza;
- Studi in vitro sull'accuratezza del posizionamento implantare.

Sono stati inclusi studi riguardanti pazienti trattati con impianti dentali mediante tecnica convenzionale a mano libera (freehand), chirurgia computer-guidata statica, chirurgia dinamica o protocolli robot-assistiti, purché riportassero dati utili alla valutazione dell'accuratezza, della predicibilità, della sicurezza o degli outcome clinici.

Per la parte dedicata all'accuratezza sono stati considerati particolarmente rilevanti gli studi che riportavano parametri riguardo alla deviazione tra posizione implantare pianificata e posizione finale dell'impianto, quali deviazione coronale, deviazione apicale, deviazione angolare e deviazione in profondità. L'accuratezza è stata confrontata in diversi livelli di guida chirurgica, come tecnica a mano libera (assenza di una guida chirurgica), chirurgia pilot-guided, chirurgia partially guided e chirurgia fully guided.

Per la parte relativa alla chirurgia computer-guidata dinamica sono stati inclusi studi che descrivevano in modo chiaro il sistema di navigazione utilizzato e i criteri di valutazione dell'accuratezza.

Per gli aspetti relativi ai tessuti molli e agli outcome estetici, sono stati selezionati studi e revisioni riguardanti mucosa cheratinizzata e stabilità del profilo mucoso in area estetica.

Sono stati privilegiati articoli in lingua inglese, disponibili almeno in forma di abstract e preferibilmente in full text.

3.6 CRITERI DI ESCLUSIONE

Sono stati esclusi gli articoli non pertinenti rispetto agli obiettivi della tesi. In particolare, non sono stati considerati lavori che trattavano genericamente la chirurgia implantare senza alcun riferimento alla pianificazione digitale, alla chirurgia computer-guidata, alla navigazione dinamica, all'accuratezza del posizionamento implantare o agli outcome implanto-protesici.

Sono stati esclusi case report isolati e descrizioni di singoli casi clinici, poiché caratterizzati da limitata generalizzabilità. Sono state esclusi anche case series di dimensioni molto ridotte, salvo rare eccezioni per argomenti innovativi o scarsamente rappresentati in letteratura.

Non sono stati inclusi editoriali, lettere all'editore, commenti privi di dati originali, abstract congressuali senza full text e articoli non sottoposti a revisione tra pari.

Sono stati inoltre esclusi studi con metodologia poco chiara, dati incompleti o impossibilità di distinguere il tipo di protocollo chirurgico utilizzato.

Per la parte relativa alla chirurgia computer-guidata sono stati generalmente esclusi studi pubblicati oltre dieci anni prima della ricerca, quando riferiti a tecnologie, software o protocolli non più rappresentativi della pratica clinica attuale. Tale limite temporale non è stato invece applicato rigidamente ai lavori storici o fondativi.

Sono stati esclusi studi esclusivamente condotti su modelli animali, quando non direttamente pertinenti all'argomento della tesi. Gli studi in vitro sono stati invece inclusi quando riguardavano specificamente l'accuratezza del posizionamento implantare o il confronto tra tecniche chirurgiche.

3.7 SINTESI DELLA STRATEGIA DI RICERCA

Per rendere più chiara e riproducibile la metodologia adottata, nella Tabella 2 sono riassunti i principali elementi della strategia di ricerca bibliografica, comprendenti database consultati, parole chiave principali, criteri di inclusione, criteri di esclusione e outcome considerati.

Tabella 2. Sintesi della strategia di ricerca bibliografica.

Elemento metodologico	Descrizione
Periodo della ricerca	Marzo–maggio 2026
Tipologia di revisione	Revisione narrativa della letteratura
Database consultati	PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, Cochrane Library, Google Scholar
Fonti integrative	Bibliografie degli articoli selezionati, revisioni sistematiche, meta-analisi, testi specialistici di riferimento
Lingua degli articoli	Prevalentemente inglese
Parole chiave principali	"guided implant surgery", "computer-guided implant surgery", "freehand implant placement", "implant accuracy", "static guided surgery", "dynamic navigation", "dental implants", "digital implant planning", "surgical guide", "flapless guided surgery", "peri-implant soft tissue"
Operatori booleani utilizzati	AND, OR
Tipologie di studi inclusi	Studi clinici, trial randomizzati controllati, studi prospettici e retrospettivi, revisioni sistematiche, meta-analisi, revisioni narrative rilevanti, studi in vitro sull'accuratezza implantare
Argomenti inclusi	Chirurgia implantare freehand, chirurgia computer-guidata statica, chirurgia dinamica, accuratezza implantare, pianificazione digitale, chirurgia flapless, impianti immediati, outcome estetici
Criteri temporali	Priorità agli studi pubblicati negli ultimi dieci anni per chirurgia guidata e tecnologie digitali; inclusione di lavori storici quando fondativi per osteointegrazione, biomeccanica e principi implantologici
Criteri di esclusione	Case report isolati, studi non pertinenti, articoli non peer-reviewed, abstract congressuali privi di full text, editoriali, lettere all'editore, studi con metodologia non chiara, lavori molto datati su tecnologie non più attuali
Outcome principali considerati	Deviazione coronale, deviazione apicale, deviazione angolare, accuratezza tridimensionale del posizionamento implantare
Outcome secondari considerati	Sopravvivenza implantare, rimodellamento osseo marginale, complicanze, dolore post-operatorio, morbidità, tempi chirurgici, costi, stabilità dei tessuti molli, outcome estetici

Invece, nella Tabella 3 sono elencati gli articoli dai quali sono state acquisite le informazioni per scrivere questa tesi.

Tabella 3. Sintesi degli articoli raccolti

N°	Articolo	Tipologia di articolo	Breve descrizione
1	Lo Russo L. et al. Three-Dimensional Accuracy of Surgical Guides for Static Computer-Aided Implant Surgery. Prosthesis. 2025;9(3):25	Revisione sistematica	Valuta l'accuratezza tridimensionale delle guide chirurgiche statiche prodotte mediante stampa 3D o fresatura. Gli autori dichiarano che la sintesi quantitativa non è risultata possibile per l'eterogeneità degli studi inclusi.
2	Putra R.H. et al. The accuracy of implant placement with computer-guided surgery in partially edentulous patients and possible influencing factors. J Prosthodont Res. 2026;28–35	Revisione sistematica e meta-analisi	Include studi clinici su pazienti parzialmente edentuli; analizza l'accuratezza dell'inserimento implantare computer-guidato e i possibili fattori influenzanti.
3	Romandini M. et al. Minimally invasive vs standard dental implant placement. Periodontol 2000. 2023;83:81–122	Revisione sistematica e meta-analisi	Analizza la chirurgia implantare flapless o minimamente invasiva rispetto agli approcci convenzionali, considerando invasività, accuratezza e outcome clinici.
4	Testori T. et al. Implant placement in the esthetic area. Periodontol 2000. 2023;77:146–165	Revisione narrativa / articolo di riferimento clinico	Non è centrato su criteri e dati per il posizionamento implantare in area estetica.
5	D'Haese J. et al. Current state of the art of computer-guided implant surgery. Periodontol 2000. 2017;73(1):121–133	Review / state-of-the-art overview	Articolo di sintesi sullo stato dell'arte della chirurgia implantare computer-guidata, non uno studio clinico randomizzato.

N°	Articolo	Tipologia di articolo	Breve descrizione
6	Dioguardi M. et al. Guided Dental Implant Surgery: Systematic Review. J Clin Med. 2023;12:1490	Revisione sistematica	Valuta sopravvivenza implantare, fallimenti, rimodellamento osseo marginale e complicanze negli impianti inseriti con chirurgia guidata.
7	Tahmaseb A. et al. The accuracy of static computer-aided implant surgery. Clin Oral Implants Res. 2018;29(Suppl 16):416–435	Revisione sistematica e meta-analisi	Lavoro molto importante sull'accuratezza della chirurgia computer-guidata statica; include studi clinici e riporta meta-analisi delle deviazioni.
8	Kernen F. et al. A review of virtual planning software for guided implant surgery: data import and visualization, drill guide design and manufacturing. BMC Oral Health. 2020;20:251	Review / revisione descrittiva comparativa di software	Non è uno studio clinico sull'accuratezza, ma una review sui software di pianificazione implantare virtuale e sulla progettazione/produzione delle guide.
9	Pozzi A. et al. Digital-assisted soft tissue sculpting technique for immediate implant loading in fresh extraction sockets. J Prosthodont Res. 2021;65:119–124	Technical procedure / descrizione di tecnica clinica digitale	Articolo tecnico-procedurale che introduce una tecnica digitale assistita per lo sculpting dei tessuti molli e il carico immediato in alveoli post-estrattivi. Non è finalizzato al confronto quantitativo dell'accuratezza implantare.
10	Takács A. et al. Advancing accuracy in guided implant placement: A comprehensive meta-analysis. J Dent. 2023;139:104748	Meta-analisi di studi in vitro	Meta-analisi che confronta diverse modalità di implantologia computer-assistita, include chirurgia statica, dinamica, robot-assistita, realtà aumentata e mano libera, in condizioni in vitro.

N°	Articolo	Tipologia di articolo	Breve descrizione
11	Khaohoen A. et al. Accuracy of implant placement with computer-aided static, dynamic and robot-assisted surgery. BMC Oral Health. 2024;24:359	Revisione sistematica e meta-analisi di studi clinici	Confronta l'accuratezza clinica della chirurgia implantare computer-assistita statica, dinamica e robot-assistita, riportando deviazione coronale, apicale e angolare rispetto alla pianificazione.
12	Markiewicz M. et al. Accuracy of Computer-Guided Dental Implant Placement: A Clinical Comparison of Three Surgical Guide Types. J Clin Med. 2025;14:8652	Studio clinico comparativo osservazionale	Studio clinico che confronta l'accuratezza di guide dento-supportate, mucoso-supportate e osseo-supportate, non randomizzato.
13	Ku J. et al. Accuracy of dental implant placement with computer-guided surgery: a retrospective cohort study. BMC Oral Health. 2022;22:8	Studio retrospettivo di coorte	Studio clinico retrospettivo su pazienti trattati con chirurgia implantare computer-guidata; valuta l'accuratezza mediante sovrapposizione CBCT.
14	Shi Y. et al. A systematic review of the accuracy of digital surgical guides for dental implantation. Int J Implant Dent. 2023;9:38	Revisione sistematica	Analizza l'influenza del tipo di supporto della guida, del metodo di produzione e del design della guida sull'accuratezza implantare, includendo studi in vitro e in vivo.
15	Chrabieh E. et al. Accuracy of computer-guided implant surgery in partially edentulous patients: a prospective observational study. Int J Implant Dent. 2024;10:36	Studio prospettico osservazionale	Studio clinico prospettico su pazienti parzialmente edentuli trattati con chirurgia guidata 3D-printed; risultati registrati su ClinicaTrials.gov.

N°	Articolo	Tipologia di articolo	Breve descrizione
16	Chandran et al. Accuracy of freehand versus guided immediate implant placement: a randomized controlled trial. J Dent. 2023;136:104620. [rif. fornito: 15]	Studio clinico randomizzato controllato / RCT	Confronta il posizionamento implantare immediato post-estrattivo con tecnica freehand versus chirurgia guidata statica. Lo studio mostra una maggiore accuratezza della chirurgia guidata rispetto alla mano libera, in particolare per la deviazione angolare e per alcune deviazioni lineari.
17	Pitman et al. Examining the Influence of Freehand, Pilot-Guided, and Fully Guided Surgical Protocols on the Accuracy of Immediately Placed Implants—An In Vitro Study. Appl Sci. 2024;14(20):9253. [rif. fornito: 16]	Studio in vitro comparativo	Confronta tre protocolli per impianti immediati: mano libera, pilot-guided e fully guided. I risultati indicano minori deviazioni con il protocollo fully guided; non emerge invece una differenza significativa tra pilot-guided e freehand.
18	Xing et al. The Accuracy of Immediate Implantation Guided by Digital Templates and Potential Influencing Factors: A Systematic Review. Int Dent J. 2025;75(2):439–452. [rif. fornito: 17]	Revisione sistematica	Valuta l'accuratezza dell'implantologia immediata eseguita con template digitali. Gli autori riportano un'accuratezza generalmente accettabile e individuano fattori influenzanti come tipo di guida, fabbricazione della ditta, protocollo chirurgico, variabilità anatomica e pianificazione preoperatoria.
19	Werny et al. Freehand vs. computer-aided implant surgery: a systematic review and meta-analysis—part 1: accuracy of planned and placed implant position. Int J Implant Dent. 2025;11(1):35. [rif. fornito: 18]	Revisione sistematica e meta-analisi	Confronta chirurgia a mano libera e computer-aided implant surgery, includendo approcci statici e dinamici. La revisione conclude che sia sCAIS sia dCAIS migliorano l'accuratezza rispetto alla mano libera, con deviazioni angolari generalmente comprese tra circa 2° e 6°.
20	Lops et al. Guided versus freehand single implant placement: A 3-year parallel randomized clinical trial. J Dent. 2024;149:105317. [rif. fornito: 19]	Studio clinico randomizzato parallelo, follow-up 3 anni	Confronta impianti singoli inseriti con chirurgia guidata statica digitale versus mano libera, valutando soprattutto stabilità dei livelli ossei marginali peri-implantari. A 3 anni non emerge una differenza significativa nel rimodellamento osseo marginale tra chirurgia guidata eseguita da operatore non esperto e freehand eseguita da operatore esperto.

N°	Articolo	Tipologia di articolo	Breve descrizione
21	Hultin et al. Clinical advantages of computer-guided implant placement: a systematic review. Clin Oral Implants Res. 2012;23 Suppl 6:124–135. [rif. fornito: 21]	Revisione sistematica	Articolo storico utile per inquadrare i possibili vantaggi clinici della chirurgia computer-guidata rispetto ai protocolli convenzionali. Non è centrato solo sulle deviazioni tridimensionali, ma su outcome clinici, complicanze e vantaggi pratici della chirurgia guidata.
22	Fürhauser et al. Esthetics of Flapless Single-Tooth Implants in the Anterior Maxilla Using Guided Surgery: Association of Three-Dimensional Accuracy and Pink Esthetic Score. Clin Implant Dent Relat Res. 2015;17 Suppl 2:e427–e433. [rif. fornito: 28]	Studio clinico osservazionale / estetico-clinico	Analizza impianti singoli flapless in mascella anteriore inseriti con chirurgia guidata, correlando accuratezza tridimensionale e risultato estetico tramite Pink Esthetic Score. Utile per sostenere che anche piccole deviazioni possono avere impatto estetico in zona anteriore.
23	Heng et al. Comparing Medium to Long-Term Esthetic, Clinical, and Patient-Reported Outcomes Between Freehand and Computer-Assisted Dental Implant Placement: A Cross-Sectional Study. J Esthet Restor Dent. 2025;37(4):834–843. [rif. fornito: 29]	Studio trasversale clinico, medio-lungo termine	Confronta outcome estetici, clinici e riferiti dal paziente tra impianti inseriti con computer-assisted implant surgery e tecnica freehand, prevalentemente in area estetica. È utile per ampliare la tesi oltre l'accuratezza immediata, includendo PES, livelli ossei marginali, parametri clinici e PROMs.
24	Graf et al. Time and costs related to computer-assisted versus non-computer-assisted implant planning and surgery. A systematic review. Clin Oral Implants Res. 2021;32 Suppl 21:303–317. [rif. fornito: 30]	Revisione sistematica economico-organizzativa	Valuta tempi e costi della pianificazione e chirurgia computer-assistita rispetto ai flussi non computer-assistiti. Gli autori riportano che le fasi diagnostiche e di pianificazione computer-assistite richiedono più tempo/costi, mentre i dati sulla fase chirurgica sono più eterogenei.
25	Joda et al. Static computer-aided implant surgery (s-CAIS) analysing patient-reported outcome measures (PROMs), economics and surgical complications: A systematic review. Clin Oral Implants Res. 2018;29 Suppl 16:359–373. [rif. fornito: 31]	Revisione sistematica su PROMs, costi e complicanze	Non è uno studio di accuratezza pura. Valuta la chirurgia statica computer-assistita considerando outcome riferiti dal paziente, aspetti economici e complicanze chirurgiche. Utile nella discussione per integrare accuratezza tecnica, percezione del paziente e sostenibilità clinica.
26	Younes et al. A randomized controlled trial on the efficiency of free-handed, pilot-drill guided and fully guided implant surgery in partially edentulous patients. Clin Oral Implants Res. 2019;30(2):131–138. [rif. fornito: 32]	Studio clinico randomizzato controllato / RCT	Confronta freehand, pilot-drill guided e fully guided in pazienti parzialmente edentuli, con focus sull'efficienza chirurgica. È utile insieme agli studi di accuratezza perché confronta direttamente diversi livelli di guida statica nella pratica clinica.

3.8 PROCESSO DI SELEZIONE DEGLI ARTICOLI

La selezione degli articoli è stata eseguita in più fasi. Inizialmente sono stati analizzati titolo e abstract degli studi identificati mediante la ricerca bibliografica, escludendo i lavori non pertinenti rispetto agli obiettivi della tesi. Successivamente sono stati esaminati i full text degli articoli ritenuti potenzialmente rilevanti, valutandone coerenza tematica, impostazione metodologica e pertinenza clinica.

Gli articoli duplicati presenti in più database sono stati rimossi. Nei casi in cui più studi affrontassero argomenti sovrapponibili, è stata data priorità ai lavori caratterizzati da maggiore solidità metodologica, numerosità campionaria più ampia, maggiore rilevanza clinica o pubblicazione più recente.

Le revisioni sistematiche e le meta-analisi sono state considerate le fonti di evidenza di maggiore peso metodologico, mentre gli studi clinici osservazionali e gli studi in vitro sono stati utilizzati soprattutto per comprendere le variabili tecniche che influenzano l'accuratezza, tenendo conto dei rispettivi limiti di trasferibilità clinica.

3.9 ESTRAZIONE E ORGANIZZAZIONE DELLE INFORMAZIONI

Dagli articoli selezionati sono state estratte le informazioni ritenute maggiormente pertinenti agli obiettivi del presente lavoro. Per ciascuno studio sono stati considerati autore, anno di pubblicazione, tipologia di studio, caratteristiche del campione, protocollo chirurgico analizzato, modalità di pianificazione digitale, tipo di guida chirurgica o sistema di navigazione impiegato, outcome valutati e principali risultati riportati.

Per gli studi relativi all'accuratezza del posizionamento implantare sono stati raccolti dati riguardanti deviazione coronale, deviazione apicale, deviazione angolare ed eventuale deviazione verticale tra posizione pianificata e posizione finale dell'impianto.

Negli studi clinici sono stati inoltre considerati outcome secondari quali sopravvivenza implantare, rimodellamento osseo marginale, complicanze chirurgiche, morbidità post-operatoria, stabilità dei tessuti molli peri-implantari ed esiti estetici.

Le informazioni raccolte sono state successivamente organizzate secondo un criterio tematico. I dati relativi ai principi biologici e biomeccanici sono stati utilizzati per costruire il razionale dell'implantologia moderna. I dati sulla chirurgia freehand sono stati impiegati per descrivere il ruolo e i limiti della tecnica convenzionale. Le evidenze sulla chirurgia computer-guidata sono state suddivise in base al tipo di approccio: chirurgia statica, chirurgia dinamica, sistemi robot-assistiti, protocolli flapless e impianti immediati guidati.

3.10 VALUTAZIONE CRITICA DELLE EVIDENZE

La qualità delle evidenze è stata valutata considerando il disegno dello studio, la numerosità del campione, la chiarezza metodologica, la presenza di un gruppo di confronto, la definizione degli outcome e la coerenza dei risultati con la letteratura disponibile.

Le revisioni sistematiche e le meta-analisi sono state considerate fonti di maggiore peso, soprattutto quando basate su criteri di selezione chiari e su un numero adeguato di studi. I trial randomizzati controllati sono stati valutati come particolarmente rilevanti per il confronto diretto tra protocolli

chirurgici. Gli studi osservazionali sono stati utilizzati per descrivere risultati clinici, estetici e funzionali in contesti vicini alla pratica quotidiana.

Gli studi in vitro sono stati interpretati con prudenza; motivo per cui è stato deciso di considerare soltanto quello ritenuto più significativo. Pur offrendo dati utili sull'accuratezza tecnica dei diversi protocolli, essi non riproducono completamente le condizioni cliniche reali, nelle quali intervengono variabili come apertura orale, qualità ossea, sanguinamento, stabilità della guida, movimento del paziente, esperienza dell'operatore, irrigazione e accessibilità chirurgica.

Nella valutazione complessiva è stata mantenuta una distinzione tra accuratezza tecnica e successo clinico. Una maggiore corrispondenza tra posizione pianificata e posizione finale dell'impianto rappresenta un dato importante, ma non coincide automaticamente con la sopravvivenza implantare, la stabilità biologica o risultato estetico ideale. Per questo motivo, l'accuratezza è stata considerata come un indicatore di controllo chirurgico e protesico, ma non come unico parametro di successo terapeutico.

3.11 OUTCOME CONSIDERATI

Gli outcome principali considerati sono stati sicuramente l'accuratezza tridimensionale del posizionamento implantare, valutata sulla base di quattro deviazioni tra la pianificazione virtuale e la posizione finale dell'impianto, di cui la quarta non sempre presente nei lavori presi in esame. In particolare, sono state valutate:

- Deviazione al punto di ingresso (coronale);
- Deviazione apicale;
- Deviazione angolare;
- Deviazione verticale o in profondità [quando riportata].

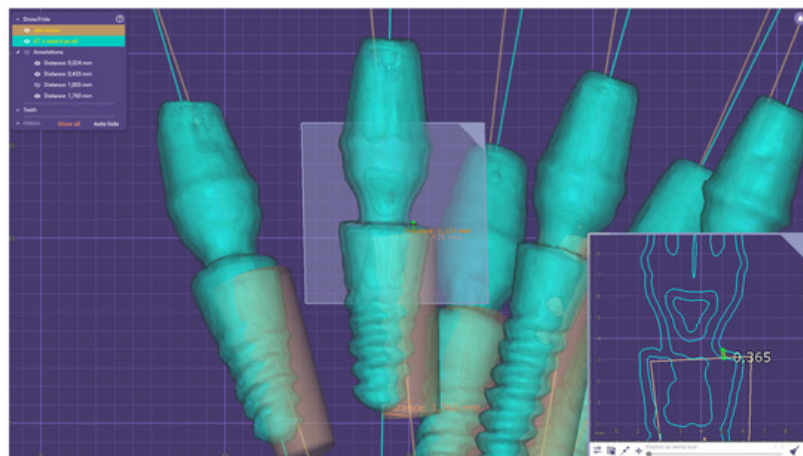


Figura 4. Misurazione della discrepanza tra posizione implantare pianificata e posizione ottenuta mediante software Exocad. Fonte: adattata da Markiewicz e Nowicki, 2025 [27], Fig. 6.

Particolare attenzione è stata posta ai fattori che possono influenzare l'accuratezza della chirurgia guidata, tra cui la qualità della CBCT, la corretta sovrapposizione dei file DICOM e STL, la progettazione e il materiale con cui viene creata la dima chirurgica, il tipo di supporto della guida, la tolleranza tra boccia e fresa e l'esperienza dell'operatore.

Per la chirurgia dinamica sono stati considerati anche aspetti specifici, come calibrazione del sistema, tracciamento dello strumento, coordinazione occhio-mano, curva di apprendimento e necessità di seguire in tempo reale la posizione della fresa sul monitor.

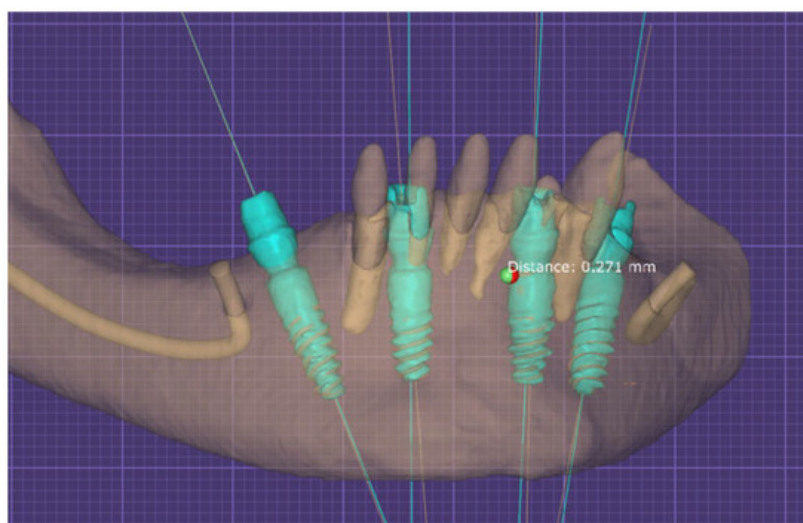


Figura 5. Allineamento dei file STL planned/placed per la verifica della posizione finale dell'impianto rispetto alla pianificazione virtuale. Fonte: adattata da Markiewicz e Nowicki, 2025 [27], Fig. 7.

Invece, per quanto riguarda gli outcome secondari, essi hanno incluso:

- Sopravvivenza implantare;
- Rimodellamento osseo marginale;
- Complicanze chirurgiche;
- Morbilità post-operatoria;
- Dolore riferito dal paziente;
- Durata dell'intervento;
- Costi;
- Stabilità dei tessuti molli;
- Esiti estetici.

3.12 SINTESI DEI DATI

I dati raccolti non sono stati sottoposti a nuova analisi statistica, poiché l'obiettivo del presente lavoro non era la realizzazione di una meta-analisi originale. Le evidenze disponibili sono state pertanto sintetizzate in forma descrittiva e critica, privilegiando gli studi caratterizzati da maggiore rilevanza clinica, metodologica e più recenti.

La sintesi è stata costruita secondo un criterio tematico. Questo approccio ha permesso di organizzare il materiale bibliografico attorno ai principali quesiti della tesi: quali sono i limiti della chirurgia implantare a mano libera, quali vantaggi offre la chirurgia computer-guidata, quali differenze esistono tra chirurgia statica e dinamica, quali sono le principali fonti di errore del workflow digitale e quali sono i reali limiti clinici delle metodiche guidate.

3.13 CONSIDERAZIONI METODOLOGICHE FINALI

La metodologia adottata ha permesso di costruire una base bibliografica ampia e coerente con gli obiettivi della tesi. L'utilizzo combinato di database scientifici, parole chiave specifiche, operatori booleani, criteri di inclusione ed esclusione e ricerca manuale delle bibliografie ha consentito di selezionare lavori utili a descrivere in modo critico l'evoluzione dalla chirurgia implantare convenzionale alla chirurgia computer-guidata.

Il materiale raccolto è stato interpretato mantenendo una prospettiva clinica realistica. La chirurgia guidata non è stata considerata come una garanzia assoluta di perfezione, ma come uno strumento capace di migliorare il trasferimento della pianificazione digitale al campo operatorio, ridurre la variabilità operatore-dipendente e aumentare la prevedibilità nei casi correttamente selezionati.

Allo stesso tempo, è stato considerato che ogni fase del workflow digitale può introdurre margini di errore: acquisizione radiologica, scansione intraorale, sovrapposizione dei file, progettazione della guida, produzione della dima, stabilità intraoperatoria e controllo clinico dell'operatore. Per questo motivo, la competenza del clinico rimane un elemento centrale, anche quando si utilizzano sistemi digitali avanzati.

In conclusione, la ricerca bibliografica ha fornito il supporto necessario per analizzare la chirurgia implantare computer-guidata non soltanto come innovazione tecnologica, ma come evoluzione del modo di pianificare ed eseguire la terapia implanto-protetica. La selezione degli studi ha permesso di confrontare vantaggi, limiti e indicazioni delle diverse metodiche, mantenendo un approccio critico, aggiornato e orientato alla pratica clinica.

4. RISULTATI

4.1 DEVIAZIONE CORONALE

La deviazione coronale esprime lo scostamento tra la posizione implantare pianificata e quella ottenuta a livello della piattaforma implantare o del punto di ingresso crestale. Quindi è un parametro clinicamente rilevante in quanto condiziona il profilo di emergenza della protesi, la possibilità di mantenere una riabilitazione avvvitata, il rapporto con gli elementi dentari adiacenti, lo spessore dei tessuti peri-implantari e il rispetto della corticale vestibolare.

Nei lavori analizzati, visualizzabili rapidamente nella Tabella 4, la chirurgia freehand mostra in generale valori di deviazione coronale superiori rispetto alle metodiche di chirurgia guidata, pur con una variabilità legata al disegno dello studio, al contesto anatomico, al tipo di edentulia e al supporto della guida.

Nella meta-analisi in vitro di Takács et al., che forse è lo studio più significativo preso in esame nella tesi, la deviazione coronale media della chirurgia freehand è pari a 1,33 mm [IC 95%: 1,00–1,67 mm]. La chirurgia guidata statica (sCAIS) complessiva mostra un valore di 0,72 mm, con differenze tra i protocolli: 0,84 mm per il protocollo pilot-guided (sCAIS-PG), 0,73 mm per il protocollo half-guided (sCAIS-HG) e 0,71 mm per il protocollo fully guided (sCAIS-FG). La chirurgia guidata dinamica (dCAIS) riporta, invece, una deviazione coronale di 1,00 mm. Il dato evidenzia un gradiente di accuratezza: la chirurgia statica completamente guidata risulta più precisa della chirurgia dinamica e della freehand nel controllo della piattaforma implantare [25].

L'analoga tendenza viene confermata nella meta-analisi clinica di Werny et al.: la deviazione globale alla piattaforma risulta essere di 1,56 mm per la freehand, 1,13 mm per la sCAIS-PG, 0,72 mm per la sCAIS-FG e 1,01 mm

per la dCAIS. Anche in ambito clinico, quindi, la chirurgia guidata statica completamente guidata (sCAIS-FG) rappresenta la metodica con il miglior controllo coronale, mentre la chirurgia guidata dinamica (dCAIS) si colloca in posizione intermedia: più accurata della mano libera (freehand), ma meno performante della statica completamente guidata (sCAIS-FG) [18].

Nel trial di Younes et al., la deviazione coronale globale è 1,45 mm nel gruppo freehand, 1,12 mm nel gruppo sCAIS-PG e 0,73 mm nel gruppo sCAIS-FG. Da questo trial si può evincere che l'utilizzo della sola guida della fresa pilota riduce parzialmente l'errore, ma non garantisce il controllo completo delle fasi successive di preparazione e inserimento implantare. Al contrario, la sCAIS-FG consente il trasferimento più fedele della pianificazione a livello crestale [32].

Per quanto riguarda gli impianti immediati post-estrattivi, Chandran et al. riportano un vantaggio netto della chirurgia guidata statica (sCAIS): nel gruppo freehand la deviazione coronale è pari a $1,13 \pm 0,89$ mm in senso mesio-distale e $1,00 \pm 0,76$ mm in senso bucco-linguale; mentre nel gruppo guidato (sCAIS) i valori si riducono rispettivamente a $0,34 \pm 0,26$ mm e $0,37 \pm 0,24$ mm. Questo risultato è particolarmente rilevante perché nella chirurgia a mano libera (freehand) l'alveolo post-estrattivo può proprio deviare la traiettoria della fresa, soprattutto in presenza di pareti vestibolari sottili o morfologie radicolari sfavorevoli [15].

Gli studi focalizzati sulla chirurgia computer-guidata statica sottolineano anche il ruolo del supporto della dima. Negli studi di Markiewicz e Nowicki, la deviazione coronale è 0,351 mm nei casi di edentulia singola, 0,313 mm nei gap multipli e 0,729 mm nei pazienti totalmente edentuli. L'analisi per arcata mostra 0,443 mm nel mascellare superiore e 0,755 mm in mandibola. Nei soggetti totalmente edentuli, la dima muco-supportata mandibolare presenta la peggiore accuratezza coronale (1,395 mm), mentre la dima osseo-supportata mandibolare mostra un valore più favorevole (0,371 mm). Quindi

la stabilità della guida e il tipo di supporto risultano tanto determinanti quanto la tecnologia impiegata [27].

Nello studio prospettico di Chrabieh et al., condotto in mandibola posteriore parzialmente edentula, viene analizzata la deviazione coronale sulla base della macrostruttura dell'impianto: gli impianti da 8 mm presentano una deviazione coronale di $0,87 \pm 0,30$ mm, mentre quelli da 10 mm mostrano un valore di $0,63 \pm 0,25$ mm. Le differenze tra lunghezze non risultano statisticamente significative, ma il dato suggerisce che lunghezza implantare e controllo della traiettoria possano influenzare la dispersione del posizionamento [48].

Nel complesso, la deviazione coronale risulta più contenuta nei protocolli di chirurgia statica completamente guidati (sCAIS-FG). Sicuramente la chirurgia guidata dinamica (dCAIS) migliora l'accuratezza rispetto alla chirurgia convenzionale freehand, ma appare più sensibile alla calibrazione del sistema, all'esperienza dell'operatore e alla capacità di mantenere un controllo costante del monitor durante l'intervento. La freehand rimane la tecnica più variabile, soprattutto nei contesti anatomici complessi o quando il progetto protesico impone vincoli tridimensionali stringenti.

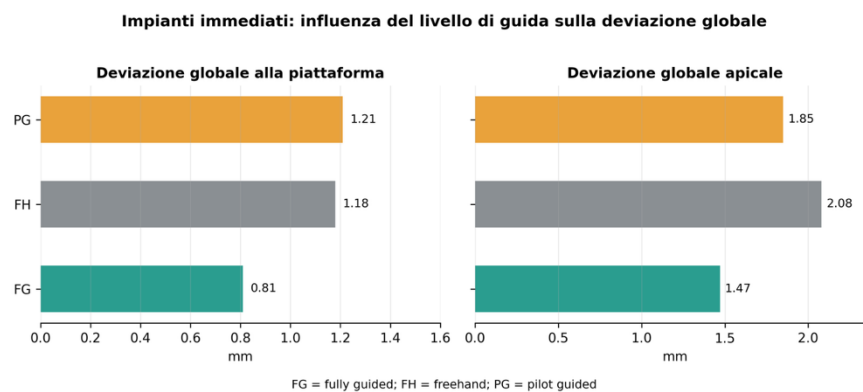


Grafico 1. Deviazione globale alla piattaforma e all'apice negli impianti immediati secondo il livello di guida chirurgica. Fonte: rielaborata da Pitman et al., 2024 [16], Fig. 3.

Tabella 4. Schema riassuntivo dei risultati su deviazione coronale, deviazione apicale, deviazione angolare e deviazione verticale

N°	Articolo	Tecnica chirurgica	Deviazione coronale (mm)	Deviazione angolare (°)	Deviazione apicale (mm)	Deviazione verticale/depth (mm)
3	Coronevici et al. (2022). Minimal invasiveness at dental implant placement: A systematic review with meta-analysis on flapless fully guided surgery. <i>Periodontology</i> 2020, 91, 89–112.	Freehand	MD come side FHP; range aggregato FHP/ICGSP Rapport 1.45–2.27	MD come side FHP; range aggregato FHP/ICGSP Rapport 3.50–5.02	MD come side FHP; range aggregato FHP/ICGSP Rapport 2.11–3.40	MD come side FHP; range aggregato FHP/ICGSP Rapport 0.50–2.20
		ICGAS	1.43 media; range 0.75–2.34	2.57° media; range 2.20–3.08	1.88 media; range 0.97–2.53	0.76 media; range 0.43–1.24
		ICGAS	ND	ND	ND	ND
7	Tahmasebi et al. (2018). The accuracy of static computer-aided implant surgery. <i>Clinical Oral Implants Research</i> , 19(Suppl 1):S1–S10.	Freehand	ND	ND	ND	ND
		ICGAS	1.2, IC95% 1.04–1.44	3.3°; IC95% 3.0–3.96	1.4, IC95% 1.28–1.58	ND
		ICGAS	ND	ND	ND	ND
10	Tadokoro et al. (2022). Assessing accuracy in guided implant placement: A comprehensive meta-analysis. <i>Journal of Dentistry</i> , 126, 104746.	Freehand	1.33, IC95% 1.00–1.67	6.44°; IC95% 5.53–7.35	1.81, IC95% 1.54–2.08	ND
		ICGAS	ICGAS complessiva 0.73, IC95% 0.64–0.80 PG 0.66, IC95% 0.66–1.03 PG 0.75, IC95% 0.46–0.97 PG 0.71, IC95% 0.61–0.82	ICGAS complessiva 2.86°; IC95% 2.63–3.30 PG 1.72°; IC95% 1.46–6.06 PG 1.30°; IC95% 2.06–4.42 PG 2.81°; IC95% 2.27–2.95	ICGAS complessiva 1.31°; IC95% 0.96–1.17 PG 1.30, IC95% 1.11–1.65 PG 1.11, IC95% 0.93–1.43 PG 1.02, IC95% 0.90–1.15	ND
		ICGAS	1.00, IC95% 0.84–1.15	3.17°; IC95% 2.51–3.83	1.28, IC95% 1.09–1.47	ND
11	Pheasant et al. (2024). Accuracy of implant placement with computer-aided static, dynamic, and robot-assisted surgery: a systematic review and meta-analysis of clinical trials. <i>BMC Oral Health</i> , 24(1), 356.	Freehand	ND	ND	ND	ND
		ICGAS	1.11, IC95% 1.00–1.20	3.99°; IC95% 3.30–5.03	1.44, IC95% 1.34–1.54	ND
		ICGAS	1.10, IC95% 1.02–1.34	3.51°; IC95% 2.80–4.12	1.36, IC95% 1.19–1.54	ND
12	Baklanov & Novitskiy (2022). Accuracy of Computer-Guided Dental Implant Placement: A Clinical Comparison of Three Surgical Guide Types. <i>Journal of Clinical Medicine</i> , 11(24), 8552.	Freehand	ND	ND	ND	ND
		ICGAS	Per sidebite: angolo 0.331; multiple 0.313; totale 0.723 Per arcata: maxilla 0.443; mandibola 0.795 Standard deviation: maxilla 0.5300; maxilla case 0.445; mandibola caso 1.395; mandibola caso 0.371	ND	Per sidebite: angolo 0.342; multiple 0.387; totale 0.371 Per arcata: maxilla 0.382; mandibola 0.981 Standard deviation: maxilla 0.795; maxilla case 0.531; mandibola caso 1.945; mandibola caso 0.458	ND
		ICGAS	ND	ND	ND	ND
13	Kuo et al. (2022). Accuracy of dental implant placement with computer-guided surgery: a retrospective cohort study. <i>BMC Oral Health</i> , 22, 6.	Freehand	Deep-not/semi-guided 14.53 ± 6.04	Deep-not/semi-guided 11.75 ± 4.38	ND	ND
		ICGAS	Guided complessiva 2.89 ± 1.00 Flapless 3.18 ± 0.89 Flapless 2.52 ± 0.88	Guided complessiva 5.52 ± 2.85 Flapless 6.82 ± 2.71 Flapless 6.27 ± 2.35	ND	ND
		ICGAS	ND	ND	ND	ND
14	Oh et al. (2023). A systematic review of the accuracy of digital surgical guides for dental implantation. <i>International Journal of Implant Dentistry</i> , 9, 36.	Freehand	ND	ND	ND	ND
		ICGAS	Per supporto: medio-laterale globale 0.10–1.08 in vitro; 0.46–1.07 in vivo; apex: 0.24–1.07 in vitro; 0.38–1.07 in vivo Dento-odontale/mixta 2.16–4.31 in vitro; 0.21–1.20 in vivo Macro-supportata globale 0.45–0.82 in vitro; 0.95–1.987 in vivo	Dento-odontale 0.77–2.72° in vitro; 1.40–4.70° in vivo Dento-odontale/mixta 2.16–4.31° in vitro; 3.10–5.62° in vivo Macro-supportata 2.39–3.47° in vitro; 3.12–7.177° in vivo	Per supporto: medio-laterale globale 0.12–1.05 in vitro; 0.28–1.17 in vivo; apex: 0.24–1.08 in vitro; 0.84–1.17 in vivo Dento-odontale/mixta 0.50–2.19 in vitro; 0.87–1.65 in vivo Macro-supportata globale 0.71–1.08 in vitro; 1.18–2.02 in vivo	Dento-bilaterale 0.11–0.05 in vitro; 0.03–0.84 in vivo Dento-odontale/mixta 0.18–0.57 in vitro; Macro-supportata 0.44–0.52 in vitro; 0.22–0.86 in vivo
		ICGAS	ND	ND	ND	ND
15	Chelush et al. (2024). Accuracy of computer-guided implant surgery in partially edentulous patients: a prospective observational study. <i>International Journal of Implant Dentistry</i> , 10, 36.	Freehand	ND	ND	ND	ND
		ICGAS	8 mm: 0.87 ± 0.32; range 0.40–1.26 10 mm: 0.63 ± 0.25; range 0.15–1.10	8 mm: 3.89 ± 2.16°; range 1.38–6.04 10 mm: 3.18 ± 2.16°; range 1.38–6.04	8 mm: 0.57 ± 0.85; range 0.36–1.28 10 mm: 0.48 ± 0.70; range 0.12–0.78	ND
		ICGAS	ND	ND	ND	ND
16	Chenbin et al. (2022). Accuracy of freehand versus guided immediate implant placement: a randomized controlled trial. <i>Journal of Dentistry</i> , 126, 104702.	Freehand	Crestale MD 1.13 ± 0.86; BL 1.00 ± 0.76	6.09 ± 5.23	Apicale MD 4.04 ± 1.90; BL 3.48 ± 1.82	2.24 ± 1.58
		ICGAS	Crestale MD 0.34 ± 0.26; BL 0.37 ± 0.24	0.82 ± 0.53	Apicale MD 0.87 ± 0.55; BL 0.94 ± 0.67	0.86 ± 0.43
		ICGAS	ND	ND	ND	ND
17	Pittman et al. (2020). Examining the Influence of Freehand, Pilot-Guided, and Fully Guided Surgical Techniques on the Accuracy of Immediately Placed Implants—An In Vitro Study. <i>Applied Sciences</i> , 10(26), 1653.	Freehand	MD globale: dist. disassiale: MD platform 0.29 ± 1.49; BP platform 0.36 ± 0.28	ND	MD globale: dist. disassiale: MD apex 1.40 ± 0.20; BP apex 0.77 ± 0.29	ND
		ICGAS	PG globale 1.21 ± 0.41 PG globale 0.81 ± 0.21 PG disassiale: MD platform 0.23 ± 0.16; BP platform 0.32 ± 0.22	PG 0.42 ± 1.01 PG 0.53 ± 0.87	PG globale 1.00 ± 0.33 PG globale 0.47 ± 0.31 PG disassiale: MD apex 1.03 ± 0.20; BP apex 0.74 ± 0.41	ND
		ICGAS	ND	ND	ND	ND
18	Reig et al. (2020). The Accuracy of Immediate Implantation Guided by Digital Templates and Patient-Specific Guides: A Systematic Review. <i>International Dental Journal</i> , 70(2), 439–452.	Freehand	ND	ND	ND	ND
		ICGAS	0.74, IC95% 0.41–1.08	2.34°; IC95% 1.69–3.00	1.01, IC95% 0.80–1.20	0.50, IC95% 0.36–0.65
		ICGAS	ND	ND	ND	ND
19	Werny et al. (2023). Freehand vs. computer-aided implant surgery: a systematic review and meta-analysis—part 1: accuracy of coronal and buccal implant position. <i>International Journal of Implant Dentistry</i> , 11(1), 35.	Freehand	Global platform 1.06, IC95% 1.38–1.73	7.40°; IC95% 5.87–8.05	Global apex 2.22, IC95% 1.99–2.56	Platform vertical 0.86 ± 0.30; apex vertical 0.82 ± 0.32
		ICGAS	Pilot-dRI 1.13, IC95% 0.98–1.26 Fully guided 0.72; IC95% 0.62–0.81	Pilot-dRI 5.94°; IC95% 4.82–7.07 Partially guided 3.17°; IC95% 2.80–3.38 Fully guided 2.23°; IC95% 2.29–2.86	Pilot-dRI 1.43, IC95% 1.21–1.66 Fully guided 0.95, IC95% 0.85–1.06	Pilot-dRI: platform 0.88; apex 0.67 Fully guided: platform 0.49 ± 0.03; apex 0.49 ± 0.03
		ICGAS	Global platform 1.01, IC95% 0.88–1.14	3.67°; IC95% 2.83–4.71	Global apex 1.36, IC95% 0.43–2.29	Platform vertical 0.50 ± 0.08; apex vertical 0.51 ± 0.08
20	Fulthausen et al. (2015). Kinematics of Flapless Single-Tooth Implants in the Anterior Maxilla Using Guided Surgery: Association of Three-Dimensional Accuracy and Pink Esthetic Score. <i>Clinical Implant Dentistry and Related Research</i> , 17(Suppl 2), e407–e413.	Freehand	ND	ND	ND	ND
		ICGAS	Shoulder 0.84 ± 0.44; range 0–1.0	2.7 ± 0.6°; range 0–12.7	1.16 ± 0.80; range 0–2.6	ND
		ICGAS	ND	ND	ND	ND
26	Thomas et al. (2019). A randomized controlled trial on the efficiency of free-handled, pilot-guid and fully guided implant surgery in partially edentulous patients. <i>Clinical Oral Implants Research</i> , 30(2), 151–158.	Freehand	GGD medio 1.45	AD medio 0.99	AGD medio 2.11	CVD 0.53; AVO 0.50
		ICGAS	Pilot-dRI GGD 1.12 Fully guided GGD 0.73	Pilot-dRI AD 0.65 Fully guided AD 2.30	Pilot-dRI AGD 1.43 Fully guided AGD 0.97	Pilot-dRI CVD 0.68; AVO 0.89 Fully guided CVD 0.45; AVO 0.43
		ICGAS	ND	ND	ND	ND

4.2 DEVIAZIONE APICALE

La deviazione apicale descrive lo scostamento dell'apice implantare rispetto alla posizione pianificata. Rispetto alla deviazione coronale, tende a essere più ampia perché anche un piccolo errore all'ingresso può amplificarsi lungo l'asse della fixture. È un parametro particolarmente rilevante per la sicurezza chirurgica poiché l'apice può avvicinarsi a strutture anatomiche critiche, quali: canale mandibolare, seno mascellare, fosse nasali, corticali vestibolari o radici di denti adiacenti.

Nella meta-analisi di Takács et al., la deviazione apicale media della chirurgia freehand è 1,81 mm, mentre per la sCAIS complessiva riporta 1,07 mm. Nei sottogruppi della chirurgia guidata statica, i valori sono 1,39 mm per il protocollo sCAIS-PG, 1,11 mm per il protocollo sCAIS-HG e 1,02 mm per il protocollo sCAIS-FG. La dCAIS mostra una deviazione di 1,28 mm. Quindi anche per il controllo apicale la sCAIS-FG si conferma il protocollo più accurata, seguita dalla dCAIS; la freehand rimane sempre la metodica meno precisa [25].

La meta-analisi clinica di Werny et al. riporta una deviazione globale apicale di 2,22 mm per la chirurgia freehand, 1,43 mm per la sCAIS-PG, 0,86 mm per la sCAIS-FG e 1,36 mm per la dCAIS. La riduzione da 2,22 mm a 0,86 mm rappresenta un miglioramento clinicamente significativo della predicibilità apicale. Tuttavia, anche con la sCAIS-FG l'errore apicale medio non è nullo; ciò conferma la necessità di mantenere margini di sicurezza adeguati rispetto alle strutture anatomiche critiche [18].

Nello studio di Younes et al. la deviazione globale apicale rappresenta proprio l'outcome principale di efficacia. Il valore medio è 2,11 mm nella freehand, 1,43 mm nella sCAIS-PG e 0,97 mm nella sCAIS-FG. Rispetto alla chirurgia convenzionale a mano libera (freehand) la riduzione dell'errore è del 32% per la sCAIS-PG e del 54% per la sCAIS-FG. Questo conferma che il controllo

apicale richiede la guida dell'intera sequenza chirurgica e non soltanto della fresa iniziale [32].

Nel contesto post-estrattivo, Chandran et al. riportano deviazioni apicali molto elevate nel gruppo freehand: $4,04 \pm 1,90$ mm in senso mesio-distale e $3,46 \pm 1,82$ mm in senso bucco-linguale. Nel gruppo con chirurgia statica guidata (sCAIS), i valori si riducono rispettivamente a $0,97 \pm 0,55$ mm e $0,94 \pm 0,67$ mm. Il dato è clinicamente rilevante perché, negli impianti immediati, l'apice deve essere controllato in profondità in un sito anatomico spesso irregolare e non simmetrico [15].

La revisione sistematica di Xing et al., dedicata agli impianti immediati guidati da template digitali, riporta una deviazione apicale aggregata di 1,01 mm [IC 95%: 0,83–1,20 mm]. Il dato è coerente con i valori osservati nei protocolli sCAIS-FG, ma l'eterogeneità degli studi inclusi impone cautela. In ogni caso, i template digitali sembrano garantire un controllo apicale clinicamente accettabile negli impianti immediati purché pianificazione, supporto e stabilità della guida siano adeguati [17].

Nei dati di Markiewicz e Nowicki, la deviazione apicale varia in funzione del tipo di edentulia e del supporto della dima. Nei casi di edentulia singola è 0,342 mm, nei gap multipli 0,387 mm e nei totalmente edentuli 0,971 mm. Per quanto riguarda l'arcata, i valori sono 0,562 mm nel mascellare superiore e 0,981 mm nella mandibola. Nei pazienti totalmente edentuli, la dima muco-supportata mandibolare mostra una deviazione apicale di 1,945 mm, mentre la dima osseo-supportata mandibolare si ferma a 0,408 mm. Questo evidenzia che il controllo apicale dipende in modo rilevante dalla stabilità della guida sul supporto biologico [27].

In sintesi, la deviazione apicale è uno degli outcome più sensibili alla tecnica chirurgica. La tecnica convenzionale freehand mostra i valori più elevati, soprattutto nei contesti post-estrattivi e nei confronti clinici diretti. Invece,

come sempre la sCAIS-FG produce i valori più bassi, mentre la sCAIS-PG offre un miglioramento parziale. La dCAIS si colloca in posizione intermedia, con risultati migliori della mano libera, ma più variabili rispetto alla chirurgia statica completamente guidata (sCAIS-FG).

4.3 DEVIAZIONE ANGOLARE

La deviazione angolare indica lo scostamento tra l'asse implantare pianificato e quello effettivamente ottenuto. È un outcome di grande importanza chirurgica e protesica: anche una deviazione lineare limitata può determinare un asse sfavorevole, la necessità di usare abutment angolati per correggere l'inclinazione, un accesso vite non ideale e una distribuzione dei carichi meno favorevole.

Nella meta-analisi in vitro di Takács et al. la deviazione angolare è $6,44^\circ$ per la chirurgia freehand. La sCAIS complessiva mostra una deviazione di $2,96^\circ$; in particolare di $4,72^\circ$ per il protocollo sCAIS-PG, $3,35^\circ$ per il protocollo sCAIS-HG e $2,61^\circ$ per il protocollo sCAIS-FG. Invece, la dCAIS riporta un valore di deviazione angolare pari a $3,17^\circ$. Da questi risultati si capisce che il livello di guida condiziona in modo evidente l'accuratezza angolare: la chirurgia statica completamente guidata (sCAIS-FG) riduce l'errore assiale più efficacemente rispetto alla sola guida della fresa pilota (sCAIS-PG) [25].

Anche la meta-analisi clinica di Werny et al. conferma questo andamento: le deviazioni angolari registrate sono di $7,46^\circ$ nella freehand, $5,94^\circ$ nella sCAIS-PG, $3,72^\circ$ nella sCAIS-HG, $2,57^\circ$ nella sCAIS-FG e $3,67^\circ$ nella dCAIS. Quindi la sCAIS-FG è la metodica più accurata, mentre la dCAIS si colloca in una posizione intermedia. Il dato è coerente con il razionale biomeccanico: maggiore è il controllo dell'asse durante la sequenza chirurgica, minore è la deviazione finale [18].

Nel trial di Chandran et al. su impianti immediati, la deviazione angolare è pari a $6,09 \pm 3,23^\circ$ nel gruppo freehand e $0,83 \pm 0,53^\circ$ nel gruppo guidato (sCAIS). Nel post-estrattivo il controllo dell'asse di inserimento risulta cruciale perché deve essere coerente con la futura corona e con la posizione della parete vestibolare residua [15].

Nello studio in vitro di Pitman et al. la deviazione angolare è pari a $3,62 \pm 1,01^\circ$ per il gruppo sCAIS-PG e $3,05 \pm 0,97^\circ$ per il gruppo sCAIS-FG. Il valore freehand non è riportato come dato globale nella Tabella 4 sintetica disponibile, ma gli autori indicano il sCAIS-FG come protocollo più accurato per gli outcome primari trattati nella tesi [16].

Nel trial di Younes et al. la deviazione angolare media è $6,99^\circ$ per la chirurgia freehand, $5,95^\circ$ per la sCAIS-PG e $2,30^\circ$ per la sCAIS-FG. Anche in questo caso, con il protocollo sCAIS-PG si riduce solo parzialmente la deviazione, mentre quello sCAIS-FG produce il miglior risultato [32].

Nello studio di Fürhauser et al., che tratta impianti singoli flapless in mascella anteriore, la deviazione angolare media è di $2,7 \pm 2,6^\circ$ [range: $0-12,7^\circ$]. Il valore medio è favorevole, ma il range dimostra che anche nella chirurgia guidata (sCAIS) possono verificarsi deviazioni significative. Nello stesso studio, la deviazione angolare non correla in modo statisticamente significativo con il Pink Esthetic Score (PES), mentre risultano più rilevanti le deviazioni alla piattaforma implantare e all'apice [28].

Nel complesso, la deviazione angolare è uno degli outcome che mostra con maggiore chiarezza il vantaggio della sCAIS-FG rispetto alla chirurgia convenzionale freehand. La dCAIS migliora l'accuratezza rispetto alla freehand, ma nei dati disponibili non raggiunge in modo costante i valori della sCAIS-FG. La sCAIS-PG rappresenta quindi un compromesso: migliora l'orientamento iniziale, ma non evita l'accumulo di errore nelle fasi successive.

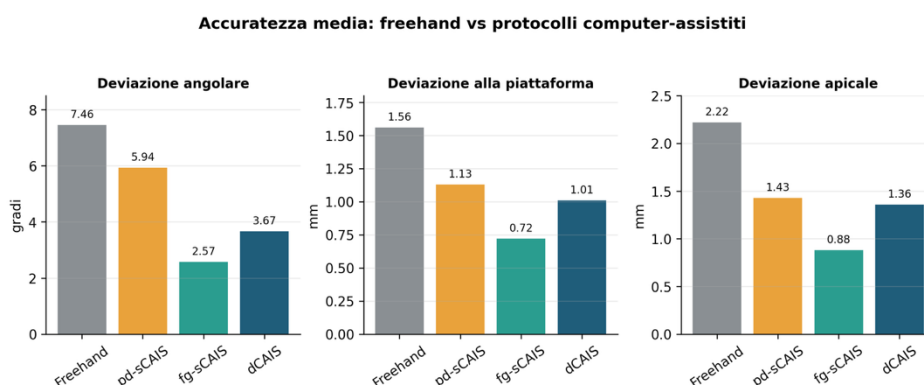


Grafico 2. Confronto delle deviazioni medie tra tecnica freehand e protocolli computer-assistiti.
Fonte: rielaborata dai dati di Werny et al., 2025 [18].

4.4 DEVIAZIONE VERTICALE E CONTROLLO IN PROFONDITÀ

La deviazione verticale, conosciuta anche con il termine “depth deviation”, misura l’errore di profondità dell’impianto rispetto alla posizione pianificata. È riportata meno frequentemente rispetto alle deviazioni coronale, apicale e angolare, ma ha notevole rilevanza clinica. Di fatto un impianto troppo coronale può compromettere il profilo di emergenza e la gestione dei tessuti molli; al contrario, un impianto troppo apicale può complicare la fase protesica, alterare lo spessore biologico peri-implantare e favorire uno scorretto rimodellamento osseo.

Nello studio di Romandini et al. la chirurgia flapless sCAIS-FG presenta una deviazione verticale media di 0,76 mm [range: 0,43–1,24 mm], mentre nel comparatore flapped freehand il range aggregato è 0,50–2,20 mm. La differenza media riportata è 0,28 mm a favore della chirurgia flapless sCAIS. Il vantaggio esiste, ma è meno marcato rispetto a quanto osservato per deviazione angolare e apicale [23].

In Chandran et al. la deviazione di profondità registrata è di $2,24 \pm 1,58$ mm nel gruppo freehand e $0,66 \pm 0,43$ mm nel gruppo sCAIS. Il dato è numericamente molto favorevole alla chirurgia computer-guidata, anche se nel materiale sintetico riportato non risulta statisticamente significativo. La profondità rimane quindi un parametro influenzato da variabili intraoperatorie, quali stabilità primaria, densità ossea, stop di fresaggio, torque di inserimento e decisioni cliniche al momento del posizionamento [15].

La revisione di Xing et al. sugli impianti immediati guidati da template digitali riporta una depth deviation media di 0,50 mm [IC 95%: 0,36–0,65 mm]. Il dato suggerisce un buon controllo verticale medio, pur in presenza di eterogeneità. Negli impianti immediati, la posizione corono-apicale condiziona in modo diretto il profilo di emergenza, il volume tissutale e la gestione del gap vestibolare [17].

Werny et al. forniscono una sintesi dettagliata del parametro di deviazione verticale. Nel gruppo con freehand la deviazione verticale registrata è $0,86 \pm 0,30$ mm alla piattaforma (CVD) e $0,82 \pm 0,32$ mm all'apice (AVD). Per la dCAIS i valori sono rispettivamente $0,50 \pm 0,08$ mm e $0,51 \pm 0,08$ mm. Invece, per quanto riguarda la sCAIS-FG entrambi i valori sono $0,45 \pm 0,03$ mm. Da ciò si può dedurre che nella sCAIS-FG il controllo sia più favorevole, seguita dalla dCAIS, anche se le differenze sono meno marcate rispetto a quelle osservate per deviazione angolare e apicale globale [18].

Nel trial di Younes et al. i valori registrati di CVD e AVD sono rispettivamente 0,53 mm e 0,50 mm nel gruppo freehand, 0,68 mm e 0,68 mm nel gruppo sCAIS-PG, 0,43 mm e 0,43 mm nel gruppo sCAIS-FG. Il dato conferma che la sCAIS-PG non migliora necessariamente il controllo verticale rispetto alla chirurgia convenzionale freehand: la profondità dipende dall'intero protocollo chirurgico, non solo dall'orientamento iniziale della fresa [32].

Nel complesso, la chirurgia computer-guidata può migliorare il controllo della profondità, ma la deviazione verticale rimane uno degli aspetti meno standardizzati e meno prevedibili. La guida riduce l'errore medio, ma la posizione finale dipende anche da stabilità primaria, resistenza ossea, necessità di modifiche intraoperatorie e precisione del sistema di stop. La profondità non dovrebbe quindi essere affidata esclusivamente alla guida chirurgica, ma necessita di essere verificata chirurgicamente e protesicamente durante l'intervento.

4.5 SOPRAVVIVENZA IMPLANTARE

La sopravvivenza implantare è trattata in modo disomogeneo nella letteratura selezionata. Gli studi selezionati per questo outcome sono stati schematizzati nella Tabella 5.

Alcuni lavori, come quelli di Dioguardi et al. e Hultin et al., affrontano direttamente il concetto di sopravvivenza implantare e fallimenti mentre altri, come D'Haese et al., discutono questi aspetti nel contesto più ampio dello stato dell'arte della chirurgia guidata. In altri casi ancora, come Tahmaseb et al., la sopravvivenza implantare è inclusa tra gli outcome previsti, ma riportata solo da una minoranza degli studi inclusi [20, 21, 24, 47].

Nel complesso, la chirurgia computer-guidata presenta tassi di sopravvivenza implantare elevati, spesso intorno al 97–98%, compatibili con la moderna implantologia. Tuttavia, non è possibile concludere che la chirurgia computer-guidata aumenti automaticamente la sopravvivenza rispetto alla chirurgia convenzionale freehand. Il vantaggio più documentato riguarda l'accuratezza tridimensionale e la corrispondenza tra posizione pianificata e posizione ottenuta.

Il dato di Romandini et al. è favorevole, con sopravvivenza 100% fino a 36 mesi, ma deriva da un solo RCT e per questo motivo tale dato deve essere interpretato con cautela. In Tahmaseb et al. la sopravvivenza del 100% dopo almeno 1 anno è riportata solo da 2 studi su 20. Dioguardi et al. forniscono un dato più solido: su 1495 impianti vengono riportati 24 fallimenti precoci e 7 tardivi; quindi, si può calcolare che la sopravvivenza complessiva stimabile sia circa il 97,9%, pur derivando da studi con follow-up differenti, compresi tra 1 e 5 anni [23, 47, 20].

Le revisioni di D'Haese et al. e Hultin et al. confermano tassi di sopravvivenza generalmente elevati. D'Haese et al. riportano valori compresi tra 89% e 100%, con un dato complessivo intorno al 97,3% su 1941 impianti. Anche Hultin et al., su 852 pazienti e 4032 impianti, riportano una sopravvivenza implantare a ≥ 1 anno compresa tra 89% e 100% [24, 21].

La sopravvivenza implantare rimane quindi un outcome multifattoriale. Qualità e quantità ossea, stabilità primaria, protocollo di carico, fumo, malattia parodontale, igiene, infezione peri-implantare, disegno protesico e distribuzione dei carichi restano determinanti. La chirurgia computer-guidata può contribuire indirettamente a migliorare la prognosi attraverso un posizionamento più coerente con il progetto protesico, ma non sostituisce la selezione del caso né il controllo dei fattori biologici.

Tabella 5. schematizzazione della sopravvivenza implantare.

N°	Articolo	Risultati sopravvivenza / fallimenti
3	Romandini et al. Minimal invasiveness at dental implant placement: A systematic review with meta-analyses on flapless fully guided surgery. <i>Periodontol 2000</i> . 2023;91:89–112.	survival 100% con follow-up a 36 mesi nell'unico studio che riporta questo outcome
5	D'Haese et al. Current state of the art of computer-guided implant surgery. <i>Periodontol 2000</i> . 2017;73(1):121–133.	survival dal range 89–100% con follow-up fra i 6 e i 48 mesi. Nella review TII viene citato un survival medio di 97,3% su 1941 impianti ad almeno 12 mesi dall'inserimento.
6	Dioguardi et al. Guided Dental Implant Surgery: Systematic Review. <i>J Clin Med</i> . 2023;12:1490.	dei 1495 impianti inseriti si è registrato un survival di 96,3% a 3 anni e 100% a 1 anno.
7	Tahmaseb et al. The accuracy of static computer-aided implant surgery: A systematic review and meta-analysis. <i>Clin Oral Implants Res</i> . 2018;29 Suppl 16:416–435.	due studi riportano un survival 100% con follow-up ad almeno 1 anno.
21	Hultin et al. Clinical advantages of computer-guided implant placement: A systematic review. <i>Clin Oral Implants Res</i> . 2012;23 Suppl 6:124–135.	dei 4032 impianti si registra un survival 89-100% con follow-up ≥1 anno.

4.6 RIMODELLAMENTO OSSEO MARGINALE (MARGINAL BONE LEVEL/MARGINAL BONE LOSS)

Il Marginal Bone Level (MBL) indica il livello dell'osso marginale peri-implantare rispetto a un riferimento implantare, solitamente la piattaforma implantare, la connessione impianto-abutment o il margine coronale della fixture. Viene misurato radiograficamente, in genere su radiografie endorali standardizzate, valutando la distanza verticale tra il riferimento implantare e il primo contatto osso-impianto a livello mesiale e distale.

Clinicamente, il MBL descrive la stabilità dell'osso crestale peri-implantare. Un modesto rimodellamento iniziale può essere fisiologico dopo inserimento,

connessione protesica e carico funzionale. Una perdita progressiva, soprattutto se associata a sanguinamento al sondaggio (BoP), suppurazione o aumento della profondità di sondaggio (PD), può invece indicare una complicanza biologica, una mucosite peri-implantare o una peri-implantite. Nello studio di Heng et al. il MBL è definito come la distanza verticale tra piattaforma implantare e primo contatto osso-impianto, misurata su radiografie endorali calibrate [29].

Tra i 26 articoli analizzati il MBL è trattato da un numero limitato di lavori, che sono stati schematizzati nella Tabella 6; la valutazione del rimodellamento osseo marginale compare soprattutto negli studi con follow-up clinico a medio-lungo termine.

Gli articoli più rilevanti per questo outcome sono due: Lops et al. e Heng et al.. Lo studio di Lops et al. è un RCT con follow-up a 3 anni e confronto diretto tra CAIS e freehand. Il MBL medio complessivo passa da 0,27 mm al carico protesico a 0,45 mm a 1 anno, 0,47 mm a 2 anni e 0,56 mm a 3 anni. La variazione a 3 anni è $0,35 \pm 0,47$ mm nel gruppo CAIS e $0,23 \pm 0,75$ mm nel gruppo freehand, con differenza tra gruppi di $0,11 \pm 0,22$ mm [non significativa ($p = 0,61$)]. Il dato indica l'assenza di un vantaggio evidente della chirurgia guidata nella riduzione del rimodellamento marginale [19, 29].

Heng et al., pur con disegno cross-sectional e campione ridotto, mostrano un risultato diverso in zona estetica. In 30 impianti singoli in mascella anteriore, con follow-up medio di circa 4 anni, il MBL medio è $0,29 \pm 0,56$ mm nel gruppo CAIS complessivo ($0,27 \pm 0,56$ mm nel sottogruppo dCAIS e $0,31 \pm 0,50$ mm nel sottogruppo sCAIS) e $0,74 \pm 0,71$ mm nel gruppo freehand. La differenza fra CAIS e chirurgia freehand è significativa ($p = 0,001$). Il dato suggerisce che, in area estetica, il posizionamento implantare computer-assistito possa contribuire a una maggiore stabilità ossea marginale [29].

Le revisioni di Dioguardi et al., D’Haese et al. e Hultin et al. aiutano a inquadrare il dato. Dioguardi et al. riportano valori medi di MBL compresi tra 0,32 mm a 1 anno e 1,9 mm negli studi inclusi. D’Haese et al. richiamano valori medi tra 0,09 e 1,40 mm nei protocolli flapless freehand e circa 0,89 mm nei protocolli flapless CAIS. Hultin et al. riportano un MBL di circa 1,3 mm, con 19% dei soggetti con perdita ossea superiore a 2 mm [20, 24, 21].

Nel complesso, la chirurgia computer-guidata consente livelli di MBL generalmente favorevoli e compatibili con la moderna implantologia, ma non dimostra una superiorità sistematica rispetto alla chirurgia freehand. Il rimodellamento osseo marginale non dipende solo dalla tecnica chirurgica: incidono profondità di inserimento, connessione impianto-abutment, profilo di emergenza, spessore dei tessuti molli sovracrestali, mucosa cheratinizzata, fumo, storia parodontale, carico immediato, igiene, mucosite e peri-implantite.

Outcome clinici: rimodellamento osseo marginale ed estetica

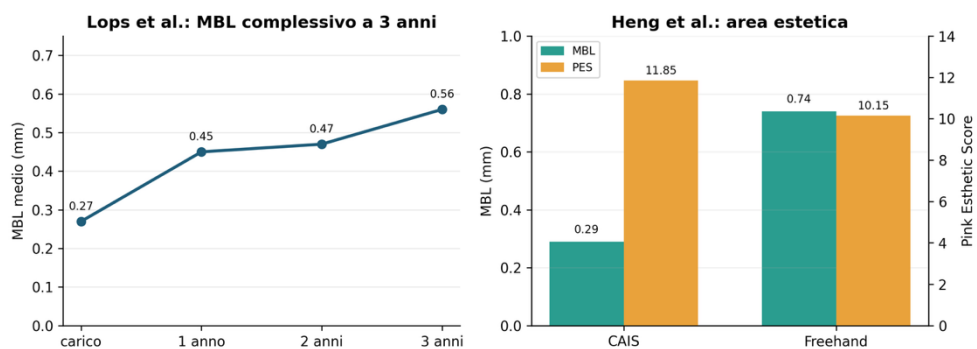


Grafico 3. Sintesi grafica degli outcome clinici relativi a rimodellamento osseo marginale ed estetica peri-implantare. Fonte: rielaborata da Lops et al., 2024 [19], e Heng et al., 2025 [29].

Tabella 6. schematizzazione dei risultati sul MBL.

N°	Articolo	Dati riportati su MBL / rimodellamento osseo marginale
5	D'Haese et al. Current state of the art of computer-guided implant surgery. Periodontology 2000 . 2017;73(1):121–133.	flapped freehand: 0,09–1,40 mm a 1–4 anni
		sCAIS flapless: 0,89 mm dopo 2–10 anni
6	Dioguardi et al. Guided Dental Implant Surgery: Systematic Review. Journal of Clinical Medicine . 2023;12:1490.	La mean marginal bone loss negli studi inclusi varia da 0,32 mm dopo 1 anno (studio di Yamada et al.) fino a 1,9 mm (studi di Lopes et al. e Marra et al.)
20	Lops et al. Guided versus freehand single implant placement: A 3-year parallel randomized clinical trial . Journal of Dentistry . 2024;149:105317.	freehand: 0,23 ± 0,75 mm a 3 anni dal carico protesico
		sCAIS: 0,35 ± 0,47 mm a 3 anni dal carico protesico
21	Hultin et al. Clinical advantages of computer-guided implant placement: a systematic review . Clinical Oral Implants Research . 2012;23 Suppl 6:124–135.	mean marginal bone loss di 1,3 mm e il 19% dei soggetti con perdita ossea >2 mm.
23	Heng et al. Comparing Medium to Long-Term Esthetic, Clinical, and Patient-Reported Outcomes Between Freehand and Computer-Assisted Dental Implant Placement: A Cross-Sectional Study . Journal of Esthetic and Restorative Dentistry . 2025;37(4):834–843.	freehand: 0,74 ±0,71 mm
		sCAIS: 0,31 ±0,50 mm
		dCAIS: 0,27 ±0,56 mm

4.7 COMPLICANZE INTRAOPERATORIE E POSTOPERATORIE

L'analisi delle complicanze richiede una distinzione tra eventi intraoperatori e complicanze postoperatorie. Queste ultime possono essere ulteriormente suddivise in dolore postoperatorio, complicanze precoci e complicanze tardive. Tale distinzione è necessaria perché gli studi inclusi non utilizzano criteri uniformi: alcuni riportano complicanze come outcome diretto, altri documentano solo eventi indiretti, quali fallimenti, MBL, mucosite o problemi protesici.

Tutte le complicanze sono schematizzate nella Tabella 7.

Le complicanze intraoperatorie della chirurgia computer-guidata sono prevalentemente legate al workflow digitale e al trasferimento della pianificazione. Secondo lo studio di Romandini et al. la sCAIS-FG presenta

un tasso di complicanze intraoperatorie del 12%, con impossibilità di completare il posizionamento implantare secondo il protocollo nel 7% dei casi. Le motivazioni di questo riguardano: guida non adattata, guida non consegnata in tempo, frattura del driver di inserimento all'interno dell'impianto e perforazione della corticale vestibolare [23].

In Dioguardi et al. gli eventi intraoperatori sono più specifici: 1 caso di impossibilità di usare una fresa per limitata apertura orale, 1 caso di deiscenza vestibolare dopo osteotomia, 1 caso di quantità ossea insufficiente e 3 casi di stabilità primaria insufficiente. Joda et al. riportano 12 complicanze chirurgiche su 408 interventi sCAIS (2,9%), costituite da 5 casi di mancata stabilità primaria e 7 casi di frattura della guida chirurgica [20, 31].

Tabella 7. schema delle complicanze intraoperatorie e postoperatorie.

N°	Articolo	Complicanze intraoperatorie	Complicanze postoperatorie — dolore	Complicanze postoperatorie — precoci	Complicanze postoperatorie — tardive
3	Romandini et al. Minimal invasiveness at dental implant placement: a systematic review with meta-analyses on flapless fully guided surgery. Periodontol 2000. 2023;91:89–112.	Nella sCAIS-FG viene riportato un tasso di complicanze intraoperatorie del 12%. L'impossibilità di completare il posizionamento implantare con il protocollo flapless sCAIS è riportata nel 7% dei casi. Gli eventi descritti includono: guida non adattata (= non fitting), guida non consegnata in tempo, frattura del driver di inserimento all'interno dell'impianto e perforazione della corticale vestibolare.	La flapless sCAIS è associata a riduzione del dolore postoperatorio rispetto agli approcci con lembo. Il dato riportato è una riduzione media del dolore pari a 17,09 mm sulla scala VAS. Viene riportata anche una tendenza a minore gonfiore postoperatorio, pari a 6,59 mm sulla scala VAS, ma non significativa.	discomfort, dolore, gonfiore, ecchimosi/sanguinamento e necessità di consumo di analgesici nei primi giorni.	L'articolo considera anche MBL, sopravvivenza e malattia peri-implantari, ma i dati sono insufficienti per concludere che la flapless sCAIS riduca le complicanze biologiche tardive.
5	D'Haese et al. Current state of the art of computer-guided implant surgery. Periodontol 2000. 2017;73(1):121–133.	complicanze legate al workflow guidato: instabilità o mancato adattamento della dima, limitata apertura orale, errori di trasferimento della pianificazione, frattura del template, necessità di modificare il piano chirurgico e inserimento implantare non conforme alla profondità pianificata. In alcune casistiche richiamate vengono riportate complicanze intraoperatorie/protesiche fino al 36,4%.	possibile vantaggio degli approcci flapless in termini di minore invasività, ma NON fornisce una misura numerica comparativa del dolore postoperatorio.	correlate al workflow guidato: misfit della guida, mancata stabilità primaria, modifica intraoperatoria del piano chirurgico, difficoltà di adattamento della protesi immediata e problemi di trasferimento tra pianificazione virtuale e campo operatorio.	Fallimenti implantari e complicanze protesiche sono discussi nel contesto generale della chirurgia guidata. Il dato non è separato in modo sistematico tra precoce e tardivo, ma l'articolo sottolinea che accuratezza, survival e complicanze devono essere interpretate insieme.
6	Dioguardi et al. Guided Dental Implant Surgery: Systematic Review. J Clin Med. 2023;12:1490.	impossibilità di usare una fresa per limitata apertura orale; deiscenza vestibolare dopo osteotomia; quantità ossea insufficiente; stabilità primaria insufficiente.	ND	Su 1495 impianti vengono riportati 24 fallimenti precoci (1,60%). A livello paziente il failure rate precoce è 3,98%. I fallimenti precoci sono descritti anche molto precocemente, da circa 2 settimane fino ai primi mesi dopo l'inserimento, e sono spesso collegati a mancata osteointegrazione. Sono inoltre riportate complicanze protesiche precoci: allentamento vite abutment, frattura protesi provvisoria, fit imperfetto della provvisoria ed aggiustamenti occlusali.	Vengono riportati 7 fallimenti tardivi (0,47%). Sicuramente la complicanza peggiore riportata è la perimplantite. Fra i fallimenti tardivi (dopo 45 mesi) rientra anche il sovraccarico. Sono riportate anche fratture di protesi definitive a causa del sovraccarico.

7	Tahmaseb et al. The accuracy of static computer-aided implant surgery: a systematic review and meta-analysis. Clin Oral Implants Res. 2018;29 Suppl 16:416–435.	siccome la sCAIS ha un errore residuo (deviazione media circa 1,2 mm al punto di ingresso, 1,4 mm all'apice e 3,5° angolare) risulta necessario mantenere margini di sicurezza, comunemente 2 mm dalle strutture anatomiche critiche.	ND	ND	complicanza protesica tardiva: frattura del framework in fibra di carbonio in alcuni protocolli.
20	Lops et al. Guided versus freehand single implant placement: a 3-year parallel randomized clinical trial. J Dent. 2024;149:105317.	ND	ND	ND	Follow-up a 3 anni. Valuta PPO, BoP/MBL, PI/m ² ? e MBL. La CAIS non riduce il rimodellamento osseo marginale rispetto alla freehand; differenza di MBL change tra CAIS e FH 0,11 ± 0,22 mm (p = 0,61). Lo spessore tissutale sovracrestale STH <3 mm è associato a MBL medio 0,33 mm più alto al carico protesico (p = 0,045).
21	Hultin et al. Clinical advantages of computer-guided implant placement: a systematic review. Clin Oral Implants Res. 2012;23 Suppl 6:124–135.	nello studio sono descritti 115 eventi totali, di cui 79 (ovvero il 69%) sono correlati alla procedura chirurgica/impiantare.	La chirurgia computer-guidata flapless è associata a minore dolore/discomfort postoperatorio rispetto agli approcci con lembo.	Circa 36 eventi (31%) sono correlati alla protesi. Le complicanze precoci sono legate soprattutto al trasferimento chirurgico-protesico: problemi di guida, posizionamento impiantare e connessione immediata della protesi.	survival almeno comparabile ai protocolli convenzionali, ma non dimostra una riduzione certa delle complicanze tardive.
23	Heng et al. Comparing Medium to Long-Term Esthetic, Clinical, and Patient-Reported Outcomes Between Freehand and Computer-Assisted Dental Implant Placement. J Esthet Restor Dent. 2025;37(4):834–843.	ND	Il vantaggio della CAIS riguarda soprattutto estetica e MBL, non dolore e discomfort.	ND	BoP, probing depth e mucosite non differiscono tra CAIS e freehand; nessun caso di peri-implantite è diagnosticato. La CAIS migliora PES e MBL, ma non dimostra una riduzione dell'infiammazione peri-implantare.
25	Joda et al. Static computer-aided implant surgery (s-CAIS) analysing patient-reported outcome measures, economics and surgical complications: a systematic review. Clin Oral Implants Res. 2018;29 Suppl 16:359–373.	12 complicanze chirurgiche su 408 interventi sCAIS, pari al 2,9%. In dettaglio: mancata stabilità primaria (5 casi) e frattura della guida chirurgica (7 casi).	La chirurgia flapless sCAIS può ridurre il dolore nei casi edentuli rispetto agli approcci open-flap, ma il beneficio non è generalizzabile a tutti i pazienti e non dimostra superiorità costante della sCAIS per dolore/discomfort.	Complicanze precoci del workflow implantoprotesico immediato: problemi nel posizionamento corretto della protesi full-arch. Nello studio di Torresanto et al. viene osservata insufficienza di mucosa cheratinizzata peri-implantare nel 20% degli impianti in mandibole edentule trattate flapless. Clinicamente, KMW ≥ 2 mm è una soglia favorevole, mentre quando KMW <2 mm richiede cautela.	La sCAIS non è priva di eventi tecnici e che il rischio aumenta nel workflow con protesi prefabbricata o carico immediato.

Il dolore postoperatorio è trattato soprattutto negli studi che valutano l'approccio flapless. In Romandini et al. la chirurgia flapless sCAIS riduce il dolore postoperatorio, con una riduzione media del dolore pari a 17,09 mm sulla scala VAS rispetto agli approcci con lembo. È riportata anche una tendenza a un minore gonfiore postoperatorio, pari a 6,59 mm sulla scala VAS, anche se non significativa. Joda et al. confermano che la chirurgia flapless sCAIS può ridurre il dolore nei pazienti edentuli rispetto agli approcci

convenzionali open-flap, ma il beneficio non è generalizzabile a tutti i casi [23, 31].

Le complicanze precoci includono mancata osteointegrazione, stabilità primaria insufficiente, fallimenti precoci, problemi di fit della protesi provvisoria e difficoltà di trasferimento del piano chirurgico-protetico. In Dioguardi et al., su 1495 impianti, si registrano 24 fallimenti precoci, con failure rate implant-level di 1,60%. I fallimenti possono comparire già da due settimane dopo l'inserimento e sono spesso associati a mancata osteointegrazione. Sono riportati anche allentamento della vite dell'abutment in 15 casi, frattura della protesi provvisoria in 3 casi, fit imperfetto della protesi provvisoria in 5 casi e aggiustamenti occlusali in 2 casi [20].

Le complicanze tardive comprendono fallimenti tardivi dovuti a peri-implantite, sovraccarico, fratture della protesi definitiva e MBL sfavorevole. Sempre nello studio di Dioguardi et al. sono riportati 7 fallimenti tardivi, con failure rate implant-level di 0,47%. La peri-implantite è descritta in almeno 4 studi inclusi; in uno studio un impianto viene perso dopo 2 anni per peri-implantite, mentre in un altro studio un fallimento tardivo dopo 45 mesi è attribuito a sovraccarico [20].

Altri lavori forniscono dati indiretti, ma comunque utili. Ad esempio, nello studio discusso precedentemente di Lops et al. la differenza di MBL tra CAIS e chirurgia freehand è $0,11 \pm 0,22$ mm ($p = 0,61$) a 3 anni di follow-up. Nello stesso studio, è stato dimostrato che quando lo spessore tissutale sovracrestale è inferiore a 3 mm si registra una perdita ossea (MBL) media maggiore di 0,33 mm, soprattutto dopo il carico protesico. Invece, nello studio di Heng et al. i parametri di sanguinamento al sondaggio (BoP), profondità di sondaggio (PD) e mucosite non differiscono tra CAIS e chirurgia freehand, e non vengono diagnosticati casi di peri-implantite [19, 29].

Nel complesso, la chirurgia computer-guidata non elimina le complicanze, ma ne modifica la natura. Nella chirurgia freehand il rischio principale è la

variabilità del posizionamento; nella sCAIS il rischio riguarda soprattutto il workflow: matching DICOM/STL, fit e stabilità della guida, limitata apertura orale, irrigazione, profondità di inserimento, stabilità primaria e adattamento della protesi prefabbricata. La chirurgia computer-guidata deve essere quindi considerata una metodica di controllo e riduzione della variabilità, non una procedura priva di rischio.

4.8 TEMPI DI PIANIFICAZIONE ED ESECUTIVI

Il confronto tra chirurgia convenzionale freehand e chirurgia computer-guidata statica (sCAIS) deve considerare l'intero workflow e non soltanto la durata dell'atto chirurgico. La sCAIS può ridurre il tempo intraoperatorio, soprattutto se associata a un approccio flapless, ma richiede un tempo maggiore di pianificazione che parte dall'acquisizione di radiografie 3D (CBCT), scansioni digitali, matching dei file, progettazione e produzione della dima.

Per semplificare la lettura sono state schematizzate nella Tabella 8 tutte le tempistiche riguardo alla fase di pianificazione ed esecuzione raccolte fra i 26 articoli selezionati.

Il dato più diretto deriva da Younes et al. che confrontano la chirurgia freehand, la sCAIS-PG e la sCAIS-FG in pazienti parzialmente edentuli. Il tempo chirurgico medio è $58,64 \pm 14,32$ minuti nella chirurgia freehand, $41,36 \pm 13,87$ minuti nella sCAIS-PG e $40,10 \pm 17,03$ minuti nella sCAIS-FG. Effettivamente la chirurgia computer-guidata riduce il tempo intraoperatorio. Tuttavia, considerando anche la pianificazione, il tempo totale diventa $58,64 \pm 14,32$ minuti per la chirurgia freehand, $65,09 \pm 21,38$ minuti per la sCAIS-PG e $61,50 \pm 18,86$ minuti per la sCAIS-FG. Si può concludere che il tempo chirurgico sia in parte compensato dalla fase preoperatoria di pianificazione [32].

Tabella 8. schema dei tempi di pianificazione ed esecutivi.

N°	Articolo	Confronto	Tempo di pianificazione	Tempo chirurgico	Altri tempi rilevanti
3	Romandini et al. Minimal invasiveness at dental implant placement: A systematic review with meta-analyses on flapless fully guided surgery. Periodontol 2000. 2023;91:89–112.	Flapless sCAIS fully guided (sCAIS-FG) vs flapped freehand	ND	la flapless sCAIS-FG mostra una riduzione di circa 24 minuti rispetto alla chirurgia convenzionale flapped.	il tempo procedurale complessivo, includendo la pianificazione, risulta simile tra i gruppi.
24	Graf et al. Time and costs related to computer-assisted versus non-computer-assisted implant planning and surgery. A systematic review. Clinical Oral Implants Research. 2021;32 Suppl 21:303–317.	sCAIS vs. freehand	Diagnosi e pianificazione richiedono generalmente più tempo nei protocolli computer-assistiti.	in alcuni studi sCAIS riduce il tempo chirurgico, in altri non lo modifica.	Valuta l'intero workflow: diagnosi, pianificazione, produzione guida, chirurgia e protesi.
24 — Amorfini et al.	Incluso in Graf et al.	sCAIS fully guided (sCAIS-FG) vs. freehand	sCAIS-FG: 15 min min	sCAIS-FG: 38 ± 2 min	Installazione provvisorio sCAIS-FG: 18 ± 2 min
			freehand: 1 min	freehand: 47 ± 6 min.	Installazione provvisorio freehand: 32 ± 4 min
24 — Pozzi et al.	Incluso in Graf et al. e Joda et al..	sCAIS fully guided (sCAIS-FG) vs. freehand	sCAIS-FG 28,20 min	sCAIS-FG: 42,68 ± 21,44 min	Installazione provvisorio sCAIS-FG: 51,40 min
			freehand: 18,85 min	freehand: 42,31 ± 23,33 min	Installazione provvisorio freehand: 50,40 min
24 — Schneider et al.	Incluso in Graf et al.	sCAIS fully guided 1 (sCAIS-FG 1)/ sCAIS fully guided 2 (sCAIS-FG 2)/vs. freehand	La pianificazione computer-assistita introduce passaggi aggiuntivi: start software, import DICOM, preparazione dati ed export.	sCAIS-FG 1: 23,2 min	ND
				sCAIS-FG 2: 18,5 min	
				freehand: 20,9 min	
25	Joda et al. Static computer-aided implant surgery (s-CAIS) analysing PROMs, economics and surgical complications: A systematic review. Clinical Oral Implants Research. 2018;29 Suppl 16:359–373.	flapless sCAIS vs. flapped freehand	sCAIS: 145 min (range 70–370 min)	studio Arisan: mucosa-supported flapless 23,53 ± 5,48 min bone-supported/open-flap 60,94 ± 13,07 min studio Pozzi: 42,68 ± 21,44 min	variabile: 20–210 min.
			freehand: ND	studio Arisan: 68,71 ± 11,40 min studio Pozzi: 42,31 ± 23,33 min	
26	Younes et al. A randomized controlled trial on the efficiency of free-handed, pilot-drill guided and fully guided implant surgery in partially edentulous patients. Clinical Oral Implants Research. 2019;30(2):131–138.	freehand vs. sCAIS pilot-drill guided (sCAIS-PG) vs. sCAIS fully guided (sCAIS-FG)	sCAIS-FG: 21,40 ± 3,34 min	sCAIS-FG: 40,10 ± 17,03 min	Tempo totale sCAIS-FG: 61,50 ± 18,86 min.
			sCAIS-PG: 23,73 ± 10,96 min	sCAIS-PG: 41,36 ± 13,87 min	Tempo totale sCAIS-PG: 65,09 ± 21,38 min
			freehand: 0 min	freehand: 58,64 ± 14,32 min	Tempo totale freehand: 58,64 ± 14,32 min

Anche Romandini et al. riportano che la chirurgia flapless sCAIS-FG riduce la durata chirurgica di circa 24 minuti rispetto agli approcci con lembo, freehand o parzialmente guidati (sCAIS-PG). Tuttavia, quando si considera il tempo procedurale complessivo, includendo pianificazione e chirurgia, il vantaggio diventa meno evidente [23].

La revisione di Graf et al. analizza in modo specifico tempi e costi del workflow computer-assistito. In Amorfini et al., la pianificazione chirurgica completamente guidata (sCAIS-FG) richiede 15 minuti rispetto a 1 minuto del protocollo non computer-assistito (freehand), ma il tempo chirurgico è inferiore: 38 ± 2 minuti contro 47 ± 6 minuti. Anche l'installazione del provvisorio è più rapida nella sCAIS-FG: 18 ± 2 minuti contro 32 ± 4 minuti [30].

Tra gli studi inclusi nella revisione di Graf et al., il lavoro di Pozzi et al., invece, il vantaggio temporale non emerge. La pianificazione nella sCAIS-FG richiede 28,20 minuti rispetto a 18,85 minuti nel gruppo freehand, mentre il tempo chirurgico è sovrapponibile: $42,68 \pm 21,44$ minuti contro $42,31 \pm 23,33$ minuti. Nella revisione di Graf et al, nel lavoro di Schneider et al., il tempo di inserimento della fixture è 23,2 minuti in un gruppo sCAIS-FG, 18,5 minuti in un secondo gruppo sCAIS-FG e 20,9 minuti nel gruppo freehand, confermando quindi l'eterogeneità dei risultati [30].

Joda et al. mostrano che il vantaggio temporale dipende dal tipo di caso. Nei vari studi, la durata chirurgica sCAIS varia tra 15 e 72 minuti. Nel lavoro di Arisan, l'inserimento della fixture mediante guida muco-supportata e chirurgia flapless richiede $23,53 \pm 5,48$ minuti, rispetto a $60,94 \pm 13,07$ minuti per la guida osseo-supportata e creazione del lembo e $68,71 \pm 11,40$ minuti nei gruppi controllo (freehand). Il tempo di pianificazione software riportato da Merli et al. è però elevato: media 145 minuti [range: 70–370 minuti] [31].

La sCAIS non deve quindi essere descritta come una tecnica sempre più rapida della chirurgia freehand. Il suo valore organizzativo consiste nello spostare una parte del lavoro dalla fase intraoperatoria alla fase preoperatoria, rendendo la chirurgia più programmata e controllata. Il tempo totale può risultare simile o superiore rispetto alla chirurgia convenzionale freehand se si considera l'intero percorso diagnostico-chirurgico-protetico.

4.9 COSTI ECONOMICI

Nel caso della chirurgia computer-guidata la valutazione economica deve includere l'intero workflow: radiografia 3D (CBCT), scansioni digitali, software di pianificazione, progettazione CAD, produzione della dima, sleeve, kit chirurgici dedicati, tempo clinico, tempo laboratoristico e gestione di eventuali complicanze. Limitare l'analisi alla sola seduta chirurgica rischia di sottostimare i costi reali della chirurgia stessa.

Come si può vedere nella schematizzazione dei costi nella Tabella 9, fra i 26 articoli analizzati in questa tesi i due più rilevanti sono quello di Graf et al. e quello Younes et al.. La revisione di Graf et al. mostra che diagnosi e pianificazione computer-assistite richiedono generalmente più tempo e costi rispetto ai protocolli non computer-assistiti. Il bilancio economico, tuttavia, non è uniforme, perché il maggiore costo iniziale può essere in parte compensato da una maggiore efficienza chirurgica o protesica [30, 32].

In Amorfini et al., la diagnostica costa 150 € nel fully guided e 75 € nel non computer-assistito; la pianificazione 350 € contro 100 €; la guida 500 € contro 250 €. Il costo del trattamento è invece 2400 € nel sCAIS-FG e 2600 € nel freehand; il follow-up è 250 € in entrambi i gruppi [30].

Invece, nello studio di Pozzi et al. la procedura computer-assistita comporta un costo aggiuntivo di circa 646 €. Il costo della guida è 32,90 € per impianto

fino a 4 impianti e 30 € per impianto oltre 4 impianti. In questo caso il vantaggio economico non è evidente, perché il costo aggiuntivo non si associa a una chiara riduzione dei tempi chirurgici o protesici [30].

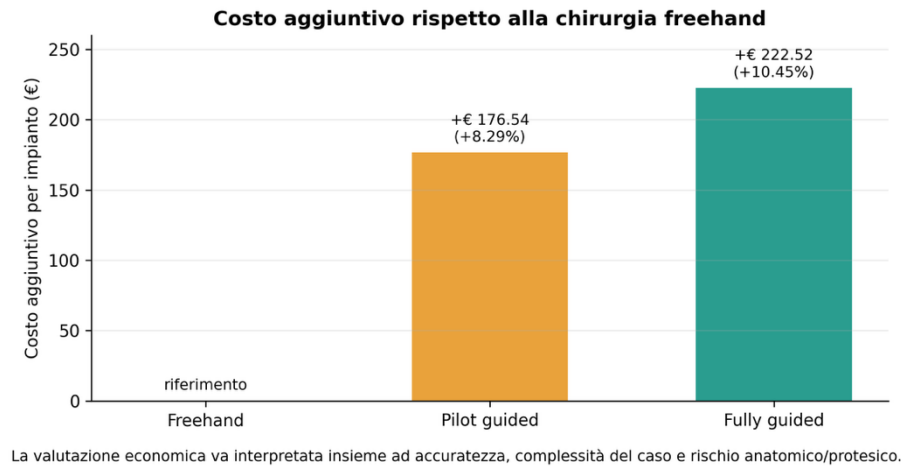
Nello studio di Schneider et al. i protocolli di sCAIS-FG risultano più costosi rispetto a quelli di freehand. La CBCT necessaria nel gruppo sCAIS-FG costa 350 CHF rispetto alla radiografia 2D da 140 CHF da eseguire nel gruppo freehand. Inoltre, la produzione della dima chirurgica costa 463 CHF e 409 CHF nei due gruppi sCAIS-FG, rispetto a 0 CHF nel controllo freehand. Quindi il costo totale è 2268 CHF e 1946 CHF nei gruppi guidati, contro 1567 CHF nel gruppo convenzionale [30].

Il confronto economico più diretto è fornito dallo studio di Younes et al.. Rispetto alla freehand, il costo aggiuntivo per impianto è +176,54 € per la sCAIS-PG (+8,29%) e +222,52 € per la sCAIS-FG (+10,45%). Tuttavia, la chirurgia sCAIS-FG ha un ICER (Incremental Cost-Effectiveness Ratio, rapporto incrementale costo-efficacia) più favorevole: 4,12 € per ogni 1% di riduzione dell'AGD (Apical Global Deviation, deviazione globale apicale), rispetto a 5,48 € della sCAIS-PG. Quindi la sCAIS-FG costa di più in valore assoluto, ma consente una maggiore riduzione dell'errore per unità di costo [32].

Nel complesso, la sCAIS comporta costi iniziali superiori rispetto alla freehand, soprattutto per diagnostica tridimensionale, pianificazione digitale e produzione della dima. Il costo aggiuntivo può essere giustificato nei casi complessi, in area estetica, in prossimità di strutture anatomiche critiche o quando è necessario mantenere una riabilitazione avvita. Nei siti semplici, con buona visibilità e adeguato volume osseo, il vantaggio economico può essere meno evidente.

Tabella 9. schema dei costi economici.

N°	Articolo	Tecniche confrontate	Dati economici principali
24	Graf et al. Time and costs related to computer-assisted versus non-computer-assisted implant planning and surgery. A systematic review. Clin Oral Implants Res. 2021;32 Suppl 21:303–317.	sCAIS vs. freehand	Gli autori concludono che diagnosi e pianificazione computer-assistite richiedono generalmente più tempo e costi rispetto ai workflow convenzionali.
24 — Amorfini et al., incluso in Graf	incluso nella revisione di Graf et al.	sCAIS fully guided (sCAIS-FG) vs. freehand	diagnostica sCAIS-FG: 150 € pianificazione sCAIS-FG: 350 € guida chirurgica: 500 € trattamento sCAIS-FG: 2400 € follow-up sCAIS-FG: 250 € diagnostica freehand: 75 €. pianificazione freehand: 100 € trattamento freehand: 2600 € follow-up freehand: 250 €
24 — Pozzi et al., incluso in Graf	incluso nella revisione di Graf et al.	sCAIS vs. freehand	Costo aggiuntivo della procedura computer-guidata: circa 646 €. Costo della guida: 32,90 € per impianto fino a 4 impianti; 30 € per impianto oltre 4 impianti.
24 — Schneider et al., incluso in Graf	incluso nella revisione di Graf et al.	sCAIS fully guided (sCAIS-FG) vs. freehand	radiografia CBCT: 350 CHF guida chirurgica: 409-463 CHF totale sCAIS-FG: 1946-2268 CHF radiografia 2D: 140 CHF guida chirurgica: 0 CHF totale freehand: 1567 CHF
26	Younes et al. A randomized controlled trial on the efficiency of free-handed, pilot-drill guided and fully guided implant surgery in partially edentulous patients. Clin Oral Implants Res. 2019;30(2):131–138.	sCAIS fully guided (sCAIS-FG) vs. sCAIS pilot-drill guided (sCAIS-PG) vs. freehand	viene solamente segnalato un costo aggiuntivo per impianto rispetto alla freehand: nella sCAIS-PG +176,54 € (+8,29%) nella sCAIS-FG +222,52 € (+10,45%)
26 — ICER Younes	incluso in Younes et al.	sCAIS fully guided (sCAIS-FG) vs. sCAIS pilot-drill guided (sCAIS-PG)	nella sCAIS-PG c'è un costo di 5,48 € per ogni 1% di riduzione dell'AGD (Apical Global Deviation, deviazione globale apicale); invece, nella sCAIS-FG c'è un costo di 4,12 € per ogni 1% di riduzione dell'AGD (Apical Global Deviation, deviazione globale apicale). Quindi la sCAIS-FG, pur avendo costo assoluto maggiore, ha un rapporto costo/beneficio migliore della sCAIS-PG



*Grafico 4. Costo aggiuntivo per impianto dei protocolli guidati rispetto alla chirurgia freehand.
Fonte: rielaborata da Younes et al., 2019 [32]*

4.10 OUTCOME ESTETICI

Gli outcome estetici sono documentati da un numero limitato di studi rispetto all'accuratezza tridimensionale. Tra i 26 articoli selezionati, il confronto clinico più diretto tra chirurgia computer-assistita e freehand è fornito da due studi: quello di Heng et al. e quello di Fürhauser et al.. Quest'ultimo, pur non confrontando le due tecniche, chiarisce il rapporto tra accuratezza del posizionamento e risultato estetico in area anteriore [28, 29].

I due studi selezionati per l'analisi degli outcome estetici sono stati schematizzati nella Tabella 10.

L'estetica peri-implantare dipende da posizione tridimensionale dell'impianto, profilo di emergenza della protesi, stabilità della parete vestibolare, livello del margine mucoso, papille e qualità dei tessuti molli. L'accuratezza ha quindi un valore clinico visibile, soprattutto nella regione anteriore.

Nello studio di Heng et al. condotto su 27 pazienti vengono inseriti 30 impianti singoli nel mascellare anteriore e seguiti con follow-up medio di circa 4 anni. Ne risulta che il Pink Esthetic Score (PES) sia più favorevole nei casi trattati con CAIS rispetto alla freehand. Il PES medio è $11,85 \pm 1,43$ nel gruppo CAIS complessivo e $10,15 \pm 2,32$ nel gruppo freehand, con differenza significativa ($p = 0,013$). In particolare, nel sottogruppo sCAIS il PES è $12,5 \pm 0,94$, mentre nel dCAIS è $11,2 \pm 1,93$; ma la differenza tra sCAIS e dCAIS non raggiunge la significatività statistica ($p = 0,076$) [29].

Lo stesso studio riporta una migliore soddisfazione estetica riferita dal paziente nei gruppi computer-assistiti: 4,7/5 nel dCAIS, 4,6/5 nello sCAIS e 4,0/5 nella freehand ($p = 0,002$).

Fürhauser et al. valutano 27 impianti singoli nel mascellare anteriore inseriti con chirurgia flapless computer-guidata. La deviazione media alla piattaforma implantare è 0,84 mm, la deviazione apicale 1,16 mm e la deviazione angolare $2,7^\circ$. Per deviazioni alla piattaforma implantare pari o superiori a 0,8 mm sono associate a un PES significativamente peggiore: 9,5 rispetto a 13 nei casi più accurati ($p = 0,039$) [28].

Nel complesso, la chirurgia computer-assistita sembra offrire un vantaggio estetico rispetto alla chirurgia freehand negli impianti singoli nei siti anteriori. Tuttavia, l'evidenza è ancora limitata. Heng et al. supportano un vantaggio della CAIS rispetto alla freehand, ma non dimostrano una superiorità certa della sCAIS rispetto alla dCAIS. Fürhauser et al. rafforzano il razionale biologico-protesico, mostrando che anche deviazioni prossime al millimetro possono compromettere l'estetica peri-implantare [29, 28].

La chirurgia computer-guidata non deve quindi essere presentata come garanzia automatica di risultato estetico, ma come uno strumento per migliorare il controllo tridimensionale dell'impianto. Il risultato finale dipende comunque dalla diagnosi, dalla selezione del caso, dalla gestione dei tessuti duri e molli, dallo spessore mucoso, dalla stabilità della parete

vestibolare, dal profilo di emergenza e dalla qualità della riabilitazione protesica.

Tabella 10. schema degli outcome estetici.

N°	Articolo	Tecniche valutate	Outcome estetici (PES)	Soddisfazione estetica soggettiva (Scala Likert: 1-5)
22	Fürhauser et al. Esthetics of Flapless Single-Tooth Implants in the Anterior Maxilla Using Guided Surgery: Association of Three-Dimensional Accuracy and Pink Esthetic Score. Clin Implant Dent Relat Res. 2015;17 Suppl 2:e427–e433.	sCAIS	deviazioni $\geq 0,8$ mm si associano a PES significativamente peggiore	ND
23	Heng et al. Comparing Medium to Long-Term Esthetic, Clinical, and Patient-Reported Outcomes Between Freehand and Computer-Assisted Dental Implant Placement. J Esthet Restor Dent. 2025;37(4):834–843.	sCAIS vs. freehand; analisi esplorativa sCAIS vs. dCAIS.	PES dCAIS: $11,2 \pm 1,93$	Likert dCAIS: 4,7/5
			PES sCAIS: $12,5 \pm 0,94$	Likert sCAIS: 4,6/5
			PES freehand: $10,15 \pm 2,32$	Likert freehand: 4,0/5

5. DISCUSSIONE

5.1 PIANIFICAZIONE DIGITALE E TRASFERIMENTO DELLA POSIZIONE IMPLANTARE NELLA sCAIS

La chirurgia implantare computer-guidata statica rappresenta il tentativo più strutturato di trasferire al campo operatorio una posizione implantare definita prima dell'intervento, sulla base di un progetto diagnostico, anatomico e protesico. Il suo presupposto non è semplicemente “guidare la fresa”, ma costruire un percorso nel quale immagini radiologiche, scansioni di superficie, progetto protesico e atto chirurgico siano integrati in un'unica sequenza decisionale.

Il primo passaggio è l'acquisizione della CBCT, che consente di valutare tridimensionalmente volume osseo, rapporti con strutture anatomiche critiche, spessore delle corticali, morfologia del sito ed eventuali difetti. A questa informazione radiologica viene associata la scansione intraorale o la scansione del modello (file STL), che fornisce il dato di superficie dei denti, della mucosa e dei profili protesici. La sovrapposizione dei file DICOM e STL permette quindi di pianificare l'impianto non solo in rapporto all'osso disponibile, ma anche in funzione della futura corona.

Questo passaggio è centrale: nella chirurgia freehand il chirurgo interpreta mentalmente la CBCT e la trasferisce manualmente nel sito chirurgico; nella sCAIS, invece, la posizione virtuale del progetto viene tradotta in una dima che dovrebbe guidare direzione, profondità e, nei protocolli fully guided, anche l'inserimento della fixture. La pianificazione digitale modifica quindi la logica dell'intervento: non è più la protesi ad adattarsi alla posizione implantare ottenuta, ma è la posizione implantare a essere definita a partire dal progetto protesico.

Questo aspetto ha una conseguenza clinica rilevante: nella chirurgia implantare computer-guidata il progetto protesico non può essere considerato un elemento secondario o delegato esclusivamente alla fase di laboratorio, ma deve rappresentare il punto di partenza della pianificazione implantare. La ceratura diagnostica digitale o il progetto protesico preliminare consentono infatti di definire volume coronale, profilo di emergenza, asse di accesso della vite, spazi protesici, rapporto con i tessuti molli e distribuzione dei carichi. Di conseguenza, il chirurgo che pianifica un caso guidato deve possedere competenze protesiche sufficienti per valutare criticamente il progetto ricevuto dal laboratorio oppure deve lavorare in stretta collaborazione con il protesista. La dima chirurgica non dovrebbe quindi essere il risultato automatico di una pianificazione tecnico-laboratoristica, ma l'espressione di una decisione clinica condivisa e validata dal clinico.

Tuttavia, questo flusso non è privo di possibili errori. Ogni fase può introdurre discrepanze: qualità della CBCT, artefatti metallici, accuratezza della scansione intraorale, precisione del matching DICOM/STL, segmentazione, scelta dell'asse implantare, offset della boccola, tolleranza tra sleeve e frese, tipo di kit chirurgico guidato, inclusa l'eventuale presenza di chiavi di riduzione o inserti intermedi tra boccola e fresa, stabilità della guida, metodo di fabbricazione e adattamento intraorale della dima. La chirurgia guidata non elimina quindi l'errore, ma lo distribuisce lungo una catena tecnologica che deve essere controllata in modo rigoroso [54].

Il tipo di supporto della dima rappresenta un ulteriore elemento critico. Le dime dento-supportate sono in genere più stabili, soprattutto nei pazienti parzialmente edentuli; quelle mucoso-supportate possono essere influenzate dalla resilienza dei tessuti molli, in particolare nei pazienti totalmente edentuli; quelle osseo-supportate richiedono un accesso chirurgico più invasivo, ma possono offrire maggiore stabilità quando il supporto dentale o mucoso non è affidabile. Anche il metodo di fabbricazione può incidere:

stampa 3D, fresatura, qualità del materiale, sterilizzazione e deformazione della dima possono influenzare il trasferimento del piano virtuale.

La pianificazione deve quindi essere considerata parte integrante della procedura chirurgica, non una fase accessoria. Una sCAIS correttamente progettata può aumentare accuratezza e riproducibilità, ma una pianificazione imprecisa o una dima instabile possono trasferire l'errore in modo sistematico. Per questo motivo, il chirurgo deve mantenere sempre un controllo critico intraoperatorio: la guida è uno strumento di trasferimento, non una garanzia assoluta di corretto posizionamento.

5.2 DISCUSSIONE DEGLI OUTCOME PRIMARI: ACCURATEZZA TRIDIMENSIONALE

Gli outcome primari di questa tesi sono rappresentati dalle deviazioni tra posizione implantare pianificata e posizione effettivamente ottenuta: deviazione coronale, apicale, angolare e verticale. Questi parametri non hanno solo valore metrico, ma riflettono conseguenze cliniche differenti. La deviazione coronale condiziona il profilo di emergenza e la possibilità di mantenere una protesi avvitata; quella apicale è strettamente collegata alla sicurezza anatomica; la deviazione angolare influenza asse protesico e distribuzione dei carichi; la deviazione verticale incide su profondità, tessuti molli e stabilità del margine osseo peri-implantare.

Il dato complessivo che emerge dagli articoli analizzati è coerente: la chirurgia guidata migliora l'accuratezza rispetto alla freehand, ma l'entità del vantaggio dipende dal protocollo utilizzato. La fully guided sCAIS mostra i valori più favorevoli nella maggior parte degli studi, soprattutto per deviazione angolare, apicale e coronale. La pilot-guided offre un miglioramento parziale, ma non controlla l'intera sequenza di fresaggio e inserimento; di conseguenza può ridurre l'errore iniziale senza impedire

l'accumulo di deviazioni nelle fasi successive. La dCAIS migliora il controllo rispetto alla mano libera, ma appare più sensibile alla calibrazione del sistema, all'esperienza dell'operatore e alla coordinazione occhio-mano richiesta dal monitoraggio in tempo reale.

La freehand rimane la metodica più variabile. Questo non significa che debba essere considerata una tecnica superata in ogni contesto: in casi semplici, con volume osseo favorevole, buona visibilità chirurgica e bassa criticità protesica, può ancora consentire risultati clinici adeguati nelle mani di operatori esperti. Tuttavia, quando il caso richiede un posizionamento tridimensionale molto preciso, la variabilità della mano libera diventa un limite più evidente.

La deviazione coronale mostra bene questa differenza. Nei dati disponibili, la freehand presenta valori medi più elevati rispetto ai protocolli guidati. Takács et al. riportano una deviazione coronale di 1,33 mm per la freehand, rispetto a 0,72 mm per la sCAIS complessiva e 0,71 mm per la fully guided. Werny et al. confermano questo andamento in ambito clinico: 1,56 mm per la freehand, 1,13 mm per la pilot-drill sCAIS, 0,72 mm per la fully guided sCAIS e 1,01 mm per la dCAIS. La fully guided sCAIS si configura quindi come il protocollo statico più efficace nel controllo della posizione della piattaforma implantare [25, 18, 49, 50].

Il significato clinico della deviazione coronale è particolarmente evidente negli impianti immediati post-estrattivi. Chandran et al. mostrano una riduzione marcata della deviazione crestale nel gruppo guidato rispetto al freehand: da $1,13 \pm 0,89$ mm a $0,34 \pm 0,26$ mm in senso mesio-distale e da $1,00 \pm 0,76$ mm a $0,37 \pm 0,24$ mm in senso bucco-linguale. In un alveolo post-estrattivo, la fresa può essere deviata dalla morfologia residua della radice e dalla parete vestibolare; per questo il controllo della piattaforma è essenziale per evitare posizioni troppo vestibolari, emergenze sfavorevoli o compromessi protesici [15].

La deviazione apicale è forse il parametro più sensibile alla tecnica chirurgica. L'errore all'apice tende ad amplificarsi lungo la fixture e può avvicinare l'impianto a strutture anatomiche critiche. Anche qui, la fully guided sCAIS offre i risultati più favorevoli. Werny et al. riportano una deviazione apicale di 2,22 mm nella freehand, 1,43 mm nella pilot-drill sCAIS, 0,86 mm nella fully guided sCAIS e 1,36 mm nella dCAIS. Younes et al. confermano il vantaggio del fully guided con una AGD (Apical Global Deviation, deviazione globale apicale) di 0,97 mm, rispetto a 1,43 mm nel pilot-drill e 2,11 mm nella freehand [18, 32].

Il dato di Younes et al. è particolarmente utile perché quantifica il beneficio in termini percentuali: la riduzione dell'errore apicale rispetto alla freehand è circa 32% con la pilot-drill guided e 54% con la fully guided. Questo suggerisce che il controllo dell'apice richiede una guida dell'intero protocollo, non solo della fresa iniziale. La guida della sola fresa pilota può migliorare l'orientamento iniziale, ma non evita deviazioni successive durante il fresaggio, l'osteotomia finale e l'inserimento implantare [32].

La deviazione angolare è l'outcome nel quale il vantaggio della chirurgia completamente guidata appare più evidente. Takács et al. riportano 6,44° per la freehand, 2,96° per la sCAIS complessiva e 2,61° per la fully guided. Werny et al. riportano 7,46° per la freehand, 5,94° per la pilot-drill sCAIS, 2,57° per la fully guided e 3,67° per la dCAIS. Anche Younes et al. mostrano un andamento sovrapponibile: 6,99° nella freehand, 5,95° nella pilot-drill e 2,30° nella fully guided [25, 18, 32].

Dal punto di vista protesico, questi valori sono molto rilevanti. Una deviazione angolare può modificare l'accesso vite, imporre abutment angolati o trasformare una riabilitazione pianificata come avvitata in una cementata. Questo aspetto è confermato dallo stesso Younes et al., in cui nel gruppo freehand 5/26 impianti sono stati restaurati con protesi cementata nonostante

fosse stata pianificata una protesi avvitata. L'accuratezza, quindi, non è un dato astratto: può cambiare concretamente il piano protesico [32].

La deviazione verticale, o depth deviation, è meno frequentemente riportata e appare più difficile da standardizzare. Anche in questo caso la fully guided sCAIS mostra valori favorevoli, ma il vantaggio rispetto alle altre metodiche è meno netto rispetto all'angolare e all'apicale. Werny et al. riportano per la freehand valori verticali di $0,86 \pm 0,30$ mm alla piattaforma e $0,82 \pm 0,32$ mm all'apice; per la dCAIS $0,50 \pm 0,08$ mm e $0,51 \pm 0,08$ mm; per la fully guided sCAIS $0,45 \pm 0,03$ mm a entrambi i livelli. Younes et al. riportano valori di CVD/AVD pari a $0,53/0,50$ mm nella freehand, $0,68/0,68$ mm nella pilot-drill e $0,43/0,43$ mm nella fully guided. Il dato conferma che la sola guida della fresa pilota non garantisce il controllo della profondità [18, 32].

La profondità dipende infatti da variabili intraoperatorie non sempre completamente controllabili dalla dima: densità ossea, stabilità primaria, torque di inserimento, precisione dello stop, compressione dei tessuti, decisioni cliniche finali e necessità di adattare l'impianto al contesto biologico. Per questo la deviazione verticale deve essere verificata durante la chirurgia e non affidata in modo acritico al sistema guidato.

5.3 FATTORI CHE MODIFICANO L'ACCURATEZZA: TECNICA CHIRURGICA, TIPO DI SUPPORTO DELLA DIMA, TIPO DI EDENTULIA, TIPO DI FABBRICAZIONE DELLA DIMA E ARCATA

Uno degli aspetti più importanti emersi dalla letteratura è che l'accuratezza non dipende solo dalla scelta tra freehand, sCAIS e dCAIS. A parità di tecnologia, i risultati possono variare in funzione del supporto della dima, del tipo di edentulia, della sede mascellare o mandibolare, della fabbricazione della guida e delle condizioni cliniche del sito.

Il tipo di supporto è un determinante essenziale. Le dime dento-supportate tendono a essere più stabili, perché i denti residui forniscono riferimenti rigidi e riproducibili. Le dime mucoso-supportate sono più vulnerabili alla compressione dei tessuti molli e alla mobilità della mucosa, soprattutto nei pazienti totalmente edentuli. Le dime osseo-supportate possono offrire stabilità, ma richiedono un lembo e quindi riducono il vantaggio di minore invasività del flapless.

I dati di Markiewicz e Nowicki illustrano chiaramente questo punto. La deviazione coronale è 0,351 mm nei casi di edentulia singola, 0,313 mm nei gap multipli e 0,729 mm nei pazienti totalmente edentuli. La deviazione apicale segue un andamento analogo: 0,342 mm nei casi singoli, 0,387 mm nei gap multipli e 0,971 mm nei totalmente edentuli. L'accuratezza peggiora quindi nei casi totalmente edentuli, dove il supporto della guida è meno stabile e la mucosa può introdurre errori di posizionamento [27].

Anche l'arcata influenza i risultati. Nello stesso studio, la deviazione coronale è 0,443 mm nel mascellare e 0,755 mm in mandibola; la deviazione apicale è 0,562 mm nel mascellare e 0,981 mm in mandibola. Nei pazienti totalmente edentuli, la dima muco-supportata mandibolare presenta i valori peggiori: 1,395 mm di deviazione coronale e 1,945 mm di deviazione apicale. La dima osseo-supportata mandibolare mostra invece valori più favorevoli, pari a 0,371 mm coronale e 0,408 mm apicale [27].

Questi dati indicano che la mandibola totalmente edentula con guida mucoso-supportata è uno degli scenari più critici per la sCAIS. La stabilità della dima può essere compromessa dalla ridotta superficie di appoggio, dalla mobilità della mucosa, dalla lingua, dal pavimento orale, dall'apertura limitata e dalla difficoltà di stabilizzare correttamente la guida. In questi casi, il ricorso a pin di fissaggio, verifiche intraoperatorie e margini di sicurezza adeguati diventa particolarmente importante.

Anche la fabbricazione della dima può influenzare l'accuratezza. Una guida stampata o fresata non riproduce automaticamente in modo perfetto il progetto virtuale: possono intervenire errori di stampa, contrazione del materiale, deformazione durante sterilizzazione, tolleranza della boccola, gioco tra sleeve e fresa o imprecisione nell'inserimento dei cilindri guida. Per questo la qualità del laboratorio o del workflow chairside è parte integrante del risultato clinico.

Il tipo di edentulia modifica, inoltre, il valore clinico dell'errore. In un singolo elemento in area estetica, anche una deviazione inferiore al millimetro può modificare il profilo mucoso o il punto di emergenza. In una edentulia multipla posteriore, la stessa deviazione può essere più facilmente compensata protesicamente, se il volume osseo è favorevole. In una edentulia totale, invece, piccoli errori multipli possono sommarsi e compromettere il fitting di una protesi prefabbricata, soprattutto nei protocolli a carico immediato.

La chirurgia dinamica merita una considerazione specifica. La dCAIS offre flessibilità e permette correzioni in tempo reale, senza vincolare meccanicamente la fresa attraverso una guida fisica. Può essere utile quando la dima statica è ingombrante o quando l'apertura orale è limitata. Tuttavia, richiede calibrazione accurata, controllo continuo del monitor, stabilità del sistema di tracking, curva di apprendimento importante e sembra avere criticità maggiori rispetto alla sCAIS nei siti post-estrattivi. Nei dati disponibili, la dCAIS migliora la precisione rispetto alla freehand, ma non raggiunge in modo costante i valori della sCAIS-FG.

Nel complesso, l'accuratezza deve essere interpretata come il risultato di una catena clinico-tecnologica. La sCAIS-FG è il protocollo statico con i migliori valori medi, ma i suoi risultati dipendono da pianificazione, qualità delle immagini, matching, supporto della dima, tipo di edentulia, arcata, fabbricazione, fit e controllo intraoperatorio. Non esiste quindi una

“accuratezza della sCAIS” valida in assoluto: esiste l’accuratezza di uno specifico workflow, applicato a uno specifico paziente [51, 52].

5.4 DISCUSSIONE DEGLI OUTCOME SECONDARI

Gli outcome secondari consentono di interpretare il significato clinico dell’accuratezza. Una tecnica più precisa è realmente utile se tale precisione si traduce in sopravvivenza favorevole, stabilità ossea, minore morbidità, riduzione delle complicanze, efficienza del workflow, sostenibilità economica e risultato estetico migliore.

Per quanto riguarda la sopravvivenza implantare, i dati sono globalmente favorevoli. La chirurgia guidata presenta percentuali spesso comprese intorno al 97–98%, compatibili con la moderna implantologia. Tuttavia, non è possibile affermare che aumenti sistematicamente il survival rate rispetto alla freehand. In Romandini et al. la sopravvivenza è 100% fino a 36 mesi, ma il dato deriva da un solo RCT. In Tahmaseb et al., il 100% dopo almeno 1 anno è riportato solo da 2 studi su 20. Dioguardi et al. forniscono un dato più solido: su 1495 impianti, 24 fallimenti precoci e 7 tardivi, con failure rate implant-level di 1,60% e 0,47%. La sopravvivenza stimabile è circa 97,9%, ma con follow-up eterogenei tra 1 e 5 anni [23, 47, 20].

Il survival rate rimane quindi un outcome multifattoriale. Qualità ossea, stabilità primaria, carico, fumo, igiene, storia parodontale, infezione peri-implantare e disegno protesico restano determinanti. La chirurgia guidata può migliorare indirettamente la prognosi attraverso un posizionamento più coerente con il progetto protesico, ma non sostituisce il controllo dei fattori biologici.

Il rimodellamento osseo marginale mostra risultati più articolati. Lops et al., in un RCT a 3 anni, non riportano un vantaggio della guided surgery rispetto

alla freehand: il MBL change è $0,35 \pm 0,47$ mm nel gruppo guidato e $0,23 \pm 0,75$ mm nel freehand, con differenza di $0,11 \pm 0,22$ mm non significativa ($p = 0,61$). Heng et al., invece, in area estetica, riportano un MBL più favorevole nei gruppi CAIS: $0,29 \pm 0,56$ mm nel CAIS complessivo contro $0,74 \pm 0,71$ mm nel freehand, con $p = 0,001$ [19, 29].

Questo suggerisce che il beneficio sul MBL non sia automatico, ma possa emergere nei casi in cui la precisione tridimensionale incide direttamente sul profilo di emergenza, sulla posizione vestibolo-palatale e sul supporto dei tessuti molli. Il MBL dipende comunque anche da profondità di inserimento, tipo di connessione, spessore dei tessuti sovracrestali, mucosa cheratinizzata, fumo, carico, igiene, mucosite e peri-implantite.

Le complicanze devono essere interpretate distinguendo eventi intraoperatori, dolore, complicanze precoci e tardive. La chirurgia guidata, soprattutto se flapless, può ridurre dolore e morbidità; Romandini et al. riportano una riduzione media del dolore pari a 17,09 mm sulla scala VAS, con tendenza a un minore gonfiore postoperatorio, pari a 6,59 mm, non significativa. Tuttavia, la sCAIS introduce complicanze proprie del workflow. Romandini et al. riportano un tasso di complicanze intraoperatorie del 12% e impossibilità di completare il protocollo nel 7%. Joda et al. riportano 12 complicanze chirurgiche su 408 interventi sCAIS (2,9%), con 5 casi di mancata stabilità primaria e 7 di frattura della guida. Dioguardi et al. riportano, tra gli eventi intraoperatori, 1 caso di limitata apertura orale che impediva l'uso della fresa, 1 deiscenza vestibolare, 1 quantità ossea insufficiente e 3 casi di stabilità primaria insufficiente [23, 31, 20].

Le complicanze precoci includono mancata osteointegrazione, fallimenti precoci e problemi protesici iniziali. Dioguardi et al. riportano 24 fallimenti precoci, failure rate implant-level 1,60%, e complicanze quali allentamento vite abutment in 15 casi, frattura della protesi provvisoria in 3, fit imperfetto della provvisoria in 5 e aggiustamenti occlusali in 2. Le complicanze tardive

includono peri-implantite, sovraccarico e fratture protesiche definitive: nello stesso lavoro sono riportati 7 fallimenti tardivi, failure rate 0,47%, peri-implantite in almeno 4 studi, perdita di un impianto dopo 2 anni per peri-implantite, fallimento dopo 45 mesi per sovraccarico e 18 fratture di protesi definitiva [20].

I tempi chirurgici mostrano un altro elemento importante: la sCAIS può ridurre il tempo intraoperatorio, ma non necessariamente quello totale. In Younes et al., il tempo chirurgico passa da $58,64 \pm 14,32$ minuti nella freehand a $41,36 \pm 13,87$ minuti nella pilot-drill guided e $40,10 \pm 17,03$ minuti nella fully guided. Tuttavia, includendo la pianificazione, il tempo totale diventa $58,64 \pm 14,32$ minuti per la freehand, $65,09 \pm 21,38$ minuti per la pilot-drill e $61,50 \pm 18,86$ minuti per la fully guided. La chirurgia guidata sposta quindi parte del lavoro dalla sala chirurgica alla fase preoperatoria [32].

Anche i costi seguono la stessa logica. La sCAIS comporta generalmente costi iniziali più elevati per CBCT, software, scansione, progettazione CAD, dima, sleeve e kit chirurgici. In Younes et al., il costo aggiuntivo per impianto è +176,54 € per il pilot-guided (+8,29%) e +222,52 € per il fully guided (+10,45%) rispetto alla freehand. Tuttavia, il fully guided presenta un ICER (Incremental Cost-Effectiveness Ratio, rapporto incrementale costo-efficacia) più favorevole: 4,12 € per ogni 1% di riduzione dell'AGD (Apical Global Deviation, deviazione globale apicale), rispetto a 5,48 € del pilot-guided. Il costo maggiore può quindi essere giustificato quando l'accuratezza evita compromessi protesici o riduce il rischio in casi complessi [32].

Infine, gli outcome estetici sono documentati da pochi studi, ma risultano coerenti con il razionale della chirurgia guidata. Heng et al. riportano un Pink Esthetic Score più favorevole nei gruppi CAIS rispetto alla freehand: $11,85 \pm 1,43$ contro $10,15 \pm 2,32$, con differenza significativa ($p = 0,013$ nella tabella dello studio; $p = 0,011$ nell'abstract). La soddisfazione estetica del paziente è 4,7/5 nella dCAIS, 4,6/5 nella sCAIS e 4,0/5 nella freehand ($p = 0,002$),

mentre funzione e comfort sono 5/5 in tutti i gruppi. Fürhauser et al. rafforzano il razionale, mostrando che deviazioni alla piattaforma implantare $\geq 0,8$ mm si associano a PES peggiore (9,5 contro 13, $p = 0,039$) e che la deviazione vestibolare è la più frequente (70%) [29, 28].

5.5 SINTESI CRITICA E IMPLICAZIONI CLINICHE

La discussione complessiva mostra che la chirurgia computer-guidata non deve essere interpretata come una tecnologia automaticamente superiore in ogni condizione clinica, ma come uno strumento capace di aumentare il controllo del posizionamento implantare quando viene utilizzato all'interno di un workflow rigoroso.

La freehand conserva un ruolo nei casi semplici, con buona disponibilità ossea, visibilità adeguata e limitata criticità estetico-protesica. Tuttavia, presenta maggiore variabilità e dipende in modo più marcato dall'esperienza dell'operatore. La dCAIS offre flessibilità e possibilità di correzione in tempo reale, ma richiede calibrazione, curva di apprendimento e controllo costante del sistema di navigazione. La sCAIS fully guided è, tra i protocolli statici, quello che mostra i valori più favorevoli di accuratezza coronale, apicale e angolare, e rappresenta il protocollo più prevedibile quando è necessario trasferire fedelmente una pianificazione protesicamente guidata.

Questo vantaggio è particolarmente rilevante nei casi post-estrattivi, nelle zone estetiche, nei pazienti con spazi protesici ridotti, nei siti vicini a strutture anatomiche critiche e nei trattamenti in cui è importante mantenere una riabilitazione avvvitata. Nei casi totalmente edentuli, invece, il vantaggio della sCAIS deve essere bilanciato con la stabilità della dima, il tipo di supporto e il rischio di errori cumulativi, soprattutto nei protocolli a carico immediato con protesi prefabbricata.

In questa prospettiva, il reale valore della chirurgia guidata non consiste soltanto nel trasferire una posizione implantare più accurata, ma nel trasferire una posizione implantare correttamente progettata. L'accuratezza diventa clinicamente rilevante solo quando la pianificazione è realmente protesicamente guidata e validata dal clinico.

La sCAIS-FG può quindi essere considerata il miglior protocollo statico in termini di accuratezza media, ma non è una procedura priva di errore. Anche i valori più favorevoli riportano deviazioni residue: l'errore non viene abolito, ma ridotto. Per questo non è corretto pianificare impianti a ridosso di strutture anatomiche nobili confidando nella guida come garanzia assoluta. Devono sempre essere mantenuti margini di sicurezza adeguati, in particolare rispetto a canale mandibolare, seno mascellare, fosse nasali, radici adiacenti e corticale vestibolare.

Il messaggio clinico finale è quindi duplice. Da un lato, la sCAIS-FG rappresenta oggi il protocollo statico più accurato e prevedibile, soprattutto quando il progetto protesico richiede elevata precisione tridimensionale. Dall'altro, questa accuratezza dipende dalla qualità dell'intero percorso: immagini, software, matching, progettazione, fabbricazione della dima, supporto, fit, stabilità intraoperatoria e controllo del chirurgo. La guida non sostituisce il giudizio clinico; lo rende più strutturato, ma impone la stessa prudenza.

6. CONCLUSIONI

La chirurgia implantare computer-guidata rappresenta una delle evoluzioni più rilevanti dell'implantologia contemporanea, non soltanto per l'introduzione di strumenti digitali, software di pianificazione, CBCT, scansioni intraorali e dime chirurgiche, ma soprattutto per il cambiamento concettuale che impone al processo decisionale. Il posizionamento implantare non viene più definito esclusivamente in funzione della disponibilità ossea e dell'esperienza intraoperatoria dell'operatore, ma deve essere progettato a partire dalla futura riabilitazione protesica, integrando sicurezza anatomica, stabilità biologica, biomeccanica, estetica e prevedibilità del risultato finale.

Dall'analisi della letteratura emerge che il vantaggio più documentato della chirurgia computer-guidata riguarda l'accuratezza tridimensionale. Rispetto alla chirurgia convenzionale a mano libera, le metodiche computer-assistite riducono mediamente la discrepanza tra posizione implantare pianificata e posizione realmente ottenuta, soprattutto in termini di deviazione coronale, apicale e angolare. Tra i protocolli statici, la chirurgia completamente guidata, o fully guided sCAIS (sCAIS-FG), emerge come protocollo di riferimento, di fatto il gold standard statico, in termini di accuratezza media, poiché consente di controllare non solo la fase iniziale dell'osteotomia, ma l'intera sequenza chirurgica fino all'inserimento della fixture.

Tuttavia, il dato di accuratezza non deve essere interpretato come un valore puramente tecnico né come garanzia automatica di successo clinico. Una posizione implantare più precisa assume reale significato solo quando la pianificazione di partenza è corretta dal punto di vista protesico, biologico e chirurgico. La guida chirurgica trasferisce il progetto, ma non lo rende automaticamente corretto: per questo il ruolo del clinico resta centrale nella validazione protesica, biologica e chirurgica dell'intero workflow.

La chirurgia computer-guidata appare particolarmente indicata nei casi in cui il margine di errore è ridotto e la posizione tridimensionale dell'impianto ha un impatto diretto sul risultato finale: settori estetici, impianti immediati post-estrattivi, siti con volume osseo limitato, aree prossime a strutture anatomiche nobili, riabilitazioni con necessità di asse protesico preciso e casi nei quali il mantenimento di una soluzione avvitata rappresenta un obiettivo clinico rilevante. In questi scenari, la pianificazione digitale può ridurre compromessi protesici, biomeccanici ed estetici difficilmente correggibili nelle fasi successive.

Al tempo stesso, la chirurgia guidata non elimina l'errore, ma lo sposta e lo rende più controllabile. La precisione finale dipende dall'intera catena diagnostico-progettuale: qualità della CBCT, scansione intraorale, matching DICOM/STL, progettazione implantare, disegno e fabbricazione della dima, tipo di supporto, stabilità intraorale, tolleranza tra boccia e fresa, apertura orale, irrigazione, sequenza chirurgica ed esperienza dell'operatore. Ogni passaggio può introdurre una discrepanza; pertanto, la presenza della dima non autorizza mai a ridurre i margini di sicurezza rispetto a strutture anatomiche critiche.

Gli outcome secondari confermano la necessità di una lettura equilibrata. La sopravvivenza implantare riportata negli studi sulla chirurgia guidata è generalmente elevata, ma non risulta dimostrato in modo definitivo un incremento sistematico del survival rate rispetto alla chirurgia convenzionale. Analogamente, rimodellamento osseo marginale, stabilità dei tessuti molli, complicanze, morbidità, tempi, costi ed esiti estetici dipendono da molteplici fattori e non possono essere attribuiti esclusivamente alla tecnica guidata. Il vantaggio clinico della sCAIS deve quindi essere interpretato non come superiorità assoluta, ma come maggiore capacità di trasferire in modo controllato una pianificazione correttamente costruita.

In conclusione, la chirurgia implantare computer-guidata non rende l'implantologia automatica né sostituisce il giudizio clinico. Al contrario, richiede una pianificazione più consapevole, una maggiore integrazione tra competenze chirurgiche e protesiche e un controllo critico di ogni fase del workflow digitale. La vera efficacia della chirurgia guidata non consiste semplicemente nel posizionare l'impianto con minore deviazione, ma nel trasferire al campo operatorio un progetto implanto-protesico corretto, biologicamente sostenibile e clinicamente validato. La guida chirurgica trasferisce il progetto, ma non lo rende automaticamente corretto: per questo il ruolo del clinico resta centrale nella validazione protesica, biologica e chirurgica dell'intero workflow. In questa prospettiva, la tecnologia non riduce la responsabilità del clinico, ma la rende ancora più centrale.

BIBLIOGRAFIA:

- [1] Torabinejad M, Lozada J, Puterman I, White SN. Endodontic therapy or single tooth implant? A systematic review. *J Calif Dent Assoc.* 2008;36(6):429-437.
- [2] Molven O, Halse A, Grung B. Periapical changes following root-canal treatment observed 20-27 years postoperatively. *Int Endod J.* 2002;35(9):784-790.
- [3] Valderhaug J, Jokstad A, Ambjørnsen E, Norheim PW. Assessment of the periapical and clinical status of crowned teeth over 25 years. *J Dent.* 1997;25(2):97-105.
- [4] Ng YL, Mann V, Rahbaran S, Lewsey J, Gulabivala K. Outcome of primary root canal treatment: systematic review of the literature - Part 1. Effects of study characteristics on probability of success. *Int Endod J.* 2007;40(12):921-939.
- [5] Burns LE, Kim J, Wu Y, Alzwaideh R, McGowan R, Sigurdsson A. Outcomes of primary root canal therapy: An updated systematic review of longitudinal clinical studies published between 2003 and 2020. *Int Endod J.* 2022;55(7):714-731.
- [6] Abraham CM. A brief historical perspective on dental implants, their surface coatings and treatments. *Open Dent J.* 2014;8:50-55.
- [7] Brånemark PI. Osseointegration and its experimental background. *J Prosthet Dent.* 1983;50(3):399-410.
- [8] Hämmerle CHF, Araújo MG, Simion M. Evidence-based knowledge on the biology and treatment of extraction sockets. *Clin Oral Implants Res.* 2012;23 Suppl 5:80-82.
- [9] Brunski JB. Biomechanical factors affecting the bone-dental implant interface. *Clin Mater.* 1992;10(3):153-201.
- [10] Li J, Jansen JA, Walboomers XF, van den Beucken JJP. Mechanical aspects of dental implants and osseointegration: A narrative review. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2020;103:103574.
- [11] Albrektsson T, Chrcanovic B, Jacobsson M, Wennerberg A. Osseointegration of Implants - A Biological and Clinical Overview. *JSM Dent Surg.* 2017;2(3):1022.

- [12] Alshadidi AAF, Aldosari LIN, Alshehri AHA, Binduhayym RIH, Kondaveeti R, Gurumurthy V, et al. The efficacy of freehand, pilot drilled and fully guided implant surgery in partially edentulous patients: A randomized control trial. *PLoS One*. 2026;21(1):e0341894. doi:10.1371/journal.pone.0341894.
- [13] Kois JC, Kan JYK. Predictable peri-implant gingival aesthetics: surgical and prosthodontic rationales. *Pract Proced Aesthet Dent*. 2001;13(9):691-698.
- [14] Wu XY, Shi JY, Yan Q. Midfacial soft tissue recession following immediate implant placement with bone grafting in the esthetic area: A systematic review and meta-analysis. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2023;38(2):239-250.
- [15] Chandran KRS, Goyal M, Mittal N, George JS. Accuracy of freehand versus guided immediate implant placement: a randomized controlled trial. *J Dent*. 2023;136:104620. doi:10.1016/j.jdent.2023.104620.
- [16] Pitman J, Cosyn J, Christiaens V, Younes F, De Bruyckere T, Vervaeke S, Glibert M. Examining the Influence of Freehand, Pilot-Guided, and Fully Guided Surgical Protocols on the Accuracy of Immediately Placed Implants-An In Vitro Study. *Appl Sci*. 2024;14(20):9253. doi:10.3390/app14209253.
- [17] Xing Q, Lin J, Lyu M. The Accuracy of Immediate Implantation Guided by Digital Templates and Potential Influencing Factors: A Systematic Review. *Int Dent J*. 2025;75(2):439-452. doi:10.1016/j.identj.2024.10.010.
- [18] Werny JG, Frank K, Fan S, Sagheb K, Al-Nawas B, Narh CT, et al. Freehand vs. computer-aided implant surgery: a systematic review and meta-analysis-part 1: accuracy of planned and placed implant position. *Int J Implant Dent*. 2025;11(1):35. doi:10.1186/s40729-025-00622-w.
- [19] Lops D, Palazzolo A, Calza S, Proietto L, Sordillo A, Mensi M, Romeo E. Guided versus freehand single implant placement: A 3-year parallel randomized clinical trial. *J Dent*. 2024;149:105317. doi:10.1016/j.jdent.2024.105317.
- [20] Dioguardi M, Spirito F, Quarta C, Sovereto D, Basile E, Ballini A, et al. Guided Dental Implant Surgery: Systematic Review. *J Clin Med*. 2023;12(4):1490.

- [21] Hultin M, Svensson KG, Trulsson M. Clinical advantages of computer-guided implant placement: a systematic review. *Clin Oral Implants Res*. 2012;23 Suppl 6:124-135.
- [22] Resnik R. *Misch's Contemporary Implant Dentistry*. 4th ed. St Louis: Elsevier; 2020. Chapters 11, 15 and 28.
- [23] Romandini M, Ruales-Carrera E, Sadilina S, Hämmerle CHF, Sanz M. Minimal invasiveness at dental implant placement: A systematic review with meta-analyses on flapless fully guided surgery. *Periodontol* 2000. 2023;91(1):89-112. doi:10.1111/prd.12440.
- [24] D'haese J, Ackhurst J, Wismeijer D, De Bruyn H, Tahmaseb A. Current state of the art of computer-guided implant surgery. *Periodontol* 2000. 2017;73(1):121-133. doi:10.1111/prd.12175.
- [25] Takács A, Hardi E, Cavalcante BGN, Szabó B, Kispélyi B, Joób-Fancsaly Á, et al. Advancing accuracy in guided implant placement: A comprehensive meta-analysis. *J Dent*. 2023;139:104748. doi:10.1016/j.jdent.2023.104748.
- [26] Khaohoen A, Powcharoen W, Sornsuwan T, Chaijareenont P, Rungsiyakull C, Rungsiyakull P. Accuracy of implant placement with computer-aided static, dynamic, and robot-assisted surgery: a systematic review and meta-analysis of clinical trials. *BMC Oral Health*. 2024;24(1):359. doi:10.1186/s12903-024-04033-y.
- [27] Markiewicz M, Nowicki AA. Accuracy of Computer-Guided Dental Implant Placement: A Clinical Comparison of Three Surgical Guide Types. *J Clin Med*. 2025;14(24):8652. doi:10.3390/jcm14248652.
- [28] Fürhauser R, Mailath-Pokorny G, Haas R, Busenlechner D, Watzek G, Pommer B. Esthetics of Flapless Single-Tooth Implants in the Anterior Maxilla Using Guided Surgery: Association of Three-Dimensional Accuracy and Pink Esthetic Score. *Clin Implant Dent Relat Res*. 2015;17(Suppl 2):e427-e433. doi:10.1111/cid.12264.
- [29] Heng S, Arunjaroen Suk S, Pozzi A, Damrongsirirat N, Pimkhaokham A, Mattheos N. Comparing Medium to Long-Term Esthetic, Clinical, and Patient-Reported Outcomes Between Freehand and Computer-Assisted Dental Implant Placement: A Cross-Sectional Study. *J Esthet Restor Dent*. 2025;37(4):834-843. doi:10.1111/jerd.13345.

- [30] Graf T, Keul C, Wismeijer D, Güth JF. Time and costs related to computer-assisted versus non-computer-assisted implant planning and surgery. A systematic review. *Clin Oral Implants Res.* 2021;32(Suppl 21):303-317.
- [31] Joda T, Derksen W, Wittneben JG, Kuehl S. Static computer-aided implant surgery (s-CAIS) analyzing patient-reported outcome measures (PROMs), economics and surgical complications: A systematic review. *Clin Oral Implants Res.* 2018;29(Suppl 16):359-373.
- [32] Younes F, Eghbali A, De Bruyckere T, Cleymaet R, Cosyn J. A randomized controlled trial on the efficiency of free-handed, pilot-drill guided and fully guided implant surgery in partially edentulous patients. *Clin Oral Implants Res.* 2019;30(2):131-138.
- [33] Esposito M, Grusovin MG, Felice P, Karatzopoulos G, Worthington HV, Coulthard P. Interventions for replacing missing teeth: management of soft tissues for dental implants. *Cochrane Database Syst Rev.* 2012;(2):CD006697.
- [34] Thoma DS, Buranawat B, Hämmerle CHF, Held U, Jung RE. Efficacy of soft tissue augmentation around dental implants and in partially edentulous areas: a systematic review. *J Clin Periodontol.* 2014;41 Suppl 15:S77-S91.
- [35] Tavelli L, Barootchi S, Avila-Ortiz G, Urban IA, Giannobile WV, Wang HL. Peri-implant soft tissue phenotype modification and its impact on peri-implant health: A systematic review and network meta-analysis. *J Periodontol.* 2021;92(1):21-44.
- [36] Müller HP, Heinecke A, Schaller N, Eger T. Masticatory mucosa in subjects with different periodontal phenotypes. *J Clin Periodontol.* 2000;27(9):621-626.
- [37] Fu JH, Yeh CY, Chan HL, Tatarakis N, Leong DJM, Wang HL. Tissue biotype and its relation to the underlying bone morphology. *J Periodontol.* 2010;81(4):569-574.
- [38] Yaman D, Aksu S, Dişçi R, Demirel K. Thickness of palatal masticatory mucosa and its relationship with different parameters in Turkish subjects. *Int J Med Sci.* 2014;11(10):1009-1014.
- [39] Bouri A Jr, Bissada N, Al-Zahrani MS, Faddoul F, Nouneh I. Width of keratinized gingiva and the health status of the supporting tissues around dental implants. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2008;23(2):323-326.

- [40] Gobbato L, Avila-Ortiz G, Sohrabi K, Wang CW, Karimbux N. The effect of keratinized mucosa width on peri-implant health: a systematic review. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2013;28(6):1536-1545.
- [41] Linkevicius T, Apse P, Grybauskas S, Puisys A. The influence of soft tissue thickness on crestal bone changes around implants: a 1-year prospective controlled clinical trial. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2009;24(4):712-719.
- [42] Linkevicius T, Puisys A, Linkeviciene L, Peciulienė V, Schlee M. Influence of vertical soft tissue thickness on crestal bone changes around implants with platform switching: a comparative clinical study. *Clin Implant Dent Relat Res*. 2015;17(6):1228-1236.
- [43] Liu Z, Li C, Liu Y, Zeng J, Chu H, Chen P, et al. The clinical significance and application of the peri-implant phenotype in dental implant surgery: a narrative review. *Ann Transl Med*. 2023;11(10):351.
- [44] Souza AB, Tormena M, Matarazzo F, Araújo MG. The influence of peri-implant keratinized mucosa on brushing discomfort and peri-implant tissue health. *Clin Oral Implants Res*. 2016;27(6):650-655.
- [45] Perussolo J, Souza AB, Matarazzo F, Oliveira RP, Araújo MG. Influence of the keratinized mucosa on the stability of peri-implant tissues and brushing discomfort: a 4-year follow-up study. *Clin Oral Implants Res*. 2018;29(12):1177-1185.
- [46] Sadilina S, Vietor K, Doliveux R, Siu A, Chen Z, Al-Nawas B, et al. Beyond Accuracy: Clinical Outcomes of Computer Assisted Implant Surgery. *Clin Exp Dent Res*. 2025;11:e70129. doi:10.1002/cre2.70129.
- [47] Tahmaseb et al. The accuracy of static computer-aided implant surgery: a systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Implants Res*. 2018;29 Suppl 16:416–435.
- [48] Chrabieh et al. (2024), Accuracy of computer guided implant surgery in partially edentulous patients: a prospective observational study. *International Journal of Implant Dentistry*, 10, 36.
- [49] Ku et al. (2022), Accuracy of dental implant placement with computer-guided surgery: a retrospective cohort study. *BMC Oral Health*, 22, 8.

[50] Shi et al. (2023), A systematic review of the accuracy of digital surgical guides for dental implantation. *International Journal of Implant Dentistry*, 9, 38.

[51] Lo Russo L. et al. Three-Dimensional Accuracy of Surgical Guides for Static Computer-Aided Implant Surgery. *Prosthesis*. 2025;9(3):25.

[52] Putra R.H. et al. The accuracy of implant placement with computer-guided surgery in partially edentulous patients and possible influencing factors. *J Prosthodont Res*. 2026;28-35.

[53] Testori T. et al. Implant placement in the esthetic area. *Periodontol* 2000. 2023;77:146-165.

[54] Kernen F. et al. A review of virtual planning software for guided implant surgery: data import and visualization, drill guide design and manufacturing. *BMC Oral Health*. 2020;20:251.

[55] Pozzi A. et al. Digital-assisted soft tissue sculpturing technique for immediate implant loading in fresh extraction sockets. *J Prosthodont Res*. 2021;65:119-124.

RINGRAZIAMENTI

Dopo sei lunghi anni trascorsi a studiare in Università, ci sarebbero tantissime persone che vorrei ringraziare. Questo percorso è stato intenso, impegnativo e ricco di momenti importanti, ma non sarei arrivato fino a qui senza il sostegno di chi mi è stato accanto.

Il primo ringraziamento va alla mia famiglia, che mi ha sempre sostenuto in ogni fase di questo percorso. Ringrazio mia madre Anna e mio padre Gianni, perché senza di loro non credo sarei arrivato fino a questo punto.

Un pensiero speciale va a mia zia Paola, alla quale dedico questa Tesi. Sicuramente è stata la persona che più mi ha aiutato in modo “attivo” nel mio percorso di studio. Da insegnante, ha sempre avuto la capacità di trasmettermi il valore dell’impegno, della costanza e della preparazione: quanti pomeriggi e quante serate passati a ripetere e ripetere alcuni argomenti, finché non li sapevo alla perfezione.

Ringrazio le mie nonne, per l’amore, la dolcezza e l’orgoglio con cui mi hanno sempre seguito.

Un ringraziamento particolare va anche al professor. Nocentini per aver creduto in me come suo primo tesista ed avermi supportato durante la stesura di questa Tesi di Laurea.

Infine, ringrazio i miei amici Giacomo, Davide e Francesco e tutti i colleghi “PASTA”, con i quali ho condiviso non solo momenti di studio, esami, ansie e sacrifici, ma anche risate, confidenze e amicizia. Questo percorso universitario non sarebbe stato lo stesso senza di loro.

Durante questi anni di studio mi sono anche concentrato nell’allenamento fisico, grazie al quale ho conosciuto altri amici, Lorenzo, Matteo e Francesco, che mi hanno supportato da questo lato e che, già da un anno prima della Laurea, mi chiamano “DOC”.