

Protesi in CAD/CAM: presente e futuro

Francesco Sanfilippo, Dario Viera

L'odontoiatria protesica si pone come obiettivo primario il recupero della funzione orale dei pazienti e il mantenimento del loro stato di salute offrendo restauri come intarsi, corone, protesi parziali o totali fisse e rimovibili. A differenza della maggior parte degli articoli prodotti industrialmente, i dispositivi riabilitativi protesici sono necessariamente prodotti su misura, realizzati per il singolo paziente e per la specifica situazione riabilitativa.

Nel tempo, sia i materiali sia le tecnologie per la fabbricazione dei dispositivi protesici hanno subito una notevole evoluzione. I manufatti protesici hanno visto l'impiego della microfusione delle leghe auree con tecnica della cera persa, la formazione plastica delle resine acriliche e la sinterizzazione delle polveri ceramiche. Queste tecniche di lavoro hanno richiesto anni per affermarsi e svilupparsi e oggi sono considerate procedure di lavoro convenzionali in ambito odontotecnico.

Dopo oltre due decenni dalla sua introduzione, il periodo pionieristico delle lavorazioni protesiche assistite dal computer è volto al termine. Oggi i sistemi di lavorazione digitale sono una realtà affidabile, capace di produrre protesi di alto livello qualitativo strutturale. La comunità scientifica mondiale ha raccolto con grande interesse e crescente entusiasmo la sfida lanciata dalle nuove tecnologie e dei nuovi materiali a esse associate in ambito protesico, e non c'è sfera odontoiatrica specialistica che non ne sia stata permeata. Questa disamina della Letteratura è volta a coloro che ancora non si sono avvicinati alla metodologia operativa CAD/CAM o che conservano un certo scetticismo nell'approccio. In questo articolo vengono presi in rassegna gli avvenimenti che hanno segnato l'introduzione e l'affermazione della tecnologia CAD/CAM in odontoiatria protesica. Viene

Introduzione

SPECIALE CAD/CAM

analizzato lo stato attuale dei sistemi CAD/CAM rivolgendo l'attenzione alle prestazioni offerte dai più recenti software di computer grafica e ai nuovi materiali per la fabbricazione di protesi fisse, ceramici e leghe. Il flusso di lavoro tradizionale del laboratorio odontotecnico viene esaminato e confrontato con le più moderne applicazioni operative del lavoro industriale. Viene fornita anche una panoramica conclusiva sulle prospettive future di questi sistemi operativi sia in ambito protesico che negli altri settori dell'odontoiatria.

Parole chiave: CAD/CAM, Protesi parziali fisse, Outsourcing, Bioleghe, Zirconia.

Potenzialità evolutiva dei sistemi CAD/CAM

Senza dubbio, le procedure formative tradizionali consentono la fabbricazione di presidi protesici di alta qualità, ma solo attraverso un'elevata professionalità individuale e una stretta collaborazione tra odontoiatra e odontotecnico. Una condizione questa che mette in luce come la qualità del risultato riabilitativo sia strettamente relazionata alle capacità e all'esperienza dei singoli operatori nonché all'imprescindibile interscambio comunicativo¹⁻³.

La crescente domanda di dispositivi riabilitativi protesici, sicuri ed esteticamente gradevoli, ha indotto la ricerca e lo sviluppo industriale a orientarsi verso nuovi materiali dotati di tenacia notevole. Leghe ad alta resistenza e materiali ceramici avanzati di ultima generazione sono stati introdotti come elementi primari per la realizzazione di presidi protesici^{4,5}. Dal momento però che questi materiali non possono essere gestiti con i tradizionali processi di lavorazione odontotecnica, nuove sofisticate tecnologie di elaborazione e appropriati sistemi di prototipazione rapida sono stati messi a punto e proposti alla moderna odontoiatria⁶.

La soluzione a questa necessità produttiva è rappresentata dall'introduzione di sistemi tecnologici di progettazione e produzione assistiti dal computer (CAD/CAM).

In relazione al rapido progresso tecnologico dei processi assistiti dal computer, avvenuto in vari settori industriali a partire dagli anni settanta dello scorso secolo, la ricerca e lo sviluppo dei sistemi CAD/CAM dentali è stata attivamente perseguita in tutto il mondo solo con un decennio di ritardo rispetto al suo esordio⁷⁻¹⁴.

In questa disamina si riassume la storia recente dello sviluppo dei sistemi CAD/CAM odontoiatrici e lo stato attuale delle conoscenze sul tema, con focus sulla produzione di protesi fisse. Per concludere, verranno discusse le prospettive future applicabili al CAD/CAM odontoiatrico.

L'approccio pionieristico negli anni ottanta alla progettazione ed elaborazione di dispositivi protesici con tecnologia CAD/CAM è apparso immediatamente fiducioso. Tuttavia, la ricerca ha trovato lungo il suo percorso diversi ostacoli da affrontare prima della messa a punto di tecnologie in grado di garantire la realizzazione di dispositivi protesici individuali di qualità elevata con standard produttivi efficaci e riproducibili.

Il primo ostacolo non poteva che essere di carattere gestionale. Infatti, volendo mettere a confronto i sistemi produttivi tradizionali e quelli che prevedono l'utilizzo di tecnologia CAD/CAM viene spontaneo riflettere sugli elementi organizzativi e decisionali essenziali per l'approntamento dei dispositivi protesici su misura, vale a dire: l'impegno economico; il tempo di realizzazione; la difficoltà operativa; la qualità del risultato¹⁵.

Per potersi affermare la nuova procedura operativa doveva essere di livello paragonabile ai sistemi convenzionali o, meglio ancora, risultare superiore. In altre parole, affinché la nuova tecnologia potesse essere in grado di affiancare o sostituire le procedure tradizionali di lavorazione avrebbe dovuto soddisfare requisiti di economicità, fluidità operativa, semplicità gestionale e qualità elevata dei prodotti, con benefici sia per il laboratorio odontotecnico sia per la pratica clinica^{16,17}.

Il secondo importante ostacolo tecnologico da affrontare riguardava l'acquisizione di una precisa e dettagliata morfologia dell'area orale necessitante di restauro protesico, com-

SPECIALE CAD/CAM

prensiva degli elementi pilastro, dei denti adiacenti e degli antagonisti. Ovviamente, al pari di un modello di lavoro convenzionale, queste informazioni volumetriche dovevano essere digitalizzate con precisione, prima di procedere alla progettazione di corone o protesi parziali fisse^{18,19}. Ineludibile è stata la necessità di realizzare il progetto protesico su una riproduzione tridimensionale della situazione orale, perfettamente congrua alla realtà clinica degli elementi pilastro e ai rapporti con la dentatura residua prossima e opposta (Figg. 1-3). Agli albori dell'applicazione della tecnologia CAD/CAM dentale risultava però alquanto difficoltoso individuare con precisione i margini di finitura delle preparazioni protesiche, facendo impiego degli scanner digitali di prima generazione. Solo pochi anni più tardi l'iperbole tecnologica ha proiettato nel settore odontoprotesico digitalizzatori altamente prestanti^{20,21}. L'acquisizione precisa e rapida di morfologie ha raggiunto livelli sorprendenti e ancora oggi continua a progredire.

Il terzo impedimento nell'affermazione dei sistemi di lavoro virtuali risiedeva nella necessità di poter rappresentare numericamente la forma delle corone e delle protesi parziali fisse. Le equazioni funzionali applicate alla realizzazione dei prodotti industriali dovevano essere modificate, integrate ed espanse per poter soddisfare la moltitudine di forme e di situazioni da riprodurre²²⁻²⁴. Inoltre, di fronte all'evidenza che i restauri protesici hanno necessità di complementare la morfologia dei denti pilastro, armonizzarsi con gli elementi più prossimi e confrontarsi con quelli dell'arcata opposta, era obbligatorio uno slancio evolutivo verso lo sviluppo di software CAD dedicati, altamente sofisticati (Fig. 4).

Il quarto importante confronto faceva capo alla necessità di garantire un'accurata lavorazione, come la fresatura di spigoli e margini sottili, imprescindibile per consentire l'ot-



Fig. 1 Modello in gesso prima della scansione.

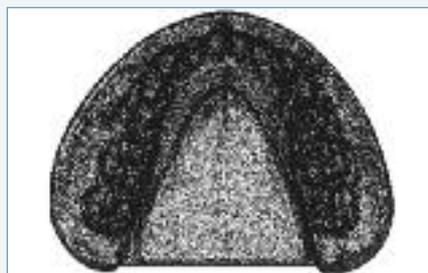


Fig. 2 Matematizzazione del modello scansionato con realizzazione della struttura a griglia tridimensionale.



Fig. 3 Modello virtuale ricostruito a partire dalla griglia.

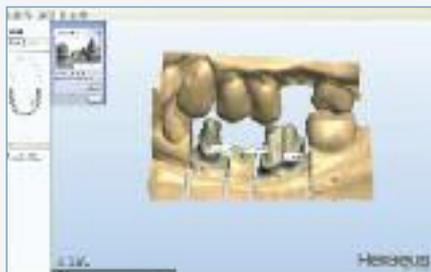


Fig. 4 Modello master con antagonista realizzato dal sistema di design 3Shape.

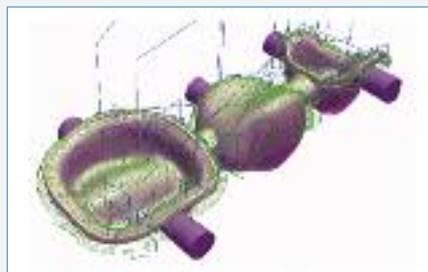


Fig. 5 Schema grafico del preciso percorso degli utensili rotanti che operano la fresatura di un ponte in zirconia.



Fig. 6 Lavorazione automatizzata di un ponte in zirconia.

SPECIALE CAD/CAM

tenimento di protesi fisse di qualità. Trasformare il disegno tridimensionale in un pezzo assolutamente fedele non poteva che risultare difficoltoso, soprattutto se era previsto l'impiego di materiali ceramici che per quanto altamente resistenti sono fragili. Anche in questo caso lo sviluppo industriale ha dovuto mettere a punto macchinari di lavorazione precisi e stabili, controllati da software sofisticati in grado di gestire le complesse e delicate operazioni di fresatura dei materiali^{19,25} (Figg. 5, 6).

Il bisogno di garantire fedeltà nella produzione dei pezzi ha peraltro creato una bipartizione nel concetto di lavorazione CAM. Originariamente, infatti, l'orientamento operativo prevedeva l'impiego di macchinari di dimensioni contenute che potevano essere installati nel laboratorio odontotecnico o addirittura in studio. La tendenza si è spostata, in un secondo tempo, verso la lavorazione industriale dei pezzi progettati in laboratorio. Questo percorso, che prende il nome di approvvigionamento dall'esterno, in gergo anglofono outsourcing, introduce anche la nuova dimensione di supercontrollo della produzione, sia all'ingresso del ciclo produttivo sia in uscita. Il progetto virtuale della protesi fissa viene, infatti, verificato prima di essere inserito nel canale di produzione e una volta completato il pezzo, tecnici specializzati ne verificano la qualità con analisi microscopiche²⁶. Questi rigori valutativi, senza rallentare il lavoro, permettono di verificare e garantirne un'elevata qualità del prodotto finale.

I pionieri del CAD/CAM odontoiatrico

Oggi la Letteratura scientifica internazionale affronta temi sempre più super-specialistici anche nell'ambito della tecnologia CAD/CAM. Riflessioni importanti sulle applicazioni delle procedure digitali si affrontano con impeto nella ricerca di base e clinica; parimenti vengono sollevate questioni tecniche pratiche a testimonianza del desiderio di risolvere difficoltà operative su grande scala e nella quotidianità.

Come sempre l'evoluzione richiede il suo tributo. Alcuni sistemi tecnologici sorti all'alba della era del CAD/CAM odontoiatrico hanno già concluso il loro ciclo vitale, altri si stanno affermando solo ora e altri devono ancora vedere il loro sorgere. La breccia è stata creata, l'orizzonte dell'operatività tecnologica è allargato e i confini operativi ancora non sono stati individuati, ma il percorso verso di essi è intrapreso. Come ogni nuovo traguardo anche quello del CAD/CAM dentale porta con sé i nomi degli uomini, i pionieri, che hanno voluto vedere oltre e che si sono confrontati con l'inerzia della tradizione, volgendo lo sguardo al di là delle consolidate e rassicuranti conoscenze, per proiettarlo in direzione di un nuovo modo di concepire il lavoro. Probabilmente di alcuni di essi già non esiste più traccia, ma tre professionisti, a partire dagli anni ottanta, hanno resistito e saputo fertilizzare con le loro idee, le loro ambizioni e il loro sguardo lungimirante un mondo fatto di convenzioni e di radicate tradizioni artigianali.

Dottor Duret

Le lodi di questa impresa vanno prima di tutto al dottor Duret, colui che per primo ha condotto il CAD/CAM in ambito odontoiatrico¹⁰. Già nel 1971 quest'uomo cominciava a fabbricare corone protesiche con una superficie occlusale funzionale. Mise a punto una serie di sistemi di rilevamento d'impronta ottica del moncone direttamente nel cavo ora-

SPECIALE CAD/CAM

le, seguita dalla progettazione digitale di una corona e dalla sua successiva realizzazione con una fresatrice a controllo numerico²⁷. Il sistema Sopher[®] creato da Duret ha avuto un impatto enorme sul successivo sviluppo degli altri sistemi CAD/CAM dentali in tutto il mondo.

Segue il dottor Mörmann, l'artefice del Cerec[®] System⁹. Anch'egli ha impiegato la nuova tecnologia operativa direttamente in studio. L'acquisizione dei dati morfologici delle cavità preparate venivano acquisite con un sistema ottico intraorale, faceva seguito nell'immediato la progettazione e la scultura di un intarsio a partire da un blocco preformato di ceramica, per mezzo di un macchinario compatto da studio. Questo sistema è stato davvero innovativo, una pietra miliare. Mörmann ha dimostrato che era possibile realizzare restauri diretti in ceramica nella stessa seduta. Quando questo sistema è stato presentato, l'acronimo bisillabe CAD/CAM si è diffuso in modo esponenziale nel mondo odontoiatrico. I quasi 300 articoli citati nella National Library of Medicine nei quali appare il nome Cerec[®], dalle origini del sistema a oggi, sveltano a testimoniare che il punto tecnologico di non ritorno è stato ormai segnato²⁸.

Dottor Mörmann

Il terzo pioniere è stato il dottor Andersson, realizzatore del sistema Procera[®]¹³. All'inizio degli anni ottanta, propose l'utilizzo delle leghe al nichel-cromo come un sostituto delle leghe auree a causa del drastico aumento dei prezzi del metallo prezioso sul mercato internazionale. Le allergie al nichel hanno rappresentato però un problema ed è stata necessaria una svolta decisionale verso la lavorazione delle leghe al titanio che si dimostravano meno allergeniche. La microfusione del titanio in quegli anni risultava complessa e il dottor Andersson si è orientato verso la fabbricazione di strutture in titanio ottenute attraverso un sistema di elettroerosione, introducendo la tecnologia CAD/CAM nel processo di realizzazione di protesi parziali fisse rivestite in materiale composito¹⁴.

Dottor Andersson

Un'altra importante breccia nel mondo della lavorazione odontoiatrica convenzionale, perché questa è stata la prima applicazione delle tecnologie assistite dal computer, non in una procedura specifica, bensì come parte integrante di un sistema di elaborazione totale. Il sistema di Andersson si è poi sviluppato in forma di centri industriali di processo o fresatura ai quali facevano capolino le richieste di framework derivanti da digitalizzatori satellite distribuiti in tutto il mondo.

Andersson spalanca le porte all'epoca dell'outsourcing, con sistemi di produzione centralizzati connessi tramite Internet, ma comincia in parallelo anche l'era dei materiali ceramici ad alta resistenza, delle bioghe al titanio e al cobalto-cromo²⁹. Il laboratorio odontotecnico, roccaforte e custodia della plurimillennaria tradizione di microfusione delle leghe preziose con la tecnica della cera persa, comincia ad aprirsi ai concetti di disegno virtuale, di partnership a distanza, di flusso di lavoro, di supercontrollo della qualità, di materiali innovativi e di risultati non più solo operatore dipendenti.

SPECIALE CAD/CAM

Panoramica
sul CAD/CAM dentale

Secondo lo schema tradizionale di realizzazione dei restauri protesici in lega: alla preparazione dei denti pilastro segue la presa dell'impronta, lo sviluppo del modello, quindi la ceratura e infine la fusione³⁰ (Fig. 7).

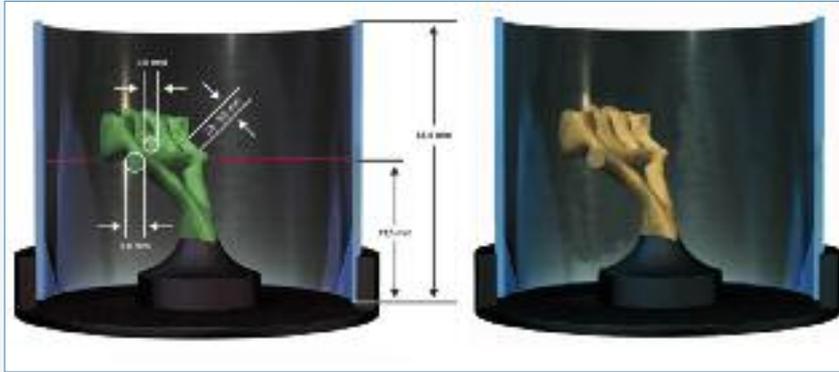


Fig. 7 La realizzazione di fusioni di qualità richiede la messa in atto di procedure accurate in ogni singola fase procedurale.

Per converso, quando questo lavoro è svolto direttamente in studio, con l'ausilio di tecnologia assistita dal computer, gli elementi pilastro sono digitalizzati direttamente all'interno della cavità orale, invece di ricorrere alla presa dell'impronta. I restauri vengono progettati su un monitor, utilizzando un software di disegno tridimensionale, dove il restauro ha modo di essere progettato in forma di una ceratura virtuale. L'elaborato di-

digitale viene poi trasformato nel restauro effettivo per mezzo di un sistema di fresatura, a partire da un blocco di materiale idoneo³¹.

A dispetto dell'apparente semplicità del flusso di lavoro elettronico bisogna tenere conto, che allo stato attuale delle risorse tecnologiche, la digitalizzazione diretta nel cavo orale degli elementi pilastro presenta ancora difficoltà concrete. Invero, i sistemi ottici di rilevamento morfologico oggi disponibili trovano ancora limiti applicativi, a causa delle esigue dimensioni del campo di lavoro intraorale e all'interferenze dovute alla presenza dei denti adiacenti, della gengiva e della saliva; condizioni sfavorevoli che rendono difficile il riconoscimento dei margini di finitura della preparazione del moncone e che delineano un limite oggettivo nella fabbricazione di restauri di precisione³¹.

Sebbene la digitalizzazione di una cavità da intarsio con una fotocamera compatta intraorale risulta tecnicamente di facile traguardo, così come la concretizzazione del restauro in ceramica; al contrario, il processo di realizzazione di corone e protesi parziali fisse accurate, abbisogna ancora che l'acquisizione della morfologia digitale avvenga su di una struttura stabile e priva di interferenze. Non a caso il modello in gesso rappresenta ancora oggi il fulcro di eccellenza per l'avvio dell'algoritmo produttivo digitale robotizzato³³. Una volta avviata la sequenza, i restauri possono essere progettati sul monitor e fabbricati da diverse macchine da lavorazione. Il laboratorio odontotecnico può mettere in atto l'intero processo produttivo se, oltre al sistema di scansione e al software di design, dispone anche di fresatori CAM. Più frequentemente, invece, questo è il flusso operativo attuato dai sistemi industriali. Di recente, i sistemi CAD/CAM che operano a distanza attraverso Internet hanno raccolto una grande attenzione, in luogo anche della possibilità di produrre strutture protesiche ad alta resistenza impiegando materiali ceramici avanzati e biogelhe senza importanti investimenti tecnologici a carico del laboratorio odontotecnico. Chiaramente la fase di digitalizzazione del modello in gesso e la progettazione della struttura protesica avvengono nei laboratori satellite distribuiti ovunque, mentre la trasformazione dell'elaborato digitale si compie in un centro di fresatura. Le strutture protesiche prodotte in modo industriale vengono poi consegnate al laboratorio satellite per completare l'estetica dei restauri, attraverso la stratificazione di porcellana o materiali compositi.

SPECIALE CAD/CAM

Con il termine digitalizzazione si intende il rilevamento della morfologia tridimensionale di un solido e la sua trasformazione in dati numerici sensibili di elaborazione grafica.

Un gran numero dei sistemi CAD/CAM odontoiatrici utilizzano il modello maestro come punto di partenza. La superficie del modello viene misurata e acquisita in forma numerica, utilizzando diversi strumenti di digitalizzazione, definiti scanner. Due approcci diversi, entrambi estremamente precisi, si confrontano a questo scopo. L'operazione di digitalizzazione può avvenire con l'impiego di sonde da contatto che scorrono sulle superfici del solido¹⁸ oppure attraverso processi di rilevazione ottica che registrano la riflessione di fasci luminosi diretti sulla superficie da acquisire. In entrambi i casi sia il movimento della sonda sia la variazione del fascio luminoso vengono registrati e trasdotti in informazioni numeriche che permettono la ricostruzione del solido in forma di un modello virtuale gestibile dal computer.

L'acquisizione dei dati mediante digitalizzatori a contatto è attuata tramite pantografi con un braccio snodato la cui punta, scorrendo sulla superficie dell'oggetto da scansionare trasmette le coordinate geometriche dei punti toccati al calcolatore. Questi sistemi sono molto precisi, ma la scansione richiede parecchio tempo affinché l'intera superficie del modello in gesso possa venir acquisita.

I sistemi ottico-topometrici, vale a dire gli strumenti di acquisizione/misurazione di un oggetto che sfruttano il comportamento della luce, sono decisamente più veloci rispetto a quelli che prevedono una misurazione da contatto. La scansione tridimensionale è attuata per mezzo di particolari rilievi fotografici, dove sensori ottici misurano i riflessi di luce generati da un raggio laser o da una fonte di luce bianca che in relazione alle caratteristiche di rilevamento rimbalza o si deforma sulla superficie dell'oggetto. La proiezione del fascio luminoso può essere per punti, linee o griglie^{34,35} (Figg. 8, 9).

La topometria ottica si basa su due tecniche di rilevamento combinate: la triangolazione, che consente la misura della posizione di un punto; e il tempo di ritorno delle onde elettromagnetiche che ne determina la distanza dalla fonte luminosa. Una serie di rilievi fotografici da diverse angolazioni permette l'acquisizione anche di aree in sottosquadro. Il sistema produce una nuvola di punti tra loro interconnessi che vengono matematizzati e ricostruiti dal software gestionale in forma di una griglia³⁶ (Fig. 10). L'oggetto prende così una forma virtuale, ma cosa importante può essere manipolato con diversi livelli di editing. Questo significa che avendo una struttura a griglia riproducibile, il programma

Acquisizione
delle informazioni digitali

Fig. 8 Scanner 3Shape Mod D700. Uno dei più avanzati sistemi di digitalizzazione con sistema di rilevazione ottico-topometrico.

Fig. 9 Il fascio laser emesso dalla sorgente luminosa rimbalza sulle superfici del modello da scansionare. Il riflesso rilevato dalle due fotocamere permette una ricostruzione fedele della situazione morfologica.

SPECIALE CAD/CAM

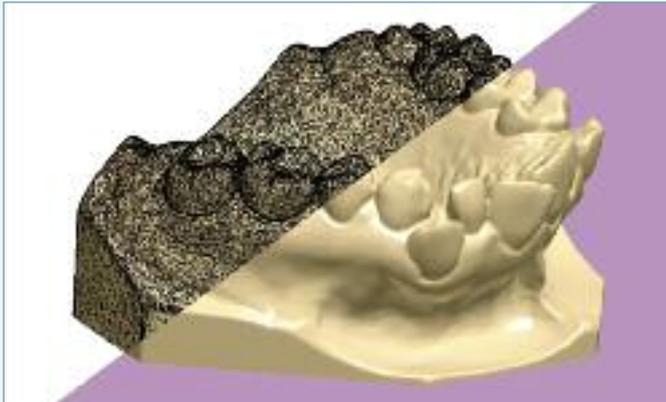


Fig. 10 Esempio di come la nuvola di punti forma una griglia tridimensionale che una volta elaborata produce il modello virtuale.



Fig. 11 Moncone di un premolare pronto per la scansione ad alta risoluzione.



Fig. 12 Ricostruzione tridimensionale del moncone scansionato. Si osservi il dettaglio del fine preparazione.



Fig. 13 Corona in zirconia completata. La capacità del sistema di acquisizione digitale è il punto di partenza per l'ottenimento di un lavoro altamente preciso.

gestionale costruisce un modello virtuale panoramico con definizione limitata, all'interno del quale vengono inserite regioni con dettaglio estremo, che si incastrano sulla precedente griglia senza possibilità di errore. Velocità, precisione e alta definizione sono gli attributi principali dei nuovi sistemi di rilevamento ottico-topometrico (Figg. 11-13).

Il CAD/CAM in studio

L'introduzione del CAD/CAM all'interno dello studio si deve al dottor. Mörmann che ha messo a punto il sistema Cerec® capace di realizzare restauri in ceramica, quali intarsi, in breve tempo. Tuttavia, inizialmente la superficie occlusale del restauro doveva essere scolpita tramite turbina⁹. Inoltre, la finitura marginale degli intarsi nelle prime versioni non risultava pienamente soddisfacente a causa dei limiti di precisione della digitalizzazione. Questa difficoltà di precisione è stata superata mediante la cementazione degli intarsi con materiali compositi in modo da colmare il gap perimetrale.

Negli anni a seguire, il sistema è stato continuamente migliorato nella tecnologia hardware e nel software. Numerose recensioni sono state pubblicate su questo sistema, a dimostrazione del raggiungimento di risultati soddisfacenti a lungo termine³⁷⁻³⁹.

SPECIALE CAD/CAM

Recenti integrazioni del sistema permettono di fabbricare non solo gli originali intarsi, ma anche corone, cappe e frameworks per protesi parziali fisse, con le entrambe le versioni dedicate sia allo studio che al laboratorio.

La digitalizzazione intraorale, come alternativa alla tradizionale tecnica di impronta, ha stimolato alcune aziende produttrici (Lava® Chairside e Cadent® iTero) a intraprendere questo itinerario innovativo malgrado la complessità e gli ostacoli che la tecnica di rilevazione digitale incontra in ogni fase del suo percorso (Fig. 14).

Alcuni sistemi di rilevazione ottica richiedono che le superfici delle preparazioni vengano cosparse con una spray opacizzante per evitare fenomeni di riflessione anomala durante la rilevazione, generati dalla presenza di fluidi o da superfici lucide. Altri sistemi abbisognano di un programma di editing post-scansione per ripulire e trasformare l'acquisizione, in un file ad alta risoluzione per la realizzazione del successivo disegno CAD. Inoltre la quantità, la posizione e il grado di rifinitura degli elementi pilastro, sono variabili che aumentano sensibilmente la complessità di rilevazione e quindi di produzione di framework soddisfacenti in termini di precisione. Nonostante l'idea di avere un prodotto realizzato direttamente nello studio odontoiatrico si sia fatta breccia in virtù delle potenzialità delle procedure di lavoro digitale, è vero anche che la necessità di ottenere standard produttivi di qualità richiede un'ineludibile abilità progettuale.

Il design virtuale è sicuramente uno strumento straordinario che invoglia il suo utilizzo anche da parte dei professionisti in studio. Nonostante si possa fare affidamento su data base di morfologie coronali, messe a disposizione dai software più complessi e aggiornati, quest'approccio non consente di sostituire l'abilità progettuale dell'odontotecnico nel conseguimento di una soluzione protesica efficace. La valutazione dei volumi e degli spessori dei framework oppure il disegno dei connettori, in relazione alle caratteristiche fisico-meccaniche del materiale da utilizzare, sono solo alcuni aspetti che evidenziano la necessità di un'esperienza progettuale e inducono a non sopravvalutare l'efficacia della sola operatività digitale.

Intorno alla metà degli anni ottanta la tecnologia CAD/CAM trovava applicazione in diverse operazioni finalizzate alla realizzazione di componenti di protesi parziali e totali rimovibili. L'avanguardia digitale del periodo verteva sull'impiego di macchinari a controllo numerico e sistemi di lavorazione in elettroerosione⁴⁰. L'asportazione per scariche elettriche si è dimostrata un eccellente metodo per molte applicazioni industriali, ma per le esigenze protesiche risultava poco efficace, poiché richiede molto tempo per la produzione dei pezzi e può essere impiegata solo su materiali conduttori, nello specifico le leghe^{14,41}. Oltremodo, la domanda di protesi rimovibili negli ultimi anni si è ridotta sensibilmente, sia a fronte dei risultati ottenuti dalla prevenzione della carie e della malattia parodontale⁴²⁻⁴⁴ sia per la possibilità di sostituire i denti mancanti con impianti⁴⁵⁻⁴⁷. Contemporaneamente, invece, si è espansa la richiesta di soluzioni protesiche sempre più este-

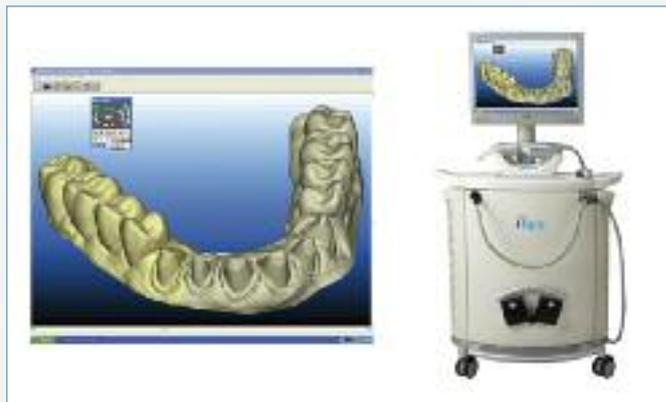


Fig. 14 Uno dei più moderni sistemi di rilevamento di impronta digitale intraorale.

Il CAD/CAM
in laboratorio

SPECIALE CAD/CAM

tiche, con conseguente bisogno di materiali ceramici innovativi che, per antonomasia, sono isolanti elettrici e non possono essere lavorati con elettroerosione.

Dagli anni novanta lo sviluppo delle tecnologie CAD/CAM ha dovuto necessariamente subire una netta deviazione, con orientamento verso la realizzazione di protesi fisse. Allora, erano già presenti diversi sistemi ben sviluppati o in fase di sviluppo. Ciò nonostante, i processori e i programmi di computer grafica di quegli anni trovavano difficoltà a riprodurre e gestire i dati digitalizzati in tre dimensioni. Progettare il nucleo di una corona singola attraverso un'operazione di ceratura virtuale a monitor richiedeva notevole abilità e un grande dispendio di tempo⁴⁸.

L'accelerazione iperbolica del progresso informatico, negli ultimi anni, ha reso possibile la messa a punto di software complessi, sostenuti da processori potenti, in grado di creare automaticamente la morfologia delle corone, in contrapposizione alla loro realizzazione mediante processi di computer grafica gestiti ancora manualmente.

L'affiancamento ai più moderni sistemi CAD/CAM anche dell'ingegneria assistita dal computer, alla quale corrisponde l'acronimo anglofono CAE, ha reso possibile anche una valutazione della meccanica strutturale delle protesi fisse in relazione alle caratteristiche dei materiali utilizzati e finalizzare una struttura dalle proprietà meccaniche predefinite^{49,50} (Figg. 15, 16).

I primi sistemi CAD/CAM da laboratorio prevedevano allora tre elementi: la strumentazione di misura; cioè lo scanner che acquisiva le informazioni analogiche e le convertiva in dati digitali; il macchinario di fresatura, in genere piuttosto ingombrante; nonché una postazione di computer, anch'essa di notevoli dimensioni, per realizzare il centro di elaborazione grafica. L'adozione di impianti così grandi nei tradizionali laboratori odontotecnici ha trovato limitazioni a causa dei notevoli investimenti richiesti per l'acquisto dell'attrezzatura tecnologica e per le esigenze di spazio che richiedevano.

Bisogna tenere conto che nonostante il vantaggio produttivo derivante dall'utilizzo della tecnologia CAD/CAM dentale, tema particolarmente caldeggiato dai produttori, gli elementi essenziali di riconoscimento dei benefici tecnici quali: l'adattamento dei restauri oppure le reali possibilità applicative dei sistemi non erano ancora suffragati da un'evidenza scientifica, tantomeno esistevano pubblicazioni specifiche che potessero far luce sull'argomento.



Fig. 15 Le strutture vengono progettate in relazione alle caratteristiche fisico-meccaniche del materiale che verrà utilizzato.



Fig. 16 La struttura realizzata in biolega al cobalto-cromo realizzata secondo precisi criteri strutturali.

SPECIALE CAD/CAM

Solo in seguito a questo malaccorto approccio sono state stabilite le nuove strategie di sviluppo che hanno dato vita all'approntamento dei più moderni, piccoli e versatili sistemi CAD/CAM⁵¹; le caratteristiche dei quali possono essere riassunte nei seguenti punti:

- macchinari compatti e integrati installabili in normali laboratori;
- sistemi gestiti da PC anziché da postazioni di lavoro costose e ingombranti;
- apparecchiature semplici e ad alte prestazioni;
- automazione della produzione;
- realizzazione di protesi di qualità utilizzando sia leghe sia materiali ceramici avanzati.

La produzione autonoma, con l'utilizzo di fresatori CAM di dimensioni medio-piccole, riesce a soddisfare solo parzialmente l'ampia gamma di lavorazioni richieste. Innegabile è il vantaggio di produrre pezzi in tempi brevi direttamente in laboratorio, ma a ciò si contrappongono difficoltà operative importanti. La qualità della fresatura è, infatti, intimamente associata alla stabilità del macchinario CAM e alla durezza del materiale. Facendo un'analisi sommaria si potrebbe sostenere che un materiale come la zirconia pre-sinterizzata, sia più facilmente lavorabile rispetto a una lega di cobalto-cromo, per la marcata differenza di durezza dei due materiali. Almeno in teoria questa questione potrebbe essere gestita utilizzando la produzione interna per le lavorazioni dei materiali più friabili, delegando la trasformazione dei materiali duri a strutture industriali esterne. Ma anche la fresatura di materiali teneri come la zirconia pre-sinterizzata, nasconde insidie legate alla natura del materiale stesso, ancora privo in questa fase, delle sue eccellenti proprietà meccaniche. Tutti i prodotti ceramici sono per natura fragili e propensi a scheggiature durante la fresatura; la loro accurata lavorazione richiede quindi utensili rotanti appropriati che lavorano in pressoché totale assenza di vibrazioni. Un fresatore CAM stabile genera superfici estremamente levigate, anche in presenza di spessori ridotti riducendo drasticamente le fasi e i tempi di rifinitura post-sintering del pezzo, che oltremodo risultano inopportune per la natura strutturale del materiale policristallino.

Un altro importante aspetto che andrebbe considerato è la fase di sinterizzazione. Nel laboratorio odontotecnico, sempre a proposito della zirconia, la manutenzione dei macchinari per la sinterizzazione è una procedura di difficile gestione. In caso di non perfetta efficienza del macchinario, la curva termica potrebbe risultare alterata da una potenziale errata variazione di temperatura durante il ciclo di sinterizzazione, con conseguente compromissione della qualità strutturale finale. Non si esclude tuttavia, la possibilità di una produzione interna al laboratorio odontotecnico, con l'impiego di protocolli e risorse tecnologiche, che tengano conto e gestiscano al meglio anche queste variabili. Rimane quindi del tutto individuale la scelta di avvalersi un percorso operativo interno al solo laboratorio oppure rivolgersi per l'approvvigionamento delle strutture protesiche, a centri di produzione esterna, dove il management produttivo è una strada ben tracciata con chiara comprensione degli obiettivi qualitativi da conseguire.

Il termine outsourcing significa approvvigionamento dall'esterno e indica nello specifico la produzione industriale di pezzi disegnati in laboratori satellite, che ordinano la lavorazione delle protesi a centri di formatura industriali. La lavorazione in outsourcing ha ri-

La lavorazione
in outsourcing

SPECIALE CAD/CAM

chiesto lo sviluppo di una rete di interscambio di informazioni su scala globale, con connessioni tra singoli laboratori e centri di produzione⁵².

Acquisiti i dati tridimensionali del modello in gesso mediante uno scanner installato nel laboratorio odontotecnico e convertiti in un simulacro virtuale di alta precisione, mediante un software di design, viene sviluppata la modellazione tridimensionale del restauro completo. Quest'operazione viene eseguita con l'ausilio di un database contenente morfologie di corone che possono essere selezionate e introdotte nella ceratura, nonché adatte nella forma alla situazione specifica del modellato virtuale (Figg. 17-19). I software più virtuosi permettono di ottenere dei modellati con morfologie del tutto equiparabili alla ceratura tradizionale, con tempi esecutivi decisamente contenuti (Fig. 20). Dalla ceratura completa, in modo del tutto automatico viene ottenuto il framework, con volumi strutturali correlati alle caratteristiche meccaniche del materiale selezionato per la fabbricazione, lega o ceramico (Fig. 21). Ancora il progetto può essere modificato in base a esigenze operative soggettive, ma sempre sotto un supercontrollo automatizzato che giudica, in tempo reale, l'operato del designer e suggerisce le necessarie modifiche, qualora la morfologia del lavoro non sia congruente con i parametri strutturali dei materiali (Fig. 22).

Realizzato il pezzo tridimensionale, il file dello stesso viene inviato tramite Internet al centro di elaborazione. Un sistema di accettazione sottopone il progetto a un'ulteriore verifica di fattibilità che, se confermata, apre le porte alla produzione (Figg. 23, 24). Utilizzando macchinari completamente automatizzati ed estremamente stabili, operanti a controllo numeri-

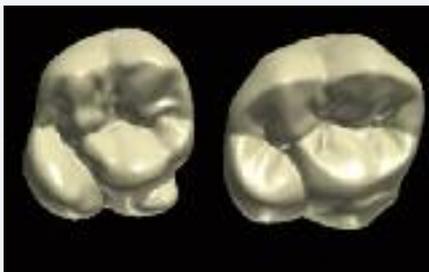


Fig. 17 Esempi di morfologie coronali fornite dalla banca dati del software, che possono essere selezionate per realizzare la ceratura virtuale.

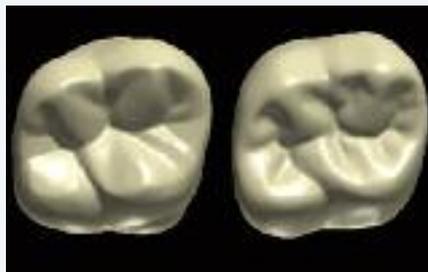


Fig. 18 La selezione delle forme coronali avviene a partire da un campione estremamente assortito.

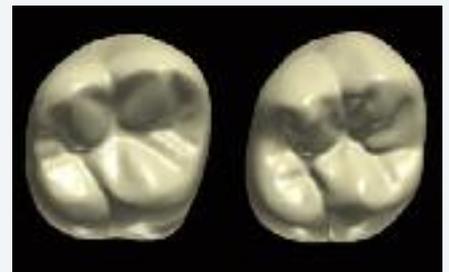


Fig. 19 Morfologie aggiuntive possono essere modellate, quindi scansionate e inserite nella banca dati in relazione alle necessità soggettive dell'operatore.

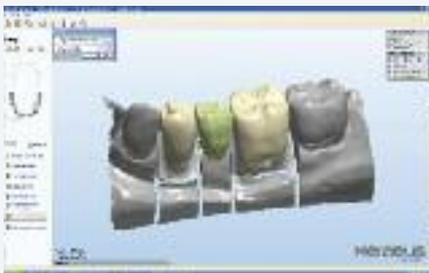


Fig. 20 Applicazione automatizzata di morfologie coronali a una ceratura virtuale per un ponte di tre elementi.



Fig. 21 Riduzione delle morfologie coronali per ottenere un framework in zirconia.

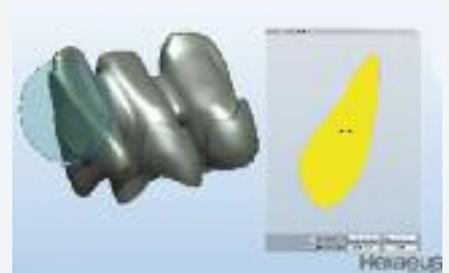


Fig. 22 Esempio di una scansione bidimensionale di un connettore per la valutazione del diametro di resistenza ottimale della struttura di un framework.

SPECIALE CAD/CAM



Fig. 23 Schema di posizionamento di corone e ponti all'interno di una cialda da fresatura in modo da ottimizzare gli spazi e ridurre gli sprechi di materiale.

Fig. 24 Esempi di corone e ponti provvisori realizzati in polimetacrilato di metile ancora connessi alla cialda madre dopo la fresatura industriale.



Fig. 25 Tecnologia di fresatura del moderno sistema Cara System® Heraeus. 17 tonnellate di macchinario poggianti su una soletta di 2,5 metri di cemento armato conferiscono stabilità assoluta alla struttura operativa.



Fig. 26 Faretra del fresatore industriale Cara System® Heraeus. Gli utensili rotanti di calibro diverso vengono automaticamente selezionati e sostituiti in relazione alla fase di alesatura dei pezzi.



Fig. 27 Fase iniziale di formatura di ponti e corone in zirconia. Si osservi la solida ghiera in acciaio che trattiene stabilmente la cialda di materiale ceramico crudo durante l'alesatura.



Fig. 28 Accurata pulizia di un ponte in zirconia dopo la fresatura.



Fig. 29 Preparazione delle strutture di corone e ponti alla fase di sinterizzazione.



Fig. 30 Verifica di qualità dei pezzi allo stereomicroscopio dopo la sinterizzazione.

co computerizzato (Fig. 25), il centro di elaborazione scolpisce fedelmente il progetto virtuale nel pezzo vero e proprio, del materiale prescelto (Figg. 26, 27). Una volta completata la formatura il pezzo è sottoposto a ulteriore verifica microscopica che ne conferma la buona realizzazione, secondo ben codificati parametri di qualità (Figg. 28-30)⁵³.

Solo dopo il superamento di questo esame il framework può intraprendere la strada verso il laboratorio satellite di partenza che ne ha ordinato la realizzazione, dove il pezzo industriale viene sottoposto a rivestimento estetico, mediante stratificazione della porcellana (Figg. 31-34).

SPECIALE CAD/CAM

Fig. 31 Disegno virtuale di un framework in zirconia ottenuto con il sistema 3Shape.

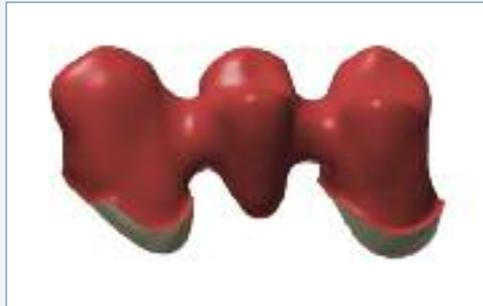


Fig. 32 Struttura ceramizzabile in zirconia ottenuta con fresatura industriale con Cara System® Heraeus.



Fig. 33 Completamento della fase di ceramizzazione del ponte con sottostruttura in zirconia.



Fig. 34 Applicazione del ponte in situ. La lavorazione industriale non ha modificato lo schema abituale di realizzazione di un tradizionale ponte.



L'introduzione di nuovi materiali

Una svolta importante in ambito delle lavorazioni odontoiatriche con CAD/CAM è stato l'avvento dei composti ceramici avanzati e delle biogelhe al titanio e al cobalto-cromo.

Materiali ceramici avanzati

Per quanto concerne i materiali ceramici avanzati, quattro caratteristiche fondamentali hanno conferito a questi composti l'ingresso e l'affermazione in ambito protesico: la biocompatibilità; la resistenza; la traslucidità; l'economicità. Tali ceramiche si sono dimostrate validi sostituti delle leghe, anche per i restauri protesici nei settori posteriori^{54,55}. Le eccellenti proprietà meccaniche, in particolare la resistenza alla flessione e alla rottura, hanno sancito il successo di composti come il disilicato di litio (Empress II®), l'allumina vetroinfiltrata (InCeram Alumina®), l'allumina vetroinfiltrata tenacizzata con zirconia (In-Ceram® Zirconia), l'allumina a elevata purezza densamente sinterizzata (Procera®) e la zirconia tetragonale policristallina stabilizzata con ittria (Cercon®, DCSPrecident®, Lava®, Cara System® Heraeus)⁵⁶⁻⁶³.

Poiché la fabbricazione di strutture protesiche in ceramica ad alta resistenza è un'operazione delicata, è necessario adottare macchinari affidabili e stabili per concretizzarne la realizzazione. La tecnologia convenzionale del laboratorio odontotecnico non è, infatti, in grado di produrre prodotti eccellenti su vasta scala impiegando questi materiali. A fronte di questa limitazione operativa l'utilizzo ottimale e standardizzato di ceramici avanzati esige ineluttabilmente l'applicazione di nuove tecnologie CAD/CAM abbinate a sistemi produttivi industriali.

Zirconia

Tra i materiali ceramici avanzati di uso odontoiatrico sicuramente la zirconia tetragonale policristallina stabilizzata con ittria (Y-TZP) è quella che sta riscuotendo un maggiore in-

SPECIALE CAD/CAM

teresse come materiale sostitutivo delle leghe, per la realizzazione di framework per protesi fisse. Infatti, la maggior parte dei sistemi CAD/CAM presenti sul mercato mondiale non fanno mancare nella lista dei loro materiali da fresatura l'Y-TZP⁶⁴⁻⁶⁷.

La zirconia è un materiale eccezionale e allo stesso tempo ancora poco compreso dal mondo odontoiatrico. Da solo questo composto ceramico meriterebbe un'approfondita rassegna per comprenderne l'essenza delle sue qualità fisiche e meccaniche. Brevemente in questa disamina si vogliono evidenziare alcuni aspetti della lavorazione industriale e come questi possono influire sul risultato finale.

Esistono infatti due tipi di blocchi di zirconia per distinte applicazioni CAD/CAM. La prima prevede l'utilizzo di blocchi densi completamente sinterizzati; la seconda e più frequente, fa uso di blocchi pressati per la fresatura. In quest'ultimo caso una volta scolpito il framework, esso subisce un processo di sinterizzazione che lo porta ad essere il prodotto finale con adeguata resistenza. Dal punto di vista operativo, il primo sistema ha il vantaggio del rispetto dimensionale, in quanto il materiale essendo già sinterizzato non è soggetto a ulteriore contrazione volumetrica, ma per converso ha una lavorabilità estremamente difficoltosa, poiché la durezza della zirconia sinterizzata impone un'usura marcata agli utensili di lavorazione. Inoltre, la formazione di microfratture sul materiale sinterizzato prodotte dalla fresatura, rende il pezzo più facilmente soggetto a deterioramento meccanico⁶⁶. La procedura che prevede l'utilizzo di zirconia non ancora sinterizzata ha il pregio di una più facile lavorabilità limitando l'usura degli strumenti o la frammentazione del materiale. Tenendo conto che in questo caso il pezzo fresato subisce una contrazione volumetrica durante il successivo processo di sinterizzazione, il software di gestione del sistema CAM rende possibile un automatico sovradimensionamento, in previsione del futuro calo dimensionale^{66,67}.

Da sottolineare, comunque, che in fase progettuale il framework viene realizzato mantenendo una scala assolutamente normale, vale a dire un rapporto uno a uno. Solo successivamente una volta che il file giunge al centro di fresatura il disegno in 3D viene magnificato, in modo da compensare la contrazione volumetrica che si verificherà durante la sinterizzazione finale della zirconia⁶⁸. Alcuni sistemi di lavorazione di ultima generazione, come il Cara System® Heraeus garantiscono una riproducibilità del file tridimensionale, generato nel laboratorio odontotecnico, con uno scarto di precisione post-sintering che non supera il singolo micrometro, permettendo quindi finiture marginali e superficiali di altissimo livello qualitativo e garantendo il raggiungimento di una qualità di accoppiamento con il moncone di livello notevole. Anche nel caso di frameworks di grandi dimensioni la messa a punto di un compenso dimensionale estremamente calibrato, in associazione con un processo di sinterizzazione controllato e mantenendo l'intero pezzo connesso con parte della cialda di fresatura, rappresentano accorgimenti capaci di mantenere fedele in modo pressoché assoluto il livello qualitativo finale di un framework dell'estensione di un'arcata.

Nonostante i materiali ceramici di ultima generazione si stanno affermando con grande impeto, sull'onda di una percezione estetica sempre più accentuata e diffusa, le protesi

Biologhe

SPECIALE CAD/CAM

odontoiatriche ancora non possono ancora eludere l'impiego dei composti metallici. Esistono diverse lavorazioni che ancora abbisognano di essere allestite in blocchi separati e successivamente congiunti mediante saldatura oppure pezzi specifici come abutment implantari, barre di ritenzione per protesi rimovibili. In questi casi la versatilità delle leghe offre uno spazio di manovra decisamente maggiore rispetto alla ceramica. Un pezzo ottenuto in ceramica non può essere infatti adattato nella forma, saldato o utilizzato per l'allestimento di una barra^{69,70}.

Le leghe disponibili oggi per lavorazioni assistite dal computer sono principalmente quelle al titanio e al cobalto-cromo. In entrambi i casi i framework vengono ottenuti a partire da blocchi o cialde di materiali densi e omogenei che non subiscono modifiche di stato fisico, come avviene nella fusione mediante tecnica della cera persa, ma mantengono intatte le loro caratteristiche offrendo prestazioni, in termini di resistenza, di livello superiore alle leghe processate per fusione⁷¹. Entrambe le tipologie di materiali rispondono a esigenze tecniche fondamentali quali: biocompatibilità; elevata resistenza; basso peso specifico; possibilità di essere rivestite con ceramiche^{72,73}.

Nella realizzazione di corone e protesi fisse il processo di rivestimento estetico avviene per stratificazione delle masse di porcellana secondo le modalità consuete per la metal-ceramica. Nel caso delle leghe al titanio devono essere adottate ceramiche apposite che tengono conto dello specifico coefficiente di dilatazione e contrazione della lega durante le cotture di rivestimento; invero, nel caso delle leghe al cobalto-cromo non è richiesto alcun adattamento procedurale per il loro rivestimento ceramico. Un attributo questo che offre ancora più versatilità a questi secondi materiali (Figg. 35-39).

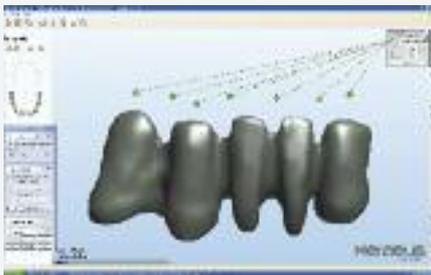


Fig. 35 Progetto protesico virtuale di un ponte anteriore in biocera al cobalto-cromo.



Fig. 36 Prova metallo del framework in cobalto-cromo.



Fig. 37 Ceramizzazione del ponte secondo la metodica convenzionale.



Fig. 38 Completamento del rivestimento ceramico.



Fig. 39 Ponte in biocera al cobalto-cromo e rivestimento ceramico in situ.

SPECIALE CAD/CAM

I vantaggi che si propone l'impiego della tecnologia CAD/CAM nel settore odontoiatrico possono essere riassunti nei seguenti punti: applicazione di nuovi materiali; riduzione del lavoro; buon rapporto costo-beneficio; controllo di qualità.

Vantaggi del CAD/CAM

In tutta la storia dell'odontoiatria, il risultato protesico è stato sempre correlato ai materiali e alla loro tecnologia di trasformazione. Quando vengono introdotti nuovi materiali l'applicazione della tecnologia convenzionale è la prima verifica ai quali quest'ultimi sono sottoposti. Tuttavia, per le ceramiche ad alta resistenza è stato difficile utilizzare le tecnologie convenzionali dei laboratori odontotecnici e per affrontarne la trasformazione si è reso necessario impiegare sistemi di lavorazione automatizzati. Inoltre, la tecnologia CAD/CAM è stata ineludibile per calcolare e quindi compensare le modifiche dimensionali che avvengono con la sinterizzazione dei prodotti ceramici.

Applicazione di nuovi materiali

Anche per le biogeghe è possibile fare un discorso analogo, quest'ultime infatti sebbene possano essere trasformate con processi di fusione, la loro resa in termini di densità e omogeneità è decisamente superiore quando il pezzo viene elaborato direttamente per fresatura. Questo significa che la qualità del pezzo ottenuto per fresatura è senza dubbio superiore rispetto a quella una lega analoga formata per fusione.

Le convenzionali tecnologie di laboratorio odontotecnico richiedono tradizionalmente una manodopera altamente qualificata e un notevole impegno di tempo. Per converso, l'applicazione della tecnologia CAD/CAM ha come intento anche la riduzione dei tempi esecutivi. La semplificazione delle procedure operative e la possibilità di potersi avvalere di un data base di morfologie coronali, facilita le operazioni di progetto tridimensionale. Bisogna tenere presente che la curva di apprendimento della tecnica di lavorazione virtuale, presentata in genere come un percorso breve e semplice, trova conferma solo nella realizzazione di piccoli e semplici frameworks, mentre per le ricostruzioni più complesse richiede tempo e applicazione. Oltre alla personale capacità operativa, i rallentamenti e le difficoltà sono talvolta correlati alla snellezza di elaborazione degli algoritmi dei software dedicati. La stabilità operativa e la semplicità di elaborazione dei software CAD sono alcuni degli aspetti più importanti del disegno virtuale, direttamente correlati alle performance operative.

Riduzione del lavoro

Nonostante la richiesta di programmi virtuosi semplici e intuitivi sia sempre più necessaria, sono oggi presenti sul mercato software con grafiche accattivanti e dotati di numerosi strumenti di lavoro virtuale non sempre accompagnati da una programmazione sufficientemente prestante o da un adeguato controllo sugli eventuali difetti di sistema, definiti bugs.

La competizione commerciale in questo settore determina talvolta scelte temerarie con effetti importanti circa la stabilità e il buon funzionamento del software CAD. Anche il lancio di uno nuovo programma di aggiornamento, release operativa, può essere causa di difficoltà se non viene testato con cura prima della distribuzione. Ancora oggi, alcuni programmi vengono messi a punto solo in fase avanzata grazie ai molteplici feedback che giungono dagli utilizzatori. Fortunatamente non tutte le aziende adottano questa strategia

SPECIALE CAD/CAM

di abbandono della sicurezza gestionale, fornendo prodotti lungamente testati e molto performanti, aspetto questo da non sottovalutare durante le fasi di analisi che precedono l'acquisto di un sistema.

Acquisita una certa dimestichezza con il sistema operativo il tempo complessivo di produzione risulta più breve se paragonato a quello di un processo di realizzazione di una corona in metallo-ceramica tradizionale. Inoltre, l'operatore partecipa direttamente alle procedure per solo per un tempo limitato mentre una gran parte del processo avviene automaticamente. Inoltre, la lavorazione in outsourcing non richiede approvvigionamento e trasformazione di materiali, e ciò si traduce in una diminuzione di impegno e di tempo dedicato a queste mansioni.

Rapporto costo-beneficio Nelle procedure convenzionali di realizzazione dei manufatti in ceramica integrale, ai laboratori è richiesto un certo grado di competenza, sia in termini di riproduzione di un'estetica naturale sia per valutare la contrazione volumetrica che avviene con il processo di sinterizzazione ad alte temperature. Dato il forte impegno di manodopera specialistica e competente la produttività risulta poco efficace e conseguentemente il costo totale dei restauri in ceramica integrale non può che essere elevato.

Parzialmente diversa è l'evidenza in cui i restauri in ceramica integrale sono fresati a partire da un blocco prefabbricato di materiale con caratteristiche predeterminate, utilizzando un sistema CAD/CAM. La produzione di protesi parziali in ceramica integrale a partire da un framework in zirconia prodotta in outsourcing è in grado di fornire prestazioni ancora più vantaggiose sia per lo studio odontoiatrico che per il laboratorio odontotecnico. L'investimento iniziale per il digitalizzatore e il software CAD, vengono gradualmente compensate nel tempo, grazie alla sensibile riduzione complessiva dei tempi di lavorazione, associata a una straordinaria qualità dei frameworks, che si contrappone però ai relativi costi in funzione alla loro complessità e al tipo di materiale. Il risparmio non è quindi determinato da un abbattimento complessivo dei costi, ma va ricercato nell'aumento della qualità strutturale, requisito indispensabile, per la riduzione dei rischi potenziali durante la fase di ceramizzazione. Anche la sensibile diminuzione dei tempi di allestimento dei frameworks, rispetto alla tecnica tradizionale, è comunque un dato certo e può venire impiegato per dedicarsi con maggiore attenzione alla cura del risultato estetico.

Controllo di qualità L'uso della tecnologia CAD/CAM non solo permette la formazione dei restauri protesici, ma consente anche il controllo della qualità degli stessi. Sin dall'inizio del processo produttivo la progettazione delle forme avviene in modo ottimale in base alle caratteristiche del materiale selezionato. Vengono oltremodo evitati gli effetti distorcenti tipici delle lavorazioni tradizionali dove i materiali, devono ineludibilmente essere trasformati attraverso cambi di stato fisico della materia. Infine il percorso di lavoro industriale permette di ottenere una tipologia di risultato sempre riproducibile.

Un blocco prefabbricato di ceramica industriale, per esempio, possiede una qualità garantita già in partenza, i difetti interni nei prodotti fresati sono pressoché inesistenti. Al con-

SPECIALE CAD/CAM

trario l'impiego di polveri ceramiche convenzionali richiede un'abilità tecnica notevole e una cura procedurale impegnativa, per ridurre le porosità interne del manufatto ceramico finale. Ciò malgrado alcuni vizi occulti della struttura sono quasi del tutto ineliminabili.

Da analisi frattografiche e a elementi finiti emerge che tra le cause di fallimento di protesi parziali fisse metal-free, realizzate con metodi convenzionali, sono contemplate, nella maggior parte dei casi, deficit strutturali dei connettori, in quanto zone che facilitano la concentrazione degli stress meccanici⁷⁴⁻⁷⁸. Nel caso di lavorazioni con CAD/CAM, il calibro del connettore, viene prestabilito in funzione della lunghezza della travata e del materiale prescelto per la costruzione del framework. Non essendo possibile ridurre il calibro del connettore a piacimento, perché il sistema di correzione automatizzata lo impedisce, l'impiego del CAD garantisce una maggior sicurezza di resistenza meccanica riducendo il rischio di frattura della travata.

La necessità di rendere i trattamenti odontoiatrici più efficaci comporterà probabilmente sempre di più una contrazione dei tempi di trattamento, senza che questo comporti una diminuzione della qualità nel risultato riabilitativo funzionale ed estetico; anzi verrà richiesto che questi parametri siano addirittura implementati. In quest'ottica evolutiva non ci sono dubbi che le necessità porteranno all'introduzione e diffusione di sistemi CAD/CAM direttamente in ambito clinico. L'odontoiatria del futuro avrà probabilmente la necessità di offrire restauri protesici efficienti ed estetici in tempi brevi, forse addirittura in una sola seduta e probabilmente senza aumentarne i costi. La tecnologia CAD/CAM applicata direttamente in studio è presumibilmente la migliore candidata in termini di potenziale tecnologico per fornire questa tipologia di servizio. La ricerca e lo sviluppo industriale stanno già mettendo a punto sistemi di scansione intraorale compatti e di alta precisione e non è da escludere che nell'immediato futuro possano già essere disponibili. Inoltre, i materiali che soddisfano al meglio le esigenze estetiche e che possiedono caratteristiche meccaniche eccellenti hanno modo di essere gestiti unicamente con questo tipo di tecnologia.

Considerando la durata media dei dispositivi riabilitativi, le innovazioni nei materiali e nelle tecnologie sono necessarie per soddisfare standard di prestazione rigorosi e garanzia di qualità. L'analisi strutturale durante il processo di progettazione CAD sarà sempre più un potente strumento che affianca il disegno dei framework in ceramica, nei quali la corretta progettazione dei connettori diminuisce decisamente il rischio di frattura durante la funzione.

Un'altra aspettativa per il futuro riguarda la simulazione della funzione masticatoria nella progettazione delle riabilitazioni. I dispositivi protesici dovrebbero essere progettati e fabbricati con un miglioramento della funzione dinamica, in relazione ai movimenti mandibolari. L'analisi dei movimenti della mandibola è una colonna portante della gnatologia e della chinesologia ed è un argomento da sempre intimamente correlato alla disciplina protesica.

Allo stato attuale dell'evoluzione tecnologica, la maggior parte dei software CAD permettono solo la riproduzione statica delle morfologie protesiche, per converso alcuni programmi stanno evolvendosi anche verso l'impiego di analisi vettoriali della dinamica mastica-

Prospettive future
per il CAD/CAM

SPECIALE CAD/CAM

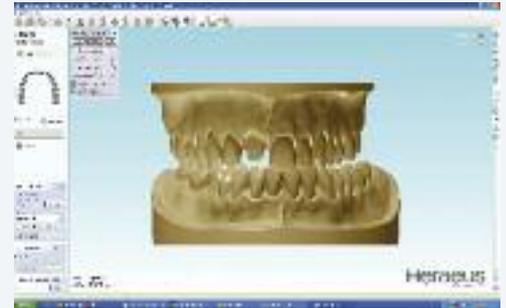
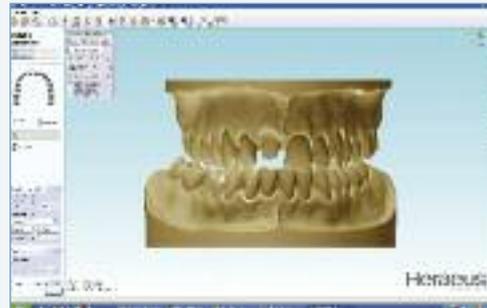
Fig. 40 Modelli in articolatore virtuale in occlusione abituale, ricreati dal software 3Shape.

Fig. 41 Visione dal lato sinistro della simulazione del movimento di lateralità destra.



Fig. 42 Visione frontale del movimento di lateralità destra.

Fig. 43 Visione frontale del movimento di lateralità sinistra.



toria con possibilità di trasferimento alla progettazione del framework, dando vita alla produzione di morfologie occlusali direttamente correlate alla dinamica funzionale soggettiva con test virtuali dinamici (Figg. 40-43). Anche l'analisi della deglutizione, della fonazione e delle parafunzioni potranno essere interfacciati con le nuove generazioni di programmi di progettazione CAD. Ancora, l'interfaccia tra la scansione intraorale e i file tipo DICOM, generati per le tomografie computerizzate, renderanno performanti le analisi tra le strutture scheletriche e la dentatura residua, per consentire piani di trattamento più corrispondenti ed efficaci ai dati di riferimento anatomico-strutturali.

Oltre al successo delle tecnologie digitali per la fabbricazione di protesi fisse su pilastri naturali, la tecnologia CAD/CAM ha già trovato applicazione anche nella realizzazione di abutment e sovrastrutture implantari. Nonostante ciò, questa tecnologia dovrebbe essere introdotta anche nella fabbricazione di protesi parziali rimovibili^{79,80} e nell'allestimento dei dispositivi ortodontici sempre mantenendo requisiti di alta qualità in tutti i campi.

Inoltre, il CAD/CAM dentale dovrebbe essere disponibile anche in contesti educativi e come strumenti di formazione continua e per simulazioni di procedure protesiche e chirurgiche⁸¹⁻⁸³.

Un altro aspetto non trascurabile riguarda la possibilità di utilizzare la tecnologia CAD/CAM per accumulare dati riguardanti la fabbricazione delle protesi e per documentarne il periodo di sopravvivenza funzionale. Questi dati una volta analizzati e processati statisticamente permetteranno di formulare linee guida protesiche basate sull'evidenza. Linee guida peraltro esistenti, ma ancora difficili da utilizzare poiché l'impiego della tecnologia produttiva convenzionale difficilmente consente di monitorare in modo accurato le procedure tecniche e il confronto qualitativo.

SPECIALE CAD/CAM

Questa disamina della Letteratura fornisce una fotografia dello stato dell'arte e delle prospettive future dei sistemi CAD/CAM dentali, con particolare focus sulla produzione di restauri protesici di tipo fisso. L'applicazione del CAD/CAM è promettente, oltre che in ambito protesico, anche nelle altre discipline odontoiatriche, malgrado il contributo attuale sia ancora limitato. Senza dubbio l'applicazione della tecnologia CAD/CAM in odontoiatria è una rivoluzione che ha portato a sensibili miglioramenti nella produzione dei dispositivi protesici, contribuendo al cambiamento favorevole della qualità professionale.

Conclusioni

1. Drago CJ. Clinical and laboratory parameters in fixed prosthodontic treatment. *J Prosthet Dent.* 1996; 76:233-238.
2. Christensen GJ. Improving the quality of fixed prosthodontic services. *J Am Dent Assoc.* 2000;131: 1631-1632.
3. McGarry TJ, Jacobson TE. The professions of dentistry and dental laboratory technology: improving the interface. *J Am Dent Assoc.* 2004;135:220-226.
4. Raigrodski AJ. Contemporary materials and technologies for all-ceramic fixed partial dentures: A review of the literature. *J Prosthet Dent.* 2004;92:557-562.
5. Liu PR. A panorama of dental CAD/CAM restorative systems. *Compend Contin Educ Dent.* 2005; 26:507-508.
6. Lee MY, Chang CC, Ku YC. New layer-based imaging and rapid prototyping techniques for computer-aided design and manufacture of custom dental restoration. *J Med Eng Technol.* 2008;32: 83-90.
7. Aoki H, Fujita T, Nishina T. CAD system and NC construction for the automation of dental laboratory. *J Dent Tech.* 1986;14:1495-1526.
8. Kimura H, Sohmura T, Watanabe T. Threedimensional shape measurement of teeth. Measurement by means of high precision laser displacement meter. *J Dent Mater.* 1988;7:552-557.
9. Mörmann WH, Brandestini M, Lutz F, Barbakow F. Chair side computer-aided direct ceramic inlays. *Quintessence Int.* 1989;20:329-339.
10. Duret F, Preston JD. CAD/CAM imaging in dentistry. *Curr Opin Dent.* 1991;1:150-154.
11. Rekow ED. Dental CAD/CAM systems: what is the state of the art? *J Am Dent Assoc.* 1991;122: 43-48.
12. Van der Zel JM. Ceramic-fused-to-metal restorations with a new CAD/CAM system. *Quintessence Int.* 1993;24:769-778.
13. Andersson M, Oden A. A new all-ceramic crown: a dense-sintered, high purity alumina coping with porcelain. *Acta Odontol Scand.* 1993;51:59-64.
14. Andersson M, Carlsson L, Persson M, Bergmann B. Accuracy of machine milling and spark erosion with a CAD/CAM system. *J Prosthet Dent.* 1996;76:187-193.
15. Rekow ED, Erdman AG, Riley DR, Klamecki B. CAD/CAM for dental restorations. some of the curious challenges. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1991;38:314-318.
16. Qualtrough AJ, Piddock V. Dental CAD/CAM: a millstone or a milestone? *Dent Update.* 1995;22: 200-204.
17. Torsello F, di Torresanto VM, Ercoli C, Cordaro L. Evaluation of the marginal precision of one-piece complete arch titanium frameworks fabricated using five different methods for implant-supported restorations. *Clin Oral Implants Res.* 2008;19:772-779.
18. Persson M, Andersson M, Bergman B. The accuracy of a high-precision digitizer for CAD/CAM crowns. *J Prosthet Dent.* 1995;74:223-229.
19. Rudolph H, Luthardt RG, Walter MH. Computer-aided analysis of the influence of digitizing and surfacing on the accuracy in dental CAD/CAM technology. *Comput Biol Med.* 2007;37:579-587.
20. Vlaar ST, van der Zel JM. Accuracy of dental digitizers. *Int Dent J.* 2006;56:301-309.
21. Persson AS, Andersson M, Odén A, Sandborgh-Englund G. Computer aided analysis of digitized dental stone replicas by dental CAD/CAM technology. *Dent Mater.* 2008;24:1123-1130.
22. Knott NJ. Standardising dental processes. *Br Dent J.* 2009;206(13):569-570.

Bibliografia

SPECIALE CAD/CAM

23. Persson AS, Odén A, Andersson M, Sandborgh-Englund G. Digitization of simulated clinical dental impressions: virtual three-dimensional analysis of exactness. *Dent Mater.* 2009;25:929-936.
24. Reich S, Brungsberg B, Teschner H, Frankenberger R. The occlusal precision of laboratory versus CAD/CAM processed all-ceramic crowns. *Am J Dent.* 2010;23:53-56.
25. Arnetzl G, Pongratz D. Milling precision and fitting accuracy of Cerec Scan milled restorations. *Int J Comput Dent.* 2005;8:273-281.
26. Adams DC. Ensuring optimal success with the Lava system, part 1. Techno-clinical perspectives from Authorized Lava Milling Centers. *Dent Today.* 2007;26:88-91.
27. Duret F, Blouin JL, Duret B. CAD-CAM in dentistry. *J Am Dent Assoc.* 1988;117:715-20.
28. Mörmann WH. The evolution of the CEREC system. *J Am Dent Assoc.* 2006;137 Suppl:7S-13S.
29. McLaren EA, Terry DA. CAD/CAM systems, materials, and clinical guidelines for all-ceramic crowns and fixed partial dentures. *Compend Contin Educ Dent.* 2002;23:637-41.
30. Wataha JC, Messer RL. Casting alloys. *Dent Clin North Am.* 2004;48:499-512.
31. Castillo de Oyagüe R, Sánchez-Jorge MI, Sánchez Turrión A, Monticelli F, Toledano M, Osorio R. Influence of CAM vs. CAD/CAM scanning methods and finish line of tooth preparation in the vertical misfit of zirconia bridge structures. *Am J Dent.* 2009;22:79-83.
32. Quaas S, Rudolph H, Luthardt RG. Direct mechanical data acquisition of dental impressions for the manufacturing of CAD/CAM restorations. *J Dent.* 2007;35:903-908.
33. Luthardt RG, Loos R, Quaas S. Accuracy of intraoral data acquisition in comparison to the conventional impression. *Int J Comput Dent.* 2005;8:283-94.
34. Van der Zel JM. Implant planning and placement using optical scanning and cone beam CT technology. *J Prosthodont.* 2008;17:476-481.
35. Ireland AJ, McNamara C, Clover MJ, House K, Wenger N, Barbour ME, Alemzadeh K, Zhang L, Sandy JR. 3D surface imaging in dentistry - what we are looking at. *Br Dent J.* 2008;205:387-392.
36. Del Corso M, Abà G, Vazquez L, Dargaud J, Dohan Ehrenfest DM. Optical three-dimensional scanning acquisition of the position of osseointegrated implants: an in vitro study to determine method accuracy and operational feasibility. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2009;11:214-221.
37. Reiss B, Walther W. Clinical long-term results and 10-year Kaplan-Meier analysis of Cerec restorations. *Int J Comput Dent* 2000;3:9-23.
38. Nakamura T, Dei N, Kojima T, Wakabayashi K. Marginal and internal fit of Cerec 3 CAD/CAM allceramic crowns. *Inter J Prosthodontics* 2003;16:244-248.
39. Effrosyni A, Tsitrou E, Northeast S, van Noort R. Evaluation of the marginal fit of three margin designs of resin composite crowns using CAD/CAM. *J Dent* 2007;35:68-73.
40. Hotta Y. Fabrication of titanium copings using the CAD/CAM process. *J Dent Mat Dev* 1992;11:169-178.
41. Schmitt SM. Spark erosion for precise fitting of implant retained restorations. *J Dent Technol.* 1998; 15:15-19.
42. Petersen PE, Ogawa H. Strengthening the prevention of periodontal disease: the WHO approach. *J Periodontol.* 2005;76:2187-2193.
43. Watt RG. New WHO diet and nutrition review: implications for dental disease prevention. *Nutrition.* 2003;19:1028-1029.
44. Baelum V, van Palenstein Helderma W, Hugoson A, Yee R, Fejerskov O. A global perspective on changes in the burden of caries and periodontitis: implications for dentistry. *J Oral Rehabil.* 2007; 34:872-906;
45. Atieh MA, Atieh AH, Payne AG, Duncan WJ. Immediate loading with single implant crowns: a systematic review and meta-analysis. *Int J Prosthodont.* 2009;22:378-387.
46. Kotsovilis S, Fourmoussis I, Karoussis IK, Bamia C. A systematic review and meta-analysis on the effect of implant length on the survival of rough-surface dental implants. *J Periodontol.* 2009;80:1700-1718.
47. den Hartog L, Slater JJ, Vissink A, Meijer HJ, Raghoobar GM. Treatment outcome of immediate, early and conventional single-tooth implants in the aesthetic zone: a systematic review to survival, bone level, soft-tissue, aesthetics and patient satisfaction. *J Clin Periodontol.* 2008;35:1073-1086.
48. Rekow ED. High-technology innovations and limitations for restorative dentistry. *Dent Clin North Am.* 1993;37:513-524.
49. Mokhtarikhoe S, Jannesari A, Behroozi H, Mokhtarikhoe S. Effect of connector width on stress distribution in all ceramic fixed partial dentures: a 3D finite element study. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc;* 2008;1829-1832.

SPECIALE CAD/CAM

50. Tsumita M, Kokubo Y, Vult von Steyern P, Fukushima S. Effect of framework shape on the fracture strength of implant-supported all-ceramic fixed partial dentures in the molar region. *J Prosthodont.* 2008;17:274-285.
51. Tomita S, Shinya A, Gomi H, Matsuda T, Katagiri S, Shinya A, Suzukil H, Yara A, Ogura H, Hotta Y, Miyazaki T, Sakamoto Y. Machining accuracy of CAD/CAM ceramic crowns fabricated with Repeated machining using the same diamond bur. *Dent Mat J* 2005;24:123-133.
52. Oden A, Andersson M, Krystek-Ondracek I, Magnusson D. Five-year clinical evaluation of Procera AllCeram crowns. *J Prosthet Dent* 1998;80:450-456.
53. Mehl A, Hickel R. Current state of development and perspectives of machine-based production methods for dental restorations. *Int J Comput Dent.* 1999;2:9-35.
54. Raigrodski AJ, Chiche GL. The safety and efficiency of anterior ceramic fixed partial dentures: a review of the literature. *J Prosthet Dent* 2001;86:520-525.
55. Sorensen LA, Knode H, Torres TJ. In-ceram allceramic bridge technology. *Quintessence Dent Technol* 1992;15:41-46.
56. Sorensen JA, Kang SK, Torren TJ, Knode H. In-Ceram fixed partial dentures:three-year clinical trial results. *J Calif Dent Assoc* 1998;26:207-214.
57. Sorensen JA, Cruz M, Mito WT, Raffener O, Meredith HR, Foser HP. A clinical investigation onthree-unit fixed partial dentures fabricated with a lithium disilicate glass-ceramic. *Pract Periodontics Aethet Dent* 1999;11:95-106.
58. Tinschert J, Zwez D, Marx R, Anusavice KJ. Structural reliability of alumina-, feldspar-, leucite, mica- and zirconia-based ceramics. *J Dent* 2000;28:529-535.
59. Tinschert J, Natt G, Mautsch W, Augthun M, Spiekermann H. Fracture resistance of lithium disilicate-, alumina-, and zirconia-based three-unit fixed partial dentures: a laboratory study. *Int J Prosthodont* 2001;14:231-238.
60. Vult von Steyern P, Jonsson O, Nilner K. Five year evaluation of posterior all-ceramic three-unit (In-Ceram) FPDs. *Int J Prosthodont* 2001;14:379-384.
61. Olsson KG, Furst B, Andersson B, Carlsson GE. A long-term retrospective and clinical follow-up study of In-Ceram Alumina FPDs. *Int J Prosthodont* 2003;16:150-156.
62. Suarez MJ, Lozano JF, Paz Salido M, Martinez F. Three-year clinical evaluation of In-Ceram Zirconia posterior FPDs. *Int J Prosthodont* 2004;17:35-38.
63. Esquivel-Upshaw JF, Anusavice KJ, Young H, Jones J, Gibbs C. Clinical performance of Lithia disilicatebased core ceramic for three-unit posterior FPDs. *Int J Prosthodont* 2004;17:469-475.
64. Christel P, Meunier A, Heller M, Torre JP, Peille CN. Mechanical properties and short-term in vivo evaluation of yttrium-oxide-partially-stabilized zirconia. *J Biomed Mater Res* 1989;23:45-61.
65. Filser F, Kocher P, Weibe F, Luthy H, ScharerP, Gauckler U. Reliability and strength of all-ceramic dental restorations fabricated by direct ceramic machining (DCM). *Int J Comput Dent* 2001;4:89-106.
66. Besimo CE, Spielmann HP, Rohner HP. Computer assisted generation of all-ceramic crowns and fixed partial dentures. *Int J Comput Dent* 2001;4:43-62.
67. Suttor D, Bunke K, Hoescheler S, Hauptmann H, Hertlein G. LAVA-the system for all-ceramic ZrO2 crowns and bridge frameworks. *Int J Comput Dent* 2001;4:195-206.
68. Beuer F, Naumann M, Gernet W, Sorensen JA. Precision of fit: Zirconia three-unit fixed dental prostheses. *Clin Oral Investig.* 2009; 13: 343-349.
- 69) Tiozzi R, Rodrigues RC, de Mattos Mda G, Ribeiro RF. Comparative analysis of the fit of 3-unit implant-supported frameworks cast in nickel-chromium and cobalt-chromium alloys and commercially pure titanium after casting, laser welding, and simulated porcelain firings. *Int J Prosthodont.* 2008; 21:121-123.
70. Baba N, Watanabe I, Liu J, Atsuta M. Mechanical strength of laser-welded cobalt-chromium alloy. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater.* 2004;69:121-124.
71. Colic M, Stamenkovic D, Anzel I, Lojen G, Rudolf R. The influence of the microstructure of high noble gold-platinum dental alloys on their corrosion and biocompatibility in vitro. *Gold Bulletin* 2009; 42:34-47.
72. Wataha JC. Biocompatibility of dental casting alloys: a review. *J Prosthet Dent.* 2000;83:223-234.
73. Roach M. Base metal alloys used for dental restorations and implants. *Dent Clin North Am.* 2007; 51:603-627.
74. Kelly JR, Tesk JK, Sorensen JA. Failure of allceramic fixed partial dentures in vitro and in vivo: analysis and modeling. *J Dent Res* 1995;74:1253-1258.

SPECIALE CAD/CAM

75. Oh W, Gotzen N, Anusavice KJ. Influence of connector design on fracture probability of ceramic fixed-partial dentures. *J Dent Res* 2002;81:623-627.
76. Oh WS, Anusavice KJ. Effect of connector design on fracture resistance of all-ceramic fixed partial dentures. *J Prosthet Dent* 2002;87:536-542.
77. Guazzato M, Proos K, Quach L, Swain MV. Strength, reliability and mode of fracture of bilayered porcelain/zirconia (Y-TZP) dental ceramics. *Biomaterials* 2004;25:5045-5052.
78. Luthy H, Filser F, Loeffel O, Schumacher M, Gauckler LJ, Hammerle CHF. Strength and reliability of four-unit all-ceramic posterior bridges. *Dental Materials* 2005;21:930-937.
79. Williams RJ, Bibb R, Eggber D, Collis J. Use of CAD/CAM technology to fabricate a removable partial denture framework. *J Prosthet Dent* 2006;96:96-99.
80. Shimakura M, Nagata T, Takeuchi M, Nemoto T. Retentive force of pure titanium konus telescope crowns fabricated using CAD/CAM system. *DMJ* 2008;27:211-215.
81. Chan DC, Frazier KB, Tse LA, Rosen DW. Application of rapid prototyping to operative dentistry curriculum. *J Dent Educ.* 2004;68:64-70.
82. Nikzad S, Azari A. A novel stereolithographic surgical guide template for planning treatment involving a mandibular dental implant. *J Oral Maxillofac Surg* 2008;66:1446-1454.
83. Tee-Khib N, Cheng AC, Lee H, Wee AG, Leong EW. The management of a completely edentulous patient using simultaneous maxillary and mandibular CAD/ CAM-guided immediately loaded definitive implantsupported prostheses: a clinical report. *J Prosthet Dent* 2008;99:416-420.

Autori Dott. Francesco Sanfilippo
Via Friuli, 2
20135 Milano
E-mail francesco-sanfilippo@fiscali.it

Odt. Dario Viera
Laboratorio Viera
Via Legioni Romane, 4
20147 Milano
E-mail info@laboratorioviera.it