UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI MEDICINA E CHIRURGIA

Corso di Laurea Magistrale in Odontoiatria e Protesi Dentaria
Presidente: Prof. Andrea Santarelli

Impatto della realtà aumentata nei restauri diretti: analisi comparativa tra tecniche convenzionali e innovative

Relatrice: Chiar.ma
Prof.ssa Giovanna Orsini

Correlatore: Chiar.mo
Dott. Riccardo Monterubbianesi

Tesi di Laurea di:
Filippo Alberto Catozzi

Anno Accademico 2025/2026

INDICE

	Introduzione	1
1	Sistemi di AR, VR e MR	3
1.1	Storia dei sistemi	3
1.2	Dispositivi HMD	6
1.3	Realtà Aumentata	9
1.4	Realtà Virtuale	13
1.5	Realtà Mista	15
1.6	Realtà Estesa	17
2	Applicazioni odontoiatriche di AR, VR, MR	19
2.1	Educazione e simulazione clinica	19
2.2	Chirurgia orale e maxillo-facciale	23
2.3	Ortodonzia	27
2.4	Terapia della fobia dentale e controllo del dolore	27
2.5	Comunicazione tra paziente e operatore	31
3	Educazione	38
3.1	L'educazione in odontoiatria restaurativa	38
3.2	Le tecniche analogiche di insegnamento	39
3.3	Le tecniche digitali di insegnamento	41
3.4	Sistemi AR, VR e MR in commercio	44
3.5	L'IA nell'educazione	46
4	*Parte sperimentale*	49
4.1	Obiettivo	49
4.2	Materiali e metodi	50
4.3	Il visore Falko Connect	56
4.4	Risultati	61
4.5	Discussione	73
4.6	Conclusioni	81
5	Bibliografia	

Introduzione

La diffusione del digitale tra i professionisti del settore è ormai capillare. Negli ultimi 15 anni l'innovazione tecnologica ha trasformato l'ambito odontoiatrico e sempre più clinici adottano un flusso di lavoro interamente digitale. Le tecnologie più utilizzate sono l'imaging tridimensionale (3D), i sistemi CAD/CAM (Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing), le stampanti 3D e gli scanner intraorali.
L'imaging 3D è una componente essenziale nella chirurgia guidata, nella pianificazione degli interventi e nella diagnosi; il CAD/CAM viene utilizzato per progettare e realizzare manufatti protesici e chirurgici; le stampanti 3D stanno prendendo spazio nella realizzazione di manufatti protesici provvisori e allineatori, mentre gli scanner 3D hanno ormai quasi del tutto soppiantato l'impronta analogica. [1] [2]
Parallelamente a questi sistemi sta crescendo interesse verso l'utilizzo di strumenti basati su Realtà Aumentata (dall'inglese Augmented Reality, AR), Realtà Virtuale (dall'inglese Virtual Reality, VR) e Realtà Mista (dall'inglese Mixed Reality, MR), il cui impiego riguarda clinica, educazione e formazione.

Le tecnologie di AR, VR e MR sono immersive e permettono di arricchire l'esperienza visiva del clinico con informazioni aggiuntive rispetto a quelle visualizzabili senza caschi, schermi o visori allo scopo di migliorare precisione ed efficienza delle procedure odontoiatriche. Con le tecniche tradizionali si utilizza un flusso di lavoro basato su tre fasi: acquisizione dell'immagine digitale, elaborazione dell'immagine e trasformazione dell'immagine digitale in supporto fisico.
L'utilizzo della AR consente di eliminare l'ultimo passaggio *(Figura 1)* evitando possibili perdite di dati, riducendo le tempistiche e fornendo un riscontro clinico diretto. [3]
L'AR, e in generale i supporti digitali, aiutano il clinico nelle procedure odontoiatriche e nella relazione con il paziente adulto o in età pediatrica. [4] [5]

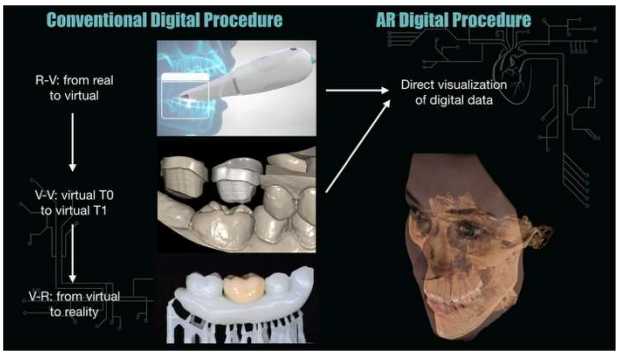


Figura 1 – Flusso di lavoro digitale tradizionale e flusso di lavoro digitale con AR.

L'AR consente di sovrapporre elementi digitali all'ambiente reale e offre quindi un'interazione diretta tra ciò che il clinico osserva e le informazioni digitali. Questa

caratteristica la rende adatta alla pianificazione del trattamento e al supporto intraoperatorio. [6]

La MR, evoluzione della AR, combina la visione diretta con oggetti digitali che possono interagire bidirezionalmente con il mondo reale, consentendo un'interazione profonda tra il clinico e le informazioni virtuali. In odontoiatria, la MR può essere impiegata per visualizzare strutture anatomiche complesse, guidare interventi chirurgici con maggiore accuratezza o aiutare il processo di formazione degli studenti. [7]

La VR, contrariamente alle altre citate, crea ambienti completamente virtuali all'interno dei quali l'utente può immergersi totalmente. In ambito odontoiatrico, la VR viene utilizzata principalmente per la pianificazione del trattamento, la simulazione di procedure complesse e la formazione degli studenti.
La pianificazione delle strategie terapeutiche è l'impiego più diffuso della VR: si parte dalla definizione dell'obiettivo clinico, si raccolgono i dati e si arriva alla creazione di modelli 3D virtuali. [8]

Sebbene i sistemi AR originino dai sistemi VR, in odontoiatria si predilige l'uso di sistemi AR e MR poiché tali sistemi potenziano l'esperienza visiva in tempo reale senza interrompere la connessione con la realtà. Inoltre, questi sistemi rendono disponibili informazioni anatomiche e radiologiche che il clinico può consultare durante l'intervento.
La VR invece si rivela particolarmente efficace in ambito formativo e nella comunicazione tra medico e paziente, soprattutto nella fase di pianificazione del trattamento.
Questa tesi descrive le principali applicazioni di AR, VR e MR in odontoiatria, focalizzandosi sull'impatto della AR nella ricostruzione di cavità di I classe su un primo molare inferiore e sull'impiego dei visori nella formazione universitaria. Il restauro di I classe è una delle prime procedure cliniche che lo studente impara e la guida grafica sovrapposta al campo operatorio è pensata come strumento didattico oltre che clinico.
Nella parte sperimentale verrà verificato se una guida grafica sovrapposta al campo operatorio e osservata attraverso un visore possa aiutare lo studente nell'esecuzione di un restauro diretto di prima classe.
Verranno messe a confronto cinque modalità di visione sullo stesso restauro: la visione a occhio nudo, il visore in 2D, il visore in 2D con AR, il visore in 3D e il visore in 3D con AR. Trenta studenti eseguono il restauro in ciascuna delle cinque modalità su modelli stampati in 3D; vengono cronometrati i tempi di esecuzione e raccolti i giudizi dei partecipanti attraverso un questionario.

1 Sistemi di AR, VR e MR

1.1 Storia dei sistemi

I sistemi di AR, MR e VR nascono negli anni ’60 del secolo scorso. Dai primi prototipi di laboratorio si è arrivati agli strumenti oggi impiegati nella didattica e nella clinica.

La prima applicazione di VR si ha nel 1962 con il Sensorama di Morton Heilig: un simulatore multisensoriale che integrava proiezione stereoscopica tridimensionale, suoni spazializzati, vibrazioni e stimoli olfattivi per creare un’esperienza immersiva di una corsa motociclistica attraverso Brooklyn. [9]
Heilig, fotografo e progettista di attrezzature cinematografiche hollywoodiane, creò una macchina capace di stimolare tutti i sensi umani, anticipando di decenni i principi fondamentali della VR e del concetto di “immersione”. [10]
Sul piano concettuale la VR nasce nella prima metà degli anni ’60 con Ivan Sutherland che, ispirato dal Sensorama, la teorizzò nel saggio “The Ultimate Display” (1965) scrivendo: “Lo schermo è una finestra attraverso la quale uno può vedere un mondo virtuale. La sfida è fare in modo che quel mondo appaia reale, si comporti in modo reale, emetta suoni reali, e si senta reale”. [11]
Da quelle premesse Sutherland realizzò nel 1968 il primo Head-Mounted Display (HMD); il dispositivo offriva una grafica interattiva assente nel Sensorama, per quanto limitata a semplici figure in wireframe (ossia rappresentazioni tridimensionali costituite dai soli spigoli degli oggetti, prive di superfici e di ombreggiatura). Ribattezzato “The Sword of Damocles” per via dell’imponente struttura di sostegno, introduceva il tracking della posizione e dell’orientamento della testa dell’utente, che serviva ad aggiornare le immagini virtuali in modo dinamico.

Nel decennio successivo nacque all’Università del North Carolina “GROPE”, il primo sistema capace di restituire all’utente un ritorno di forza (force feedback); negli stessi anni Myron Krueger sviluppò “VIDEOPLACE”: in questo ambiente di realtà artificiale alcune telecamere riprendevano la sagoma di ciascun utente e la riproducevano su uno schermo, così che più persone potessero muoversi e interagire all’interno dello stesso spazio virtuale bidimensionale. [12] Questo sistema è il precursore della motion capture.

Gli anni ’80 videro l’ingresso di nuovi dispositivi in ambito commerciale; in ambito militare, nel 1982, venne presentato dall’US Air Force il VCASS (Visually Coupled Airborne System Simulator); in questo simulatore di volo, il primo del suo genere, il pilota indossava un HMD e da lì gestiva la rotta e i bersagli della missione.

Successivamente la VPL Research commercializzò il DataGlove (1985): un guanto con sensori a fibra ottica capace di misurare la flessione, l'orientamento e la posizione spaziale delle dita, traducendo i gesti manuali in comandi digitali.
L'EyePhone, uscito nel 1988, fu il primo HMD commerciale: offriva un campo visivo di 60° e impiegava display a cristalli liquidi.
Un salto innovativo arrivò nel 1989 con il BOOM (Binocular-Omni-Orientational Monitor), sviluppato da Fake Space Labs. Il sistema montava un display stereoscopico su un braccio meccanico snodabile; aveva una latenza inferiore a 80ms e una stabilità dell'immagine superiore agli HMD dell'epoca.
Grazie al BOOM e al DataGlove, la NASA sviluppò un simulatore per l'analisi aerodinamica di velivoli spaziali in ambiente virtuale chiamato "Virtual Wind Tunnel".
Nel 1992, l'Electronic Visualization Laboratory dell'Università dell'Illinois presentò il CAVE (Cave Automatic Virtual Environment), un sistema di proiezione immersiva che trasformava stanze intere in ambienti virtuali proiettando le immagini sulle pareti. Rappresentò un'alternativa agli HMD poiché era utilizzabile da più utenti contemporaneamente.

L'AR iniziò a imporsi all'inizio degli anni '90 come evoluzione naturale della VR. La Boeing Corporation sviluppò il primo prototipo AR industriale per guidare i tecnici nell'installazione di cablaggi aeronautici, sovrapponendo istruzioni digitali sugli oggetti reali. Il sistema riduceva gli errori di assemblaggio. [13]
Rosenberg e Feiner nello stesso periodo evidenziarono miglioramenti significativi nelle prestazioni degli operatori quando venivano supportati da informazioni virtuali sovrapposte ai dispositivi da riparare.
Loomis et al. svilupparono nel 1993 un sistema AR basato su GPS per la navigazione assistita dei non vedenti, unendo informazioni audio spaziali con il posizionamento satellitare. [14]
Parallelamente, Julie Martin creò "Dancing in Cyberspace", un teatro AR dove gli attori interagivano in tempo reale con oggetti virtuali proiettati nello spazio scenico.
Il 1997 vide la nascita del Mobile AR System (MARS) di Feiner et al.; il primo sistema AR portatile destinato ai turisti, che sovrapponeva informazioni virtuali ai monumenti attraverso HMD ottici trasparenti. MARS introduceva il concetto di AR in mobilità, anticipando le applicazioni smartphone. [15]
I primi anni del nuovo millennio videro l'esplosione delle applicazioni consumer. ARQuake del 2000, sviluppato da Thomas et al., fu il primo videogioco AR che utilizzava il tracking GPS e visori HMD per sovrapporre elementi virtuali nell'ambiente urbano reale. [16]
Nel 2008, Wikitude fu un'applicazione che combinò la fotocamera dello smartphone, la connettività internet e il GPS per fornire informazioni virtuali sull'ambiente circostante, iniziando l'era dell'AR mobile di massa.

ARToolKit, rilasciato nel 1999, e SiteLens del 2009 crearono uno standard, permettendo agli sviluppatori di creare applicazioni AR senza competenze hardware specialistiche. Nel 2011 la Total Immersion sviluppò D'Fusion, una piattaforma AR per design e visualizzazione architettonica.
Nel 2013 il Google Glass venne lanciato sul mercato; questo dispositivo indossabile integrava un display ottico trasparente, fotocamere e connettività wireless. Fu il primo dispositivo indossabile di larga diffusione a essere impiegato in ambito medico.[17]
Una revisione sistematica del 2018 analizzò l'utilizzo di Google Glass in ambito chirurgico su 31 casi; si documentò come il dispositivo venisse impiegato prevalentemente (68%) come sistema di visualizzazione intraoperatoria, e meno frequentemente come monitor dei parametri vitali (19%), display per la navigazione chirurgica (16%) e come dispositivo di videoconferenze con chirurghi remoti (16%). Le limitazioni principali furono la scarsa durata della batteria e la difficoltà nell'uso delle funzioni a comando remoto. [18] [19]

I dispositivi VR subirono un rilancio nel 2013 con l'Oculus Rift 1 (DK1), che utilizzò un display da smartphone di risoluzione 720p e sistemi di tracking per offrire una VR accessibile a chiunque. L'Oculus Rift venne usato in ambito medico per il controllo del dolore in pazienti ustionati. [20]
Nel 2016 l'Oculus Rift 2 (DK2) venne testato con una valutazione comparativa di vetrini istologici che evidenziò il limite più grande di questa generazione di visori: la bassa risoluzione dello schermo. [21]

Microsoft HoloLens fu presentato nel 2015 e portò per primo il concetto di MR in un dispositivo commerciale; combinò algoritmi SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) con ologrammi tridimensionali ancorati nel mondo reale. HoloLens consentiva ai chirurghi di visualizzare modelli anatomici preoperatori sovrapposti al paziente, mantenendo le mani libere. [22] [23]
Un'analisi sistematica dell'accuratezza di HoloLens 2 per la navigazione chirurgica marker-based, pubblicata nel 2023, evidenziò come il sistema di Microsoft fosse quasi paragonabile ai sistemi di navigazione chirurgica tradizionali. [24]
Nel 2023 il Meta Quest 3 introdusse per la prima volta il pass-through RGB ad alta fedeltà in un sistema MR, migliorando la qualità visiva.
Negli ultimi anni le pubblicazioni scientifiche su AR, VR e MR sono aumentate rapidamente. Gli obiettivi futuri sono due: una latenza pressoché nulla, tale da rendere la visione attraverso il visore sovrapponibile a quella umana, e dispositivi più leggeri, comodi da indossare per lunghe sessioni.

1.2 Dispositivi HMD

Un Head-Mounted Display (HMD) è un dispositivo di visualizzazione indossabile che integra schermi e lenti ottiche posizionati a breve distanza dagli occhi affinché l'utente possa fruire di contenuti video. Esistono versioni per la visualizzazione in AR, VR e MR, che consentono rispettivamente la sovrapposizione o l'integrazione dei contenuti digitali nella scena reale. [25] [26]

In base al modo in cui integrano reale e virtuale gli HMD vengono suddivisi in optical see-through, video see-through e monitor based.

La visione attraverso un visore HMD modifica il modo in cui l'operatore percepisce la profondità di campo. Nella visione naturale la profondità si ottiene da fattori monoculari e binoculari. I monoculari sono: prospettiva, contorni degli oggetti, tessitura dei materiali e sfocatura di ciò che è fuori fuoco. Mentre il fattore binoculare è la stereopsi, ossia la capacità della corticale di fondere due immagini retiniche leggermente diverse, fornendo una stima più precisa della profondità di campo. [27]

Le varie tipologie di visori possono restituire più o meno in maniera naturale la profondità di campo. Un HMD stereoscopico invia a ciascun occhio un'immagine diversa e riproduce la disparità binoculare mentre un HMD che mostra la stessa immagine ai due occhi lascia invece la profondità ai soli indizi monoculari e questo secondo caso corrisponde alla modalità bidimensionale dei sistemi video see-through.

L'influenza della stereopsi sulla coordinazione occhio-mano è stata misurata in compiti motori precisi. Bloch et al. hanno confrontato 30 soggetti con stereopsi normale e 15 soggetti con stereopsi assente in un esercizio di precisione eseguito prima a visione diretta e poi attraverso un monitor: il gruppo con stereopsi normale ottiene punteggi più alti soltanto nella visione diretta, mentre nella condizione bidimensionale i due gruppi si comportano in modo sovrapponibile. [28]
La stereopsi è importante quando l'informazione binoculare è disponibile mentre negli altri casi il vantaggio scompare perché la profondità deve essere ricostruita dai soli indizi monoculari.

Sistemi optical see-through

Con un HMD a vista chiusa l'utente perde il contatto visivo con l'ambiente circostante; nei modelli see-through, invece, l'ambiente resta visibile e gli oggetti virtuali vi vengono sovrapposti. Negli HMD optical see-through questa sovrapposizione viene ottenuta con dei combinatori ottici collocati davanti agli occhi, in parte trasmissivi e in parte riflettenti. La trasmissività consente di guardare direttamente attraverso di essi, mentre la riflettività aggiunge alla scena le immagini virtuali provenienti dai monitor montati sulla testa *(Figura 2)*.

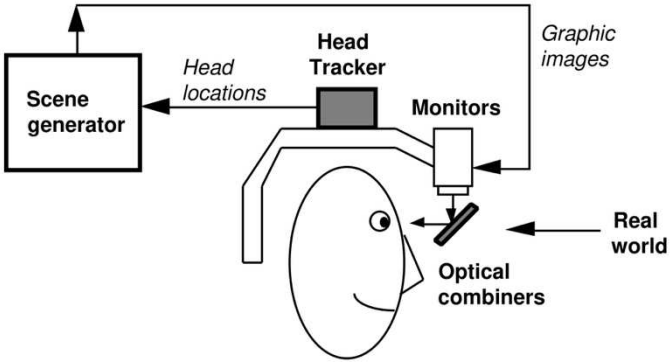


Figura 2 – Diagramma concettuale di un HMD optical see-through.

Sistemi video see-through

Gli HMD video see-through sono invece visori a vista chiusa ai quali vengono aggiunte una o due videocamere, fissate al casco e orientate come lo sguardo dell'utente. L'ambiente reale viene quindi ripreso dalle videocamere; un generatore di scene fonde questo segnale video con le immagini grafiche e l'immagine composta compare sui monitor posti di fronte agli occhi *(Figura 3)*.

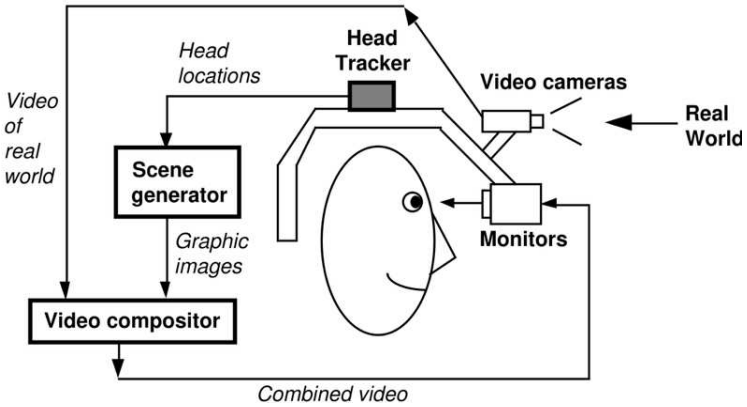


Figura 3 – Diagramma concettuale di un HMD video see-through.

La composizione video può essere realizzata in più modi. Il più semplice è il chroma-keying: lo sfondo delle immagini grafiche viene impostato su un colore specifico non

impiegato da alcun oggetto virtuale e, nella fase di combinazione, tutte le aree di quel colore vengono sostituite con le parti corrispondenti del video del mondo reale. Una composizione più sofisticata utilizza invece le informazioni sulla profondità: confrontando la profondità pixel per pixel, gli oggetti reali possono coprire quelli virtuali e viceversa.

Sistemi monitor-based

In alternativa agli HMD see-through si possono utilizzare configurazioni basate su monitor; in questo caso una o due videocamere, statiche o mobili, riprendono l'ambiente, il video del mondo reale viene combinato con le immagini grafiche e visualizzato su un monitor di fronte all'utente che non indossa alcun dispositivo di visualizzazione *(Figura 4)*. Le immagini possono inoltre essere presentate in stereoscopia, soluzione che richiede però occhiali dedicati. Esiste anche una variante ottica di questa configurazione, analoga all'HMD optical see-through: qui però monitor e combinatori non vengono indossati ma restano ancorati a una struttura, ed è l'utente ad avvicinare il capo per osservare la scena attraverso le lenti.

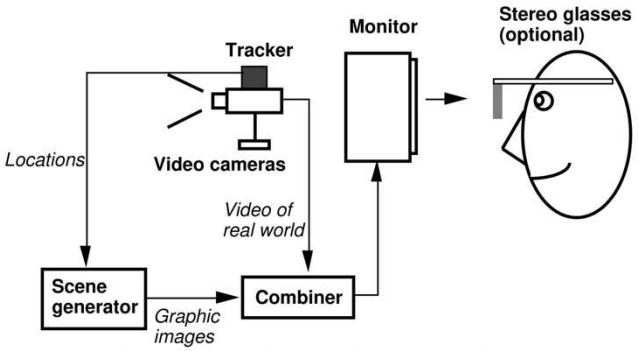


Figura 4 – Diagramma concettuale di un sistema AR monitor-based.

1.3 Realtà Aumentata

La Realtà Aumentata (dall'inglese Augmented Reality, AR) è una tecnologia che sovrappone immagini generate dal computer alla visione diretta del mondo reale, integrando quindi l'ambiente circostante l'utente con elementi digitali. [29]

Gli elementi digitali integrati nella scena possono essere vari, ad esempio grafiche, audio, video, e l'utente interagisce con essi simultaneamente alla visione del mondo reale. [30]
Le caratteristiche fondamentali dell'AR comprendono la combinazione di oggetti virtuali con il mondo reale e la possibilità di eseguire operazioni interattive su oggetti reali; l'utente percepisce così un ambiente intermedio tra la scena reale e la computer grafica sovrapposta. [1] [31] [32]
I sistemi AR richiedono alcune funzionalità essenziali: un database da cui acquisire informazioni, il tracciamento in tempo reale degli oggetti reali, un'elaborazione grafica avanzata, la determinazione del punto di vista (POV, Point Of View) dell'utente nello spazio attraverso sensori giroscopici, il display utilizzato e meccanismi di feedback aptico. Nella pratica odontoiatrica l'AR viene impiegata sia per arricchire la visione clinica con informazioni utili all'operatore, sia nella comunicazione tra paziente e professionista, attraverso la condivisione di immagini, video e modelli tridimensionali. [33]

Le funzionalità appena elencate, fonti di dati reali e virtuali, tracciamento, elaborazione della visualizzazione e meccanismi di feedback, vengono integrate in modo differente dai singoli sistemi AR. [34]

In odontoiatria l'AR è stata implementata con lo sviluppo di nuovi sistemi di visualizzazione per l'esplorazione anatomica a partire dall'uso di software basati sulla VRI primi impieghi odontoiatrici dell'AR derivano da software di VR nati per lo studio dell'anatomia, dai quali sono stati sviluppati sistemi di visualizzazione di nuova concezione. [35] Il passaggio dalla VR all'AR richiede che le immagini virtuali vengano collocate sulla scena reale con precisione e ripetibilità, rispettando la tridimensionalità dello spazio e seguendo i movimenti di operatore e paziente; il risultato dipende dal sistema impiegato. [3]
I sistemi più comunemente usati sono gli HMD, Head-Mounted Display, e le proiezioni su specchi semiriflettenti; entrambi ammettono configurazioni molto diverse tra loro. [36]
Gli oggetti virtuali da sovrapporre vengono solitamente ricavati da acquisizioni radiologiche tridimensionali, come la TC (Tomografia Computerizzata) e la CBCT (Cone

Beam Computed Tomography), con software come “Mimics” (Materialise, Leuven). L’oggetto viene esportato in un formato di ampia compatibilità (stl) e utilizzato per la ricostruzione 3D dell’area di interesse. La stessa procedura vale per le immagini di risonanza magnetica, per l’angiografia e in generale per ogni acquisizione volumetrica. [37]
Viene quindi definito AR qualsiasi sistema che combini reale e virtuale, sia interattivo in tempo reale e sia registrato in tre dimensioni. Rientrano così nella definizione sia i monitor e i dispositivi monoculari sia gli HMD, insieme a tutte le altre soluzioni capaci di unire le due componenti.

Schmalstieg et al. hanno classificato le tecnologie di visualizzazione in base al punto in cui il dispositivo si trova rispetto all’utente, distinguendo lo spazio della “testa”, quello del “corpo” e quello del “mondo”. Schermi desktop, specchi e vetrine virtuali, finestre, portali e sistemi a proiezione occupano una posizione fissa nel mondo; i dispositivi palmari appartengono al corpo e i near-eye display alla testa dell’utente. [38]
Allo spazio “testa” appartiene l’HMD, la tecnologia di visualizzazione più nota in ambito AR. Alla soluzione optical see-through corrisponde per esempio Microsoft HoloLens, mentre alla soluzione video see-through corrisponde HTC Vive. In medicina lo stesso principio si ritrova nel microscopio operatorio digitale.
Gli smartphone e i tablet sono gli esempi più rappresentativi dello spazio “corpo”; la fotocamera posteriore fornisce all’utente un’immagine video see-through. In ambito medico un esempio è rappresentato dalle applicazioni per visualizzare le strutture anatomiche.
Lo spazio “mondo” comprende schermi desktop, specchi virtuali, sistemi a proiezione e installazioni fisse. Uno schermo desktop diventa un dispositivo AR con l’aggiunta di una webcam. La fotocamera anteriore fornisce l’input proveniente dalla realtà e sullo schermo viene mostrata l’immagine di ciò che si trova davanti al dispositivo. Esistono anche varianti fisse del sistema optical see-through, in cui alla scena reale si affianca la visione di informazioni aggiuntive. Infine, i display basati su proiettori possono essere solidali o non solidali con il punto di vista dell’utente e possono anche essere montati su un HMD, creando una proiezione personale. In medicina lo spazio “mondo” è molto frequente, soprattutto in sala operatoria: gli esami preoperatori possono comparire su uno schermo accanto al campo chirurgico oppure essere proiettati sul corpo del paziente.

Tracciamento e interazione

Il tracciamento in un ambiente AR viene classificato in base alla tecnologia impiegata; i criteri di riferimento sono la natura fissa o mobile dei sensori e il tipo di rilevamento ottico adottato. Molti sistemi combinano oggi più meccanismi; HTC Vive, ad esempio, integra il monitoraggio stazionario, con fari fissi nella stanza e rilevatori nei dispositivi, e il monitoraggio mobile tramite sensori giroscopici. [38]

Nel tracciamento stazionario la posizione viene calcolata a partire da sorgenti fisse di diversa natura: bracci meccanici, campi elettromagnetici, emettitori a infrarossi oppure ultrasuoni. Tra gli esempi più diffusi ci sono i tracker SteamVR, impiegati da HTC Vive e da altri visori AR/VR per localizzare l'utente nella stanza. Una seconda opzione è l'ultrasonic tracking: la posizione viene ottenuta misurando il tempo che un impulso ultrasonico impiega a raggiungere il sensore.

Mentre il tracciamento stazionario limita gli spostamenti dell'utente, i sensori mobili rendono possibile il rilevamento all'aperto. Tra i sensori mobili il più utilizzato è il GPS (Global Positioning System): il ricevitore calcola la propria posizione misurando quanto tempo impiegano a raggiungerlo i segnali inviati da più satelliti; all'interno di una rete wireless già stabilita è inoltre possibile localizzare un oggetto a partire dalla stazione base utilizzata per la connessione.

Il tracciamento ottico in AR può essere classificato secondo due criteri: la presenza o l'assenza di un modello di riferimento e l'impiego di marcatori artificiali o ambientali. Nel primo caso viene impiegato un modello creato precedentemente; la tecnica senza modello di riferimento procede invece su un modello temporaneo e risulta più flessibile, soprattutto se combinata con la scansione 3D. I marcatori artificiali consentono algoritmi più robusti, perché sono forme già note e vengono riconosciute con facilità. I marcatori ambientali richiedono invece una qualità dell'immagine superiore. Il riconoscimento si basa soprattutto sui punti di interesse (key points); questi punti devono essere individuati con facilità e rimanere stabili da qualunque angolazione venga osservato l'oggetto. Un'alternativa è costituita dalle caratteristiche del bordo degli oggetti, che devono però risultare distinguibili dallo sfondo. [31]

Classificazione dei sistemi AR

Per la classificazione dei sistemi AR viene utilizzata la "tassonomia funzionale" introdotta da Hugues et al.; secondo questa classificazione possono essere identificate sei sottofunzionalità della percezione aumentata *(Figura 5)*. [39] [38]

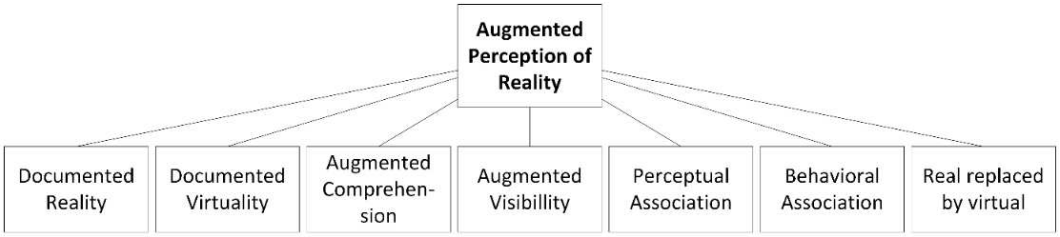


Figura 5 – Tassonomia funzionale dei sistemi AR secondo Hugues et al.

Sottofunzionalità 0: Reale e virtuale compaiono insieme sul medesimo display, senza però alcun legame di contenuto: lo schermo è unico, i riquadri sono due e distinti, uno per le immagini reali e uno per il virtuale.
Sottofunzionalità 1: è una funzione minima di AR; anche qui l'AR consiste di due riquadri ma, a differenza della sottofunzionalità 0, le immagini reali e quelle virtuali sono correlate tra loro e forniscono quindi informazioni aggiuntive al contesto della realtà.
Sottofunzionalità 2 (realtà con percezione aumentata): il riquadro rimane uno solo, condiviso da immagini reali e virtuali. Questa sottofunzionalità si articola in due livelli: la "comprensione aumentata", in cui le immagini virtuali mostrano l'allineamento con le immagini reali senza essere sempre vicine, e la "visibilità aumentata", in cui le immagini virtuali coprono completamente le immagini reali.
Sottofunzionalità 3 (associazione percettiva delle immagini reali e virtuali): è ulteriormente suddivisa nei livelli di "incrostazione" e "integrazione" delle entità virtuali sulle immagini reali; essa consente per esempio di distinguere la proiezione di un tumore al di sopra di un organo dall'immagine tridimensionale del tumore integrata nell'organo stesso.
Sottofunzionalità 4 (associazione comportamentale del reale e virtuale): è un ulteriore grado di integrazione, poiché attribuisce agli oggetti virtuali proprietà fisiche, in particolare quelle dell'oggetto reale.
Sottofunzionalità 5 (sostituzione del reale con il virtuale o "realtà virtualizzata"): consente di sostituire la scena reale con un'immagine artificiale e viceversa; è quindi possibile modificare l'angolo di visione, vedendo sia la realtà attraverso una telecamera sia un'immagine artificiale da un altro punto di vista.

1.4 Realtà Virtuale

La Realtà Virtuale (dall'inglese Virtual Reality, VR) è una simulazione generata da un computer, che riproduce ambienti reali oppure interamente artificiali. L'utente viene immerso in un ambiente virtuale e ha l'impressione di vivere in prima persona la realtà simulata; i sensi maggiormente stimolati sono la vista e l'udito. [40]

Le principali caratteristiche della VR sono l'immersione e l'interazione. L'immersione esprime la sensazione di essere presenti nell'ambiente virtuale; l'interazione è la possibilità di modificarlo e di agire su di esso, con o senza un operatore esterno. [41]
Gli stimoli sensoriali derivano interamente da feedback generati dal computer; sono quindi privi di un corrispettivo nel mondo fisico e sono soltanto il prodotto di un'elaborazione computazionale.

La VR si distingue dall'AR per tre sistemi fondamentali: il generatore di scene, il dispositivo di visualizzazione e il sistema di tracciamento e rilevamento. Poiché il display e il generatore di scene vengono impiegati per simulare il mondo reale, la risoluzione del monitor diventa determinante per l'interazione in tempo reale con l'ambiente virtuale. L'utente può inoltre interagire con la scena attraverso un joystick o sistemi aptici con ritorno di forza. [33]

In odontoiatria i sistemi VR vengono impiegati soprattutto in ambito di formazione universitaria e post-laurea nella simulazione di procedure cliniche complesse e nella pianificazione del trattamento. [40] [8] Le tre caratteristiche comuni ai sistemi VR sono quelle già descritte: l'immersione, la percezione di essere presenti in un ambiente e l'interazione con tale ambiente. [42] La VR si basa su monitor 3D stereoscopici, sul rilevamento dei movimenti di mano e corpo e sul suono binaurale.

I requisiti generali dei sistemi AR valgono anche per i sistemi VR, quindi per funzionare necessitano di: generatore di scene, dispositivo di visualizzazione e tracciamento. [36]
Per quanto riguarda il generatore di scene, se il rendering non è oggi una criticità per l'AR, i sistemi VR devono generare immagini realistiche sostituendo integralmente il mondo reale con l'ambiente virtuale necessitando quindi di requisiti tecnici e computazionali molto più elevati. In AR le immagini virtuali si limitano a integrare la scena reale, quindi gli oggetti da disegnare sono meno numerosi e non sempre devono risultare realistici.
Anche i dispositivi di visualizzazione impiegati in AR hanno requisiti meno rigorosi rispetto alla VR tanto che in certe applicazioni AR è sufficiente un display

monocromatico, mentre in VR si usano quasi sempre display a colori. Gli HMD optical see-through con un campo visivo ridotto possono risultare comunque soddisfacenti, perché l'utente mantiene la visione periferica del mondo reale. Allo stesso modo la risoluzione del monitor può essere inferiore a quella tollerata in VR, perché l'optical see-through non degrada la resa dell'ambiente reale.
Per il tracciamento e il rilevamento il rapporto si inverte. Qui i requisiti più severi sono quelli dell'AR, perché gli oggetti reali e virtuali devono risultare correttamente allineati tra loro; in caso contrario l'illusione della coesistenza dei due mondi viene compromessa.

I dispositivi impiegati negli ambienti virtuali vengono distinti in dispositivi di input e dispositivi di output. [43]
I dispositivi di input consentono all'utente di comunicare con l'ambiente virtuale. Tastiera, mouse, trackball e joystick sono le periferiche desktop più semplici da usare e permettono di impartire comandi o di generare movimenti continui nella scena. Esistono poi i dispositivi di tracciamento come guanti che registrano i movimenti della mano, le posture, i gesti e i movimenti delle dita, mentre i tracker seguono gli spostamenti dell'utente nel mondo fisico e li traducono nell'ambiente virtuale.

I dispositivi di output consentono all'utente di vedere, udire, odorare o toccare ciò che accade nell'ambiente virtuale.
I dispositivi visivi coprono un'ampia gamma, dal monitor di un computer, il più semplice e il meno immersivo, fino alle soluzioni immersive come i visori HMD e i sistemi CAVE. Le periferiche uditive e tattili stimolano gli altri sensi e rendono l'esperienza più simile alla realtà; le periferiche tattili, ad esempio, possono restituire la sensazione di contatto e imprimere all'utente feedback di forza. [42]

Classificazione dei sistemi VR

Il grado di immersione dipende da quanti sensi vengono coinvolti, da quanto l'utente può interagire e da quanto gli stimoli usati per simulare l'ambiente somigliano a quelli reali; questa caratteristica dipende dalle proprietà del sistema tecnologico con cui l'utente viene isolato dal mondo fisico. [44]

Il grado di immersione dipende dalla tipologia di sistema VR messa a disposizione dell'utente. I sistemi non immersivi sono la tipologia più semplice ed economica e riproducono le immagini del mondo su comuni postazioni desktop. Nei sistemi immersivi, al contrario, la simulazione coinvolge l'utente in modo completo, perché la vista viene affiancata da più canali sensoriali in uscita. I sistemi semi-immersivi sono intermedi tra i due precedenti; la scena tridimensionale viene mostrata su monitor e la prospettiva si aggiorna seguendo i movimenti della testa di chi osserva. [42]

I sistemi altamente immersivi restituiscono un'esperienza più vicina alla realtà, dando l'illusione che non vi siano processi computazionali in atto e quindi che l'utente percepisca di "vivere" all'interno dell'ambiente virtuale. Sono stati inoltre progettati HMD dotati di elementi ottici che coprono la visione periferica, così da accrescere il grado di immersione e interazione. [1] Questa categoria, rispetto alle altre due, può aggiungere diversi output sensoriali, aumentando il grado di percezione della realtà. [42]

L'esperienza VR dell'utente può essere valutata misurando la presenza, il realismo e i livelli di realtà. La presenza è una sensazione psicologica complessa; in VR include la sensazione e la percezione della presenza fisica, oltre alla possibilità di interagire e reagire come se l'utente si trovasse nel mondo reale. Il livello di realismo misura invece quanto gli stimoli e l'esperienza rispondono a ciò che l'utente si aspetta: quanto più gli stimoli si avvicinano al mondo reale, tanto più l'aspettativa viene soddisfatta e l'esperienza VR risulta efficace. Allo stesso modo, quanto più l'interazione con gli stimoli virtuali è realistica, tanto più realistici sono i comportamenti dell'utente verso l'ambiente virtuale. [45] [46]

1.5 Realtà Mista

La Realtà Mista (dall'inglese Mixed Reality, MR) è un'integrazione di contenuti digitali in 3D all'interno di un ambiente reale. Gli oggetti virtuali sono ancorati al mondo reale e possono interagire con esso venendo spostati, ancorati, manipolati; le azioni compiute sugli oggetti virtuali producono effetti coerenti con il mondo reale. Si distingue perciò da AR e VR proprio perché non c'è una semplice sovrapposizione dell'informazione digitale o l'immersione completa in un ambiente virtuale, ma una più profonda integrazione tra reale e virtuale *(Figura 6)*. [47] [48] [38]

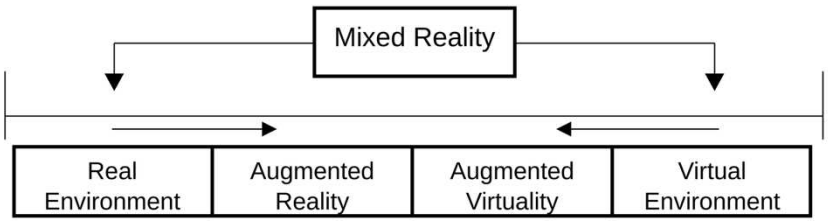


Figura 6 – Realtà mista: il continuum di Milgram tra ambiente reale e ambiente virtuale.

La MR ha un tipo di immersività ibrida: l'utente continua a percepire il mondo reale, ma la scena viene arricchita da oggetti virtuali, che restituiscono la sensazione di presenza fisica dell'oggetto 3D.
Gli utenti possono infatti osservare, afferrare, riposizionare e utilizzare oggetti 3D; questi oggetti rispondono al contatto simulato attraverso input derivanti dai movimenti delle mani, dalla voce e dallo sguardo.
L'utente è anche in grado di muoversi nell'ambiente in qualsiasi direzione mantenendo gli oggetti 3D fissi nel punto spaziale scelto. [49]
Questa proprietà viene definita consapevolezza dell'ambiente. Non sono soltanto gli oggetti virtuali ad avere effetti sulla scena reale: anche gli oggetti reali possono modificare gli elementi virtuali. Ad esempio nella MR l'utente non riesce a vedere uno strumento virtuale collocato dentro un cassetto se non aprendolo, mentre nell'AR lo strumento viene semplicemente sovrapposto e l'apertura del cassetto non è necessaria. [33]
In ambito odontoiatrico e chirurgico i sistemi MR vengono impiegati per visualizzare strutture anatomiche complesse, guidare la navigazione intraoperatoria e formare gli studenti. [7] [49]

I sistemi MR nascono come evoluzione degli HMD optical see-through. La visione diretta del mondo reale attraverso i combinatori ottici non viene più arricchita da semplici elementi sovrapposti, ma da elementi tridimensionali ancorati stabilmente allo spazio fisico. Il primo dispositivo di questo tipo è stato Microsoft HoloLens che ha permesso ai chirurghi nella fase preoperatoria di visualizzare modelli anatomici sovrapposti al paziente avendo le mani libere. [22]
Nei sistemi ottici MR anche la posizione del POV dell'operatore rispetto al costrutto 3D influenza l'accuratezza della registrazione e del puntamento. [23]

Display e visualizzazione

La MR condivide in gran parte l'architettura degli HMD optical see-through: combinatori ottici semitrasparenti per la visualizzazione degli elementi digitali e tracciamento ottico markerless per la registrazione spaziale. La tecnologia per la MR si distingue quindi per il livello di integrazione tra contenuto digitale e ambiente fisico, non per l'hardware di visualizzazione.
Per confrontare gli HMD in ambito clinico sono stati proposti criteri specifici: la leggibilità del testo, la percezione del contrasto, il carico di lavoro dell'operatore, il frame rate e la latenza del sistema. Il confronto tra i dispositivi optical see-through disponibili in commercio ha attribuito a Microsoft HoloLens le migliori prestazioni complessive. [50]

Tracciamento e interazione

La mappatura spaziale continua dell'ambiente, ottenuta tramite camere di profondità e sensori inerziali integrati nel visore, consente un tracciamento di tipo inside-out, che non richiede riferimenti né sensori esterni. Qui sta la differenza rispetto ai sistemi AR di prima generazione, che dipendono da rilevatori o marcatori fisici.
Nei sistemi MR gli oggetti virtuali non vengono semplicemente sovrapposti alla scena reale, ma integrati in essa, con le proprietà di manipolazione tramite mani, voce, sguardo e ancoraggio spaziale. [47] [48]

Classificazione dei sistemi MR

Microsoft HoloLens 2 è attualmente il dispositivo di riferimento per la MR in ambito sanitario; l'analisi del sistema per la navigazione chirurgica marker-based ha evidenziato un'accuratezza quasi paragonabile a quella delle piattaforme tradizionali, con ampi margini di miglioramento. [24] Accuratezza e affidabilità non bastano però a sostituire le tecniche di guida convenzionali nelle procedure che le richiedono. [51]
Di pari passo all'approccio optical see-through, nel 2023 il Meta Quest 3 ha introdotto il pass-through RGB ad alta fedeltà, realizzando la MR per via video see-through, con un miglioramento della qualità visiva. Le revisioni sistematiche più recenti sull'uso della MR in sala operatoria riportano benefici nella visualizzazione anatomica, nella comunicazione tra operatori e nella riduzione dei tempi procedurali. [49]
Lo sviluppo dei prossimi dispositivi riguarda la latenza, il peso e l'autonomia. Senza questi miglioramenti l'uso prolungato dei visori MR resta lontano dalla visione naturale. [51]

1.6 Realtà Estesa

Nella letteratura compare anche il termine Realtà Estesa (dall'inglese Extended Reality, XR). Non indica una tecnologia distinta da quelle descritte nei paragrafi precedenti ma raccoglie sotto un'unica etichetta AR, VR e MR venendo utilizzata quando la distinzione tra le tre non è rilevante oppure quando una stessa applicazione funziona su più modalità. Serrano et al. hanno esaminato 141 articoli pubblicati tra il 2004 e il 2024 e li hanno classificati in AR, MR, VR, Virtualità Aumentata e Simulazione Computerizzata, individuando come caratteristiche ricorrenti la visione stereoscopica, l'immersione, l'interazione, la modifica dei modelli digitali e il feedback aptico. Gli autori segnalano però che le definizioni adottate nei singoli lavori non concordano tra loro e che la VR viene spesso impiegata come termine generico al posto di XR *(Figura 7).* [52]

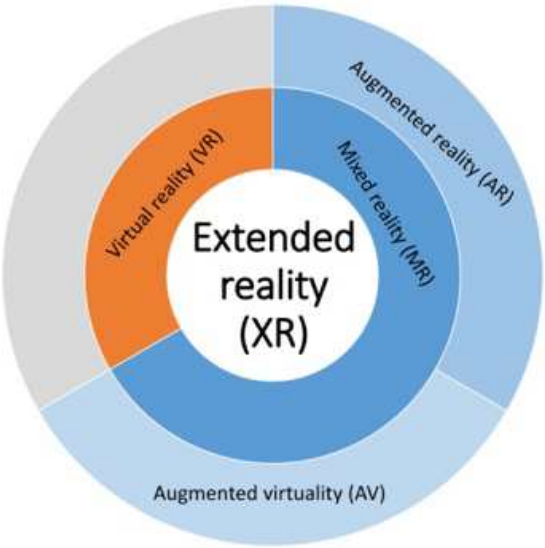


Figura 7 – La realtà estesa (XR) come insieme che comprende la realtà virtuale (VR) e la realtà mista (MR); all'interno della realtà mista si collocano la realtà aumentata (AR) e la virtualità aumentata (AV).

Nella letteratura medica il continuum di Milgram è stato rivisto da Egger et al., che evidenziano una discrepanza: lo schema originario descrive l'aggiunta di elementi virtuali alla scena, ma non la loro rimozione. Gli autori propongono quindi di rendere esplicita la diminuzione e distinguono la Realtà Diminuita, in cui oggetti o persone reali vengono cancellati dalla scena percepita, dalla Virtualità Diminuita, in cui l'eliminazione riguarda elementi dell'ambiente virtuale *(Figura 8).* [53]

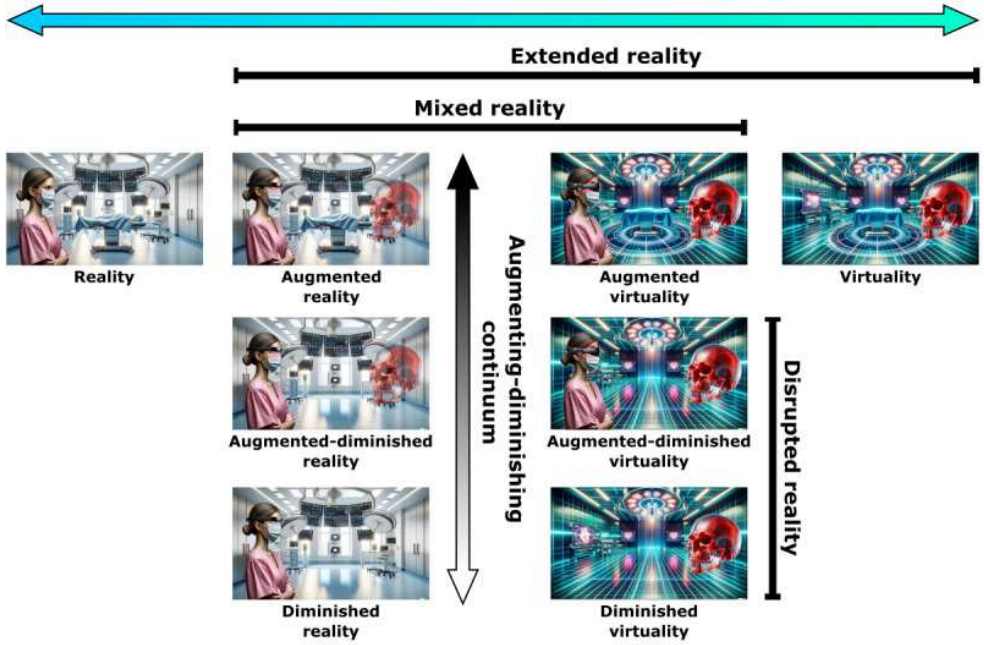


Figura 8 – Il continuum della realtà estesa secondo Egger et al.: all'asse che porta dalla realtà alla virtualità si aggiunge l'asse di aumento e diminuzione, dal quale derivano la realtà diminuita e la virtualità diminuita.

2 Applicazioni odontoiatriche di AR, VR, MR

I sistemi di AR, VR e MR hanno trovato in odontoiatria numerose implementazioni, molte delle quali non richiedono un visore indossabile e vengono utilizzate attraverso schermi, tablet e smartphone; il visore HMD, a differenza di questi, immerge l'utente nella scena oppure sovrappone i contenuti virtuali direttamente al suo campo visivo e lascia libere le mani. Viene impiegato nella formazione, nella navigazione chirurgica e nel trattamento dell'ansia e del dolore.

2.1 Educazione e simulazione clinica

Nella formazione odontoiatrica la VR e la AR vengono utilizzate anche senza visore, mostrando l'immagine su uno schermo. Il tatto viene riprodotto da un dispositivo a ritorno di forza (haptic feedback device), che l'operatore impugna come se fosse un manipolo.

Vengono così riprodotte procedure quali la preparazione delle cavità, la rimozione della carie e la realizzazione di corone. Tra i sistemi più diffusi, il Moog Simodont Dental Trainer utilizza uno schermo tridimensionale e un dispositivo tattile *(Figura 9)*, mentre il CDS-100 affianca alla visualizzazione un tracciamento ottico che fornisce un feedback in tempo reale sull'angolazione e sulla profondità della preparazione. Altri simulatori, come IDEA, PerioSim e Voxel-Man, adottano la stessa combinazione di schermo e manipolo aptico. Lo studente può esercitarsi in autonomia e il sistema valuta il lavoro svolto.



Figura 9 – Simulazione virtuale con Moog Simodont Dental Trainer.

I sistemi di simulazione impiegano in modo diverso AR, VR e MR *(Figura 10)*. Il confronto tra i singoli simulatori riguarda invece altri parametri: il tipo di dente riprodotto, la possibilità di operare su entrambi i lati, il realismo della sensazione tattile riferita dagli utilizzatori, il rispetto delle posture ergonomiche, il trasferimento diretto dei dati al programma di tutoraggio, il feedback istantaneo e la simulazione dell'esame.

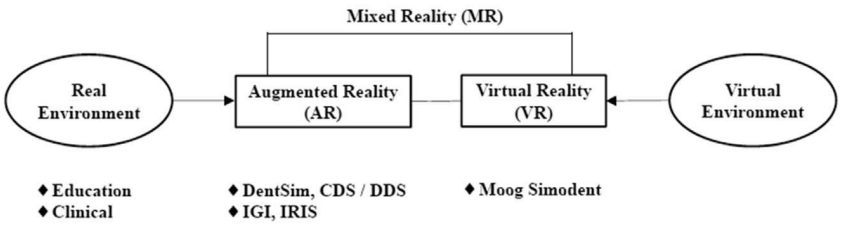


Figura 10 – Impiego di AR, VR, MR nei diversi sistemi di simulazione.

Nel PerioSim la sensazione tattile risulta fedele sui denti ma non sulla gengiva, mentre nel Simodont le immagini tridimensionali sono convincenti, sebbene la texture del tessuto dentale sano, cariato e restaurato debba essere ancora migliorata. DentSim, Simodont e CDS consentono inoltre di mantenere una postura corretta e di registrare le procedure, che possono così essere riviste e corrette *(Figure 11 e 12)*.

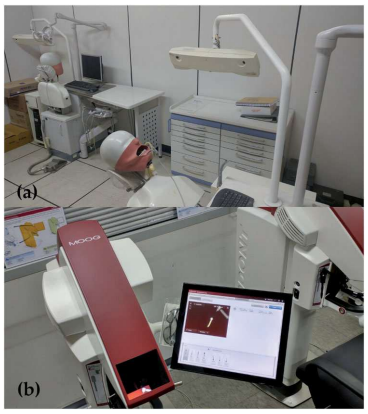


Figura 11 – Unità di simulazione basate sulla VR: a) DentSim; b) MOOG Simodont.

Durante la pandemia di COVID-19 molti studenti non hanno potuto svolgere l'attività pre-clinica in sede e sono rimasti privi del supporto diretto del tutor. Con i simulatori tradizionali la percezione tattile è difficile da descrivere a parole, mentre il feedback diretto e i sensori di pressione dei sistemi virtuali e misti permettono di superare questo limite. Eve et al. hanno confrontato la prestazione nella rimozione della carie su un simulatore aptico in VR, tra studenti e specializzandi in protesi; l'efficienza, definita come percentuale di lesione cariosa rimossa in rapporto al tempo di fresaggio, è migliorata in modo significativo in entrambi i gruppi nel corso dell'esperimento. [135] Parallelamente De Boer et al. hanno rilevato un effetto positivo significativo della VR sul

rendimento dello studente e un maggiore apprezzamento dell'ambiente tridimensionale rispetto a quello bidimensionale. [134]



Figura 12 – Unità di lavoro DentSim.

Anche i simulatori preclinici più completi, come il sistema DentSim, integrano un visore, sensori e telecamere a infrarossi per tracciare gli strumenti durante l'esercitazione. [54] [55]
Rispetto alla configurazione monitor-based il visore aggiunge la visione stereoscopica del modello digitale dei denti e dei manipoli virtuali, con ingresso e uscita di aria, acqua e diversi tipi di frese, restituendo un'esperienza preclinica più vicina alla posizione di lavoro reale.

Studio dell'anatomia

L'apprendimento dell'anatomia dentale risulta più efficace in un contesto in cui le strutture possono essere osservate da ogni angolazione. Le immagini bidimensionali dei libri di testo, invece, obbligano lo studente a ricostruirne mentalmente la tridimensionalità *(Figura 13)*. L'AR supera questo limite presentando modelli tridimensionali sui dispositivi che lo studente già possiede, come tablet e smartphone, senza bisogno di attrezzature dedicate. [56]

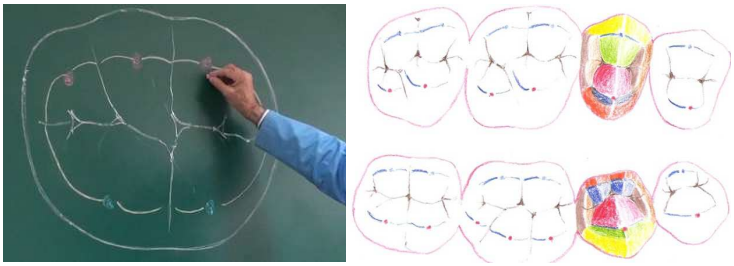


Figura 13 – Strumenti tradizionali per l'apprendimento della morfologia dentale: a destra - lavagna; a sinistra - immagine bidimensionale stampata.

Il sistema riconosce un'immagine di riferimento inquadrata dalla fotocamera e sovrappone ad essa il modello virtuale. Lo studente può ruotarlo, ingrandirlo e spostarlo muovendo il dispositivo o toccando lo schermo. Con questo principio vengono studiate la morfologia dei denti e l'anatomia delle diverse componenti dell'elemento

dentale *(Figure 14 e 15)*. Le singole componenti morfologiche possono inoltre essere isolate e visualizzate separatamente *(Figura 16)*. Lo stesso approccio viene applicato all'istologia orale: alcune applicazioni per smartphone trasformano i vetrini in schede dinamiche, sulle quali le annotazioni possono essere nascoste o rivelate per lo studio e l'autovalutazione. [57]

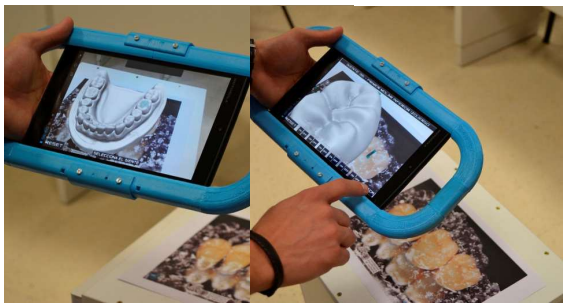


Figura 14 – a sinistra - Image Target e scena aumentata con il modello della mascella inferiore; a destra - Image Target e scena aumentata con il dente 3.6.



Figura 15 – Mandibola con le aree morfologiche selezionabili evidenziate in blu.

Diversi studi hanno confrontato l'apprendimento tramite AR con i metodi tradizionali; la conoscenza acquisita risulta equivalente, ma gli studenti si dimostrano più coinvolti e dedicano più tempo all'esplorazione del modello tridimensionale rispetto ai supporti bidimensionali.

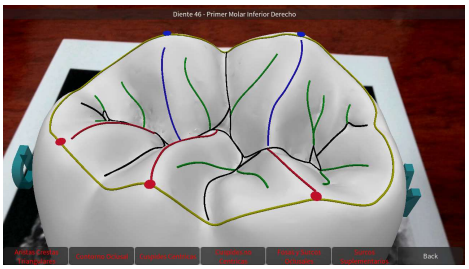


Figura 16 – Visualizzazione delle diverse componenti morfologiche dentali.

Come confermato da Küçük, gli studenti di odontoiatria dimostrano un interesse maggiore verso lo studio delle strutture anatomiche su modello tridimensionale. Reymus ha valutato l'impiego della VR nell'insegnamento dell'anatomia del canale radicolare e la considera uno strumento valido per l'addestramento *(Figura 17)*,
pur senza differenze statisticamente significative nell'apprendimento rispetto al metodo tradizionale. Un ulteriore vantaggio è economico: i modelli virtuali sono riutilizzabili, a differenza dei cadaveri e delle riproduzioni sintetiche in silicone o in resina, che restano il riferimento per lo studio dell'anatomia della testa e del collo. [33]
Nella formazione il visore permette allo studente di osservare e manipolare i modelli tridimensionali come se fossero oggetti reali. L'anatomia del canale radicolare si presta a questo approccio: i denti scansionati e digitalizzati tramite CBCT vengono importati in un ambiente VR, dove lo studente può ruotare attorno all'elemento, guardarne l'interno o sezionarlo.



Figura 17 – Studente che interagisce in VR con il primo molare mandibolare: in alto a sinistra - panoramica del dente; in alto a destra - veduta della camera pulpare; in basso a sinistra - sezione sul piano orizzontale lungo il decorso dei canali; in basso a destra - fusione dei canali mesiali.

Diegritz et al. hanno costruito su questo principio Tooth Anatomy Inspector, un'applicazione di anatomia in realtà estesa (XR, Extended Reality); gli studenti l'hanno accolta favorevolmente come metodo di studio complementare. [55]
Un vantaggio analogo è stato osservato nello studio della morfologia dentale. Dopo aver utilizzato per una settimana un'applicazione di VR con un visore mobile, gli studenti del primo anno hanno giudicato l'esperienza più intuitiva e più ricca di informazioni rispetto ai libri di testo tradizionali.

2.2 Chirurgia orale e maxillo-facciale

In chirurgia orale la AR viene impiegata soprattutto per il posizionamento degli impianti dentali: la pianificazione preoperatoria viene sovrapposta al sito operatorio, con una riduzione del rischio intraoperatorio e dei tempi dell'intervento.
L'impiego dell'AR nel posizionamento implantare inizia con un primo sistema capace di sovrapporre al paziente la posizione suggerita. L'AR agisce come filtro automatico dell'informazione selezionando i soli dati necessari e mantenendo quindi l'attenzione del clinico concentrata sul movimento operativo.
L'accuratezza di questi sistemi è stata misurata in diversi studi. Su modelli mandibolari edentuli la navigazione con AR ha mostrato precisione, applicabilità ed efficienza superiori rispetto a quella bidimensionale tradizionale, con tempi di intervento significativamente più brevi. [58] In vitro il posizionamento con navigazione dinamica in AR è risultato paragonabile alla chirurgia guidata statica e superiore alla tecnica a mano libera. [59]

Una revisione sistematica con meta-analisi ha rilevato che gli errori di posizionamento degli impianti guidati con AR rientrano nella zona di sicurezza e risultano paragonabili a quelli della chirurgia guidata statica. [60] Parallelamente sono stati sviluppati sistemi che portano la navigazione in AR sullo smartphone per ridurre i costi e la complessità tecnologica che ne hanno finora limitato la diffusione. [61]

Le stesse informazioni possono essere portate nel campo visivo dell'operatore attraverso un visore. Una serie di casi di chirurgia cranio-maxillo-facciale è stata condotta utilizzando esclusivamente un visore a MR Microsoft HoloLens 2, sul quale veniva caricato il piano chirurgico virtuale ricostruito dalle immagini di tomografia e risonanza. Il dispositivo ha restituito in tempo reale la visualizzazione tridimensionale del piano e l'identificazione delle strutture critiche. Lo stesso dispositivo è stato valutato per il posizionamento degli impianti zigomatici su cadavere, dove la navigazione in AR ha mostrato un'accuratezza accettabile come alternativa alle guide chirurgiche convenzionali. [62] [63]

Pianificazione preoperatoria

Le tecnologie senza visore trovano impiego anche nella chirurgia maxillo-facciale a partire dalla pianificazione preoperatoria. Il sistema di Olsson combina la visualizzazione stereoscopica su schermo con un dispositivo aptico a sei gradi di libertà: il chirurgo osserva il modello tridimensionale ricavato dalla TC del paziente e riposiziona i frammenti ossei, percependo il contatto tra le superfici *(Figure 18 e 19)*. Dopo un addestramento di quarantacinque minuti un chirurgo che non aveva mai impiegato questa tecnologia ha ricostruito virtualmente una frattura mandibolare pluriframmentaria in ventidue minuti. [64]

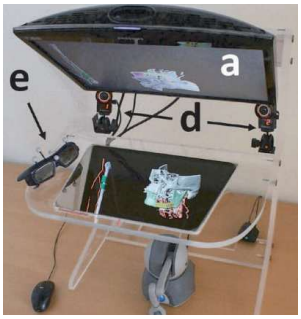


Figura 18 – Sistema immersivo di Olsson: la visualizzazione stereoscopica su specchio semitrasparente è associata a un dispositivo aptico a sei gradi di libertà, con il quale il chirurgo riposiziona i frammenti ossei.

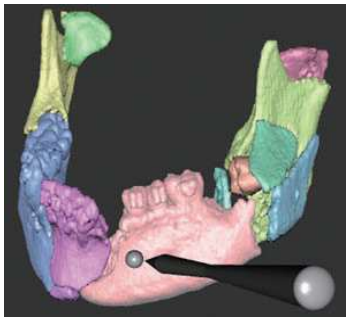


Figura 19 – A ciascun frammento osseo viene assegnato un colore univoco; avvicinando il cursore aptico il frammento viene evidenziato e può quindi essere afferrato e manipolato con la maniglia a sei gradi di libertà.

Il vantaggio principale dell'AR in chirurgia ortognatica è la sovrapposizione delle immagini del piano virtuale alla visione reale permettendo alla pianificazione preoperatoria e alle informazioni anatomiche di arrivare sul flusso video in tempo reale. Su questo principio si basano i sistemi per la simulazione della riduzione dell'angolo mandibolare e della chirurgia ricostruttiva della mandibola. Viene inoltre simulata una mandibulectomia con trapianto di perone nel sito mandibolare, con verifica dei vasi sanguigni e delle isole cutanee *(Figura 20)*. Anche la VR è stata applicata alla chirurgia ortognatica, per l'addestramento a diverse procedure; i sistemi riproducono il taglio dell'osso, la fresatura e il posizionamento dei mezzi di fissazione con ritorno di forza aptico, mentre in altre piattaforme l'interazione con la scena virtuale avviene attraverso un controller con tracking impugnato dall'operatore.

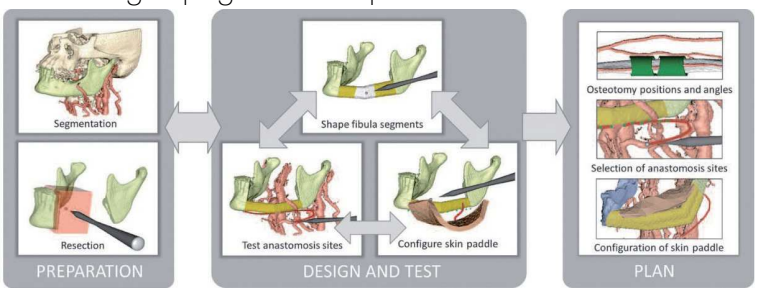


Figura 20 – Ricostruzione dell'osso segmentato e dei vasi a partire dai dati angiografici e tomografici, con resezione ossea per la preparazione del sito ricevente; definizione di posizione, orientamento e angolazione dei segmenti di perone con pianificazione dell'intervento.

Navigazione intraoperatoria

In sala operatoria le informazioni possono essere portate sul campo anche attraverso schermi trasparenti come il sistema X-Scope. Il chirurgo lo impugna e vede le strutture anatomiche reali in sovrapposizione alle ricostruzioni della TC o della risonanza magnetica *(Figure 21 e 22)*. In uno studio di fattibilità lo strumento è stato utilizzato per controllare il riposizionamento del mascellare dopo osteotomia di Le Fort I in cinque pazienti con un'accuratezza di circa un millimetro. [65]



Figura 21 – Schermo trasparente X-Scope.



Figura 22 – Impostazione intraoperatoria del sistema AR: il chirurgo impugna lo schermo sterile X-Scope e la posizione reale del mascellare può essere controllata rispetto a quella del mascellare virtuale sovrapposto.

Una nuova implementazione elimina del tutto lo schermo separato e proietta le rappresentazioni tridimensionali delle strutture ossee e dei tessuti molli direttamente sul corpo del paziente. Il chirurgo dispone così dell'informazione di profondità sulle strutture a rischio all'interno dell'osso *(Figura 23)*. In interventi come la perforazione ossea e il posizionamento delle viti il sistema ha mostrato un errore di posizione complessivo inferiore al millimetro. [66]

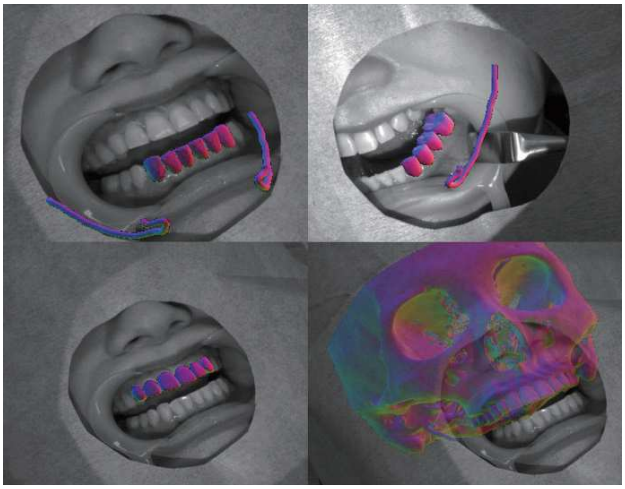


Figura 23 – In alto esiti della registrazione dell'immagine ottenuta con i modelli degli incisivi inferiori e dei molari inferiori sinistri, con i canali nervosi sovrapposti per la visualizzazione chirurgica in basso esito della registrazione ottenuta con il modello degli incisivi superiori, con fusione del modello maxillo-facciale aumentato e del flusso video della telecamera.

Nella chirurgia maxillo-facciale il visore porta il piano operatorio direttamente sopra il paziente senza ricorrere a un monitor separato. Un sistema indossabile, stereoscopico e video see-through, privo di localizzatore esterno, è stato validato come ausilio al riposizionamento mascellare, mostrando la fattibilità dell'approccio nella chirurgia ossea *(Figure 24 e 25)*. [67] In parallelo è stata sviluppata una navigazione chirurgica basata su visore ottico see-through, che presenta le informazioni virtuali nel campo dell'operatore. [68]

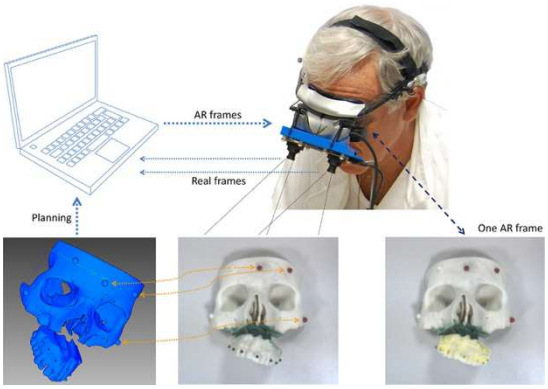


Figura 24 – Sistema di navigazione in AR di Badiali: visore stereoscopico video see-through indossato dall'operatore.

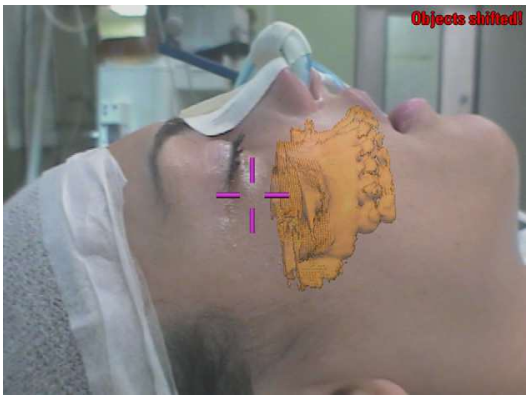


Figura 25 – Veduta del chirurgo sul segmento mascellare nella rappresentazione in AR.

Nella chirurgia ortognatica la sovrapposizione dipende anche dall'accuratezza del tracciamento. Diversi sistemi di navigazione in AR sono stati confrontati durante il riposizionamento mascellare dopo osteotomia di Le Fort I, per rilevare con precisione la posizione ossea. [69]
Il tracciamento può avvenire anche senza marcatori artificiali, sovrapponendo il modello dei denti del paziente al video intraoperatorio ripreso da una videocamera 4K indossata dal chirurgo *(Figura 26)*. I modelli ricavati dalla TC vengono così proiettati sulle immagini in tempo reale con un errore di tracking di circa un millimetro. [70]



Figura 26 – a) Chirurgo che indossa la videocamera 4K; b) tracciamento dei denti; c) visione video in AR convalidata su dati clinici, con il modello dell'arteria carotide del paziente sovrapposto.

2.3 Ortodonzia

L'AR viene applicata anche in ortodonzia, in particolare per il posizionamento dei bracket. Le applicazioni per smartphone e tablet sovrappongono alla corona clinica la posizione pianificata digitalmente così che l'operatore veda in tempo reale il punto di incollaggio corretto senza bisogno di imaging radiologico tridimensionale o di guide fisiche di trasferimento. [71]
I sistemi di navigazione AR migliorano l'accuratezza del gesto clinico: l'errore di collocazione scende entro il limite clinicamente accettabile di circa 0,5 millimetri, anche in mano agli operatori meno esperti. Risultati analoghi si osservano per l'inserimento delle miniviti ortodontiche. Queste metodiche hanno però ancora costi elevati, una scarsa integrazione tra i software, e richiedono una formazione dedicata. [72]
La letteratura raccolta non riporta applicazioni ortodontiche che impieghino un visore HMD; i sistemi descritti restano quelli su schermo e su dispositivo mobile.

2.4 Terapia della fobia dentale e controllo del dolore

La fobia dentale è una delle condizioni fobiche più diffuse e ostacola una corretta cura del paziente facendo nascere l'interesse per strategie non invasive che possano ridurla. [46]

Il 50-60% dei pazienti presenta una paura o ansia specifica per le procedure odontoiatriche e per gli stimoli collegati. Chi soffre di odontofobia tende a rivolgersi al dentista quando la situazione clinica è già compromessa, e questo rende l'odontofobia uno degli aspetti più difficili della gestione clinica. Tra le tecniche più efficaci ci sono la terapia IVET (In Vivo Exposure Therapy), usata per le paure legate all'odontoiatria, la terapia ARET e la VRET. [33]

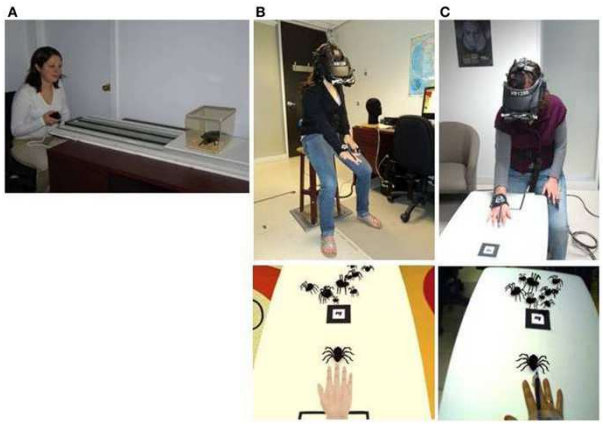


Figura 27 – Tre modalità terapeutiche basate sull'esposizione: a) esposizione in vivo; b) esposizione in VR, con la veduta dell'utente nell'immagine in basso; c) esposizione in AR, con la veduta dell'utente nell'immagine in basso.

La terapia ARET (Augmented Reality Exposure Therapy) inserisce lo stimolo virtuale temuto nell'ambiente reale senza sottrarre il paziente al mondo che lo circonda *(Figura 27)*. Gli elementi virtuali da progettare sono pochi, quindi il costo di produzione è più basso che in VR. Il soggetto vede inoltre il proprio corpo interagire con essi. L'approccio è stato verificato in ambito psichiatrico con uno studio controllato randomizzato sulla fobia dei ragni: la ARET ha ridotto la paura in modo paragonabile all'esposizione diretta reale. [73]

I metodi educativi e motivazionali intervengono sulle abitudini igieniche, soprattutto nei bambini, in cui la coordinazione motoria è ancora in via di sviluppo. Con questo obiettivo è stato proposto un gioco basato sulla AR pensato per migliorare l'efficacia dello spazzolamento nei bambini dai sei ai dieci anni. I movimenti del giocatore vengono riconosciuti dal sensore Kinect e interpretati come comandi del gioco *(Figure 28 e 29)*. [74]

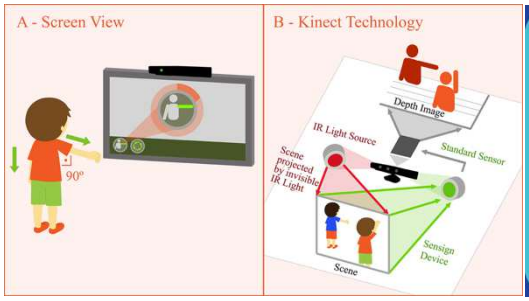


Figura 28 – Struttura dell'interfaccia di gioco.

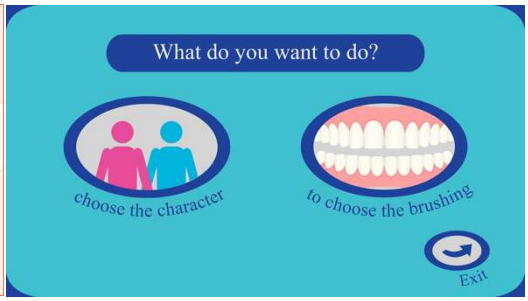


Figura 29 – Schermata iniziale del gioco.

Il bambino sceglie la tecnica di spazzolamento e la esegue davanti allo schermo. Se l'esecuzione è errata il sistema mostra una risposta visiva con l'indicazione della zona non spazzolata e la direzione corretta del movimento *(Figure 30 e 31)*. L'apprendimento dell'igiene orale diventa così più coinvolgente e accessibile grazie all'interfaccia ludica.

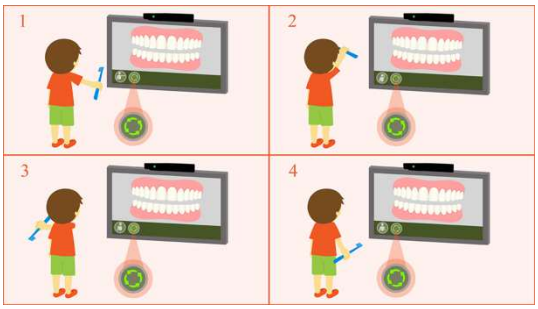


Figura 30 – Rilevamento del movimento di spazzolamento eseguito dal giocatore.

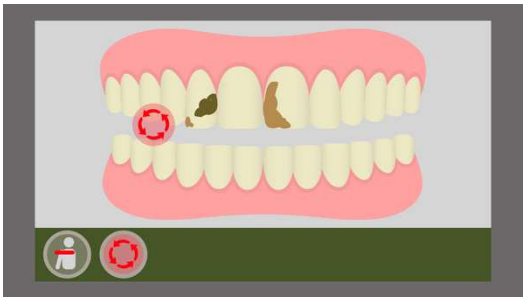


Figura 31 – Il gioco mostra i residui rimasti a seguito di un errore nella tecnica di spazzolamento eseguita.

L'educazione all'igiene orale migliora l'atteggiamento e le abitudini del paziente, perché fornisce dispositivi e tecniche utili al controllo della placca, con un effetto positivo sulla salute gengivale e sulla comparsa della carie. La AR e la VR vengono impiegate sia nei soggetti giovani sia in quelli anziani, attraverso giochi e interfacce dedicate. I pochi studi che ne hanno valutato l'impiego in questo ambito lo descrivono come uno strumento di apprendimento coinvolgente che i pazienti hanno percepito come utile alla comprensione del proprio stato di salute. [33]

La VR immersiva necessita di un visore per isolare il paziente dall'ambiente reale e sostituirlo con uno scenario generato al computer. Su questo principio si basa la terapia d'esposizione VRET (Virtual Reality Exposure Therapy). Il paziente indossa un visore Oculus e viene esposto in modo graduale agli stimoli dentali temuti mentre ne vengono registrati i parametri fisiologici come la frequenza cardiaca. [75]
Uno studio di fattibilità controllato ha confrontato la VRET con un opuscolo informativo in pazienti con fobia dentale valutando la sicurezza e l'efficacia del trattamento nella riduzione dell'ansia. I risultati hanno avvalorato l'impiego della VRET come possibile alternativa non invasiva nel contesto dello studio dentistico. [76]
Nella VRET lo stimolo temuto viene affrontato nella sua rappresentazione virtuale, con un controllo maggiore sull'intensità dell'esposizione. L'efficacia dipende dalla sensazione di essere presenti nell'ambiente virtuale.

Distrazione e controllo del dolore

Il visore viene impiegato anche per il controllo del dolore attraverso la distrazione. Hoffman et al. hanno sottoposto due pazienti con parodontite a scaling e levigatura radicolare in tre condizioni, cioè senza distrazione, guardando un film e in VR immersiva, ed entrambi hanno riferito una netta riduzione della consapevolezza del dolore durante l'uso di VR *(Figura 32)*. [77] Studi successivi hanno confermato l'applicabilità clinica della distrazione immersiva nelle stesse procedure. [78]

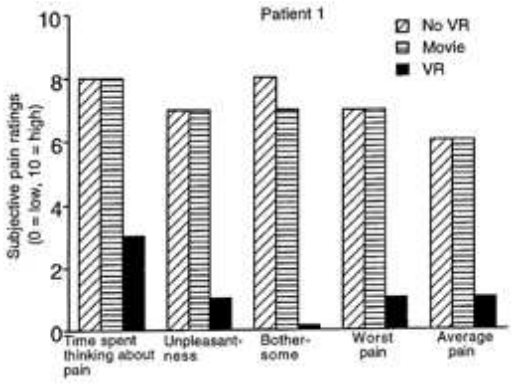


Figura 32 – Giudizi soggettivi sulla percezione del dolore nei pazienti 1 e 2 nelle tre condizioni: visione del film, immersione in VR e assenza di distrazione (Hoffman, 2001).

Rilassamento guidato

Un altro impiego del visore è il rilassamento guidato. Al paziente vengono proposti ambienti virtuali che coinvolgono più sensi contemporaneamente, come paesaggi naturali accompagnati dai suoni *(Figura 33)*.

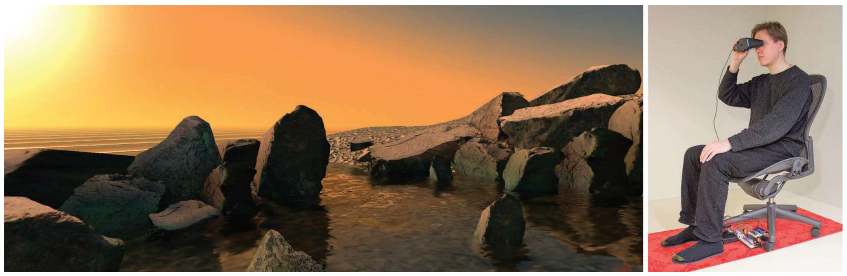


Figura 33 – L'ambiente virtuale che coinvolge più sensi contemporaneamente: a) rendering dal punto di vista del paziente; b) dispositivo vibrotattile personalizzato posto sotto i piedi del paziente, che riproduce la sensazione dello scorrere dell'acqua. Il paziente impara così a dirigere l'attenzione verso uno dei cinque sensi, seguendo gli stimoli presenti nell'ambiente virtuale.

Un video immersivo a 360 gradi di un paesaggio tranquillo della durata di pochi minuti ha ridotto l'ansia preoperatoria dei pazienti in sala d'attesa *(Figura 34)*.

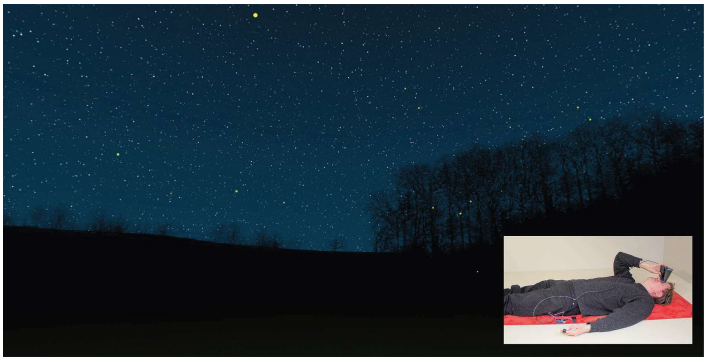


Figura 34 – L'ambiente virtuale di riposo guidato per il paziente in posizione supina.

Il beneficio è stato confermato anche in età pediatrica: in uno studio controllato randomizzato su 154 bambini la distrazione immersiva ha ridotto in modo significativo la percezione del dolore durante le procedure e ha raddoppiato il livello di rilassamento. [79] [80]
L'efficacia della distrazione e del rilassamento dipende da quanto il paziente si sente immerso nell'ambiente virtuale; per questo motivo alla stimolazione visiva viene affiancata quella sonora. Si preferisce riprodurre il suono in formato binaurale, che restituisce un ascolto immersivo con semplici cuffie e senza hardware complesso. L'utente percepisce così i suoni degli oggetti in base alla loro posizione nello spazio virtuale. Hendrix et al. hanno confermato che il suono tridimensionale accresce il senso di immersione e che una sonorizzazione adeguata favorisce uno stato di calma.

2.5 Comunicazione tra paziente e operatore

Una volta formulata la diagnosi il paziente deve essere informato sulle possibilità di trattamento; molti pazienti però non hanno le conoscenze necessarie per comprendere le condizioni del proprio cavo orale e questo rende difficile la comunicazione. L'AR e la VR sono tra le tecnologie che possono migliorare questo scambio; il paziente vede in anticipo l'esito della terapia.
Tra gli strumenti tradizionalmente impiegati rientrano la ceratura diagnostica e quella virtuale, che consentono di visualizzare il possibile trattamento protesico. La previsione dell'esito terapeutico offre vantaggi nella comunicazione, nella progettazione e nella gestione economica del caso. La rappresentazione visiva del risultato semplifica inoltre la trasmissione dei dati al laboratorio odontotecnico. [33]

Digital Smile Design

Il Digital Smile Design (DSD) è uno strumento che consente la pianificazione estetica a partire dall'analisi del volto. Fotografie del viso e delle arcate vengono usate per tracciare linee e forme di riferimento, con cui valutare il piano orizzontale, la linea mediana, la forma dei denti e il colore *(Figure 35-40)*. In questo modo la comunicazione tra specialisti migliora e la prevedibilità del trattamento aumenta. [81] Il paziente, posto davanti all'anteprima del risultato finale, si dimostra inoltre più propenso ad accettare il piano di cura. [82]

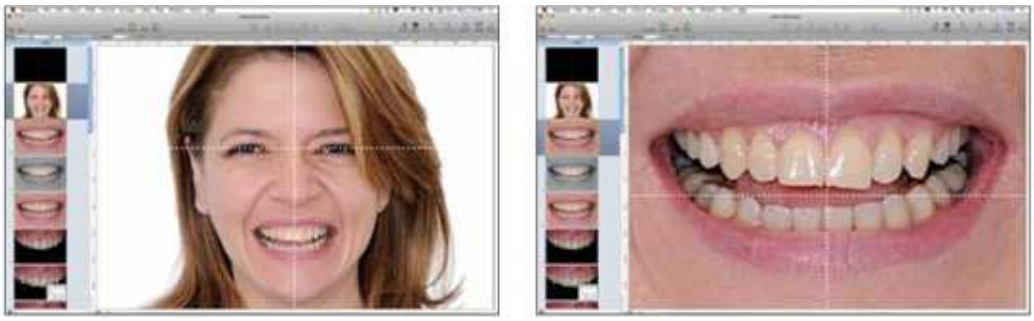


Figura 35 – a) La fotografia del volto con sorriso ampio e denti divaricati viene posta dietro la croce di riferimento, per determinare il piano orizzontale ideale e la linea mediana verticale (arco facciale digitale); b) trasferimento della croce dalla veduta del volto a quella del sorriso, per valutare la relazione tra le linee del viso e labbra, denti e gengiva.



Figura 36 – Simulazione dentale di base, eseguita ritagliando le immagini dei denti e sovrapponendole alla fotografia del sorriso, con correzione dei livelli gengivali e della lunghezza e inclinazione degli elementi anteriori.



Figura 37 – a) Tracciamento delle linee di riferimento che consentono il trasferimento della croce facciale alla fotografia intraorale; b) fotografia intraorale adattata alle tre linee di riferimento.



Figura 38 – a) Un rettangolo con lunghezza e larghezza rapportate secondo le proporzioni indicate in letteratura (80%) viene posto sull'incisivo centrale, per confrontare le misure dell'elemento con quelle ideali; b) disegno del contorno del futuro elemento tramite le guide costituite dalla croce e dalle proporzioni del rettangolo.

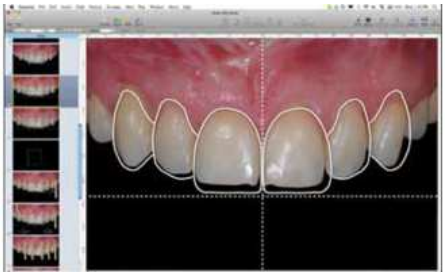


Figura 39 – Contorno finale del futuro sorriso, che mostra la differenza tra la situazione preoperatoria e la condizione ideale finale.

Le informazioni raccolte con il DSD vengono poi trasferite alla ceratura diagnostica e alla fase di prova tramite un mock-up *(Figura 40)*. Il protocollo consente confronti tra le fotografie precedenti e successive al trattamento e viene utilizzato anche come strumento educativo e di valutazione. L'approccio si è successivamente evoluto verso simulazioni tridimensionali basate sull'analisi in articolatore virtuale, che aggiungono alla progettazione estetica i dati occlusali e i movimenti mandibolari del paziente. [83] [84]



Figura 40 – a) Situazione iniziale; b) provvisorio di prova in resina acrilica, ottenuto da una mascherina in silicone realizzata a partire dalla ceratura diagnostica; c) risultato finale a sei mesi.

Simulazione del sorriso in AR

Lo stesso principio viene portato sui dispositivi mobili: applicazioni come IvoSmile utilizzano la AR per mostrare in tempo reale, sul viso del paziente ripreso dalla fotocamera, una configurazione ideale dell'arcata dentale. Il paziente osserva l'anteprima del proprio sorriso come in uno specchio, e questo facilita la comunicazione durante la pianificazione del trattamento estetico *(Figure 41-48)*.



Figura 41 – Nella fase motivazionale il tablet viene utilizzato come specchio; i risultati sono migliori se il dispositivo non viene tenuto in mano, ma fissato in posizione come mostrato nell'immagine.

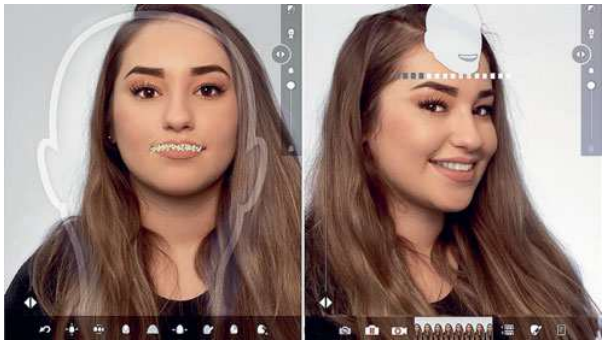


Figura 42 – L'applicazione IvoSmile consente l'acquisizione diretta delle fotografie con la fotocamera del dispositivo mobile; sono possibili anche sequenze di immagini.



Figura 43 – Il riconoscimento automatico dei tratti tipici del viso supporta l'allineamento delle fotografie secondo le linee guida estetiche.

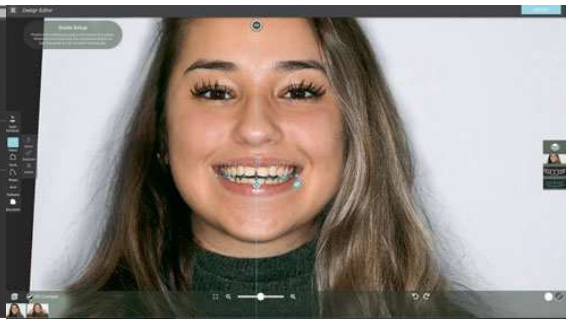


Figura 44 – Le linee di riferimento estetiche rilevanti del sorriso vengono calcolate in tempo reale.

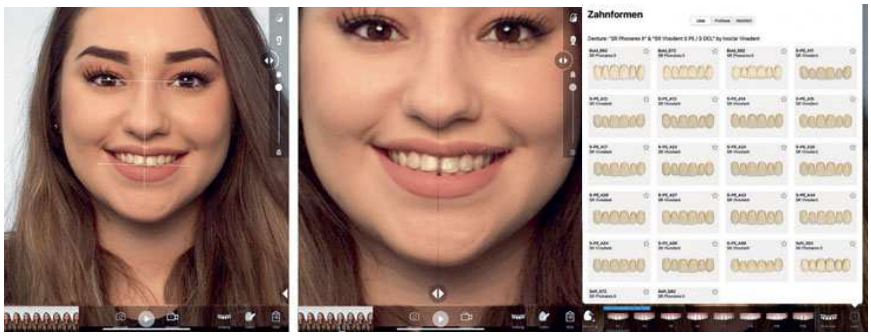


Figura 45 – Un disegno del dente corrispondente alla pianificazione del trattamento estetico viene selezionato da un database, con il modello corrispondente.

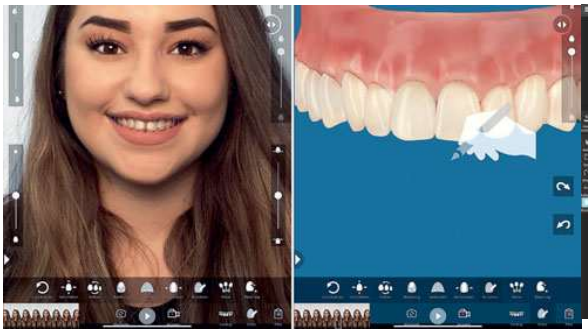


Figura 46 – La selezione e il posizionamento del sistema dentale tridimensionale vengono eseguiti automaticamente e in tempo reale in questa fase possono essere apportate anche modifiche definite dall'operatore.

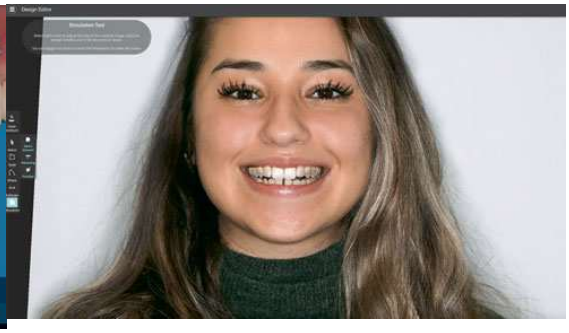


Figura 47 – Simulazione finale del sorriso.

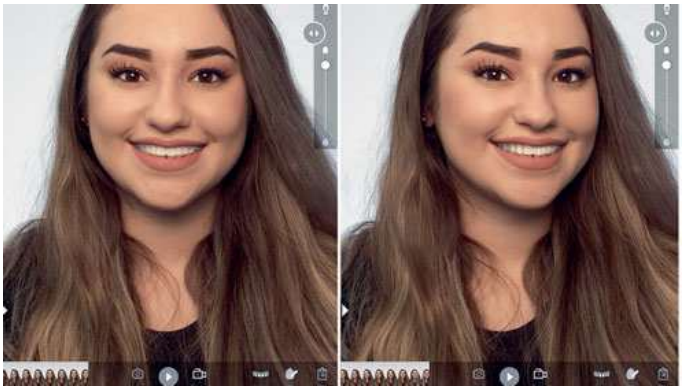


Figura 48 – Simulazione realistica sul viso del paziente in movimento.

Un dispositivo di AR può inoltre collocare un modello tridimensionale direttamente nella bocca del paziente, restituendo la profondità necessaria alla pianificazione estetica. Il sistema AR permette poi di condividere la visione dell'operatore con il tecnico di laboratorio o con un altro specialista durante la formulazione del piano di trattamento. [33]

Teleodontoiatria

La comunicazione si estende oltre lo studio attraverso la teleodontoiatria. I dati clinici del paziente vengono trasmessi ai professionisti, portando l'assistenza nelle aree svantaggiate e alle persone con difficoltà a raggiungere le strutture. Le applicazioni riguardano lo screening a distanza, la diagnosi delle lesioni orali e il monitoraggio del trattamento. È stato rilevato un miglioramento degli esiti di salute orale, per effetto della diagnosi precoce e del maggiore accesso alle cure, con risparmio di tempo e di costi. Risultati favorevoli sono emersi anche negli interventi di promozione e prevenzione. [54] [85]

MR e pazienti virtuali

In odontoiatria la tecnologia della MR è stata utilizzata per visualizzare la struttura interna della radice dentale attraverso l'olografia e la AR. [86]

Questo approccio ha preso forma nel progetto HoloDentist, che porta il visore HoloLens nella pratica clinica. Caricato il paziente virtuale, il modello appare davanti agli occhi dell'operatore come un oggetto reale collocato nella stanza. Il professionista può analizzarlo nella sua interezza, comprese le scansioni facciali e intraorali e i dati della tomografia, e può ingrandirlo, ruotarlo e sezionarlo con le mani *(Figura 49)*. Il sistema consente inoltre di condividere l'esperienza visiva tra più utenti, sia nello stesso spazio fisico sia a distanza, così che il modello tridimensionale possa essere discusso con il laboratorio o con un collega.

I dati delle diverse tecnologie digitali, cioè fotografie, dispositivi di tracciamento tridimensionale, informazioni radiografiche e immagini intraorali, vengono integrati e costruiscono il cosiddetto "paziente virtuale". Su questo modello il clinico sviluppa a schermo il piano di trattamento e simula la navigazione chirurgica per il posizionamento implantare, la progettazione dei restauri e l'endodonzia guidata. La disponibilità di più modelli virtuali sostiene inoltre un approccio clinico centrato sul paziente, anche nella scelta degli esiti da valutare. [33]



Figura 49 – Il modello tridimensionale compare nel mondo reale e può essere manipolato direttamente dal clinico.

Limiti e criticità dei visori in ambito clinico

Nonostante i risultati descritti, l'utilizzo dei visori in ambito clinico presenta ancora dei limiti. Il più frequentemente segnalato è la cybersickness, ovvero l'insieme di sintomi che l'utente sperimenta durante o dopo l'esposizione a un ambiente immersivo. Una revisione sistematica sui visori completamente immersivi indica i disturbi oculomotori come gli effetti negativi più frequenti, seguiti dal disorientamento. [87]

Anche i dispositivi ottici see-through presentano delle criticità. HoloLens 2 ha migliorato la distribuzione del peso e la gestione del calore rispetto alla prima generazione. Questo però non ha eliminato i sintomi da cybersickness riportati dagli utilizzatori, e restano i vincoli legati all'autonomia della batteria, al campo visivo ridotto e all'interazione in condizioni di sterilità. [88]

3 Educazione

3.1 L'educazione in odontoiatria restaurativa

L'odontoiatria restaurativa si occupa della diagnosi, del trattamento delle lesioni dei tessuti dentali duri e in particolare della carie. L'obiettivo è ripristinare forma, funzione ed estetica dell'elemento dentale conservando la maggior quantità possibile di tessuto sano. Oltre ciò rientrano nel percorso la valutazione del rischio di carie, la rimozione selettiva del tessuto infetto, la preparazione della cavità, la scelta del materiale e l'esecuzione del restauro diretto o indiretto.

Lynch et al. hanno documentato il passaggio alle tecniche adesive e mininvasive. Nelle scuole del Regno Unito e dell'Irlanda il composito ha superato l'amalgama come materiale prevalente nei restauri posteriori eseguiti dagli studenti e in dieci sedi su diciassette viene introdotto prima dell'amalgama. [89] Le tecniche insegnate variano molto da sede a sede. Le indagini si ripetono da più di trent'anni. Nel 1989 in oltre il 90% delle scuole il composito posteriore non veniva insegnato. [90] Nelle rilevazioni del 1997-1999 e del 2004-2005 la quota è salita a circa il 30% dei restauri posteriori eseguiti dagli studenti. Wilson e Lynch hanno riunito quattro cicli di indagini e concludono che il composito posteriore viene ormai considerato un'alternativa affidabile e qualitativamente superiore all'amalgama. [91]

Il Nordamerica presenta una situazione simile. Un'indagine nelle scuole degli Stati Uniti e del Canada ha rilevato che tutte le sedi insegnavano il restauro delle cavità occlusali e della maggior parte di quelle occluso-prossimali, mentre otto scuole, il 16% del campione, non insegnavano le cavità a tre superfici. [92] I docenti del Regno Unito e dell'Irlanda raccomandavano da tempo di insegnare il composito come materiale di prima scelta nel restauro dei denti posteriori. [93]

La scelta ha basi cliniche. Uno studio retrospettivo su 1949 restauri di II classe, 1202 in amalgama e 747 in composito, ne ha confrontato la durabilità a dodici anni. [94] Il composito si è dimostrato più durevole.

3.2 Le tecniche analogiche di insegnamento

Le tecniche analogiche sono la base della formazione universitaria. Il primo esercizio è tradizionalmente l'intaglio della morfologia dentale su blocchi di cera o di sapone. Lo studente riproduce un elemento sovradimensionato ricostruendone cuspidi, creste, fosse e solchi; l'obiettivo è trasferire la conoscenza teorica dell'anatomia in una forma tridimensionale *(Figura 50)*.



Figura 50 – A sinistra denti intagliati nel sapone, a destra denti intagliati nella cera.

In uno studio condotto presso l'Università di Aberdeen gli studenti del primo anno hanno giudicato l'esercizio utile allo sviluppo della destrezza manuale. [95] La cera e il sapone vengono scelti per il costo contenuto e la facilità di lavorazione. Il limite più discusso sono le dimensioni fuori scala del modello, che alterano la percezione delle proporzioni reali.

Successivamente vengono utilizzati denti estratti oppure denti artificiali. I denti estratti offrono la massima fedeltà dei tessuti, ma pongono problemi di disponibilità, conservazione e standardizzazione. I denti artificiali, in resina o in materiale plastico stampato in 3D, vengono montati su un'arcata finta inserita nel manichino; questo riproduce la posizione del paziente e permette di simulare l'ergonomia e la visione diretta e indiretta del riunito *(Figura 51)*.



Figura 51 – a sinistra manichino montato sul riunito per le esercitazioni precliniche, a destra l'arcata artificiale con denti finti e gengiva in resina.

Le prime esercitazioni sono solchi geometrici su blocchi di resina o di gesso, utili ad acquisire il controllo del manipolo e la percezione della profondità. Si passa poi alla

preparazione di cavità di I classe e poi di II classe, che introduce la parete prossimale e il rapporto con l'elemento adiacente. Solo in un secondo momento viene affrontato il restauro vero e proprio con la stratificazione del composito e la ricostruzione della morfologia occlusale.
I primi esercizi vengono eseguiti su un modello tenuto in mano o fissato al banco, con visione diretta e libertà di orientamento; successivamente il modello viene montato su un manichino in posizione di poltrona, che impone la visione indiretta con lo specchietto. È il momento più critico del percorso preclinico: alle difficoltà tecniche se ne aggiunge una percettiva.

I denti artificiali non riproducono le proprietà meccaniche dei tessuti dentali e non simulano la ridotta durezza del tessuto cariato; quindi l'esercizio di rimozione selettiva risulta poco realistico. [96] Il simulatore convenzionale ha il vantaggio di avere costi contenuti ma dipende interamente dal docente per la valutazione del risultato e non fornisce alcun feedback in tempo reale.

La valutazione del restauro

Prima di poter valutare un restauro è necessario definire che cosa lo renda corretto. I criteri universitari derivano dalle forme classiche della preparazione. Il bordo stabilisce l'estensione della cavità e il rapporto con solchi e cuspidi. Il pavimento deve essere piatto e gli angoli interni arrotondati. Contano poi la profondità e lo spessore residuo delle creste. La forma di ritenzione riguarda la direzione delle pareti, segue l'ampiezza necessaria all'accesso strumentale e la forma della fresa tronco conica utilizzata. [97]
Ai criteri geometrici si affiancano quelli relativi al restauro finito. Sul piano clinico un buon restauro in composito ha bisogno di isolamento del campo, corretta gestione della dentina esposta, matrice che consenta di ricostruire i punti di contatto, polimerizzazione efficace, rifinitura e lucidatura. [98]
Il giudizio del docente rimane l'unico strumento capace di valutare sia il risultato sia il modo in cui viene ottenuto, ma varia da docente a docente. Per ridurre al minimo questa variabile vengono impiegate griglie strutturate, che scompongono il risultato in criteri misurabili e associano a ciascun livello di prestazione una descrizione esplicita.
Mittal et al. hanno verificato l'efficacia di questo strumento: una griglia costruita sulle forme classiche della preparazione ha guidato l'autovalutazione degli studenti prima del giudizio del docente. [97] Nella prima sessione gli studenti sovrastimavano in modo marcato la propria prestazione; dopo il confronto individuale con il docente la discrepanza si annullava e il punteggio assegnato dai docenti migliorava progressivamente a ogni sessione. La griglia serve quindi a due cose: rende esplicite le aspettative del corso e dà allo studente un riferimento per riconoscere l'errore.

Una revisione sistematica ha esaminato l'autovalutazione nella formazione preclinica e clinica in odontoiatria. [99] Il dato più costante è la tendenza a sovrastimare la propria prestazione nelle prime esperienze; la capacità predittiva migliora con l'esercizio e con il confronto con il docente. [100]

Apprendimento e mantenimento delle competenze

Definiti i criteri di valutazione, resta da stabilire come si costruisca la competenza e come la si conservi. La ricerca educativa insiste sulla pratica e sulla ripetizione mirata dell'esercizio con difficoltà crescente. L'apprendimento va di pari passo con il raggiungimento di una soglia di prestazione ben definita. Nell'ambito restaurativo la progressione dalla cavità di I classe a quella di II classe, e da questa al restauro completo con ricostruzione del punto di contatto, è l'esempio più immediato. [89]
Nassar e Tekian individuano nel feedback frequente e immediato la pratica più efficace nell'apprendimento, perciò il feedback automatico del simulatore unito a quello del docente si sono dimostrati superiori a entrambi presi singolarmente. [101]
Un feedback combinato simulatore e docente può garantire ottime prestazioni durante l'esercizio, ma senza feedback continui lo studente può commettere più errori esercitandosi in autonomia. La letteratura resta limitata e gli autori delle revisioni segnalano la necessità di studi con follow-up prolungato. [96] È consigliabile quindi alternare sessioni con feedback continuo e sessioni di verifica autonoma, così che l'autovalutazione diventi lo strumento con cui lo studente conserva la competenza.

3.3 Le tecniche digitali di insegnamento

Le tecniche digitali vengono introdotte nella didattica restaurativa con l'obiettivo di superare i due limiti principali delle tecniche tradizionali: l'assenza di un feedback costante e la dipendenza dalla presenza del docente che comporta anche un feedback non oggettivo e non ripetibile in ogni università.
Serve distinguere tra la simulazione computerizzata (CS, Computer Simulation), in cui il software valuta il lavoro svolto, e la VR, in cui l'esercizio viene svolto interamente in un ambiente digitale. [96].
La letteratura restaurativa indica come la possibilità di osservare la preparazione da più angolazioni, di ingrandirla in un punto determinato, di ripetere l'esercizio senza consumo di materiale offra un vantaggio importante rispetto al solo utilizzo delle tecniche tradizionali. [102] Erdilek et al., in una revisione sulla digitalizzazione della didattica odontoiatrica, hanno suddiviso queste applicazioni in tre gruppi, a seconda che l'apprendimento sia assistito dal computer, dalla AR o dalla VR. Gli autori concludono che i sistemi digitali possono potenziare le abilità degli studenti grazie alla visualizzazione delle informazioni e alla chiarezza del feedback. [103]

I risultati appaiono però differenti in base all'abilità considerata. La simulazione si è dimostrata efficace su tutti i partecipanti nell'insegnamento della fotopolimerizzazione, con un miglioramento del 32% dopo feedback visivo immediato. [101] Nella preparazione delle cavità i risultati sono meno univoci. Difatti diversi studi non hanno rilevato differenze significative nella qualità delle preparazioni tra gruppi addestrati con simulatore e gruppi addestrati con metodo convenzionale, mentre l'aggiunta di alcune ore di simulazione a un corso preclinico già strutturato ha migliorato la prestazione agli esami pratici. [96]
In un altro studio è stato notato come il tempo richiesto per l'apprendimento del gruppo addestrato con l'utilizzo di tecniche digitali sia cinque volte inferiore rispetto al gruppo addestrato con tecniche tradizionali, senza riscontrare differenze nella qualità della preparazione finale. Si può perciò ritenere che la simulazione sia più utile come integrazione alle tecniche tradizionali che come loro sostituto. [96] [112]

La AR nella didattica restaurativa

Il simulatore virtuale (VR) sostituisce il campo operatorio con un modello digitale, mentre i sistemi di AR mantengono l'elemento reale e vi sovrappongono un contenuto informativo. Lo studente continua a utilizzare gli strumenti rotanti su un modello fisico, con una guida grafica allineata alla scena reale.
Per l'intaglio dentale è stato sviluppato uno strumento mobile in AR, che sovrappone il modello anatomico di riferimento al blocco su cui lo studente lavora. [113] L'applicazione viene installata su uno smartphone fissato a un supporto e riconosce un marker stampato posto accanto al blocco di cera, sul quale allinea il modello tridimensionale dell'elemento da riprodurre. I passaggi dell'intaglio vengono scorsi con due pulsanti, così che lo studente confronti a ogni fase la forma raggiunta con quella attesa *(Figura 52)*.

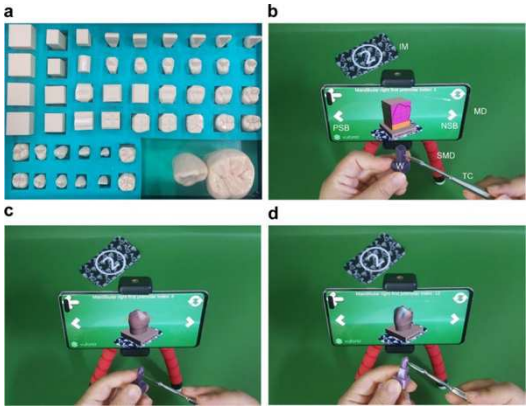


Figura 52 – Strumento mobile in AR per l'intaglio dentale. In (a) i blocchi di cera nelle fasi successive dell'esercizio, accanto ai denti di riferimento. In (b) il modello anatomico del primo premolare inferiore destro viene sovrapposto al blocco: IM indica il marker stampato che consente il riconoscimento della scena, MD il dispositivo mobile, W il blocco di cera montato sul supporto SMD, TC lo strumento da intaglio, PSB e NSB i pulsanti con cui si scorrono i passaggi. In (c) e (d) lo stesso elemento al sesto e al dodicesimo passaggio.

Uno studio in vitro ha confrontato la riduzione di tessuto tra tecnica a mano libera e tecnica assistita da un dispositivo AR, misurando il volume di differenza tra riduzione pianificata ed eseguita; la guida sovrapposta ha permesso un controllo più stretto della quantità di tessuto rimosso. [98]
Farronato et al., in una revisione, indicano gli ambiti educativo e di formazione come quelli in cui l'applicazione dell'AR alla didattica restaurativa risulta più matura. [3]
Rispetto alla VR i sistemi in AR hanno un vantaggio pratico: non richiedono la ricostruzione dell'intero ambiente di lavoro e possono essere integrati nella postazione già esistente, con un costo complessivo inferiore.
Nei sistemi di AR la sensazione al taglio è quella reale del materiale utilizzato, ed è un vantaggio rispetto al feedback aptico simulato. Il dispositivo però non fornisce alcuna misurazione automatica del gesto; la valutazione resta quindi affidata al docente o a un'analisi successiva del modello.
I sistemi finora descritti utilizzano lo schermo o un dispositivo mobile. I visori non sono ancora entrati nella didattica restaurativa. Con il monitor o con lo smartphone lo studente alterna lo sguardo tra il riferimento grafico e il modello, e la corrispondenza tra i due viene ricostruita ogni volta; con un visore video see-through la scena reale e il contenuto sovrapposto arrivano sullo stesso piano ottico e il confronto tra la forma raggiunta e quella attesa avviene senza spostare lo sguardo dal campo operatorio.

I sistemi attualmente impiegati addestrano abilità isolate come la destrezza manuale, la geometria della preparazione o la fotopolimerizzazione, ma non riproducono la situazione clinica nel suo complesso. Non vengono riprodotti l'accesso limitato, la presenza di saliva e sangue, il movimento del paziente e la gestione del tempo operatorio.
I denti artificiali non riproducono le differenze di durezza tra smalto, dentina e tessuto cariato e i modelli virtuali multistrato sviluppati per colmare questa lacuna non hanno mostrato differenze significative rispetto ai denti estratti negli esercizi di rimozione della carie. [96] Il problema della simulazione della lesione cariosa resta quindi non risolto del tutto. Le revisioni sistematiche disponibili concordano sul numero ridotto di studi, sull'eterogeneità dei disegni sperimentali e sull'assenza di follow-up prolungati. Il ruolo della VR nei corsi universitari è ancora incerto. [96] [40]
La letteratura indica un miglioramento delle prestazioni nell'ambiente simulato per quanto riguarda il trasferimento delle competenze al paziente reale, ma i dati sul passaggio dall'esercitazione preclinica al trattamento dei pazienti sono limitati. I nuovi dispositivi dovrebbero essere valutati proprio su questa transizione.

3.4 Sistemi AR, VR e MR in commercio

I dispositivi indossabili devono rispettare molteplici caratteristiche prima di poter essere messi in commercio. Il campo operatorio odontoiatrico si sviluppa a una distanza compresa fra venti e quaranta centimetri dall'occhio dell'operatore, con dettagli anatomici dell'ordine di pochi millimetri e una postura di lavoro che impone la testa in avanti. Ne derivano tre condizioni vincolanti: la messa a fuoco a distanza ravvicinata, una risoluzione sufficiente a distinguere il margine di una preparazione e un peso contenuto, distribuito in modo tale da non affaticare il rachide cervicale durante sessioni prolungate.

Un secondo criterio è la modalità con cui il dispositivo integra reale e virtuale. Nei sistemi optical see-through la visione naturale viene conservata, ma il contrasto dell'immagine virtuale dipende dall'illuminazione ambientale, che è una condizione critica in odontoiatria per l'intensità della lampada del riunito. Nei sistemi video see-through la resa del contenuto digitale risulta uniforme e diventa possibile l'ingrandimento elettronico, a costo di una latenza residua e di un errore di parallasse che alla distanza di lavoro odontoiatrica diventa percepibile.

Zari et al. hanno messo a confronto Magic Leap 1 e Microsoft HoloLens 2 nella visualizzazione di modelli anatomici tridimensionali ricostruiti da immagini radiologiche, valutati da chirurghi e specializzandi. Le prestazioni non differivano significativamente, mentre il personale chirurgico preferiva Magic Leap 1 per la qualità della visualizzazione e la facilità di interazione con il contenuto virtuale. [97]

Nella *Tabella 1* sono raccolti i sistemi in commercio utilizzabili in odontoiatria restaurativa, con la tipologia, le caratteristiche principali e la rilevanza didattica.

	Sistema	Tipologia	Caratteristiche principali	Rilevanza didattica
Sistemi optical see-through				
	Microsoft HoloLens 2 (Microsoft, USA)	MR, autonomo	Campo visivo ~52° diagonali; guide d'onda olografiche; tracciamento di mani, sguardo e ambiente; ~566 g; fuori produzione dal 2024	Dispositivo di riferimento in letteratura; visione naturale conservata, ma contrasto ridotto sotto la lampada operatoria
	Magic Leap 2 (Magic Leap, USA)	MR, unità di calcolo separata	Campo visivo ~70° diagonali; oscuramento dinamico delle lenti; visore ~260 g con compute pack indossabile	L'oscuramento dinamico migliora la leggibilità in ambienti illuminati; peso ridotto sul capo

Sistemi video see-through				
	Meta Quest 3 (Meta, USA)	VR e MR, autonomo	Campo visivo ~110° orizzontali; pass-through RGB; lenti pancake; tracciamento inside-out; ~515 g	Buon rapporto prestazioni-costo per anatomia e morfologia; parallasse e risoluzione limitano la visione ravvicinata
	Apple Vision Pro (Apple, USA)	VR e MR, autonomo	Display micro-OLED ad altissima densità; tracciamento oculare e manuale senza controller; ~600–650 g	Risoluzione e tracciamento oculare utili alla valutazione del gesto; peso anteriore e costo elevati
	Varjo XR-4 (Varjo, Finlandia)	MR, collegato a computer	Risoluzione prossima all'acuità visiva umana nell'area centrale; pass-through a bassa latenza; postazione fissa	È il sistema più vicino alla resa necessaria per il dettaglio marginale; vincolo del cavo e costo elevato
	HTC Vive Focus Vision (HTC, Taiwan)	VR e MR, modulare	Pass-through a colori; tracciamento oculare; batteria posteriore che bilancia il peso	Bilanciamento favorevole alla postura di lavoro; impiego prevalentemente formativo generale
	FALKO Connect con telecamere OKKIO (Tecnomed Italia)	Sistema dedicato all'odontoiatria	Telecamere orientabili sul supporto del visore; unità di controllo con scheda di acquisizione; visione 2D e 3D con ingrandimento regolabile	Unico sistema concepito per l'odontoiatria; impiegato nella parte sperimentale e descritto nel paragrafo 4.3
Sistemi di sola visualizzazione				
	Vuzix M400 (Vuzix, USA)	Occhiali intelligenti, display monoculare	Display monoculare periferico; <100 g; comandi vocali; trasmissione video in tempo reale	Non sovrappone guide al campo operatorio; utile per consultare radiografie o la sequenza operativa
	Xreal Air 2 Pro (Xreal, Cina)	Occhiali birdbath, schermo virtuale fisso	Schermo virtuale a distanza fissa; oscuramento elettrocromico; ~75 g; nessun tracciamento spaziale	Monitor indossabile per l'immagine di telecamera intraorale o microscopio; non è una guida sovrapposta

Tabella 1 – Sistemi di AR, VR, MR in commercio.

Dal confronto emergono tre gruppi. I sistemi optical see-through conservano la visione naturale del campo operatorio e sono quindi i candidati per la guida sovrapposta alla preparazione, ma pagano un campo visivo ristretto e una perdita di contrasto proporzionale all'illuminazione ambientale, che in odontoiatria è elevata. I sistemi video see-through offrono un contenuto virtuale uniforme e la possibilità di ingrandimento elettronico, condizione che li avvicina alla funzione del microscopio operatorio, ma introducono latenza ed errore di parallasse. Gli occhiali di sola visualizzazione, infine, non realizzano una vera AR e svolgono la funzione di monitor indossabile.
Nessuno dei dispositivi di consumo elencati è stato progettato per l'odontoiatria. Ai limiti generali già discussi, cioè cybersickness, campo visivo ridotto, autonomia della batteria, interazione in condizioni di sterilità e costo, si aggiunge un problema di destinazione d'uso: peso e distribuzione delle masse pensati per l'interazione a media distanza e non per la postura odontoiatrica, distanza di messa a fuoco troppo elevata, assenza di procedure di disinfezione compatibili con l'ambulatorio. I sistemi sviluppati specificamente per il settore, come il FALKO Connect impiegato in questa tesi, affrontano questi aspetti a monte, rinunciando alla ricostruzione di un ambiente virtuale completo per concentrarsi sulla visione del campo reale. Per questo la parte sperimentale che segue adotta un dispositivo dedicato e non un visore di consumo. [89] [96] [114]

3.5 L'IA nell'educazione

L'intelligenza artificiale (AI, Artificial Intelligence) viene introdotta nella didattica universitaria con un compito diverso da quello dei simulatori descritti nel paragrafo 3.3. Il simulatore riproduce l'ambiente di lavoro, mentre l'AI analizza il prodotto dello studente e restituisce una valutazione. Chiu et al., in una revisione sistematica sull'uso dell'AI in educazione, hanno individuato 13 funzioni distribuite in apprendimento, insegnamento, valutazione e autovalutazione; hanno raccolto 7 tipi di esito misurato negli studi disponibili insieme a 10 criticità che vanno dalla qualità dei dati raccolti sugli studenti all'assenza di un modello di insegnamento condiviso a cui ricondurre le singole applicazioni. [115] Le tre forme più ricorrenti di utilizzo di AI sono il tutoraggio intelligente, il percorso adattivo e il feedback automatico.
Uribe et al. hanno condotto un'indagine internazionale su docenti di odontoiatria: il 74,3% ritiene che l'AI possa migliorare l'acquisizione delle conoscenze, il 63,6% la decisione clinica e il 60,0% la valutazione, mentre solo il 38,8% le attribuisce un ruolo nell'addestramento delle abilità cliniche. [116]
El-Hakim et al. hanno condotto un'indagine nelle università, evidenziando come lacuna principale nell'insegnamento la totale assenza di una valutazione in tempo reale ad esempio sulla preparazione della cavità o sull'accuratezza del restauro. [117] Gli autori

affermano che i sistemi di attribuzione automatica del voto non producono un commento paragonabile a quello del docente.
Nella diagnosi invece l'AI si dimostra uno strumento molto più utile. Rampf et al. hanno confrontato in uno studio randomizzato diverse modalità di feedback nell'apprendimento della diagnosi radiografica, integrando in una di esse un'applicazione di AI. Studenti del quarto anno hanno lavorato per otto settimane su sedici casi radiologici virtuali e sono stati assegnati per sorteggio a un feedback elaborato con AI oppure alla sola comunicazione della risposta corretta. [118] Il feedback elaborato con AI ha migliorato le competenze diagnostiche, in particolare nel riconoscimento della carie dello smalto e della parodontite apicale; inoltre la descrizione delle radiografie prodotta dall'applicazione di AI si è rivelata utilizzabile e comparabile a quella degli esperti. Schropp et al. hanno invece verificato l'effetto di un software di AI nel riconoscimento delle lesioni cariose prossimali sulle radiografie endorali, scoprendo che il supporto automatico non ha modificato in modo significativo la prestazione degli studenti. [119]
Tahani et al. hanno costruito uno strumento che fotografa il dente prima e dopo la preparazione e ricava dalle due immagini la forma della cavità e l'angolo delle pareti, con l'obiettivo di sostituire la valutazione del docente. Il confronto con il parere degli esperti ha dato un errore medio-basso del sistema. Gli autori scrivono però che prima di poter essere usato nella didattica il metodo va verificato in maniera più approfondita, e lo propongono come strumento di autovalutazione con cui lo studente confronta il proprio lavoro con i parametri di riferimento. [120]
Han et al. hanno utilizzato la scansione tridimensionale di 35 primi molari inferiori preparati da studenti e valutati per riduzione occlusale e angolo delle pareti, prima utilizzando un algoritmo e poi con i docenti che lavoravano sullo stesso file digitale. Il confronto tra i punteggi ha evidenziato come il giudizio dell'algoritmo e quello professionale coincidano quasi sempre, quindi la macchina effettua misurazioni sempre nello stesso modo. Per questo potrebbe essere usata in un esame, dove la variabilità dell'esaminatore ricade sul voto dello studente. [121]
Alshammari et al. hanno progettato un sistema che assegna alla cavità un punteggio di qualità da 1 a 10 partendo da una fotografia; la profondità e la forma del fondo della cavità vengono aggiunte solo quando è disponibile anche il file STL. Confrontato con le misure di tre esperti, il punteggio ha dato scarti molto piccoli. Gli autori chiariscono però che il sistema serve a dare un aiuto formativo e non sostituisce il giudizio del docente. [122]
Benli ha condotto l'unico studio randomizzato che confronta direttamente il feedback generato dall'AI con quello del docente. 56 studenti sono stati assegnati per sorteggio a due gruppi, e 51 sono arrivati all'analisi finale. Per la preparazione di corona il sistema restituiva cinque parametri: riduzione occlusale e assiale, angolazione, qualità del margine di preparazione, levigatura della superficie e sottosquadri. Vengono presentati

insieme come mappa tridimensionale a colori, punteggio numerico e commento scritto. Chi ha consultato il sistema più spesso ha ridotto gli errori segnalati del 27,8%, contro il 9,6% di chi lo ha usato poco, e nello stesso sottogruppo la prestazione all'esame pratico è migliorata in modo significativo. L'84% degli studenti ha trovato utile il feedback e il 78% lo ha giudicato comprensibile, però il 69% ha indicato come modalità preferita la combinazione di AI e docente, non l'AI da sola. [123]
Il feedback sulla preparazione, che nelle tecniche analogiche dipende esclusivamente dal docente, diventa misurabile e confrontabile. Lo step successivo è unirlo alla AR, difatti la guida sovrapposta mostra allo studente la forma attesa, l'AI misura lo scostamento e il risultato arriva mentre lo studente lavora. Ma su questo non ci sono ancora studi scientifici.

4 Parte sperimentale

4.1 Obiettivo

L'obiettivo di questa tesi è valutare l'efficacia della AR nella ricostruzione di cavità di I classe, stabilendo se la visione attraverso un visore, con e senza una guida grafica sovrapposta al campo operatorio, consenta di eseguire un restauro diretto di I classe con la stessa efficacia della visione diretta. Inoltre verrà verificato se questa modalità con visore possa essere impiegata nella didattica e nell'insegnamento, e se il giudizio dei partecipanti cambi quando si passa dall'insegnamento alla pratica clinica quotidiana. Il restauro viene eseguito su un modello di primo molare inferiore, corrispondente all'elemento 46 nella notazione FDI.

La cavità di I classe si presta bene a questo confronto: è facile da standardizzare e la sua ricostruzione coincide quasi del tutto con la modellazione della morfologia occlusale, cioè con la riproduzione di cuspidi, solchi e creste.

Vengono messe a confronto cinque modalità di visione: la visione a occhio nudo, il visore in 2D, il visore in 2D con AR, il visore in 3D e il visore in 3D con AR. Il 3D corrisponde alla modalità stereoscopica, basata sulla stereopsi descritta nel capitolo 1: ciascun occhio riceve un'immagine ripresa da un punto di vista leggermente diverso e il cervello fonde le due immagini in una sola, dotata di profondità. Nel 2D invece entrambi gli occhi vedono la stessa immagine, piatta come quella di un monitor.

Per ciascuna modalità vengono considerati la qualità percepita del restauro, i tempi di esecuzione, la profondità di campo, la coordinazione occhio-mano e il comfort visivo dell'operatore. Parallelamente viene raccolta l'esperienza d'uso complessiva attraverso un questionario.

La guida grafica è formata dalle linee di restauro dei solchi e delle creste del primo molare inferiore. Il confronto tra visione bidimensionale e stereoscopica serve a capire se questa guida produca un effetto da sola o se ha bisogno di un'immagine che restituisca la profondità di campo; una linea appoggiata su un'immagine piatta indica dove modellare, ma non a quale altezza. Per lo stesso motivo il restauro viene diviso nelle sue due fasi, il riempimento della cavità e la modellazione della morfologia occlusale.

Sono stati raccolti anche dati sul fastidio visivo riferito con ciascuna modalità e sul momento in cui compare, per verificare se l'intensità del disturbo si rifletta sul giudizio di efficacia assegnato a quella modalità. Viene inoltre considerata l'influenza di alcune caratteristiche del partecipante, come il numero di restauri già eseguiti, la presenza di un difetto visivo, l'uso di occhialini ingrandenti e l'abitudine allo schermo.
I tempi vengono letti anche all'interno dello stesso partecipante. Si vuole capire se chi è rapido a occhio nudo resta rapido con il visore, oppure se lavorare attraverso uno schermo richieda un'abilità diversa, legata all'adattamento al dispositivo più che alla capacità di ricostruire una cavità; l'ordine casuale delle prove permette inoltre di escludere che nella stessa seduta compaia un apprendimento progressivo.

La qualità del restauro viene giudicata dal partecipante stesso e l'analisi dei dati resta descrittiva; lo scopo è raccogliere un primo insieme di indicatori su cui impostare ricerche future, con un campione più ampio e una misurazione oggettiva dei restauri.

4.2 Materiali e metodi

Arruolamento dei partecipanti

Lo studio è sperimentale, ogni partecipante esegue le ricostruzioni con tutte le modalità di visione. L'ordine delle cinque modalità viene assegnato in modo casuale e cambia da partecipante a partecipante. I dati sono stati raccolti in università tra settembre 2024 e giugno 2025. Per ciascun partecipante le cinque prove si sono svolte in un'unica seduta; i dati e il questionario compilato alla fine della prova sono stati raccolti in forma totalmente anonima. Alla prova hanno partecipato 30 studenti del corso di laurea magistrale in Odontoiatria e Protesi Dentaria dell'Università Politecnica delle Marche. L'arruolamento è avvenuto su base volontaria e non ha previsto una selezione per livello di esperienza. Nel campione rientrano partecipanti con difetti visivi quali miopia, astigmatismo o ipermetropia e portatori di occhiali o lenti a contatto durante la pratica clinica. Tali dispositivi indossabili sono compatibili con il visore utilizzato, pertanto i difetti visivi o l'utilizzo di occhiali da vista non sono elementi di esclusione dall'esperimento.
Ogni partecipante ha lavorato sul proprio modello, identico a quello degli altri, e sulla stessa postazione.

Realizzazione dei modelli

Il primo passo è stato la realizzazione del modello su cui eseguire i restauri; per farlo il modello è stato progettato al CAD a partire da un modello 3D del molare con la cavità già preparata utilizzando ExoCad come software di modellazione. I denti preparati sono quindi uguali tra loro e ogni modello è uguale all'altro. Successivamente è stato esportato il file in STL e stampato in 3D in resina. È stata usata una stampante 3D della Sisma modello Everes 1 a tecnologia DLP con una resina grigia per modelli studio, per stampare i 30 modelli *(Figure 53, 54 e 57)*.



Figura 53 – Il modello stampato in 3D con le cinque cavità di I classe, visione occlusale.

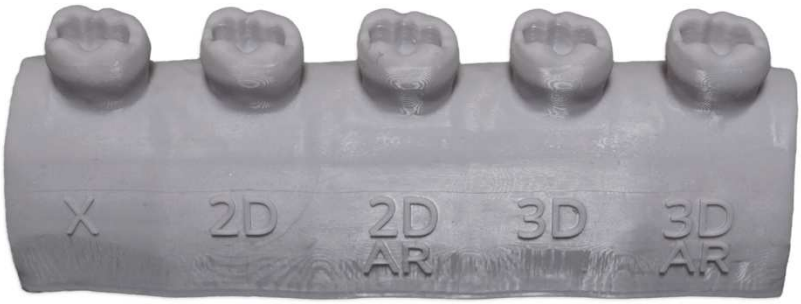


Figura 54 – Lo stesso modello in visione laterale, con le sigle delle cinque visioni incise sulla base.

Ogni cavità è stata contrassegnata sul modello con la sigla corrispondente: “X” per la visione a occhio nudo, “2D” e “2D+AR” per le due condizioni bidimensionali, “3D” e “3D+AR” per quelle stereoscopiche. In questo modo ciascun partecipante ha ripetuto lo stesso restauro in cinque condizioni diverse, senza sovrapposizioni tra le prove *(Figure 55 e 56)*.

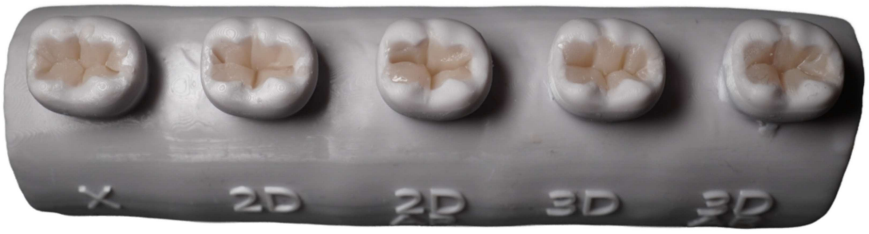


Figura 55 – Un modello a restauri completati, visione occlusale.

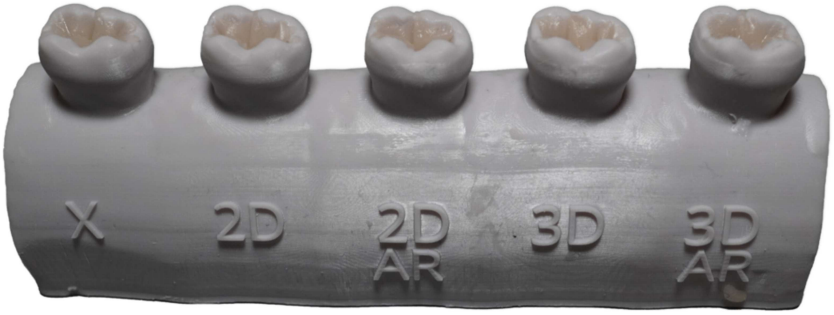


Figura 56 – Lo stesso modello a restauri completati in visione laterale.



Figura 57 – I trenta modelli al termine della raccolta dati, numerati per partecipante.

Le cinque modalità di visione a confronto

La prima modalità è la visione diretta a occhio nudo, che rappresenta la condizione di riferimento; il partecipante osserva il campo di lavoro senza alcun dispositivo e senza alcun ingrandimento. Le altre quattro modalità si basano sul sistema FALKO. Nella modalità 2D si utilizza la telecamera OKKIO 4K e il partecipante osserva un ingrandimento bidimensionale della cavità, privo di informazione di profondità; è l'unica delle cinque modalità in cui il campo operatorio viene ingrandito *(Figura 58).* L'AR non è una funzione del sistema FALKO e non viene fornita dal produttore: è stata realizzata da noi appositamente per questo studio, mediante un software (WindowTop) che sovrappone al flusso video in entrata un'immagine PNG con le linee di restauro; il partecipante vede quindi nel visore, oltre alla cavità reale, una guida per la modellazione dei solchi e delle creste. L'allineamento resta manuale e la sovrapposizione non segue il modello se questo viene ruotato, perciò durante la prova il modello veniva mantenuto in posizione fissa.

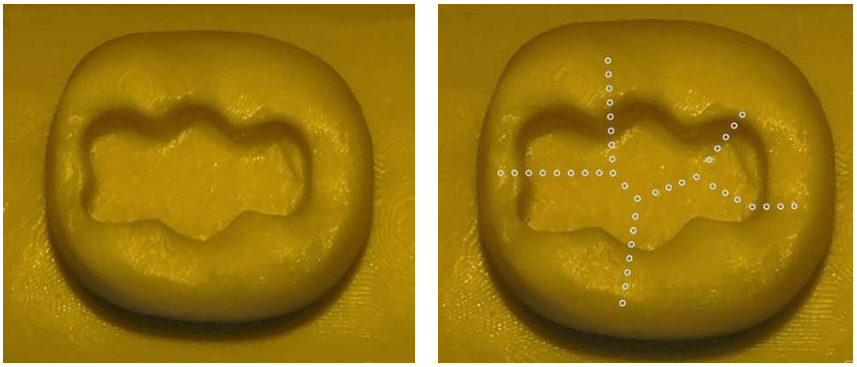


Figura 58 – a sinistra la cavità osservata nel visore in modalità 2D, priva di informazione di profondità, a destra la stessa visione ma con la guida in AR.

Nella modalità 3D la telecamera OKKIO 3D acquisisce due flussi stereoscopici che il visore separa e invia ai due occhi, restituendo la percezione della profondità. *Nella configurazione utilizzata la telecamera 3D lavora a fuoco fisso, con le ottiche poste a circa 40 cm dal modello, e non fornisce alcun ingrandimento: l'immagine ha dimensioni simili a quelle della visione diretta (Figura 59)*. Nella *Figura 60* si osservano le linee di restauro in AR applicate al flusso video in entrata.

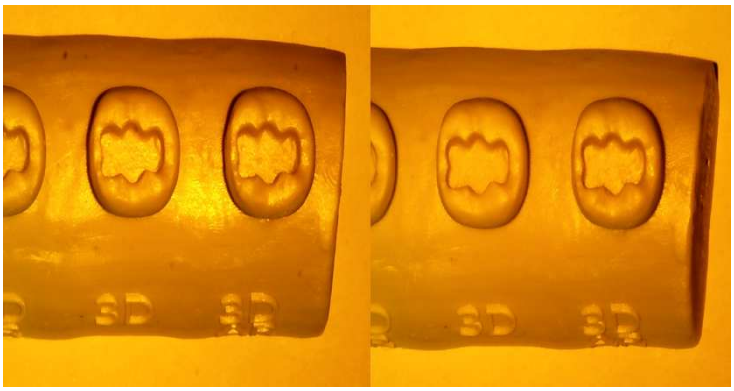


Figura 59 – La ripresa della telecamera OKKIO 3D: il visore separa le due immagini e le invia ai due occhi.

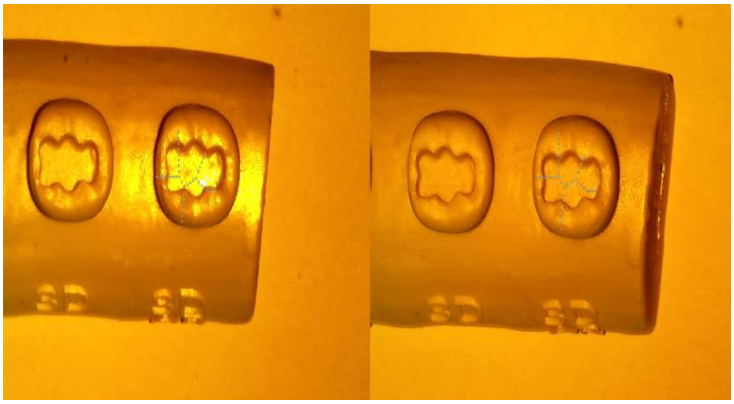


Figura 60 – La modalità 3D con AR: le linee di restauro compaiono su entrambe le riprese affiancate.

Sequenza operativa

La postazione di lavoro è illustrata nella *Figura 61*, con la telecamera sul braccio articolato che inquadrava dall'alto il modello, gli strumenti da lavoro, il pc e il visore.

Figura 61 – La postazione di lavoro.



Ogni partecipante ha effettuato i 5 restauri con le modalità indicate in precedenza, riempiendo la cavità con resina composita e modellando la morfologia occlusale con gli strumenti LM.
Il composito viene apposto in un unico incremento e la fotopolimerizzazione viene effettuata soltanto al termine della modellazione; della sequenza del restauro diretto di prima classe resta quindi la sola fase ricostruttiva, cioè il riempimento della cavità e la modellazione dei solchi e delle creste.

Rilevazione dei tempi

Per ciascuna cavità è stato cronometrato il tempo di esecuzione in secondi e tutti i tempi sono stati poi raccolti in un foglio di calcolo insieme all'identificativo del modello. Il dato consente di confrontare la stessa modalità tra i partecipanti e le cinque modalità all'interno dello stesso partecipante garantendo l'anonimato del partecipante.

Il questionario

Al termine delle cinque prove ogni partecipante compilava un questionario anonimo su Microsoft Forms. Il modulo è diviso in cinque pagine da attraversare in sequenza, per un totale di 30 domande; le opzioni di risposta compaiono in ordine casuale, così la posizione nell'elenco che quindi non influenza la scelta.
I tipi di risposta sono quattro: scelta singola tra le modalità, scelta multipla, scala a sette livelli da "non efficace" a "estremamente efficace", scala numerica da 0 a 10.
La prima sezione è quella anagrafica in cui si chiedono età, sesso del partecipante, se utilizza occhiali da vista o lenti a contatto o occhialini ingrandenti durante la pratica clinica, se è abituato a passare molte ore al pc o a giocare ai videogame, se è odontotecnico e quanti restauri ha effettuato prima della prova.
La seconda sezione riguarda le preferenze operative del partecipante e un suo giudizio sulle singole caratteristiche della visione. Sono state chieste le modalità preferite per riempire la cavità e per modellare la morfologia occlusale, quella che restituisce l'esperienza più simile alla visione a occhio nudo o con occhialini ingrandenti, quale con visore offre la maggiore profondità di campo e quale la migliore coordinazione occhio-mano e i movimenti più precisi rispetto alla visione diretta, quanto l'ingrandimento aiuta nella realizzazione del restauro, quanto la AR aiuta nella realizzazione del restauro e infine quanto è stato facile adattarsi al visore.
Nella terza sezione è stata affrontata l'opinione complessiva del partecipante chiedendogli con quale modalità creda di aver eseguito il restauro migliore e con quale quello più veloce, quanto la AR, in 2D e in 3D, ha aiutato a ricostruire l'anatomia della morfologia occlusale, quale modalità userebbe nella didattica universitaria per

insegnare la modellazione della morfologia occlusale e quale userebbe nella pratica clinica quotidiana.
Nella quarta sezione è stato chiesto di effettuare un confronto tra le 5 modalità con una scala a 7 valori da “non efficace” a “estremamente efficace”.
Nell’ultima sezione sono stati affrontati i problemi visivi; è stato chiesto al partecipante quale modalità del visore crea meno fastidio agli occhi, con l’opzione “tutte le opzioni mi creano fastidio”, quanto ha dato fastidio ogni modalità presa singolarmente e il momento di comparsa del fastidio.
Infine si chiedeva al partecipante che ha problemi di vista di rispondere a ulteriori domande che approfondivano il suo difetto.

Analisi dei dati

L’elaborazione viene svolta con Microsoft Excel. Per i tempi vengono riportate media, mediana, deviazione standard, valore minimo e valore massimo di ciascuna delle cinque modalità; per ogni modello viene inoltre registrato quale modalità fa segnare il tempo più breve. Per le domande a scelta singola vengono riportati il conteggio delle risposte e la percentuale sui 30 partecipanti. Le scale da 0 a 10 sono riassunte con la media, mentre i sette livelli della scala di efficacia vengono convertiti in punteggi da 1 a 7, da “non efficace” a “estremamente efficace”. Nelle due domande a risposta multipla viene contata ogni singola risposta, quindi il totale supera il numero dei partecipanti.

4.3 Il visore Falko Connect

Il sistema FALKO (FALKO 3D System, Tecnomed Italia s.r.l., Monte Porzio, Italia) è un sistema di visualizzazione indossabile progettato per l’ambito medico e odontoiatrico. Al centro del sistema c’è un visore HMD che riceve in tempo reale i segnali video provenienti dalle apparecchiature di imaging presenti nello studio e li riproduce davanti agli occhi dell’operatore, che può così tenere lo sguardo sul campo operatorio senza doversi voltare verso un monitor esterno. [124]
FALKO viene definito dal produttore come una “soluzione aperta”: il visore non sostituisce le apparecchiature già presenti nello studio, ma le potenzia collegandosi ad esse. Tra le sorgenti compatibili rientrano telecamere 2D e 3D, microscopi operatori, scanner intraorali, TC Cone Beam e sistemi di navigazione implantare. In questo paragrafo vengono descritti i componenti del sistema e il suo principio di funzionamento, con particolare riferimento alla configurazione utilizzata nella parte sperimentale di questa tesi.

Caratteristiche generali e componenti del sistema

FALKO è un visore di tipo video: l'operatore non guarda il mondo reale attraverso lo schermo, ma osserva le immagini acquisite da una telecamera e riprodotte sui display del dispositivo.

Nella classificazione descritta nel capitolo 1 il dispositivo rientra tra i sistemi video see-through: il display è a vista chiusa e la visione del campo operatorio è mediata da una videocamera il cui segnale viene elaborato e inviato ai monitor posti davanti agli occhi. La differenza riguarda la posizione della telecamera. Negli HMD video see-through le videocamere sono montate sulla testa e il punto di vista della ripresa coincide con quello dell'utente; nel sistema FALKO la telecamera viene fissata di norma a un braccio articolato sopra il campo operatorio, quindi l'inquadratura resta indipendente dai movimenti della testa. Sotto questo aspetto la configurazione si avvicina ai sistemi monitor-based, dai quali si distingue perché il display viene indossato e non è fisso nello spazio. Il dispositivo non rientra invece tra i sistemi optical see-through, dato che i combinatori ottici sono assenti e la visione diretta del campo viene recuperata solo sollevando il display.

Le informazioni aggiuntive, come la sorgente secondaria visualizzata in PIP o le annotazioni tracciate dall'utente remoto, vengono affiancate all'immagine reale senza un allineamento tridimensionale con l'anatomia del paziente; il sistema resta perciò un dispositivo di visualizzazione video, ingrandita oppure stereoscopica a seconda della telecamera, con funzioni AR limitate.



Figura 62 – Il visore FALKO montato sul caschetto ergonomico con sistema flip-up.

La guida grafica in AR impiegata nella parte sperimentale non rientra tra queste funzioni ed è stata costruita a parte, come descritto più avanti. Il visore è montato su un

caschetto ergonomico regolabile ed è dotato di un sistema “flip-up”; il meccanismo permette di sollevare il display senza togliere il caschetto, alternando rapidamente la visione mediata dagli schermi e quella diretta *(Figura 62)*. [125]
Il vantaggio ergonomico è uno degli aspetti più rilevanti. Con i sistemi ingrandenti tradizionali, come il microscopio operatorio, l’operatore deve mantenere gli occhi su oculari fissi per lunghi periodi, assumendo spesso posture scorrette. Con il visore le immagini seguono i movimenti della testa e si può lavorare con il rachide in posizione neutra. [126]
Il sistema FALKO comprende una serie di apparecchiature che possono operare in modo autonomo oppure essere connesse tra loro *(Figura 63)*. Nella configurazione completa include il visore, le telecamere OKKIO, l’unità di elaborazione del segnale e gli accessori di controllo, descritti di seguito.



Figura 63 – Il sistema FALKO nel suo insieme: visore, telecamera OKKIO 3D, unità FALKONNECT e accessori di controllo.

Il visore è un display binoculare costituito da due schermi OLED ad alta definizione, uno per ciascun occhio *(Figura 64)*.



Figura 64 – Il visore FALKO

Sui display possono essere visualizzate informazioni video relative all’intervento, come le immagini della telecamera, l’imaging radiologico del paziente o la schermata di un PC; l’operatore può inoltre regolare in tempo reale parametri come zoom, contrasto, luminosità e saturazione. [127] Il visore riceve un segnale video HDMI ad alta definizione

non compresso; la trasmissione può avvenire via cavo oppure in modalità wireless, senza necessità di configurazioni di rete o di connessione a internet. Un joystick posto sul visore consente di passare da una sorgente all'altra oppure di visualizzarle contemporaneamente, in una finestra PIP (Picture-in-Picture) o affiancate. [128]

Le telecamere OKKIO sono le sorgenti video dedicate del sistema e vengono prodotte in due versioni principali. La OKKIO 4K è bidimensionale e monta un sensore Sony capace di acquisire video e fotografie fino alla risoluzione 4K (3840 × 2160 pixel); lo zoom arriva fino a 40X con focus manuale o autofocus. È disponibile con collegamento HDMI o USB e con ottiche a diversa distanza di lavoro; grazie a un aggancio magnetico può essere installata rapidamente su un braccio articolato a più snodi *(Figura 65)*. [129]



Figura 65 – La telecamera bidimensionale OKKIO 4K.

La versione OKKIO 3D è invece una telecamera stereoscopica *(Figura 66)*: due ottiche affiancate riprendono la stessa scena da due punti di vista leggermente diversi, in modo analogo a quanto avviene con i due occhi. Entrambi i flussi vengono acquisiti in alta definizione e, una volta visualizzati nel visore, restituiscono secondo il produttore un ingrandimento ottico fino a 4X con percezione della profondità. [130] Nella parte sperimentale di questa tesi la telecamera 3D viene invece utilizzata a fuoco fisso, a circa 40 cm dal modello e senza ingrandimento.



Figura 66 – La telecamera stereoscopica OKKIO 3D, con le due ottiche affiancate.

Alle telecamere può essere associato un illuminatore LED dedicato; il dispositivo produce un fascio luminoso uniforme, con intensità fino a 24.000 lux e temperatura di

colore di 5700 K. Un pedale wireless permette infine di acquisire fotografie e video durante le procedure senza interrompere il lavoro. Nella telecamera OKKIO 3D il LED è integrato. [131]
FALKONNECT è l'unità centrale del sistema, un processore video medicale che riceve i segnali dai dispositivi di imaging e li distribuisce verso i display o le piattaforme di streaming. L'unità permette di gestire due sorgenti video scelte tra microscopio, lampada con telecamera, telecamera OKKIO, PC, navigatore implantare, scanner 3D, rilevatore apicale e monitor multiparametrico; la selezione avviene direttamente dal joystick posto sul visore. [132]
Al sistema può essere abbinata una scheda di acquisizione video (FALKO Capture); il dispositivo riceve il segnale HDMI della telecamera e lo converte in un flusso USB 3.0 leggibile dal PC.
In questa tesi l'elaborazione video del segnale è affidata al laptop in dotazione, che elabora il video tramite un software (AmCap) e lo invia al visore effettuando un mirroring dello schermo del laptop.

Principio di funzionamento

Il funzionamento del sistema è suddiviso in tre fasi: acquisizione delle immagini, elaborazione e trasmissione del segnale, visualizzazione nel visore.
Nella prima fase la telecamera viene collocata su un braccio articolato al di sopra del campo operatorio e orientata in modo da inquadrare l'area di lavoro. Nel caso della telecamera 2D viene acquisito un unico flusso video ad alta risoluzione. Nel caso della telecamera 3D vengono invece acquisiti due flussi sincronizzati, uno per ciascuna ottica; la loro separazione riproduce la distanza interpupillare e genera la disparità binoculare necessaria alla visione stereoscopica.
Nella seconda fase il segnale video in uscita dalla telecamera viene inviato al laptop.
Si differenzia la telecamera 2D da quella 3D poiché in quest'ultima il segnale video viene inviato al laptop tramite cavo USB, acquisito dal software AmCap dove le due immagini ottenute dalla telecamera 3D vengono visualizzate affiancate in formato "side-by-side". Compaiono quindi due riprese quasi identiche della stessa scena, corrispondenti all'occhio destro e a quello sinistro. Il contenuto dello schermo viene poi duplicato sul visore tramite mirroring con cavo HDMI; l'immagine che giunge al visore è quindi identica a quella visibile sul monitor del laptop.
La latenza complessiva della catena di trasmissione è contenuta, seppur non assente. Un ritardo percepibile tra il movimento delle mani e l'immagine osservata comprometterebbe la coordinazione occhio-mano dell'operatore.
L'ultima fase è effettuata dal visore, che forma la visione tridimensionale.

Nel caso della telecamera 2D invece il segnale video non viene direttamente inviato al laptop, ma prima passa in un'unità di acquisizione video esterna che lo trasmette tramite USB al PC, nel quale subisce un'elaborazione software per poi essere inviato tramite mirroring al visore con cavo HDMI.

Nella modalità 2D la stessa immagine viene mostrata a entrambi gli occhi; l'operatore osserva quindi un ingrandimento del campo operatorio privo di informazione di profondità, in modo analogo a quanto avviene guardando un monitor.

Nella modalità 3D il visore separa le due metà dell'immagine side-by-side e le invia al display corrispondente: l'occhio destro riceve la ripresa dell'ottica destra e l'occhio sinistro quella dell'ottica sinistra. Il cervello fonde le due immagini in una unica tridimensionale, ripristinando la percezione della profondità. La visione con percezione della profondità conta soprattutto nelle procedure che richiedono un controllo fine della stessa, come la preparazione delle cavità.

La funzione di AR viene poi aggiunta tramite elaborazione software con WindowTop: un programma disponibile sul Microsoft Store che sovrappone un'immagine PNG a qualsiasi schermata già aperta in Windows. È stata quindi creata questa immagine con le linee di restauro dell'elemento dentale in esame in modo da poterla sovrapporre e allineare manualmente alla morfologia occlusale del molare inquadrato dalla telecamera; il partecipante vede così nel visore, oltre alla cavità reale, anche una guida grafica per la modellazione della morfologia occlusale.
Non essendo un'elaborazione software gestita dal visore, l'allineamento delle linee di restauro è manuale e non è possibile ruotare il modello mantenendo le linee di restauro in posizione.

4.4 Risultati

Composizione del campione

All'esperimento partecipano 30 studenti di età media di 26 anni, con valori compresi tra 24 e 32; 18 uomini e 12 donne, due dei quali odontotecnici. L'esperienza clinica è

distribuita in modo mediamente omogeneo: 10 partecipanti dichiarano da 0 a 10 restauri eseguiti prima della prova, 16 da 11 a 50, 2 da 51 a 100 e 2 oltre 100 *(Figura 67)*. Nel campione ci sono studenti alle prime armi e studenti con più esperienza ma 26 partecipanti su 30 hanno realizzato meno di 50 restauri.

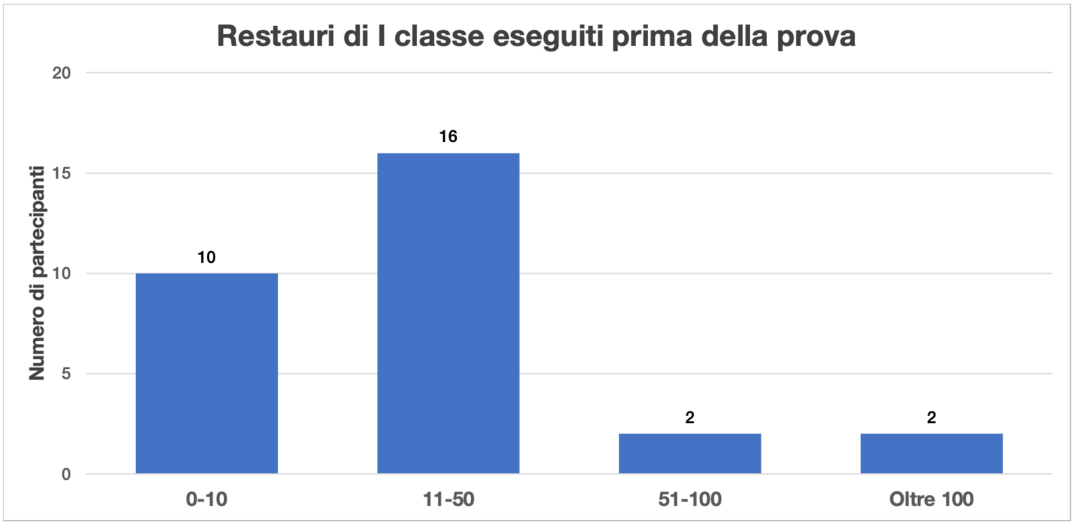


Figura 67 – Numero di partecipanti per classe di restauri di I classe eseguiti prima della prova.

21 partecipanti riferiscono un difetto visivo, con miopia, astigmatismo e ipermetropia tra i difetti indicati, e 17 utilizzano occhiali o lenti a contatto durante la pratica clinica. Solo 4 usano abitualmente occhialini ingrandenti. 17 dichiarano di passare molte ore davanti al computer o di essere videogiocatori, caratteristica raccolta per verificare se l'abitudine alla visione su schermo modifichi la risposta al visore.

I tempi di esecuzione e le correlazioni tra le modalità

La visione a occhio nudo risulta la modalità più rapida, con un tempo medio di 5'08'' *(Tabella 2)*. Seguono, in ordine crescente di durata, il 3D AR con 5'36'', il 2D AR con 6'04'', il 3D con 6'20'' e il 2D con 6'31'' *(Figura 68)*.

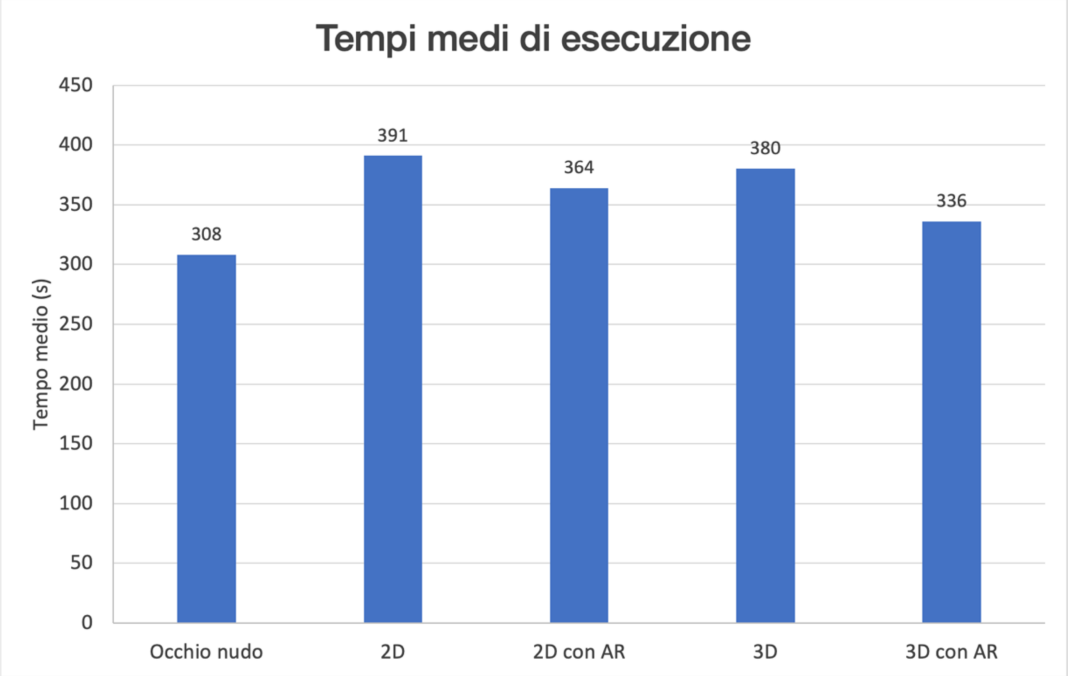


Figura 68 – Tempi medi di esecuzione del restauro nelle cinque modalità di visione, in secondi.

	Media (s)	Mediana (s)	Differenza rispetto all'occhio nudo	Minimo e massimo (s)
Occhio nudo	308	309	–	60–699
2D	391	404	+27%	117–805
2D con AR	364	358	+18%	121–863
3D	380	360	+23%	195–720
3D con AR	336	318	+9%	160–503

Tabella 2 – Tempi di esecuzione del restauro nelle cinque modalità di visione. La differenza è calcolata sul tempo medio rispetto alla visione a occhio nudo. Il minimo e il massimo sono il tempo più breve e il tempo più lungo registrati in quella modalità: indicano quanto i singoli operatori si differenziano tra loro, perché due modalità con la stessa media possono avere una dispersione molto diversa.

Rispetto alla visione a occhio nudo il 2D richiede in media il 27% di tempo in più, il 3D il 23%, il 2D AR il 18% e il 3D AR il 9%. L'occhio nudo risulta più rapido nel 63% dei casi rispetto al 2D e al 2D AR, nel 73% dei casi rispetto al 3D e nel 67% rispetto al 3D AR. Il tempo più breve del singolo modello si verifica a occhio nudo in 13 casi, con il 2D in 6, con il 2D AR in 5, con il 3D AR in 4 e con il 3D in 2.
A parità di visore l'aggiunta della guida grafica riduce il tempo medio, da 6'31'' a 6'04'' nel 2D e da 6'20'' a 5'36'' nel 3D. La riduzione si verifica in 19 casi su 30 nel confronto tra 2D e 2D AR e in 16 su 30 nel confronto tra 3D e 3D AR *(Figura 69)*.

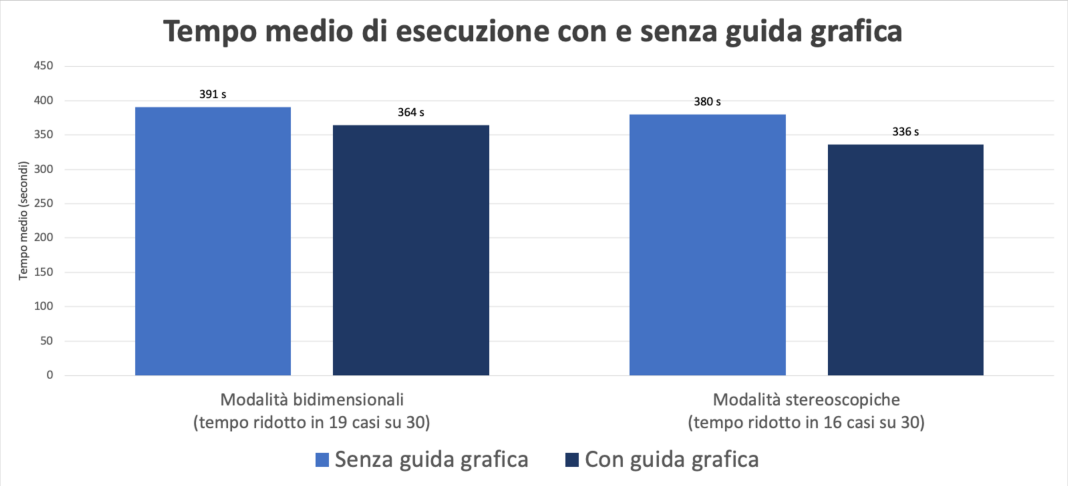


Figura 69 – Tempo medio di esecuzione con e senza guida grafica, nelle modalità bidimensionali e in quelle stereoscopiche.

I tempi dei 30 modelli vengono confrontati tra loro per verificare se un soggetto rapido in una modalità resta rapido anche nelle altre. Le quattro modalità con il visore si comportano in modo coerente: chi risulta veloce in una lo è in genere anche nelle altre, e la somiglianza maggiore riguarda il 2D e il 2D AR.
La visione a occhio nudo si comporta invece in modo indipendente: il tempo rilevato senza visore non anticipa il tempo ottenuto con il visore. L'ordine di esecuzione non produce effetti degni di nota, infatti nella sequenza delle prove non si osserva alcun apprendimento progressivo. I soggetti complessivamente più lenti sono anche quelli che variano di più tra le cinque modalità.

Preferenze operative ed efficacia percepita

Per riempire la cavità 20 partecipanti su 30 indicano come preferita la visione a occhio nudo, 5 il 3D AR, 4 il 3D e 1 il 2D *(Tabella 3 e Figura 70)*. Sulla modellazione della morfologia occlusale l'occhio nudo scende a 13 preferenze, il 3D AR sale a 11 e il 3D a 6.

Alla domanda su quale modalità avesse permesso il restauro migliore 18 partecipanti rispondono occhio nudo, 6 il 3D, 5 il 3D AR e 1 il 2D. Sulla velocità percepita la risposta è quasi unanime: 26 partecipanti su 30 indicano l'occhio nudo, 3 il 3D AR e 1 il 2D.

La modalità preferita per riempire la cavità e quella giudicata più veloce coincidono in 22 partecipanti su 30, e la stessa cosa si osserva tra la modalità preferita per la modellazione e quella con cui lo studente ritiene di aver eseguito il restauro migliore, di nuovo 22 su 30.

	Riempimento della cavità	Modellazione della morfologia occlusale	Restauro migliore	Restauro più veloce
Occhio nudo	20	13	18	26
2D	1	0	1	1
2D con AR	0	0	0	0
3D	4	6	6	0
3D con AR	5	11	5	3

Tabella 3 – Numero di preferenze espresse dai 30 partecipanti per ciascuna modalità nelle quattro domande di confronto diretto.

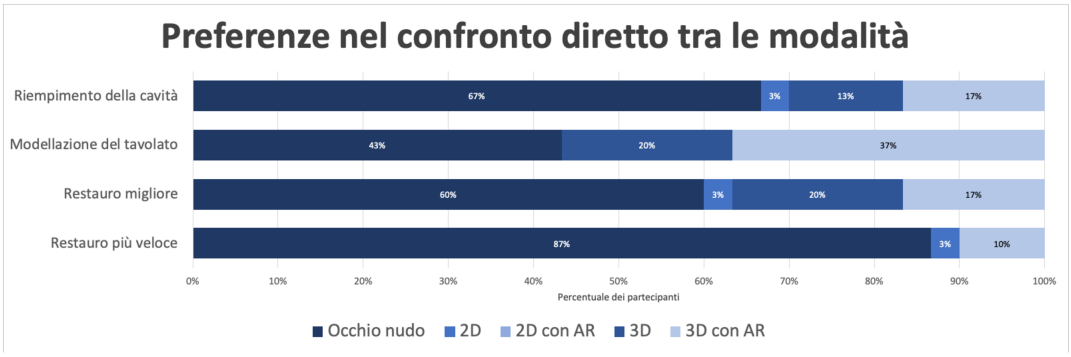


Figura 70 – Distribuzione percentuale delle preferenze nelle quattro domande di confronto diretto tra le modalità.

Le stesse preferenze, espresse in percentuale, sono rappresentate nella *Figura 71* e nella *Figura 72*. Nel primo grafico si mettono a confronto il riempimento della cavità e la modellazione della morfologia occlusale: l'occhio nudo passa dal 66,7% al 43,3%, mentre il 3D AR sale dal 16,7% al 36,7%. Nel secondo grafico il confronto riguarda il restauro giudicato migliore e quello giudicato più veloce; sulla velocità l'occhio nudo arriva all'86,7% e le modalità con visore si fermano al 10%, mentre sulla qualità percepita l'occhio nudo scende al 60% e il 3D, con o senza guida grafica, raggiunge complessivamente il 36,7%.

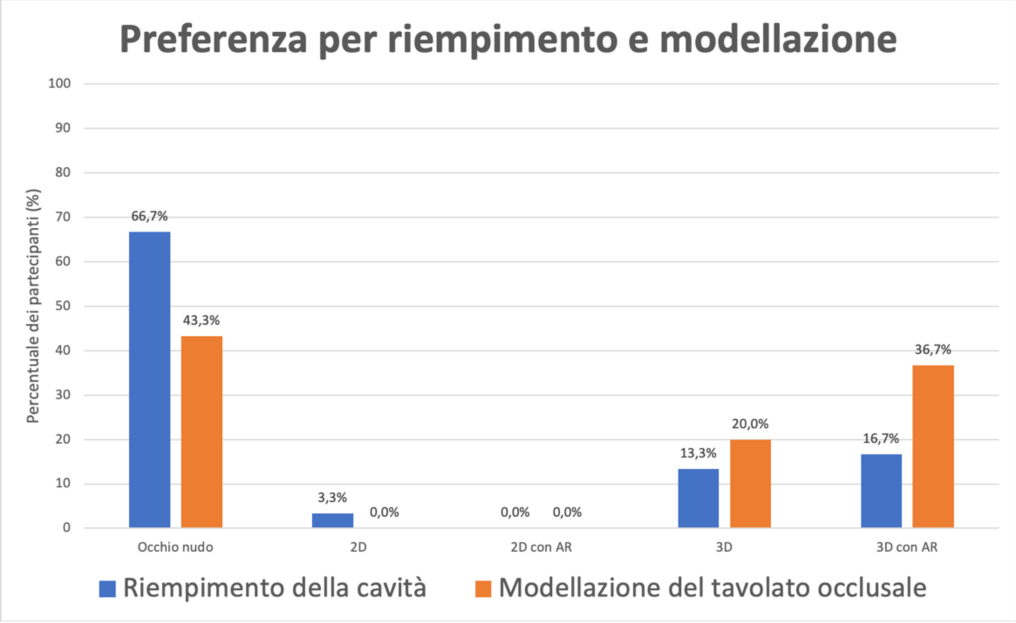


Figura 71 – Preferenze per il riempimento della cavità e per la modellazione della morfologia occlusale nelle cinque modalità di visione, in percentuale sui 30 partecipanti.

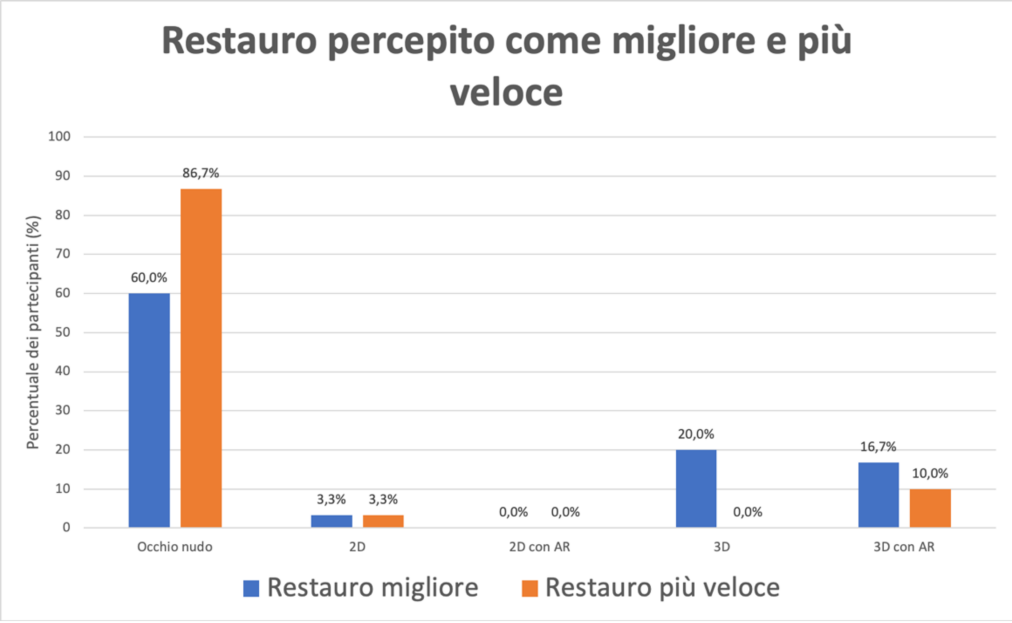


Figura 72 – Modalità con cui i partecipanti ritengono di aver eseguito il restauro migliore e il restauro più veloce, in percentuale sui 30 partecipanti.

Il giudizio di efficacia viene raccolto su una scala a sette livelli, da "non efficace" a "estremamente efficace", ripetuta per ciascuna delle cinque modalità. La visione a occhio nudo raccoglie 17 giudizi di estremamente efficace e 11 di molto efficace: 28 valutazioni su 30 nei due livelli più alti. Il 2D sta all'estremo opposto, con 21 partecipanti che lo giudicano "poco", "molto poco" o "non efficace" *(Figura 73)*.
L'aggiunta della AR al 2D non modifica in modo sostanziale quanto descritto, con 19 giudizi negativi (da "non efficace" a "poco efficace") su 30 e 6 di "abbastanza efficace". Il 3D ottiene 13 giudizi di "abbastanza efficace" e sette di "molto efficace"; il 3D AR sale a 23 valutazioni positive (da "abbastanza efficace" a "estremamente efficace") su 30, di cui 3 estremamente efficace.

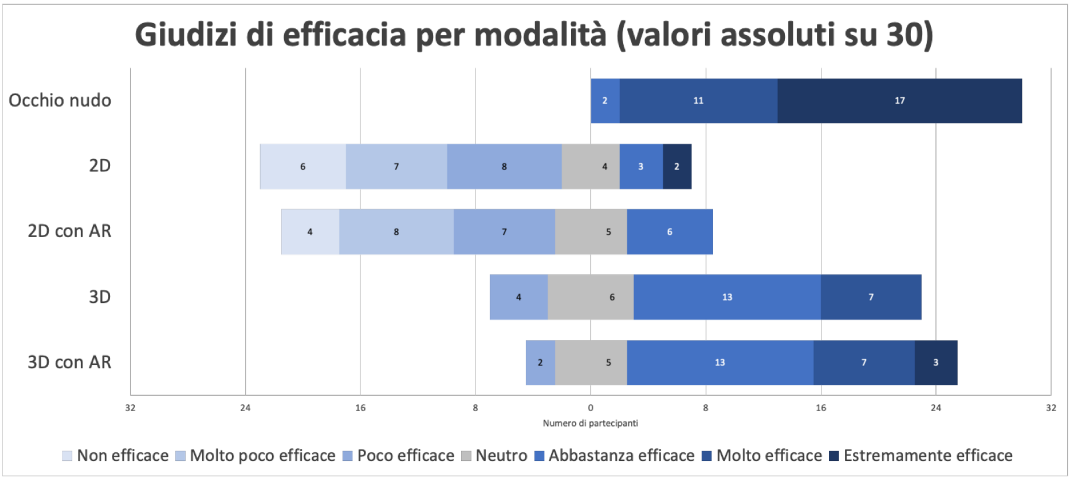


Figura 73 – Distribuzione dei giudizi di efficacia nelle cinque modalità, con i giudizi negativi a sinistra e quelli positivi a destra del livello neutro.

Confrontando le risposte dello stesso partecipante sulle due modalità bidimensionali, 10 giudizi migliorano con l'aggiunta della guida grafica, 13 restano identici e 7 peggiorano. Nelle due modalità con 3D i giudizi che migliorano sono ancora 10, ma quelli che peggiorano scendono a 2 e la media sale da 4,8 a 5,1 *(Tabella 4)*.

Confronto	Giudizi migliorati	Giudizi invariati	Giudizi peggiorati	Media senza AR	Media con AR
2D e 2D con AR	10	13	7	3,0	3,0
3D e 3D con AR	10	18	2	4,8	5,1

Tabella 4 – Variazione del giudizio di efficacia dello stesso partecipante con l'aggiunta della guida grafica, nelle due modalità bidimensionali e nelle due stereoscopiche (30 partecipanti).

La sezione del questionario dedicata al solo visore mette a confronto le quattro modalità di visione. 27 partecipanti su 30 indicano una delle due modalità 3D come quella che restituisce la maggiore profondità di campo: 14 il 3D AR e 13 il 3D. Sulla

coordinazione occhio-mano e sulla precisione dei movimenti il 3D AR raccoglie 12 preferenze e il 3D 10, mentre 4 partecipanti scelgono il 2D, 1 il 2D AR e 3 dichiarano che nessuna delle opzioni risulta soddisfacente *(Tabella 5)*.

	Più simile alla visione diretta	Maggiore profondità di campo	Migliore coordinazione occhio-mano	Minore fastidio agli occhi
2D	4	2	4	5
2D con AR	1	1	1	0
3D	13	13	10	13
3D con AR	12	14	12	9
Nessuna opzione	0	0	3	3

Tabella 5 – Confronto tra le quattro modalità con visore nelle domande riservate ai soli utilizzatori del dispositivo.

Sono raccolti i dati di domande relative alle sole modalità con il visore. Sulla somiglianza con la visione diretta il 3D raccoglie il 43,3% e il 3D AR il 40%; sulla profondità di campo i due valori sono rispettivamente 43,3% e 46,7%; sulla coordinazione occhio-mano, il 3D AR arriva al 40%, 12 partecipanti su 30, e il 3D al 33,3%, 10 su 30. Il 2D AR resta sotto il 4% in tutte e tre le domande *(Figura 74)*.

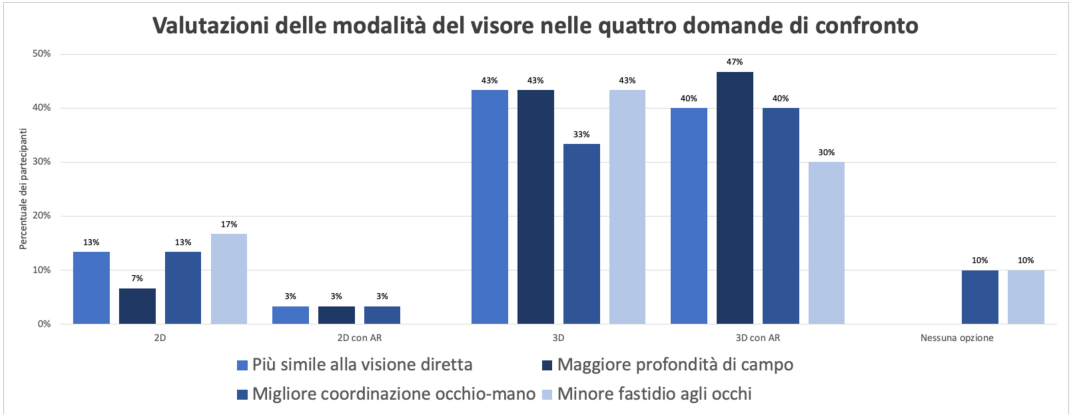


Figura 74 – Le quattro domande riservate al visore a confronto, in percentuale sui 30 partecipanti.

Il comfort visivo e l'utilità percepita di ingrandimento e AR

13 partecipanti indicano il 3D come la modalità che crea meno fastidio agli occhi e 9 il 3D AR: 22 su 30. 5 scelgono il 2D, 3 dichiarano che tutte le opzioni con il visore risultano fastidiose *(Figura 75)*. L'entità del disturbo, raccolta su una scala da 0 a 10, vale in media 6,7 per il 2D con o senza AR e 4,9 per il 3D.

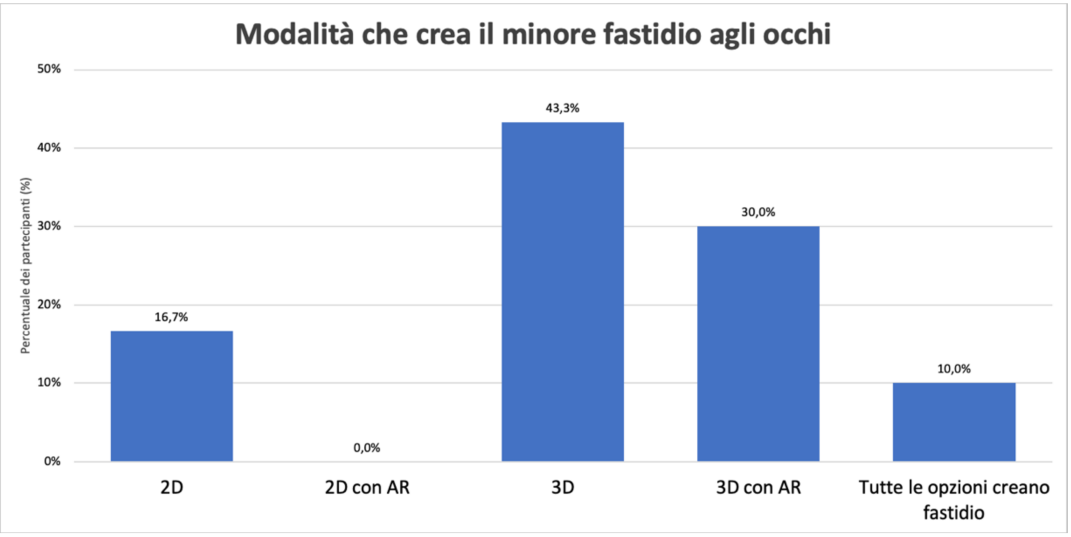


Figura 75 – Modalità con visore che crea il minore fastidio agli occhi, in percentuale.

Il momento di comparsa del fastidio separa ancora le due modalità. Con il 2D 11 partecipanti riferiscono un disturbo immediato, 14 lo avvertono durante il restauro, 1 soltanto dopo la fine della procedura e 4 non lo avvertono mai. Con il 3D 14 partecipanti non riportano alcun fastidio, 12 lo avvertono durante il restauro e 4 dopo la fine *(Figura 76)*. Il confronto tra le versioni con e senza AR mostra un quadro uniforme. 16 partecipanti indicano lo stesso momento di insorgenza del fastidio nel 3D e nel 3D AR (12 "durante il restauro" e 4 "dopo il restauro"). Nel 2D e nel 2D AR i dati sono simili ma non uguali; in ogni caso la stragrande maggioranza del campione accusa fastidi visivi immediatamente e durante il restauro.

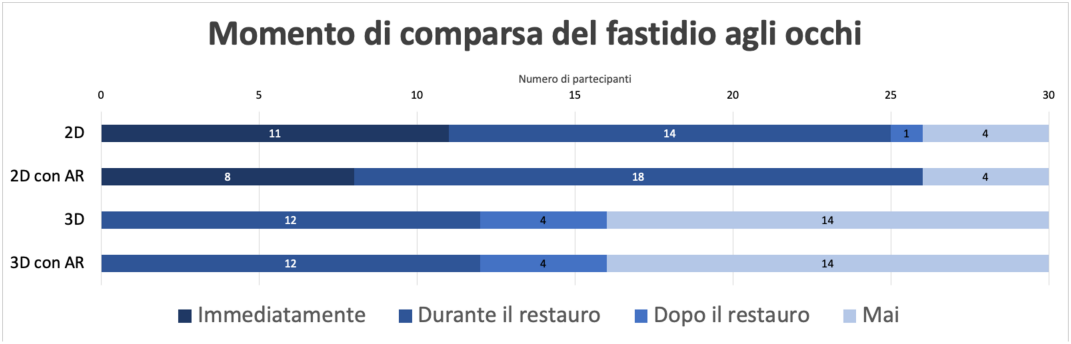


Figura 76 – Momento di comparsa del fastidio agli occhi nelle quattro modalità con visore, su 30 partecipanti.

Chi riferisce un fastidio elevato giudica meno efficace la modalità corrispondente. I 17 partecipanti che assegnano al 2D un fastidio pari o superiore a 7 danno a quella modalità un punteggio medio di efficacia di 2,3 sui sette livelli, contro il 3,9 dei restanti 13. Nel 3D il confronto è tra i 10 partecipanti con fastidio pari o superiore a 6, che valutano il 3D AR 4,4, e gli altri 20, che lo valutano 5,5 *(Figura 77)*.

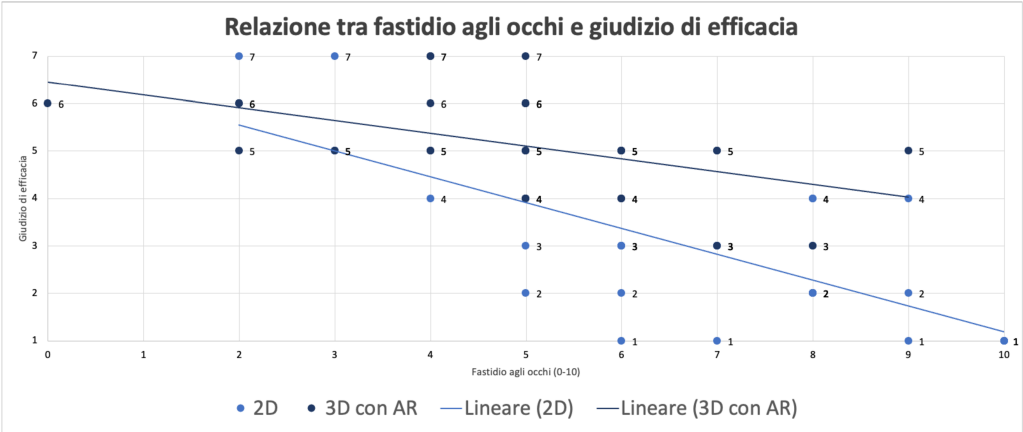


Figura 77 – Relazione tra intensità del fastidio agli occhi e giudizio di efficacia nel 2D e nel 3D con AR, con retta di tendenza per ciascuna modalità.

L'ingrandimento, presente nella prova soltanto nella modalità 2D, raccoglie il punteggio medio più alto tra le domande a scala del questionario: 7,8 su 10 *(Tabella 6)*. Il dato riguarda la percezione dei partecipanti e non viene messo in relazione con i tempi di esecuzione riportati precedentemente. Alla AR i partecipanti attribuiscono 6,1 su 10. Lo stesso punteggio medio viene assegnato alla domanda sull'aiuto fornito dalla guida grafica nella ricostruzione dell'anatomia della morfologia occlusale; le due domande vengono poste in forma separata per controllo, e infatti hanno lo stesso punteggio medio, confermando la veridicità dello studio. Le domande sul fastidio visivo confermano quanto detto in precedenza: il 2D è sensibilmente più fastidioso del 3D. L'adattamento all'uso del visore riceve il punteggio medio più basso.

Domanda	Media
Utilità dell'ingrandimento	7,8
Utilità della realtà aumentata	6,1
Aiuto della guida grafica nell'anatomia occlusale	6,1
Fastidio riferito con il visore 2D	6,7
Fastidio riferito con il visore 3D	4,9
Adattamento all'uso del visore	4,3

Tabella 6 – Punteggi attribuiti dai partecipanti sulle scale da 0 a 10.

Esperienza dei partecipanti

I 20 partecipanti con più di 10 restauri eseguiti prima della prova attribuiscono punteggi di efficacia più alti alle modalità stereoscopiche rispetto ai 10 con esperienza minore: 5,0 contro 4,4 sul 3D e 5,3 contro 4,8 sul 3D AR *(Figura 78)*. Anche il beneficio riferito alla guida grafica nella ricostruzione dell'anatomia occlusale è maggiore nel primo gruppo, 6,4 contro 5,7 su 10 *(Figura 79)*.

Una differenza si osserva anche in base alle abitudini di magnificazione. I quattro partecipanti che usano abitualmente occhialini ingrandenti attribuiscono all'ingrandimento un punteggio medio di 9,5 contro il 7,5 degli altri 26 e alla guida grafica per l'anatomia 8,5 contro 5,8; sebbene il campione di coloro che usano abitualmente occhialini sia molto piccolo per una stima corretta.

I 21 partecipanti con un difetto visivo attribuiscono alla AR un'utilità media di 5,4 su 10, contro 7,6 dei nove partecipanti senza difetti visivi. Chi porta occhiali o lenti a contatto durante la pratica clinica giudica anche l'occhio nudo leggermente meno efficace, 6,3 contro 6,8 sui sette livelli, una differenza minima.

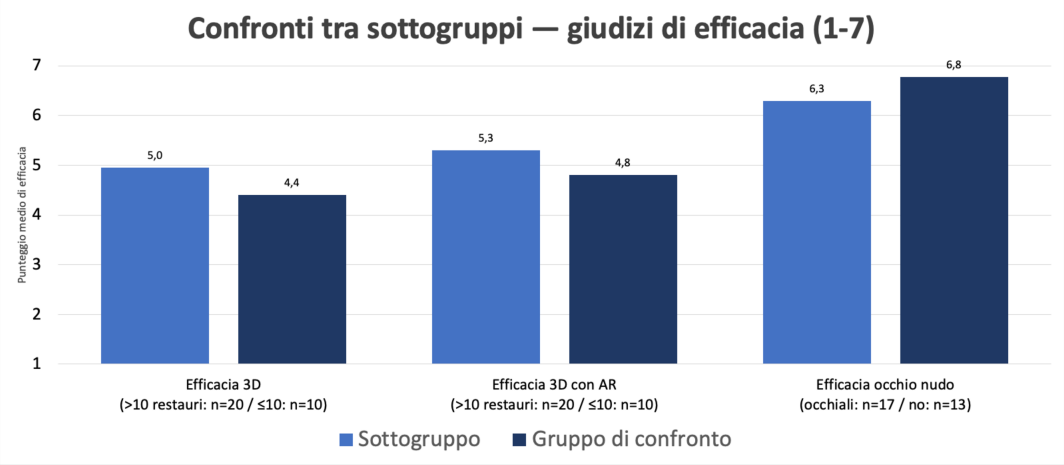


Figura 78 – Confronto tra sottogruppi nei giudizi di efficacia, su scala a sette livelli.

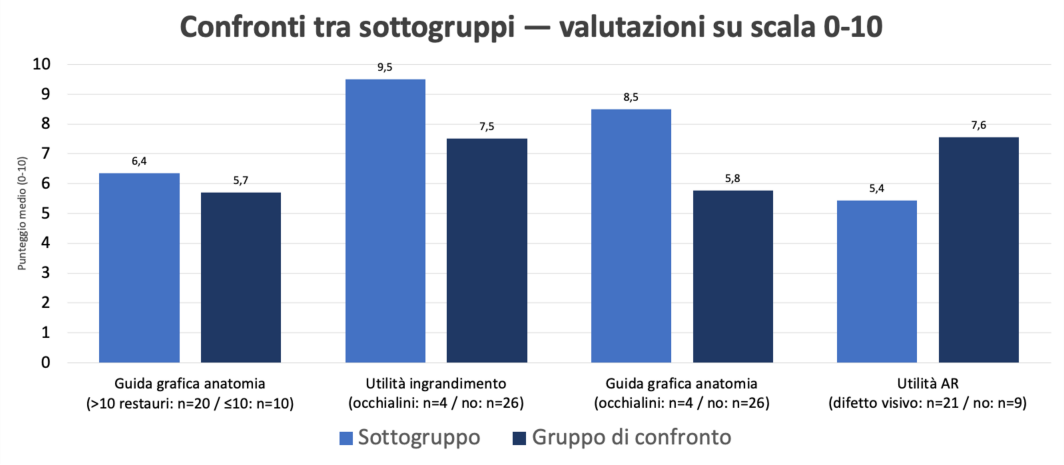


Figura 79 – Confronto tra sottogruppi nelle valutazioni su scala da 0 a 10.

La domanda sui metodi da utilizzare nella didattica universitaria per insegnare la modellazione della morfologia occlusale ammette più risposte e raccoglie 48 indicazioni: 22 per l'occhio nudo, 12 per il 3D AR, 11 per il 3D, 2 per il 2D AR e 1 per il 2D. In percentuale l'occhio nudo si ferma al 45,8% e le due modalità stereoscopiche insieme arrivano al 47,9%. Sulla pratica clinica quotidiana le indicazioni scendono a 37 e la distribuzione si sposta: 28 per l'occhio nudo, 6 per il 3D AR, 2 per il 3D e 1 per il 2D, cioè il 75,7% contro il 21,6% delle due modalità stereoscopiche *(Tabella 7)*.

Modalità	Didattica universitaria	Pratica clinica quotidiana
Occhio nudo	22	28
2D	1	1
2D con AR	2	0
3D	11	2
3D con AR	12	6

Tabella 7 – Modalità indicate dai partecipanti per l'insegnamento della modellazione della morfologia occlusale e per l'attività clinica quotidiana.

La distribuzione delle indicazioni è rappresentata nella *Figura 80* per la didattica e nella *Figura 81* per la pratica clinica. Il confronto tra i due grafici mostra lo spostamento: la quota dell'occhio nudo passa dal 45,8% al 75,7%, quella del 3D con AR dal 25% al 16,2% e quella del 3D dal 22,9% al 5,4%.

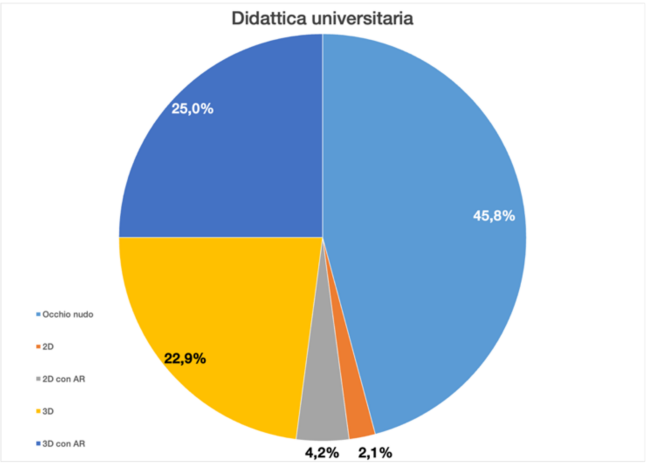


Figura 80 – Metodi indicati per la didattica universitaria in percentuale

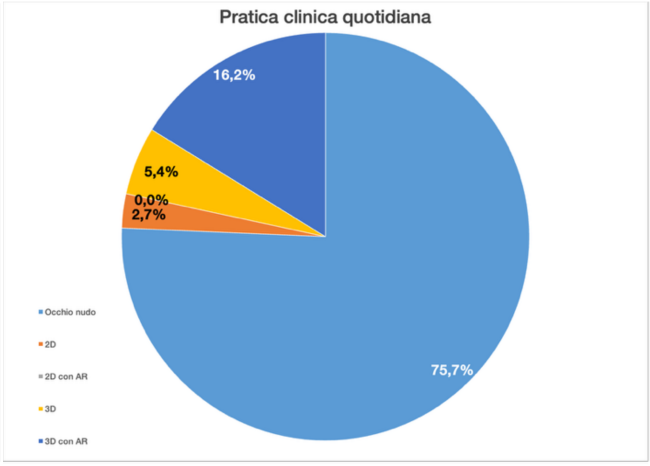


Figura 81 – Metodi indicati per la pratica clinica quotidiana in percentuale

4.5 Discussione

Questa tesi valuta l'impatto della AR nella ricostruzione di una cavità di I classe, un impatto che non si riduce a un solo dato ma richiede più indicatori letti insieme. Nessuna delle quattro modalità con visore raggiunge la visione a occhio nudo per preferenza, rapidità e utilizzo clinico, ma il 3D AR è la più apprezzata e la più vicina alla visione diretta. Il 3D AR indica anche la direzione da seguire: una visione il più possibile diretta, integrata da una guida grafica e da informazioni digitali. Si è voluto cercare una correlazione che possa orientare lo sviluppo di nuovi dispositivi, poiché la tecnologia attuale ha ancora ampi margini di miglioramento.

Ogni modalità con visore è più lenta dell'occhio nudo, con un incremento che va dal 9% del 3D AR al 27% del 2D.
La spiegazione è semplice. Nel 2D, con o senza AR, la scena viene riprodotta su un piano ottico fisso e da una sola immagine non si può ricostruire la profondità. Il 3D invece, grazie alle due ottiche, riproduce più fedelmente la visione a occhio nudo e permette al clinico di operare con i meccanismi che usa nella pratica abituale, a occhio nudo o con sistemi ingrandenti. Il 2D risulta quindi l'alternativa meno efficace e meno apprezzata dai partecipanti.

I partecipanti non avevano mai usato il visore prima della prova; con un utilizzo prolungato è lecito pensare che il clinico si adatti allo strumento e che la differenza di velocità si riduca.

Un altro aspetto migliorabile è l'allineamento manuale della sovrapposizione, che obbligava a tenere fermo il modello e può aver rallentato il restauro in tutte le modalità. Con un POV statico come quello della telecamera servirebbe un software che riconosca il dente in automatico e ancori la guida in modo markerless, adattandola al suo movimento. Con un POV dinamico sugli occhi del clinico, cioè con occhiali optical see-through che lasciano la visione diretta e vi sovrappongono la guida, i calcoli sarebbero nettamente superiori e richiederebbero un hardware diverso da quello impiegato in questo esperimento ma l'effetto restituito all'utente sarebbe più naturale; la prima opzione è più compatibile con la didattica mentre la seconda più con la pratica clinica.

I tempi del 3D e del 3D AR sono più simili tra loro che nelle altre modalità; la visione stereoscopica unita alla guida grafica potrebbe quindi facilitare l'adattamento dell'operatore. È un'ipotesi compatibile con i dati, ma senza una valutazione della qualità non si può dire se questi restauri siano anche i migliori.

Dai dati si nota che chi è rapido con il visore in una modalità qualsiasi tende a esserlo anche nelle altre, mentre il tempo ottenuto senza visore non anticipa quello ottenuto con il visore. Il visore sembra quindi richiedere un'abilità diversa: adattarsi a quel tipo di visione conta più della rapidità nel ricostruire una cavità di I classe a occhio nudo.

Non si osserva alcun miglioramento progressivo e, dato l'ordine casuale delle prove, il risultato non dipende dalla posizione della modalità di visione nella serie. Probabilmente cinque ripetizioni in una sola seduta, su un compito già noto, non bastano a produrre un apprendimento misurabile. I soggetti più lenti sono anche quelli con la maggiore variabilità tra le modalità.

L'effetto della guida grafica dipende dall'immagine su cui viene sovrapposta. Tra 2D e 2D AR i giudizi di efficacia migliorano in dieci casi, restano invariati in tredici e peggiorano in sette, con la media ferma a 3,0; tra 3D e 3D AR i miglioramenti sono ancora dieci, i peggioramenti scendono a due e la media sale da 4,8 a 5,1. La guida riduce il tempo in 19 partecipanti su 30 nel confronto bidimensionale e in 16 su 30 in quello stereoscopico, ma nel 3D la riduzione media è quasi il doppio. La guida grafica non è quindi un elemento indipendente: funziona quando l'immagine contiene già informazione di profondità.
Una lettura possibile è che le linee di restauro siano più facili da usare quando l'operatore sa già collocare il modello nello spazio. Nel 2D la guida resta un disegno appoggiato sul campo operatorio; nel 3D diventa un riferimento sovrapposto a una scena percepita in profondità. Il questionario va nello stesso senso: 27 partecipanti su 30 attribuiscono la maggiore profondità di campo a una modalità stereoscopica e 25 su 30 la indicano come la più simile alla visione diretta. Il 2D AR resta sotto il 4% delle preferenze in tutte le domande sul visore; su 30 partecipanti non si può distinguere un effetto assente da uno troppo piccolo, ma il dato va considerato nelle ricerche future.

Per riempire la cavità 20 partecipanti su 30 scelgono l'occhio nudo e 5 il 3D AR; per la modellazione della morfologia occlusale l'occhio nudo scende a 13 e il 3D AR sale a 11, la distanza minima del questionario. Riempire significa gestire un materiale e adattarlo alle pareti, in una zona che la guida non descrive; modellare significa riprodurre un'anatomia, cioè ciò che le linee di restauro rappresentano. L'AR ha quindi il suo impatto maggiore proprio nella modellazione della morfologia occlusale.

La modalità preferita per il riempimento coincide con quella giudicata più veloce in 22 partecipanti su 30, e quella preferita per la modellazione coincide con quella del restauro migliore nello stesso numero di casi: il partecipante pensa alla velocità nel riempimento e alla qualità nella modellazione. Un sistema basato sulla visione a occhio

nudo, con informazioni AR aggiunte quando servono, sarebbe quindi la combinazione più vicina alle richieste dei partecipanti.

Il fastidio passa da una media di 6,7 nel 2D a 4,9 nel 3D e 22 partecipanti su 30 indicano una modalità stereoscopica come la meno fastidiosa. Con il 2D il disturbo compare subito in 11 partecipanti, mentre con il 3D 14 non lo avvertono affatto. Il momento di insorgenza è quasi lo stesso con e senza guida, quindi il disturbo dipende dal tipo di visione più che dal contenuto sovrapposto. L'assenza di profondità nel 2D richiede un grande sforzo di adattamento, minore nella visione stereoscopica; a questo si aggiunge il POV della telecamera, diverso da quello dell'occhio, che un sistema a visione diretta eliminerebbe.

Il fastidio pesa anche sul giudizio: i 17 partecipanti che assegnano al 2D un fastidio pari o superiore a 7 lo valutano 2,3 su sette livelli, contro 3,9 degli altri, e nel 3D il confronto è tra 4,4 e 5,5. Anche nel 3D 12 partecipanti avvertono il disturbo durante il restauro.

I 20 partecipanti con più di 10 restauri alle spalle danno punteggi più alti alle modalità stereoscopiche, 5,0 contro 4,4 sul 3D e 5,3 contro 4,8 sul 3D AR, e alla guida grafica, 6,4 contro 5,7 su 10. Sono però più lenti in tutte le condizioni con visore, per esempio 353,7 contro 302,0 secondi nel 3D AR, mentre a occhio nudo i due gruppi coincidono. Chi ha più esperienza perciò apprezza di più il dispositivo, in particolare l'AR, ma con il dispositivo impiega più tempo.

Nella stessa direzione vanno i quattro utilizzatori di occhialini ingrandenti, che assegnano all'ingrandimento 9,5 su dieci e alla guida grafica 8,5 contro 5,8; con quattro persone il dato resta un'osservazione preliminare.

Va invece in controtendenza il dato sui 21 partecipanti con un difetto visivo, che attribuiscono alla AR un'utilità di 5,4 su dieci contro 7,6 degli altri nove. L'ipotesi che l'ingrandimento digitale possa compensare un deficit visivo non trova riscontro. Lo stesso sottogruppo è più lento in tutte le condizioni con visore, per esempio 356,5 contro 289,7 secondi nel 3D AR, e riferisce più fastidio, mentre a occhio nudo è leggermente più rapido. Si può ipotizzare che l'uso del visore in persone con deficit visivi peggiori l'adattamento e il comfort, oppure che chi convive con un difetto visivo sia più sensibile a un'immagine virtuale; nessuna delle due spiegazioni è verificabile con i dati raccolti.

I diciassette partecipanti abituati a molte ore di schermo o al gioco elettronico sono più rapidi nelle modalità bidimensionali ma non in quelle stereoscopiche, e dichiarano un

adattamento al visore migliore, 4,65 contro 3,85. L'abitudine allo schermo sembra compensare ciò che manca all'immagine piatta e non aggiunge nulla quando la profondità è già restituita.

La maggior parte della letteratura sulla formazione restaurativa utilizza simulatori che sostituiscono il campo operatorio con un modello digitale e restituiscono il tatto attraverso un dispositivo a ritorno di forza; in questa tesi invece il campo operatorio resta fisico, il materiale è composito reale e il visore interviene soltanto sulla visione seguendo la configurazione video see-through. I risultati non sono quindi sovrapponibili a quelli dei simulatori, e vanno letti come dati sulla visione e non sulla simulazione.

La superiorità della visione diretta sui tempi di esecuzione trova un riscontro preciso nella letteratura chirurgica di Bloch et al. che hanno osservato come il vantaggio di una buona visione della profondità con entrambi gli occhi nella visione diretta si annulli quando lo stesso compito viene eseguito su un monitor. [28] Nel nostro campione accade lo stesso: ogni modalità con la telecamera è più lenta dell'occhio nudo e il 3D AR resta la più vicina alla condizione di riferimento.

Alaraimi et al. hanno confrontato in uno studio randomizzato su 28 studenti di medicina un esoscopio tridimensionale ad alta definizione con il microscopio operatorio in quattro esercizi di microchirurgia di base, cronometrando ciascun compito. La visione tridimensionale ha permesso tempi inferiori rispetto a quella bidimensionale. L'esoscopio è stato preferito dalla maggior parte degli studenti in tutte le domande richieste dal questionario, in particolare su messa a fuoco e qualità dell'immagine; inoltre due esercizi sono risultati più facili da eseguire con quel sistema. [133] Lo studio somiglia a quello di questa tesi per operatori inesperti, compito standardizzato e confronto tra modalità di visione sullo stesso soggetto. Anche il risultato coincide: la visione stereoscopica, più simile a quella umana, facilita l'adattamento al visore e avvicina i tempi a quelli dell'occhio nudo, che resta la modalità più veloce. Pur in un ambito diverso, anche la preferenza per la visione digitale stereoscopica concorda con i nostri dati.

L'effetto prodotto dalla guida grafica in AR è invece più complesso da valutare confrontando questa tesi con i dati in letteratura poiché la tecnica utilizzata di allineamento manuale fuoriesce dagli schemi classici descritti in precedenza e trova pochi riscontri. Con un allineamento automatico all'anatomia, mantenuto durante il movimento da un sistema di tracciamento, la configurazione diventerebbe più classica e più facile da confrontare con quelle già utilizzate.

Nel giudizio di efficacia si trova riscontro nella letteratura scientifica di De Boer et al. [134] che hanno rilevato un maggiore apprezzamento dell'ambiente tridimensionale rispetto a quello bidimensionale insieme a un effetto positivo sul rendimento dello studente. I nostri dati si allineano alla prima parte di quel risultato: le due modalità bidimensionali raccolgono insieme 40 giudizi negativi su 60, mentre le due modalità stereoscopiche raccolgono insieme 43 valutazioni positive su 60. Tra le modalità con visore, quindi, solo il 3D viene apprezzato dai partecipanti.

Sull'apprendimento la letteratura va in direzione opposta. Eve et al. hanno osservato un miglioramento significativo dell'efficienza su un simulatore aptico, con sessioni ripetute. [135] La differenza dipende dal disegno dello studio: le nostre cinque prove si svolgono in una sola seduta, mentre Eve et al. misurano il miglioramento su sessioni distribuite nel tempo. Inoltre qui il restauro viene giudicato dal partecipante stesso e non da un docente, perciò il dato potrà essere rivalutato con analisi future.

L'aspetto del comfort visivo è quello che meglio si allinea con i dati raccolti in letteratura. La revisione di Cossio et al. indica i disturbi oculomotori come l'effetto negativo più frequente dei visori immersivi, prima del disorientamento. [87] Nel nostro campione il fastidio segue l'andamento descritto sopra: diminuisce nel 3D, non scompare e non cambia con la guida grafica. Lo schema ottico del visore spiega questa distribuzione: in entrambe le modalità l'immagine si forma su un piano ottico fisso e l'accomodazione resta agganciata a quel piano, ma solo nel 3D le due immagini in stereoscopia ricreano l'effetto di profondità e attenuano il fastidio. [77]

Sul comfort di utilizzo i nostri dati si collocano nel mezzo rispetto a quanto afferma la letteratura. Difatti Ajmera et al. hanno riportato punteggi di fatica e sforzo più bassi con l'esoscopio tridimensionale rispetto al microscopio operatorio in chirurgia otologica, senza differenze sul carico mentale e sulla capacità di concentrazione. [104] Mentre una valutazione prospettica del VITOM 3D in chirurgia dell'orecchio non ha invece trovato differenze significative nel carico di lavoro percepito e attribuisce il vantaggio ergonomico alla durata maggiore delle procedure e alla necessità di riposizionare e rimettere a fuoco il sistema. [105] I nostri dati indicano che il fastidio agli occhi è presente, misurabile e si dimezza passando dal 2D al 3D; inoltre la durata delle prove, intorno ai sei minuti, è molto inferiore a quella di un intervento, quindi il confronto con quei lavori riguarda la direzione del fenomeno e non la sua entità.

Una misura strumentale di quel disturbo è stata pubblicata di recente. Yego et al. hanno misurato con un fotorefrattore l'accomodazione dell'occhio e la vergenza di sedici soggetti, prima e dopo un compito tridimensionale svolto in AR con un visore e poi ripetuto su oggetti fisici. [106] Dopo aver usato il visore in AR è stato visto come il

disaccoppiamento tra accomodazione e vergenza produce un effetto misurabile sul sistema oculomotore, non soltanto una sensazione riferita dall'operatore. Lo stesso disturbo è stato riferito in maniera soggettiva dai partecipanti a questa tesi.

Le revisioni sulla formazione chirurgica con AR riportano un miglioramento degli indicatori oggettivi di prestazione, tra cui i tempi di esecuzione e i tassi di errore, insieme a un carico cognitivo inferiore rispetto ai metodi convenzionali. [107] I dati raccolti in questa tesi non confermano nella sua totalità quanto affermato nella revisione; possiamo però affermare con certezza che la guida grafica riduce il tempo medio all'interno della stessa modalità di visione ma nessuna condizione con visore raggiunge la visione diretta. Non avendo però valutato le ricostruzioni non è possibile confrontare i tassi di errore. La stessa revisione elenca però ostacoli che possiamo riscontrare anche nella nostra tesi come la difficoltà di registrare la sovrapposizione virtuale sull'anatomia reale e l'affaticamento visivo associato ai visori.

In letteratura è stato pubblicato nel 2026 un articolo che si pone come obiettivo quello di migliorare l'insegnamento e l'apprendimento in odontoiatria con l'AR. È infatti stato utilizzato un sistema AR per l'insegnamento dell'intaglio dove si sovrappone il modello anatomico di riferimento al blocco di cera su cui lo studente lavora, con l'obiettivo dichiarato di ridurre la distanza tra l'illustrazione bidimensionale del libro e la struttura tridimensionale da riprodurre. [108] Il principio è lo stesso adottato in questa tesi; sebbene cambino oggetto della sovrapposizione, che nello studio è la forma completa dell'elemento e in questa tesi sono le linee della morfologia occlusale, e il materiale su cui lo studente modella. Il sistema utilizzato nello studio di Zhong et al. riconosce marker tridimensionali e sovrappone il modello dentale virtuale al blocco di cera su cui lo studente lavora; anche in quel caso l'elemento scelto è il primo molare inferiore. La sovrapposizione resta ancorata al marker e non segue l'oggetto durante il movimento, così come la configurazione usata in questa tesi resta ancorata al POV della telecamera, obbligando lo studente in entrambi i casi a tenere il modello fermo.

Grad et al. hanno effettuato il lavoro più simile a quello affrontato in questa tesi. [109] I partecipanti ricostruivano l'anatomia occlusale di tre denti, una volta senza alcun riferimento e due volte con un modello anatomico di riferimento, stampato in 3D nel primo caso e visualizzato in AR con HoloLens nel secondo. Le superfici ottenute venivano poi sovrapposte al modello anatomico e confrontate. La ricostruzione più accurata è quella ottenuta con il modello fisico stampato, ed è anche la più lenta, mentre il riferimento in AR aiuta ma non sostituisce il modello fisico. Il compito è lo stesso affrontato in questa tesi e, sebbene il modello anatomico non sia stato utilizzato nel nostro esperimento, possiamo assumere che l'equivalente di tale modello siano le linee di restauro utilizzate. Il dispositivo utilizzato è diverso, poiché HoloLens è un

sistema optical see-through che lascia passare la scena reale, mentre il FALKO ricostruisce l'intera scena a partire dal flusso della telecamera.

La revisione sistematica di Dzyuba et al. ha selezionato quattordici studi randomizzati pubblicati in dieci anni sull'uso di VR e AR nella formazione odontoiatrica e conclude che l'acquisizione di abilità motorie con questi sistemi è confrontabile con quella ottenuta con i metodi tradizionali. [110] La stessa osservazione compare nella revisione narrativa di Lin et al., che aggiunge il costo di implementazione e la difficoltà di inserire simulazioni complesse in un piano di studi già ricco e complesso. [111] Su questi due punti possiamo affermare che con l'autovalutazione dei restauri gli studenti che hanno partecipato a questo esperimento non sono contrari all'utilizzo di AR o VR nell'apprendimento, sebbene nutrano molti dubbi sull'utilizzo clinico di tali metodi. Inoltre il punto di forza della configurazione FALKO è che si sovrappone alla postazione con il manichino già presente in università, mentre il costo di implementazione e gestione resta un aspetto da valutare.

Farronato et al. indicano l'ambito educativo come quello in cui l'applicazione della AR risulti più matura e osservano che questi sistemi possono essere integrati nella postazione esistente senza ricostruire l'ambiente di lavoro. [3] Nella nostra tesi le due modalità stereoscopiche arrivano insieme al 47,9% delle indicazioni per la didattica, contro il 45,8% della visione diretta, mentre nella pratica clinica il rapporto si rovescia, 21,6% contro 75,7%. Gli studenti confermano quindi la letteratura: il visore ha un forte impatto nella didattica e nell'apprendimento, mentre in ambito clinico ha ancora margini di miglioramento.

In questa tesi, a differenza di molti studi citati, non si misurano esiti oggettivi della modellazione ma il giudizio del partecipante, con attenzione all'ambito didattico. L'ambito in cui il sistema risulta oggi utilizzabile è quindi l'insegnamento della modellazione occlusale, dove la sovrapposizione fornisce un riferimento visivo sul campo operatorio e dove i tempi di esecuzione non rappresentano un vincolo.

Il primo limite è l'assenza di una valutazione professionale della qualità del restauro: con l'autovalutazione i partecipanti possono aver sovrastimato o sottostimato il proprio lavoro. L'AR è stata generalmente apprezzata, ma senza una valutazione professionale non è possibile quantificarne l'impatto sul risultato.

Il secondo limite riguarda la dimensione del campione; 30 partecipanti e un'analisi soltanto descrittiva non permettono di distinguere una differenza reale da valori isolati.

Il terzo limite riguarda la postazione utilizzata: le cavità erano già preparate e il campo operatorio era un modello in resina fermo sul piano di lavoro, senza fluidi e senza problemi di accesso. I tempi rilevati sottostimano quindi la difficoltà clinica e probabilmente sottostimano anche il contributo dell'ingrandimento. L'AR veniva allineata una sola volta e richiedeva il modello immobile, condizione difficile da riprodurre in studio; per un primo studio in ambito didattico lo schema è comunque adeguato. Il miglioramento da cercare è un sistema che si adatti all'operatore, e non il contrario.

Restano infine due punti su cui questa tesi non ha raccolto alcun dato. Il primo è il costo, che le revisioni sopra citate indicano tra i principali ostacoli all'adozione di questi sistemi nella didattica universitaria. Il secondo è il comportamento del sistema in bocca, dove il campo operatorio si muove, i fluidi interferiscono con la ripresa e l'accesso è limitato dalle labbra e dalla lingua.

Il passaggio successivo di questa tesi sarebbe quello di scansionare e confrontare in sovrapposizione tridimensionale i modelli con un restauro di riferimento, ricavando per ciascun restauro uno scostamento medio dal modello atteso in aggiunta ad una valutazione del docente per ogni restauro effettuato. Con quel dato diventa verificabile matematicamente l'ipotesi che la guida grafica impatti sulla qualità del risultato e non solo sulla percezione che ha il partecipante.

Ciò che i dati ci indicano riguarda il modo in cui l'AR va impiegata; le linee di restauro producono un effetto quando vengono appoggiate a un'immagine stereoscopica, sui tempi come sui giudizi, e non ne producono quando vengono appoggiate a un'immagine piatta. È quindi il 3D con AR la strada da seguire, sebbene l'ambito in cui il sistema è oggi utilizzabile sia l'insegnamento, dove il modello resta fermo e il tempo non è un vincolo.

Alla luce dei dati e dei giudizi dei partecipanti, il sistema utilizzato è una buona base per le tecnologie dei prossimi anni. Il visore restituisce una visione 3D simile a quella umana che potrà migliorare negli anni con sviluppi tecnologici. Parallelamente alla VR si sta lavorando anche a occhiali con AR optical see-through, con lenti trasparenti che lasciano la visione diretta e vi aggiungono le informazioni.

Un passaggio intermedio, più compatibile con la didattica, potrebbe essere un software che, dal segnale di una telecamera sulla postazione, riconosca il dente in automatico e generi una guida in 3D che lo segua nel movimento, con marker dinamici o in modo markerless, permettendo di ruotare il modello senza perdere la guida e di valutare dimensione e forma delle creste, il tutto sul monitor già presente in ogni

postazione. Lo stesso principio potrebbe essere portato in studio, con difficoltà maggiori. Il miglioramento più immediato riguarda quindi il software, che può valorizzare le potenzialità dell'hardware già disponibile; è questa la strada da proseguire in attesa di un hardware che unisca prestazioni elevate e costi più accessibili.

4.6 Conclusioni

Questo studio ha confrontato, in restauri diretti di I classe su modelli identici, la visione a occhio nudo con il visore in 2D e in 3D, con e senza guida grafica in AR.

L'occhio nudo resta il riferimento e nessuna modalità con visore lo supera per rapidità, efficacia percepita o preferenza nella pratica clinica. Il 3D AR è quella che si avvicina di più per tempo, efficacia, comfort visivo e preferenze; il divario si riduce al minimo nella modellazione della morfologia occlusale, l'unica fase descritta dalle linee di solchi e creste della guida.

L'AR è utile solo sopra la visione stereoscopica. Nel 2D la stessa guida non cambia il giudizio dei partecipanti.

Il visore ha anche pregi propri: maggiore profondità di campo, minore affaticamento visivo rispetto al 2D e un ingrandimento molto apprezzato. Si inserisce nella postazione con manichino già presente in università e, per la didattica, le modalità stereoscopiche vengono preferite alla visione diretta.

La guida in AR utilizzata in questa tesi è stata realizzata da noi con strumenti semplici: un'immagine con le linee di restauro sovrapposta al flusso video e allineata a mano. Nonostante ciò il 3D AR è stato apprezzato.

L'AR può essere integrata in maniera più efficace portandola all'interno del software del sistema, con un allineamento automatico al dente e un tracciamento che mantenga la sovrapposizione anche quando il modello viene ruotato; la guida potrebbe inoltre passare dalle sole linee a un riferimento tridimensionale di cuspidi e creste.

Sul visore i miglioramenti riguardano il comfort visivo negli utilizzi prolungati e un punto di vista più vicino a quello dell'occhio, fino all'evoluzione verso occhiali AR con lenti trasparenti che conservino la visione diretta.

L'impatto della AR sulla ricostruzione di una cavità di I classe è quindi misurabile, ed è qui che bisognerà concentrare gli sforzi futuri, nell'attesa di un hardware che possa gestire un software già pronto e ottimizzato per la didattica e l'ambito clinico.

5 Bibliografia

[1] T.-K. Huang, C.-H. Yang, Y.-H. Hsieh, J.-C. Wang, e C.-C. Hung, «Augmented reality (AR) and virtual reality (VR) applied in dentistry», *Kaohsiung J. Med. Sci.*, vol. 34, fasc. 4, pp. 243–248, apr. 2018, doi: 10.1016/j.kjms.2018.01.009.

[2] S. Ahmed *et al.*, «Digital Impressions Versus Conventional Impressions in Prosthodontics: A Systematic Review», *Cureus*, vol. 16, fasc. 1, p. e51537, gen. 2024, doi: 10.7759/cureus.51537.

[3] M. Farronato *et al.*, «Current state of the art in the use of augmented reality in dentistry: a systematic review of the literature», *BMC Oral Health*, vol. 19, fasc. 1, p. 135, lug. 2019, doi: 10.1186/s12903-019-0808-3.

[4] N. Schulz-Weidner, M. Gruber, E. M. Schraml, B. Wöstmann, N. Krämer, e M. A. Schlenz, «Improving the Communication of Dental Findings in Pediatric Dentistry by Using Intraoral Scans as a Visual Aid: A Randomized Clinical Trial», *Dent. J.*, vol. 12, fasc. 1, p. 15, gen. 2024, doi: 10.3390/dj12010015.

[5] F. Mangano, J. A. Shibli, e T. Fortin, «Digital Dentistry: New Materials and Techniques», *Int. J. Dent.*, vol. 2016, p. 5261247, 2016, doi: 10.1155/2016/5261247.

[6] M. Javaid e A. Haleem, «Virtual reality applications toward medical field», *Clin. Epidemiol. Glob. Health*, vol. 8, fasc. 2, pp. 600–605, giu. 2020, doi: 10.1016/j.cegh.2019.12.010.

[7] J. Blanchard, S. Koshal, S. Morley, e M. McGurk, «The use of mixed reality in dentistry», *Br. Dent. J.*, vol. 233, fasc. 4, pp. 261–265, ago. 2022, doi: 10.1038/s41415-022-4451-z.

[8] Y. A. Algarni *et al.*, «The impact of virtual reality simulation on dental education: A systematic review of learning outcomes and student engagement», *J. Dent. Educ.*, vol. 88, fasc. 11, pp. 1549–1562, nov. 2024, doi: 10.1002/jdd.13619.

[9] L. Vizzari, «Il Sensorama: La nascita della Realtà Virtuale», VR ITALIA. Consultato: 22 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: https://www.vr-italia.org/il-sensorama-realta-virtuale/

[10] A. C. M. Dumay, «VEs in Medicine; Medicine in VEs», in *Information Technologies in Medicine*, John Wiley & Sons, Ltd, 2001, pp. 33–56. doi: 10.1002/0471216690.ch2.

[11] J. A. I. Guitian e M. Agus, «Interfacce uomo-macchina nella Realtà Virtuale».

[12] *M. W. Krueger, T. Gionfriddo, e K. Hinrichsen, «VIDEOPLACE, an artificial reality», ACM SIGCHI Bull., vol. 16, fasc. 4, pp. 35–40, 1985, doi: 10.1145/1165385.317463.*

[13]J. Carmigniani, B. Furht, M. Anisetti, P. Ceravolo, E. Damiani, e M. Ivkovic, «Augmented reality technologies, systems and applications», *Multimed. Tools Appl*, vol. 51, fasc. 1, pp. 341–377, gen. 2011, doi: 10.1007/s11042-010-0660-6.

[14]J. M. Loomis, R. G. Golledge, e R. L. Klatzky, «Navigation System for the Blind: Auditory Display Modes and Guidance», *Presence Teleoper Virtual Env.*, vol. 7, fasc. 2, pp. 193–203, apr. 1998, doi: 10.1162/105474698565677.

[15]S. Feiner, B. MacIntyre, T. Höllerer, e A. Webster, «A Touring Machine: Prototyping 3D Mobile Augmented Reality Systems for Exploring the Urban Environment», in *Proceedings of the First International Symposium on Wearable Computers (ISWC '97)*, Cambridge, MA, USA, 1997, pp. 74–81, doi: 10.1109/ISWC.1997.629922.

[16]B. Thomas, B. Close, J. Donoghue, J. Squires, P. Bondi, M. Morris, e W. Piekarski, «ARQuake: An outdoor/indoor augmented reality first person application», in *4th International Symposium on Wearable Computers*, 2000, pp. 139–146, doi: 10.1109/ISWC.2000.888480.

[17]N. J. Wei, B. Dougherty, A. Myers, e S. M. Badawy, «Using Google Glass in Surgical Settings: Systematic Review», *JMIR MHealth UHealth*, vol. 6, fasc. 3, p. e54, mar. 2018, doi: 10.2196/mhealth.9409.

[18]R. Sahyouni *et al.*, «Assessment of Google Glass as an adjunct in neurological surgery», *Surg. Neurol. Int.*, vol. 8, p. 68, apr. 2017, doi: 10.4103/sni.sni_277_16.

[19]D. G. Armstrong, T. M. Rankin, N. A. Giovinco, J. L. Mills, e Y. Matsuoka, «A Heads-Up Display for Diabetic Limb Salvage Surgery», *J. Diabetes Sci. Technol.*, vol. 8, fasc. 5, pp. 951–956, set. 2014, doi: 10.1177/1932296814535561.

[20]H. G. Hoffman *et al.*, «Feasibility of Articulated Arm Mounted Oculus Rift Virtual Reality Goggles for Adjunctive Pain Control During Occupational Therapy in Pediatric Burn Patients», *Cyberpsychology Behav. Soc. Netw.*, vol. 17, fasc. 6, pp. 397–401, giu. 2014, doi: 10.1089/cyber.2014.0058.

[21]N. Farahani *et al.*, «Exploring virtual reality technology and the Oculus Rift for the examination of digital pathology slides», *J. Pathol. Inform.*, vol. 7, p. 22, mag. 2016, doi: 10.4103/2153-3539.181766.

[22]Y. Zuo *et al.*, «A Novel Evaluation Model for a Mixed-Reality Surgical Navigation System: Where Microsoft HoloLens Meets the Operating Room», *Surg. Innov.*, vol. 27, fasc. 2, pp. 193–202, apr. 2020, doi: 10.1177/1553350619893236.

[23]J. A. Luzon, B. V. Stimec, A. O. Bakka, B. Edwin, e D. Ignjatovic, «Value of the surgeon's sightline on hologram registration and targeting in mixed reality», *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.*, vol. 15, fasc. 12, pp. 2027–2039, 2020, doi: 10.1007/s11548-020-02263-3.

[24]A. Florkowska, M. Trojak, W. Celniak, M. Stanuch, M. Daniol, e A. Skalski, «Metrological Analysis of HoloLens 2 for Visual Marker-Based Surgical Navigation», in *2023 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST)*, ott. 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/IST59124.2023.10355714.

[25]S. Yoshida, K. Kihara, H. Takeshita, e Y. Fujii, «Instructive head-mounted display system: pointing device using a vision-based finger tracking technique applied to surgical education», *Videosurgery Miniinvasive Tech.*, vol. 9, fasc. 3, pp. 449–452, set. 2014, doi: 10.5114/wiitm.2014.44132.

[26]J. R. Ehrlich *et al.*, «Head-Mounted Display Technology for Low Vision Rehabilitation and Vision Enhancement», *Am. J. Ophthalmol.*, vol. 176, pp. 26–32, apr. 2017, doi: 10.1016/j.ajo.2016.12.021.

[27]R. Patterson e W. L. Martin, «Human stereopsis», *Hum. Factors*, vol. 34, fasc. 6, pp. 669–692, dic. 1992, doi: 10.1177/001872089203400603.

[28]E. Bloch, N. Uddin, L. Gannon, K. Rantell, e S. Jain, «The effects of absence of stereopsis on performance of a simulated surgical task in two-dimensional and three-dimensional viewing conditions», *Br. J. Ophthalmol.*, vol. 99, fasc. 2, pp. 240–245, feb. 2015, doi: 10.1136/bjophthalmol-2013-304517.

[29]«augmented reality noun - Definition, pictures, pronunciation and usage notes | Oxford Advanced Learner's Dictionary at OxfordLearnersDictionaries.com». Consultato: 19 agosto 2025. [Online]. Disponibile su: https://www.oxfordlearnersdictionaries.com/definition/english/augmented-reality

[30]N. Navab *et al.*, «Medical Augmented Reality: Definition, Principle Components, Domain Modeling, and Design-Development-Validation Process», *J. Imaging*, vol. 9, fasc. 1, p. 4, gen. 2023, doi: 10.3390/jimaging9010004.

[31]F. Zhou, H. B.-L. Duh, e M. Billinghurst, «Trends in augmented reality tracking, interaction and display: A review of ten years of ISMAR», in *2008 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, set. 2008, pp. 193–202. doi: 10.1109/ISMAR.2008.4637362.

[32]R. Azuma, Y. Baillot, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier, e B. MacIntyre, «Recent advances in augmented reality», *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 21, fasc. 6, pp. 34–47, nov. 2001, doi: 10.1109/38.963459.

[33]R. Monterubbianesi *et al.*, «Augmented, Virtual and Mixed Reality in Dentistry: A Narrative Review on the Existing Platforms and Future Challenges», *Appl. Sci.*, vol. 12, fasc. 2, p. 877, gen. 2022, doi: 10.3390/app12020877.

[34]D. R. Berryman, «Augmented Reality: A Review», *Med. Ref. Serv. Q.*, vol. 31, fasc. 2, pp. 212–218, apr. 2012, doi: 10.1080/02763869.2012.670604.

[35]Y. Pulijala, M. Ma, M. Pears, D. Peebles, e A. Ayoub, «Effectiveness of Immersive Virtual Reality in Surgical Training—A Randomized Control Trial», *J. Oral Maxillofac. Surg.*, vol. 76, fasc. 5, pp. 1065–1072, mag. 2018, doi: 10.1016/j.joms.2017.10.002.

[36]R. T. Azuma, «A Survey of Augmented Reality», *Presence Teleoperators Virtual Environ.*, vol. 6, fasc. 4, pp. 355–385, ago. 1997, doi: 10.1162/pres.1997.6.4.355.

[37]H. Suenaga *et al.*, «Real-time in situ three-dimensional integral videography and surgical navigation using augmented reality: a pilot study», *Int. J. Oral Sci.*, vol. 5, fasc. 2, pp. 98–102, giu. 2013, doi: 10.1038/ijos.2013.26.

[38]M. Eckert, J. S. Volmerg, e C. M. Friedrich, «Augmented Reality in Medicine: Systematic and Bibliographic Review», *JMIR MHealth UHealth*, vol. 7, fasc. 4, p. e10967, apr. 2019, doi: 10.2196/10967.

[39]B. Furht, *Handbook of Augmented Reality*. 2011. doi: 10.1007/978-1-4614-0064-6.

[40]T. Joda, G. O. Gallucci, D. Wismeijer, e N. U. Zitzmann, «Augmented and virtual reality in dental medicine: A systematic review», *Comput. Biol. Med.*, vol. 108, pp. 93–100, mag. 2019, doi: 10.1016/j.compbiomed.2019.03.012.

[41]R. McCloy e R. Stone, «Science, medicine, and the future. Virtual reality in surgery», *BMJ*, vol. 323, fasc. 7318, pp. 912–915, ott. 2001, doi: 10.1136/bmj.323.7318.912.

[42]P. Cipresso, I. A. C. Giglioli, M. A. Raya, e G. Riva, «The Past, Present, and Future of Virtual and Augmented Reality Research: A Network and Cluster Analysis of the Literature», *Front. Psychol.*, vol. 9, nov. 2018, doi: 10.3389/fpsyg.2018.02086.

[43]G. Burdea, P. Richard, e P. Coiffet, «Multimodal Virtual Reality: Input-Output Devices, System Integration, and Human Factors», *Int. J. Hum.-Comput. Interact.*, vol. 8, p. 5, gen. 1996, doi: 10.1080/10447319609526138.

[44]M. Slater, «Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments», *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.*, vol. 364, fasc. 1535, pp. 3549–3557, dic. 2009, doi: 10.1098/rstb.2009.0138.

[45]V. Schwind, P. Knierim, N. Haas, e N. Henze, «Using Presence Questionnaires in Virtual Reality», in *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, in CHI '19. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, mag. 2019, pp. 1–12. doi: 10.1145/3290605.3300590.

[46]O. Baus e S. Bouchard, «Moving from Virtual Reality Exposure-Based Therapy to Augmented Reality Exposure-Based Therapy: A Review», *Front. Hum. Neurosci.*, vol. 8, p. 112, mar. 2014, doi: 10.3389/fnhum.2014.00112.

[47]D. B. Calem *et al.*, «Mixed reality applications in upper extremity surgery: the future is now», *EFORT Open Rev.*, vol. 9, fasc. 11, pp. 1034–1046, nov. 2024, doi: 10.1530/EOR-24-0080.

[48]Y. Xing, C. Fahy, e J. Shell, «Assessing web 2D user interface experiences in mixed reality», *Heliyon*, vol. 10, fasc. 11, p. e31916, mag. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e31916.

[49]R. Magalhães *et al.*, «Mixed Reality in the Operating Room: A Systematic Review», *J. Med. Syst.*, vol. 48, fasc. 1, p. 76, 2024, doi: 10.1007/s10916-024-02095-7.

[50]L. Qian *et al.*, «Comparison of optical see-through head-mounted displays for surgical interventions with object-anchored 2D-display», *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.*, vol. 12, fasc. 6, pp. 901–910, giu. 2017, doi: 10.1007/s11548-017-1564-y.

[51]C. Gsaxner *et al.*, «The HoloLens in medicine: A systematic review and taxonomy», *Med. Image Anal.*, vol. 85, p. 102757, apr. 2023, doi: 10.1016/j.media.2023.102757.

[52]C. M. Serrano, M. J. Atenas, P. J. Rodriguez, e J. M. Vervoorn, «From Virtual Reality to Reality: Fine-Tuning the Taxonomy for Extended Reality Simulation in Dental Education», *Eur. J. Dent. Educ. Off. J. Assoc. Dent. Educ. Eur.*, vol. 29, fasc. 3, pp. 486–496, ago. 2025, doi: 10.1111/eje.13064.

[53]J. Egger, C. Gsaxner, J. Kleesiek, e B. Puladi, «What is Diminished Virtuality? A Directional and Layer-Based Taxonomy for the Reality-Virtuality Continuum», *JMIR XR Spat. Comput.*, vol. 1, p. e52904, 2024, doi: 10.2196/52904.

[54]C. E. Fernández, C. A. Maturana, S. I. Coloma, A. Carrasco-Labra, e R. A. Giacaman, «Teledentistry and mHealth for Promotion and Prevention of Oral Health: A Systematic Review and Meta-analysis», *J. Dent. Res.*, vol. 100, fasc. 9, pp. 914–927, ago. 2021, doi: 10.1177/00220345211003828.

[55]C. Diegritz, C. Fotiadou, F. Fleischer, e M. Reymus, «Tooth Anatomy Inspector: A comprehensive assessment of an extended reality (XR) application designed for teaching and learning of root canal anatomy by students», *Int. Endod. J.*, vol. 57, fasc. 11, pp. 1682–1688, nov. 2024, doi: 10.1111/iej.14124.

[56]J. Dalanon, «Multiplatform and cost-effective augmented reality model development in restorative dentistry», *J. Dent. Educ.*, vol. 87, fasc. S1, pp. 929–931, 2023, doi: 10.1002/jdd.13166.

[57]N. Sharmin, A. K. Chow, D. Votta, e N. Maeda, «Implementing Augmented Reality to Facilitate the Learning of Oral Histology», *Healthc. Inform. Res.*, vol. 28, fasc. 2, pp. 170–175, apr. 2022, doi: 10.4258/hir.2022.28.2.170.

[58]W. Jiang *et al.*, «Evaluation of the 3D Augmented Reality-Guided Intraoperative Positioning of Dental Implants in Edentulous Mandibular Models», *Int. J. Oral Maxillofac. Implants*, vol. 33, fasc. 6, pp. 1219–1228, 2018, doi: 10.11607/jomi.6638.

[59]M. Kivovics, A. Takács, D. Pénzes, O. Németh, e E. Mijiritsky, «Accuracy of dental implant placement using augmented reality-based navigation, static computer assisted implant surgery, and the free-hand method: An in vitro study», *J. Dent.*, vol. 119, p. 104070, apr. 2022, doi: 10.1016/j.jdent.2022.104070.

[60]H.-N. Mai, V. V. Dam, e D.-H. Lee, «Accuracy of Augmented Reality-Assisted Navigation in Dental Implant Surgery: Systematic Review and Meta-analysis», *J. Med. Internet Res.*, vol. 25, p. e42040, gen. 2023, doi: 10.2196/42040.

[61]P. Grün *et al.*, «Smartphone-Based Augmented Reality Application for Dental Implant Placement: A Technical Innovation», *J. Oral Maxillofac. Surg. Off. J. Am. Assoc. Oral Maxillofac. Surg.*, vol. 83, fasc. 12, pp. 1519–1525, dic. 2025, doi: 10.1016/j.joms.2025.08.011.

[62]E. B. Strong *et al.*, «Augmented Reality Navigation in Craniomaxillofacial/Head and Neck Surgery», *OTO Open*, vol. 9, fasc. 2, p. e70108, 2025, doi: 10.1002/oto2.70108.

[63]S. Tabernée Heijtmeijer *et al.*, «Accuracy of augmented reality navigated surgery for placement of zygomatic implants: a human cadaver study», *PeerJ*, vol. 12, p. e18468, 2024, doi: 10.7717/peerj.18468.

[64]P. Olsson, F. Nysjö, J.-M. Hirsch, e I. B. Carlbom, «A haptics-assisted cranio-maxillofacial surgery planning system for restoring skeletal anatomy in complex trauma cases», *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.*, vol. 8, fasc. 6, pp. 887–894, nov. 2013, doi: 10.1007/s11548-013-0827-5.

[65]R. A. Mischkowski, M. J. Zinser, A. C. Kübler, B. Krug, U. Seifert, e J. E. Zöller, «Application of an augmented reality tool for maxillary positioning in orthognathic surgery - a feasibility study», *J. Cranio-Maxillo-fac. Surg. Off. Publ. Eur. Assoc. Cranio-Maxillo-fac. Surg.*, vol. 34, fasc. 8, pp. 478–483, dic. 2006, doi: 10.1016/j.jcms.2006.07.862.

[66]H. H. Tran *et al.*, «Augmented reality system for oral surgery using 3D auto stereoscopic visualization», *Med. Image Comput. Comput.-Assist. Interv. MICCAI Int. Conf. Med. Image Comput. Comput.-Assist. Interv.*, vol. 14, fasc. Pt 1, pp. 81–88, 2011, doi: 10.1007/978-3-642-23623-5_11.

[67]G. Badiali *et al.*, «Augmented reality as an aid in maxillofacial surgery: validation of a wearable system allowing maxillary repositioning», *J. Cranio-Maxillo-fac. Surg. Off. Publ. Eur. Assoc. Cranio-Maxillo-fac. Surg.*, vol. 42, fasc. 8, pp. 1970–1976, dic. 2014, doi: 10.1016/j.jcms.2014.09.001.

[68]X. Chen *et al.*, «Development of a surgical navigation system based on augmented reality using an optical see-through head-mounted display», *J. Biomed. Inform.*, vol. 55, pp. 124–131, giu. 2015, doi: 10.1016/j.jbi.2015.04.003.

[69]J. Ahn, H. Choi, J. Hong, e J. Hong, «Tracking Accuracy of a Stereo Camera-Based Augmented Reality Navigation System for Orthognathic Surgery», *J. Oral Maxillofac. Surg. Off. J. Am. Assoc. Oral Maxillofac. Surg.*, vol. 77, fasc. 5, p. 1070.e1-1070.e11, mag. 2019, doi: 10.1016/j.joms.2018.12.032.

[70]J. Wang, H. Suenaga, L. Yang, E. Kobayashi, e I. Sakuma, «Video see-through augmented reality for oral and maxillofacial surgery», *Int. J. Med. Robot. Comput. Assist. Surg. MRCAS*, vol. 13, fasc. 2, giu. 2017, doi: 10.1002/rcs.1754.
[71]D. A. Ströbele, A. Othman, M. A. Meier, K. Aboulazm, e C. von See, «Augmented reality in orthodontics for bracket placement using conventional mobile devices: Technical note», *J. World Fed. Orthod.*, vol. 12, fasc. 6, pp. 280–283, dic. 2023, doi: 10.1016/j.ejwf.2023.08.003.
[72]K. Shah *et al.*, «Augmented Reality in Orthodontic Education and Clinical Practice - A Review», *J. Pharm. Bioallied Sci.*, vol. 17, fasc. Suppl 5, pp. S3462–S3464, dic. 2025, doi: 10.4103/jpbs.jpbs_1517_25.
[73]T. Jurcik *et al.*, «The efficacy of augmented reality exposure therapy in the treatment of spider phobia-a randomized controlled trial», *Front. Psychol.*, vol. 15, p. 1214125, 2024, doi: 10.3389/fpsyg.2024.1214125.
[74]S. N. S. R. Amantini *et al.*, «Using Augmented Reality to Motivate Oral Hygiene Practice in Children: Protocol for the Development of a Serious Game», *JMIR Res. Protoc.*, vol. 9, fasc. 1, p. e10987, gen. 2020, doi: 10.2196/10987.
[75]K. Raghav, A. J. Van Wijk, F. Abdullah, M. N. Islam, M. Bernatchez, e A. De Jongh, «Efficacy of virtual reality exposure therapy for treatment of dental phobia: a randomized control trial», *BMC Oral Health*, vol. 16, p. 25, feb. 2016, doi: 10.1186/s12903-016-0186-z.
[76]K. R. Gujjar, A. van Wijk, R. Sharma, e A. de Jongh, «Virtual Reality Exposure Therapy for the Treatment of Dental Phobia: A Controlled Feasibility Study», *Behav. Cogn. Psychother.*, vol. 46, fasc. 3, pp. 367–373, mag. 2018, doi: 10.1017/S1352465817000534.
[77]H. G. Hoffman, A. Garcia-Palacios, D. R. Patterson, M. Jensen, T. Furness, e W. F. Ammons, «The effectiveness of virtual reality for dental pain control: a case study», *Cyberpsychology Behav. Impact Internet Multimed. Virtual Real. Behav. Soc.*, vol. 4, fasc. 4, pp. 527–535, ago. 2001, doi: 10.1089/109493101750527088.
[78]E. Furman, T. R. Jasinevicius, N. F. Bissada, K. Z. Victoroff, R. Skillicorn, e M. Buchner, «Virtual reality distraction for pain control during periodontal scaling and root planing procedures», *J. Am. Dent. Assoc.*, vol. 140, fasc. 12, pp. 1508–1516, dic. 2009, doi: 10.14219/jada.archive.2009.0102.
[79]S. M. Alshatrat, J. M. Sabarini, H. M. Hammouri, M. M. Alsaleh, I. A. Al-Bakri, e A. K. Tabnjh, «Effect of immersive virtual reality on pain in different dental procedures in children: a randomized controlled clinical trial», *Front. Oral Health*, vol. 6, p. 1539018, 2025, doi: 10.3389/froh.2025.1539018.
[80]S. Lahti, A. Suominen, R. Freeman, T. Lähteenoja, e G. Humphris, «Virtual Reality Relaxation to Decrease Dental Anxiety: Immediate Effect Randomized Clinical

Trial», *JDR Clin. Transl. Res.*, vol. 5, fasc. 4, pp. 312–318, 2020, doi: 10.1177/2380084420901679.
[81]Z. Jafri, N. Ahmad, M. Sawai, N. Sultan, e A. Bhardwaj, «Digital Smile Design-An innovative tool in aesthetic dentistry», *J. Oral Biol. Craniofacial Res.*, vol. 10, fasc. 2, pp. 194–198, 2020, doi: 10.1016/j.jobcr.2020.04.010.
[82]P. P. Garcia *et al.*, «Digital smile design and mock-up technique for esthetic treatment planning with porcelain laminate veneers», *J. Conserv. Dent. JCD*, vol. 21, fasc. 4, pp. 455–458, 2018, doi: 10.4103/JCD.JCD_172_18.
[83]Z. Yue, Z. Luo, J. Hou, e H. Zhang, «Application of 3D digital smile design based on virtual articulation analysis in esthetic dentistry: A technique», *J. Prosthet. Dent.*, vol. 133, fasc. 1, pp. 24–30, gen. 2025, doi: 10.1016/j.prosdent.2023.11.014.
[84]F. R. Santos, S. F. Kamarowski, C. A. V. Lopez, C. L. M. Storrer, A. T. Neto, e T. M. Deliberador, «The use of the digital smile design concept as an auxiliary tool in periodontal plastic surgery», *Dent. Res. J.*, vol. 14, fasc. 2, pp. 158–161, 2017.
[85]D. Al-Buhaisi, S. Karami, e N. Gomaa, «The role of teledentistry in improving oral health outcomes and access to dental care: An umbrella review», *J. Oral Rehabil.*, vol. 51, fasc. 11, pp. 2375–2389, nov. 2024, doi: 10.1111/joor.13836.
[86]D. Dolega-Dolegowski *et al.*, «Application of holography and augmented reality based technology to visualize the internal structure of the dental root - a proof of concept», *Head Face Med.*, vol. 18, fasc. 1, p. 12, apr. 2022, doi: 10.1186/s13005-022-00307-4.
[87]S. Cossio *et al.*, «Cybersickness and discomfort from head-mounted displays delivering fully immersive virtual reality: A systematic review», *Nurse Educ. Pract.*, vol. 85, p. 104376, mag. 2025, doi: 10.1016/j.nepr.2025.104376.
[88]A. Palumbo, «Microsoft HoloLens 2 in Medical and Healthcare Context: State of the Art and Future Prospects», *Sensors*, vol. 22, fasc. 20, p. 7709, gen. 2022, doi: 10.3390/s22207709.
[89]C. D. Lynch, K. B. Frazier, R. J. McConnell, I. R. Blum, e N. H. F. Wilson, «State-of-the-art techniques in operative dentistry: contemporary teaching of posterior composites in UK and Irish dental schools», *Br. Dent. J.*, vol. 209, fasc. 3, pp. 129–136, ago. 2010, doi: 10.1038/sj.bdj.2010.674.
[90]N. H. Wilson e J. C. Setcos, «The teaching of posterior composites: a worldwide survey», *J. Dent.*, vol. 17 Suppl 1, pp. S29-33; discussion S47-52, 1989, doi: 10.1016/0300-5712(89)90160-7.
[91]N. H. F. Wilson e C. D. Lynch, «The teaching of posterior resin composites: planning for the future based on 25 years of research», *J. Dent.*, vol. 42, fasc. 5, pp. 503–516, mag. 2014, doi: 10.1016/j.jdent.2014.02.014.

[92]F. J. Duarte de Oliveira, P. S. Ferreira da Silva Filho, M. J. Fernandes Costa, M. R. G. Rabelo Caldas, B. C. Dutra Borges, e D. F. Gadelha de Araújo, «A comprehensive review of the antibacterial activity of dimethylaminohexadecyl methacrylate (DMAHDM) and its influence on mechanical properties of resin-based dental materials», *Jpn. Dent. Sci. Rev.*, vol. 57, pp. 60–70, nov. 2021, doi: 10.1016/j.jdsr.2021.03.003.

[93]C. D. Lynch, A. C. Shortall, D. Stewardson, P. L. Tomson, e F. J. T. Burke, «Teaching posterior composite resin restorations in the United Kingdom and Ireland: consensus views of teachers», *Br. Dent. J.*, vol. 203, fasc. 4, pp. 183–187, ago. 2007, doi: 10.1038/bdj.2007.726.

[94]N. J. M. Opdam, E. M. Bronkhorst, B. a. C. Loomans, e M. C. D. N. J. M. Huysmans, «12-year survival of composite vs. amalgam restorations», *J. Dent. Res.*, vol. 89, fasc. 10, pp. 1063–1067, ott. 2010, doi: 10.1177/0022034510376071.

[95]R. Abu Eid, K. Ewan, J. Foley, Y. Oweis, e J. Jayasinghe, «Self-directed study and carving tooth models for learning tooth morphology: perceptions of students at the University of Aberdeen, Scotland», *J. Dent. Educ.*, vol. 77, fasc. 9, pp. 1147–1153, set. 2013.

[96]H. M. Nassar e A. Tekian, «Computer simulation and virtual reality in undergraduate operative and restorative dental education: A critical review», *J. Dent. Educ.*, vol. 84, fasc. 7, pp. 812–829, lug. 2020, doi: 10.1002/jdd.12138.

[97]G. Zari, S. Condino, F. Cutolo, e V. Ferrari, «Magic Leap 1 versus Microsoft HoloLens 2 for the Visualization of 3D Content Obtained from Radiological Images», *Sensors*, vol. 23, fasc. 6, p. 3040, mar. 2023, doi: 10.3390/s23063040.

[98]C. Obispo, T. Gragera, G. Giovannini, Á. Zubizarreta-Macho, e J. M. Aragoneses Lamas, «Influence of Augmented Reality Appliances on Tooth Preparation Designs-An In Vitro Study», *J. Pers. Med.*, vol. 14, fasc. 1, p. 37, dic. 2023, doi: 10.3390/jpm14010037.

[99]K. A. Mays e G. L. Branch-Mays, «A Systematic Review of the Use of Self-Assessment in Preclinical and Clinical Dental Education», *J. Dent. Educ.*, vol. 80, fasc. 8, pp. 902–913, ago. 2016.

[100] A. Rung e R. George, «A systematic literature review of assessment feedback in preclinical dental education», *Eur. J. Dent. Educ. Off. J. Assoc. Dent. Educ. Eur.*, vol. 25, fasc. 1, pp. 135–150, feb. 2021, doi: 10.1111/eje.12584.

[101] R. B. Price, H. E. Strassler, H. L. Price, S. Seth, e C. J. Lee, «The effectiveness of using a patient simulator to teach light-curing skills», *J. Am. Dent. Assoc.*, vol. 145, fasc. 1, pp. 32–43, gen. 2014, doi: 10.14219/jada.2013.17.

[102] B. Dündar, F. Gönüldaş, B. Akat, e K. Orhan, «The effect of virtual reality simulators on tooth preparation skills of dental students», *BMC Oral Health*, vol. 25, fasc. 1, p. 422, mar. 2025, doi: 10.1186/s12903-025-05812-x.

[103] D. Erdilek, B. Gümüştaş, e B. Güray Efes, «Digitalization era of dental education: A systematic review», *Dent. Med. Probl.*, vol. 60, fasc. 3, pp. 513–525, 2023, doi: 10.17219/dmp/156804.

[104] A. Ajmera, R. G. Campbell, J. W. Y. Lee, S. J. McGinness, e P. Mukherjee, «Ergonomics of 3D-Exoscope Versus the Operating Microscope in Otologic Surgery», *ANZ J. Surg.*, vol. 95, fasc. 9, pp. 1862–1868, set. 2025, doi: 10.1111/ans.70278.

[105] C. Müller *et al.*, «Prospective evaluation of the VITOM 3D exoscope in ear surgery compared with surgical microscopes: part II-optical performance, handling, workload and ergonomics», *Eur. Arch. Oto-Rhino-Laryngol. Off. J. Eur. Fed. Oto-Rhino-Laryngol. Soc. EUFOS Affil. Ger. Soc. Oto-Rhino-Laryngol. - Head Neck Surg.*, vol. 283, fasc. 5, pp. 3037–3050, mag. 2026, doi: 10.1007/s00405-026-10045-x.

[106] W. K. Yego, S. J. Gilson, R. C. Baraas, e E. Svarverud, «Adaptive Responses of Accommodation and Vergence Following Exposure to Augmented Reality in a Head-Mounted Display», *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, vol. 66, fasc. 12, p. 1, set. 2025, doi: 10.1167/iovs.66.12.1.

[107] A. M *et al.*, «The Role of Augmented Reality in Surgical Training: A Narrative Review», *Cureus*, vol. 17, fasc. 10, ott. 2025, doi: 10.7759/cureus.95214.

[108] X. Zhong *et al.*, «Augmented Reality-Assisted System for Tooth Carving Training in Dental Education», *J. Vis. Exp. JoVE*, fasc. 234, ago. 2026, doi: 10.3791/73392.

[109] P. Grad, A. M. Przeklasa-Bierowiec, K. P. Malinowski, J. Witowski, K. Proniewska, e G. Tatoń, «Application of HoloLens-based augmented reality and three-dimensional printed anatomical tooth reference models in dental education», *Anat. Sci. Educ.*, vol. 16, fasc. 4, pp. 743–755, 2023, doi: 10.1002/ase.2241.

[110] N. Dzyuba, J. Jandu, J. Yates, e E. Kushnerev, «Virtual and augmented reality in dental education: The good, the bad and the better», *Eur. J. Dent. Educ. Off. J. Assoc. Dent. Educ. Eur.*, vol. 29, fasc. 3, pp. 497–515, ago. 2025, doi: 10.1111/eje.12871.

[111] P.-Y. Lin *et al.*, «The use of augmented reality (AR) and virtual reality (VR) in dental surgery education and practice: A narrative review», *J. Dent. Sci.*, vol. 19, fasc. Suppl 2, pp. S91–S101, dic. 2024, doi: 10.1016/j.jds.2024.10.011.

[112] Y. Li *et al.*, «Effectiveness and Methodologies of Virtual Reality Dental Simulators for Veneer Tooth Preparation Training: Randomized Controlled Trial», *J. Med. Internet Res.*, vol. 27, p. e63961, mag. 2025, doi: 10.2196/63961.

[113] E.-J. Lim, Y.-S. Kim, J.-E. Im, e J.-G. Lee, «Mobile educational tool based on augmented reality technology for tooth carving: results of a prospective cohort study», *BMC Med. Educ.*, vol. 23, fasc. 1, p. 462, giu. 2023, doi: 10.1186/s12909-023-04443-6.

[114] P. Mittal *et al.*, «Impact of self-assessment on dental student's performance in pre-clinical conservative dentistry course», *BMC Oral Health*, vol. 24, fasc. 1, p. 593, mag. 2024, doi: 10.1186/s12903-024-04140-w.

[115] T. K. F. Chiu, Q. Xia, X. Zhou, C. S. Chai, e M. Cheng, «Systematic literature review on opportunities, challenges, and future research recommendations of artificial intelligence in education», *Comput. Educ. Artif. Intell.*, vol. 4, p. 100118, gen. 2023, doi: 10.1016/j.caeai.2022.100118.

[116] S. E. Uribe *et al.*, «Artificial intelligence chatbots and large language models in dental education: Worldwide survey of educators», *Eur. J. Dent. Educ. Off. J. Assoc. Dent. Educ. Eur.*, vol. 28, fasc. 4, pp. 865–876, nov. 2024, doi: 10.1111/eje.13009.

[117] M. El-Hakim, R. Anthonappa, e A. Fawzy, «Artificial Intelligence in Dental Education: A Scoping Review of Applications, Challenges, and Gaps», *Dent. J.*, vol. 13, fasc. 9, p. 384, ago. 2025, doi: 10.3390/dj13090384.

[118] S. Rampf, H. Gehrig, A. Möltner, M. R. Fischer, F. Schwendicke, e K. C. Huth, «Radiographical diagnostic competences of dental students using various feedback methods and integrating an artificial intelligence application—A randomized clinical trial», *Eur. J. Dent. Educ.*, vol. 28, fasc. 4, pp. 925–937, 2024, doi: 10.1111/eje.13028.

[119] L. Schropp, A. P. S. Sørensen, H. Devlin, e L. H. Matzen, «Use of artificial intelligence software in dental education: A study on assisted proximal caries assessment in bitewing radiographs», *Eur. J. Dent. Educ.*, vol. 28, fasc. 2, pp. 490–496, 2024, doi: 10.1111/eje.12973.

[120] B. Tahani, A. Rashno, H. Haghighi, R. Monirifard, H. N. Khomami, e R. Kafieh, «Automatic Evaluation of Crown Preparation Using Image Processing Techniques: A Substitute to Faculty Scoring in Dental Education», *J. Med. Signals Sens.*, vol. 10, fasc. 4, pp. 239–248, 2020, doi: 10.4103/jmss.JMSS_5_20.

[121] S. Han, Y. Yi, M. Revilla-León, B. Yilmaz, e H.-I. Yoon, «Feasibility of software-based assessment for automated evaluation of tooth preparation for dental crown by using a computational geometric algorithm», *Sci. Rep.*, vol. 13, fasc. 1, p. 11847, lug. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-39089-3.

[122] A. F. Alshammari *et al.*, «Automated evaluation of dental cavity preparation quality using deep learning and anatomically informed geometric analysis», *Front. Artif. Intell.*, vol. 9, ago. 2026, doi: 10.3389/frai.2026.1884843.

[123] M. Benli, «Impact of AI-Generated Feedback on Dental Student Performance in Preclinical Prosthodontics Education», *J. Dent. Educ.*, vol. n/a, fasc. n/a, doi: 10.1002/jdd.70304.
[124] «FALKO System | Ecosistema per l'odontoiatria digitale», Tecnomed Italia Group. Consultato: 5 settembre 2026. [Online]. Disponibile su: https://www.tecnomeditalia.com/l/falko-system/
[125] «Tecnomed Italia | Digital Store», Tecnomed Italia Group. Consultato: 5 settembre 2026. [Online]. Disponibile su: https://shop.tecnomeditalia.com/en/
[126] G. Scirocchi, «FALKO - Medical Media Vision», Tecnomed Italia Group. Consultato: 5 settembre 2026. [Online]. Disponibile su: https://www.tecnomeditalia.com/en/post-falko/
[127] «Realtà aumentata in odontoiatria | Odontoiatria33». Consultato: 5 settembre 2026. [Online]. Disponibile su: https://www.odontoiatria33.it//approfondimenti/23528/realta-aumentata-in-odontoiatria.html
[128] «FALKO: real-time, 3D digital visualization systems - DDS News», DDS News & Blog. Consultato: 5 settembre 2026. [Online]. Disponibile su: https://news.digital-dentistry.org/interview/falko-discovering-real-time-3d-digital-visualization-systems-with-professor-fernando-zarone/
[129] S. Santini, «OKKIO - la nuova telecamera medicale 4k per chirurgia, odontoiatria, educational», Tecnomed Italia Group. Consultato: 5 settembre 2026. [Online]. Disponibile su: https://www.tecnomeditalia.com/okkio-4k/
[130] riccardo, «Innovations in Digital Dentistry with FALKO 3D System - DDS News», DDS News & Blog. Consultato: 5 settembre 2026. [Online]. Disponibile su: https://news.digital-dentistry.org/news/innovations-in-digital-dentistry-the-integrated-ecosystem-of-tecnomed-italia/
[131] «OKKIO HDMI medical camera FALKOLED», Tecnomed Italia Group. Consultato: 5 settembre 2026. [Online]. Disponibile su: https://shop.tecnomeditalia.com/en/product/okkio-hdmi-camera-4k-25mm-f8-0-350-700mm-with-led-illuminator/
[132] «Configuratore Sistema FALKO 3D | Visualizzazione odontoiatrica avanzata», Tecnomed Italia Group. Consultato: 5 settembre 2026. [Online]. Disponibile su: https://www.tecnomeditalia.com/configuratore-visore-falko/
[133] B. Alaraimi *et al.*, «A randomized prospective study comparing acquisition of laparoscopic skills in three-dimensional (3D) vs. two-dimensional (2D) laparoscopy», *World J. Surg.*, vol. 38, fasc. 11, pp. 2746–2752, nov. 2014, doi: 10.1007/s00268-014-2674-0.
[134] I. R. de Boer, P. R. Wesselink, e J. M. Vervoorn, «Student performance and appreciation using 3D vs. 2D vision in a virtual learning environment», *Eur. J.*

Dent. Educ. Off. J. Assoc. Dent. Educ. Eur., vol. 20, fasc. 3, pp. 142–147, ago. 2016, doi: 10.1111/eje.12152.

[135] E. J. Eve, S. Koo, A. A. Alshihri, J. Cormier, M. Kozhenikov, R. B. Donoff, e N. Y. Karimbux, «Performance of dental students versus prosthodontics residents on a 3D immersive haptic simulator», *J. Dent. Educ.*, vol. 78, fasc. 4, pp. 630–637, apr. 2014, PMID: 24706694.