



In questo capitolo tratteremo:

Attrezzature necessarie e procedure

Acquisizione delle immagini

- Scansione
- Acquisizione dati DICOM

Modellazione CAD

Fresatura CAM

Stampa 3D

Stereolitografia

Laser-sinterizzazione

Al termine del capitolo saprai:

- Quali sono le principali attrezzature utilizzate con i sistemi digitali di realizzazione delle protesi.
- Quali tipi di scansione si possono utilizzare per acquisire le immagini virtuali utilizzate per le tecniche CAD.
- Quali sono i principi di funzionamento dei diversi tipi di scanner.
- Come si ottiene l'immagine virtuale 3D a partire dalla scansione.
- Spiegare come possono interagire i dati DICOM con le scansioni di modelli e impronte.
- Quali sistemi di prototipazione possono essere utilizzati per realizzare un oggetto tridimensionale a partire da un file virtuale.
- Perché le tecnologie CAD sono risultate decisive per la diffusione di materiali innovativi come zirconia o titanio.

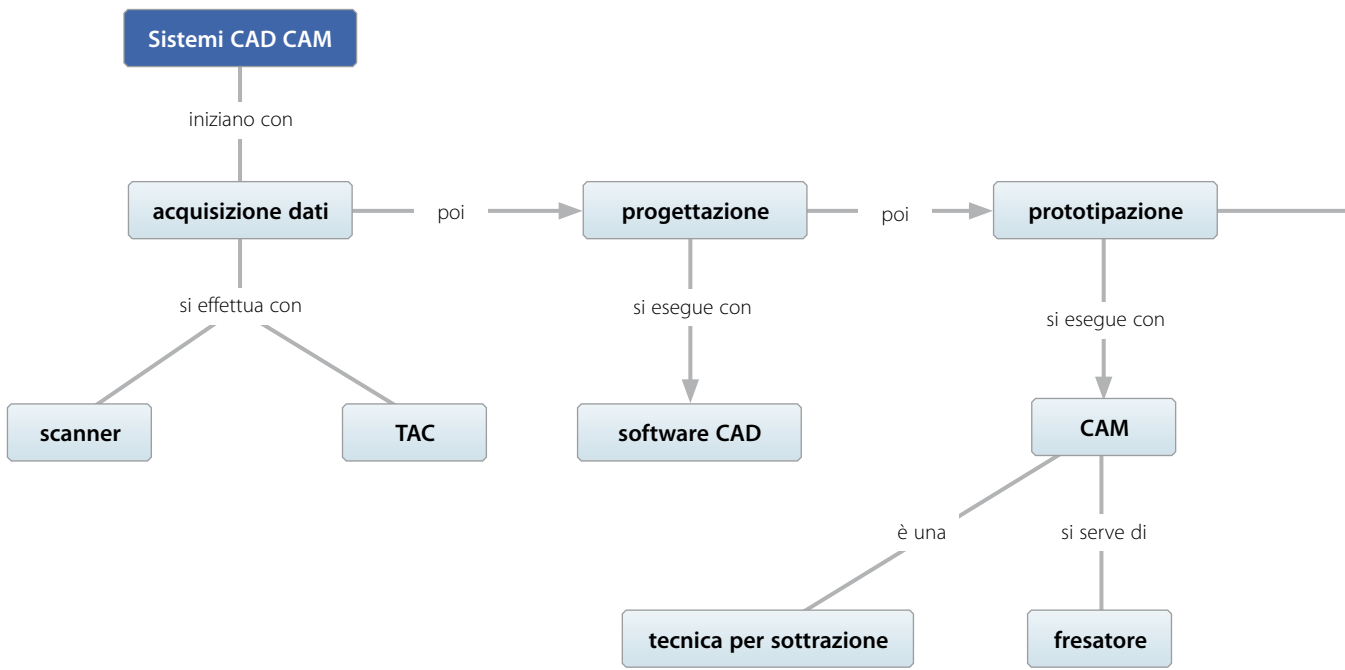


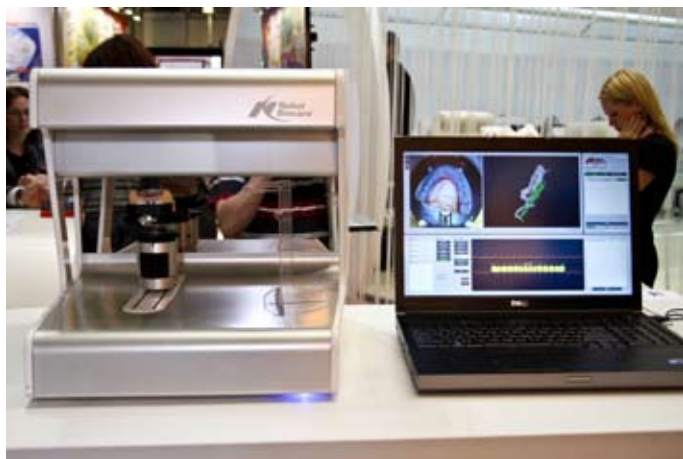
La tecnologia **CAD CAM** è una tecnica computerizzata che permette di ottenere un **oggetto tridimensionale** a partire da un **disegno vettoriale** eseguito al computer.

I due acronimi CAD e CAM stanno, rispettivamente, per **Computer Aided Design** e **Computer Aided Manufacturing**, ovvero disegno assistito dal computer e produzione assistita dal computer.

Nata negli anni '60 del secolo scorso, questa tecnologia è oggi utilizzata nell'industria per la produzione di un'infinità di oggetti ed è prepotentemente entrata anche nel campo dentale, nel quale è probabile che in brevissimo tempo diventi uno degli standard più diffusi.

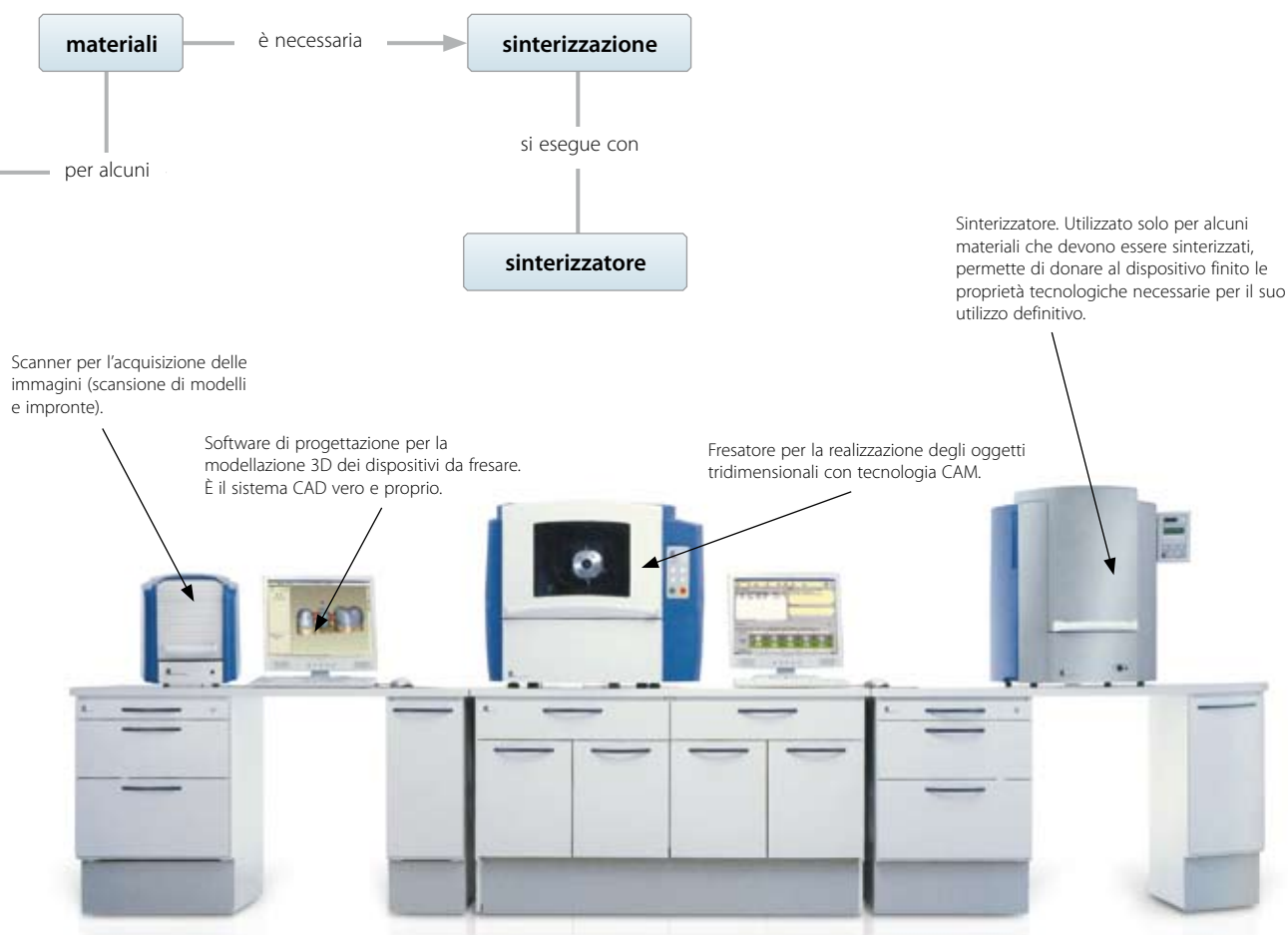
I primi esperimenti CAD CAM nel settore dentale iniziarono negli anni '70, ma i primi sistemi commercializzati dovranno aspettare più di un decennio per vedere la luce: si trattava di Cerec e Procera. Da allora, la tecnologia CAD CAM ha visto un rapido e costante sviluppo commerciale e tecnologico, che l'ha portata in meno di 30 anni ad ottenere una diffusione capillare, se non del sistema nel suo complesso, almeno di alcune sue parti.





◀ Il sistema Procera, in uso ancora oggi in versione più evoluta, è stato uno dei primi sistemi CAD CAM ad essere sviluppato per il settore dentale.

I sistemi di produzione dentale CAD CAM si compongono di alcuni passaggi chiave, che possono essere così schematizzati:



MODELLI VIRTUALI

SCANSIONE CAVO ORALE

SCANSIONE IMPRONTA

SCANSIONE MODELLO

■ Acquisizione delle immagini

Così come il modello tradizionale permette all'odontotecnico di realizzare la protesi su un duplicato del paziente, anche nella tecnologia CAD ci si serve di **modelli virtuali**, ovvero **riproduzioni digitali** dell'anatomia del paziente.

Per ottenere un modello tradizionale, abbiamo visto che la tecnica fondamentale è quella di rilevarne l'impronta nel cavo orale. Per ottenere un modello virtuale, sono invece possibili diverse soluzioni, spesso in combinazione tra loro, tra le quali le principali sono la **scansione** e l'acquisizione di dati **DICOM**.

Scansione

La **scansione** è il metodo principale per la realizzazione dei modelli virtuali utilizzati nella tecnica CAD. Realizzata con appositi macchinari (**scanner**), molto diversi tra loro anche a livello di funzionamento, possiamo suddividerla in tre categorie principali:

- scansione **del cavo orale**. Gli scanner intraorali sono la nuova frontiera sulla quale si confrontano i produttori di tecnologie digitali destinate al dentale. Esistono infatti già oggi diversi tipi di scanner in grado di "leggere" la conformazione morfologica delle varie parti del cavo orale, ma al momento attuale il loro grado di precisione non ha ancora raggiunto la qualità necessaria per soppiantare completamente il tradizionale rilevamento dell'impronta. Infatti, alcuni problemi come la lettura della morfologia sottogengivale delle preparazioni e il superamento delle alterazioni morfologiche dovute alla presenza dei liquidi orali (sangue, saliva) devono ancora trovare una soluzione soddisfacente. È comunque probabile che nel prossimo futuro le rilevazioni intraorali acquisiranno sempre maggiore importanza;
- scansione **dell'impronta**. In questo caso lo scanner "legge" l'impronta e realizza un modello virtuale (cioè un disegno 3D) nello stesso modo in cui lo farebbe il gesso, cioè riproducendo in positivo ciò che l'impronta ha "letto" in negativo nel cavo orale. Questo sistema sta sviluppandosi velocemente anche perché permette agli operatori di saltare diverse fasi operative, soprattutto la colatura del modello, risparmiando non solo sui passaggi di lavoro e sui materiali, ma spesso evitando il tragitto studio-laboratorio nei casi in cui essi siano situati in luoghi diversi. L'impronta può infatti essere scansionata dal clinico e, tramite Internet, spedita immediatamente come file ad un centro di fresatura lontano anche migliaia di chilometri. Resta indispensabile che, soprattutto nei casi delle impronte per protesi fissa, l'impronta stessa risulti precisa e perfettamente detersa e asciutta, poiché in caso contrario il modello virtuale risulterebbe impreciso.
- scansione **del modello**. È la tecnica più tradizionale di acquisizione delle immagini. Con questo sistema ad entrare nello scanner è un modello (in gesso o altro materiale) ottenuto da un'impronta tradi-



zionale. Il vantaggio, rispetto alle altre tecniche, è che il tecnico, disponendo di un modello reale, può intervenire prima della scansione per correggerne le imprecisioni. Inoltre, l'impiego di sistemi di scomposizione (monconi sfilabili sistemi pindex ecc.), gli permette di procedere alla scansione anche di singole parti, che possono così essere rilevate con maggiore precisione dallo scanner. Per contro, il passaggio aggiuntivo (impronta - modello - modello virtuale) può anche essere esso stesso causa di imprecisioni, in funzione delle alterazioni volumetriche dei materiali coinvolti (contrazione del materiale da impronta, espansione del gesso).



▲ Scansione intraorale.



▲ Scansione di un'impronta.



▲ Scansione di un modello.

Qualunque sia il tipo di scansione eseguita, il suo risultato è un **modello virtuale**, cioè un **disegno in tre dimensioni** che riproduce fedelmente ciò che è stato scansionato (cavo orale, impronta, modello ecc.).

Il funzionamento degli scanner, pur a fronte di tecnologie molto raffinate e frutto di ricerche di livello elevato, a livello teorico è piuttosto semplice: il pezzo da scansionare viene bombardato da tutti i lati con fasci luminosi e ripreso con delle microtelecamere che registrano l'angolazione, la direzione e la distanza di ogni singolo rilevamento dal punto di trasmissione, con un sistema molto simile a quello utilizzato dai radar, dai sonar, o dai pipistrelli.

Gli scanner più diffusi attualmente sono:

- **Scanner laser 3D.** Sfruttano l'emissione di impulsi elettromagnetici (**laser**) dei quali si ricevono i segnali riflessi. Misurando l'intervallo di tempo trascorso tra trasmissione e ricevimento del segnale, e quindi la distanza tra lo strumento e il punto rilevato, creano una "nuvola di punti" che una volta interpretati dal software CAD vengono elaborati come la forma virtuale del modello scansionato.
- **Scanner a luce strutturata:** sfruttano un sistema di luce strutturata, proiettando un **pattern** luminoso sull'oggetto da scansionare e interpretando tramite telecamere la deformazione che l'oggetto determina sul pattern. Il calcolo delle coordinate tridimensionali così ottenute permette di ricostruire la forma virtuale da utilizzare poi con il software CAD. Questo tipo di scanner consente la digitalizza-

SCANNER

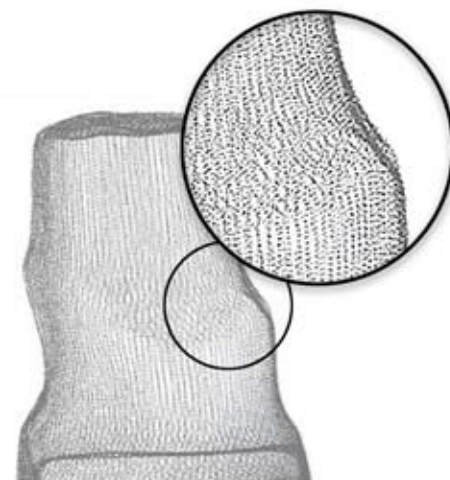


zione non di un solo punto per volta (come nel caso degli scanner laser), ma di centinaia di migliaia di punti alla volta.

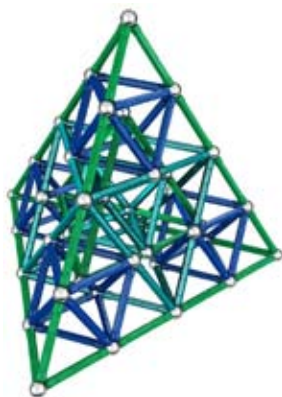
Possiamo quindi individuare come **parti principali dello scanner** un dispositivo di proiezione luminosa, una o due **microtelecamere**, e una **componente meccanica** che è quella che determina il movimento delle parti, soprattutto del pezzo da scansionare. L'azione combinata delle tre parti è coordinata da un **software di scansione** in grado di far muovere la componente meccanica in modo che il pezzo venga analizzato sotto tutti i punti di vista dal raggio luminoso e dalla telecamera, i quali registreranno, per ogni punto, i dati di angolazione e distanza del raggio riflesso dal punto di trasmissione della luce. Poiché le scansioni sono numerosissime e rilevate su tutta la circonferenza del pezzo da scansionare, il risultato ottenuto è una nuvola di punti che, come un quadro pointillista, riproduce la morfologia dell'oggetto scansionato.



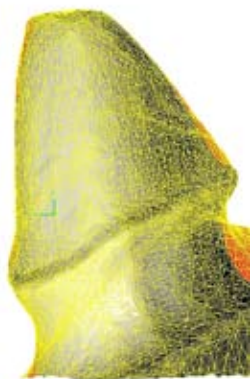
▲ Un famoso quadro di Seurat, Un Dimanche ou la Grande Jatte, splendido esempio di **pointillisme**, una tecnica pittorica che realizza le immagini servendosi di minuscoli puntini.



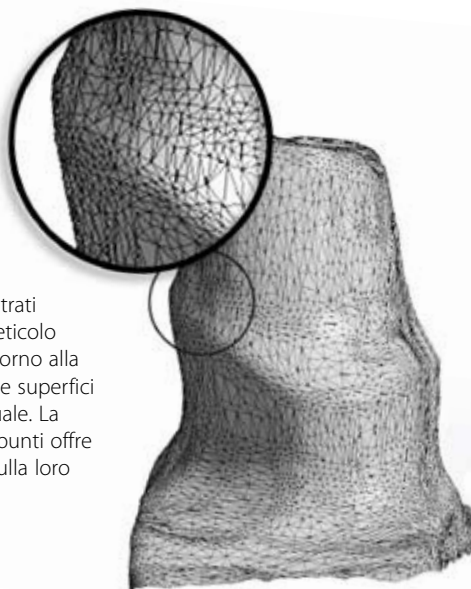
▲ Con lo stesso sistema, lo scanner registra una nube di punti che riproducono in 3 dimensioni il pezzo scansionato. È interessante notare come il software sia in grado di "imporre" un maggior numero di punti di scansione nelle zone in cui l'irregolarità è maggiore, così da ottenere una riproduzione più esatta dove è più necessario (per esempio, nei bordi cervicali).



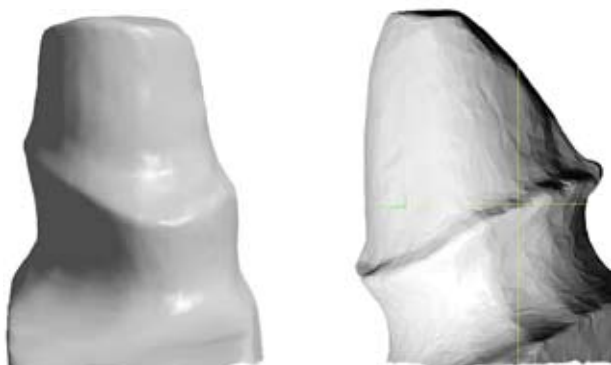
A questo punto è necessario che la nube di punti si trasformi in una **superficie**. Per farlo, il software provvede quindi a collegare i singoli punti secondo una formula matematica, misurando le distanze che li dividono e ricostruendo un **reticolo** formato da una serie di minuscoli poligoni (generalmente, triangoli), un po' come accade con alcuni tipi di costruzioni magnetiche dei bambini.



► Collegando i vari punti registrati dalla scansione, si ottiene un reticolo che costituisce l'intelaiatura attorno alla quale il software costruirà poi le superfici volumetriche del modello virtuale. La misura della distanza tra i vari punti offre al software riferimenti precisi sulla loro disposizione spaziale.



Disponendo della serie di poligoni offerta dal **wireframe**, il software può calcolare l'**area dei singoli triangoli** e definirne il **riempimento**. Si è così ottenuta la figura solida che costituisce il modello virtuale (**shade**), la cui fedeltà della riproduzione dipenderà principalmente dalla dimensione e dal numero di triangoli e, quindi, dal numero di punti di riferimento inizialmente registrati dallo scanner.



◀ La fase *shade* (in inglese, ombra) è quella in cui il software passa dalla realizzazione del wireframe alla realizzazione del modello virtuale 3D. A seconda del numero di punti di scansione registrati e dell'analisi più o meno approfondita della loro posizione si possono ottenere superfici diversamente dettagliate: quelle più precise appariranno convesse e ben modellate, quelle meno accurate appariranno invece sfaccettate, poiché il numero di triangolazioni che le definisce è minore.



Il software di scansione generalmente è predisposto per scansionare meglio la superficie che si presenta più irregolare, risparmiando invece risorse nelle zone in cui la superficie è molto liscia o si presenta sostanzialmente piatta.

Quanto più precisa sarà la scansione, tanto più pesante risulterà il file di uscita. Attualmente, il tipo di file più utilizzato è il file **STL**, non a caso acronimo di **Standard Triangulation Language**.

FILE STL





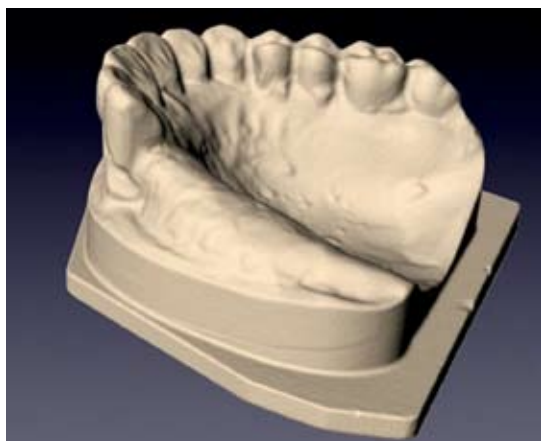
DATI DICOM

Oggi la scansione è il passaggio tecnico più diffuso di tutto il sistema, in quanto il costo molto elevato delle altre attrezzature ha originato un mercato in cui grandi centri di fresatura ricevono via Internet i file STL provenienti dagli scanner dei singoli clinici e laboratori, realizzando poi le altre fasi di lavoro e rimandando infine con una spedizione il lavoro finito al cliente. In questo modo il singolo clinico o il laboratorio devono acquistare solo lo scanner e delegano il resto del processo al centro di fresatura.

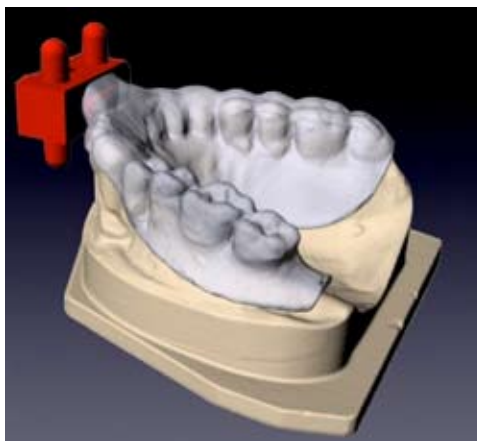
Acquisizione dati DICOM

Con l'avvento delle protesi a supporto implantare, la cui sede naturale sono le ossa mascellari, i sistemi CAD CAM si sono rivelati molto importanti per la definizione dei siti in cui inserire gli impianti, poiché poter lavorare con un modello virtuale permette di simulare con immediatezza le varie situazioni assiali, la disponibilità di spazi adeguati, i profili protesici ecc.

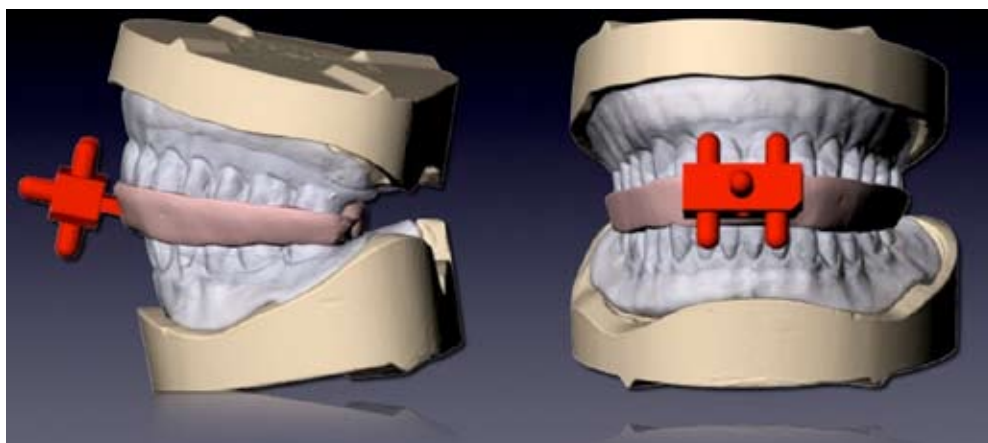
Oggi, lo sviluppo di queste tecnologie permette di implementare il **modello virtuale** dell'arcata del paziente (rilevato mediante la scansione) mettendolo in relazione con i **dati DICOM** provenienti da una **TAC (Tomografia Assiale Computerizzata)** o un altro esame analogo (TC spirale, TC Cone Beam) attraverso i quali ottenere una riproduzione virtuale anche delle ossa del paziente, quindi di parti anatomiche non visibili direttamente. Se a questo si aggiunge la possibilità di articolare e simulare l'occlusione e i movimenti dei due antagonisti, si può immaginare a quale grado di simulazione si sia arrivati. La chiave di questa relazione viene sempre registrata attraverso dispositivi-guida conosciuti dal software. In pratica, sia il paziente che il modello devono indossare questi dispositivi – rispettivamente – durante la TAC e la scansione, in modo che il software possa poi metterli in perfetta relazione reciproca utilizzando come chiave la forma e la posizione del dispositivo-guida di riferimento.



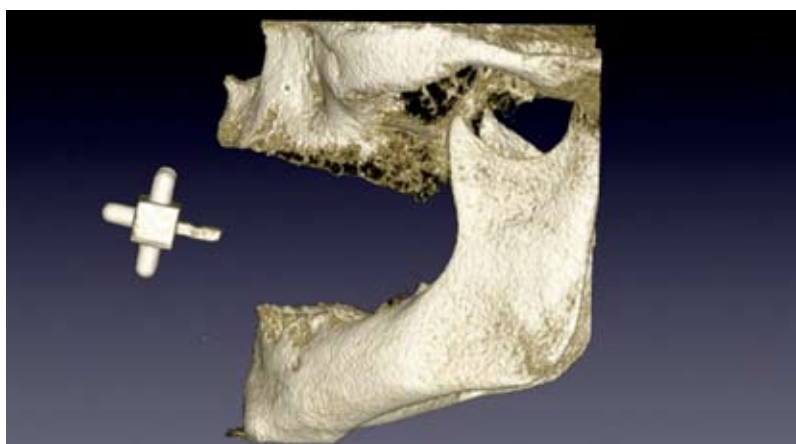
▲ Il modello virtuale ottenuto dalla scansione del modello del paziente.



◀ Sul modello si prepara una dima radiologica munita di un dispositivo-guida di forma e misure note al software.



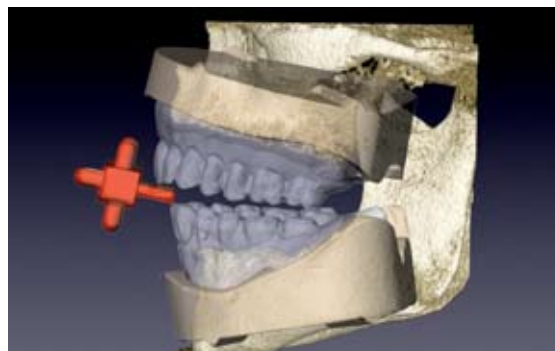
◀ La stessa operazione viene eseguita sul modello antagonista, poi le due dime vengono messe in relazione reciproca con una masticazione rilevata sul paziente.

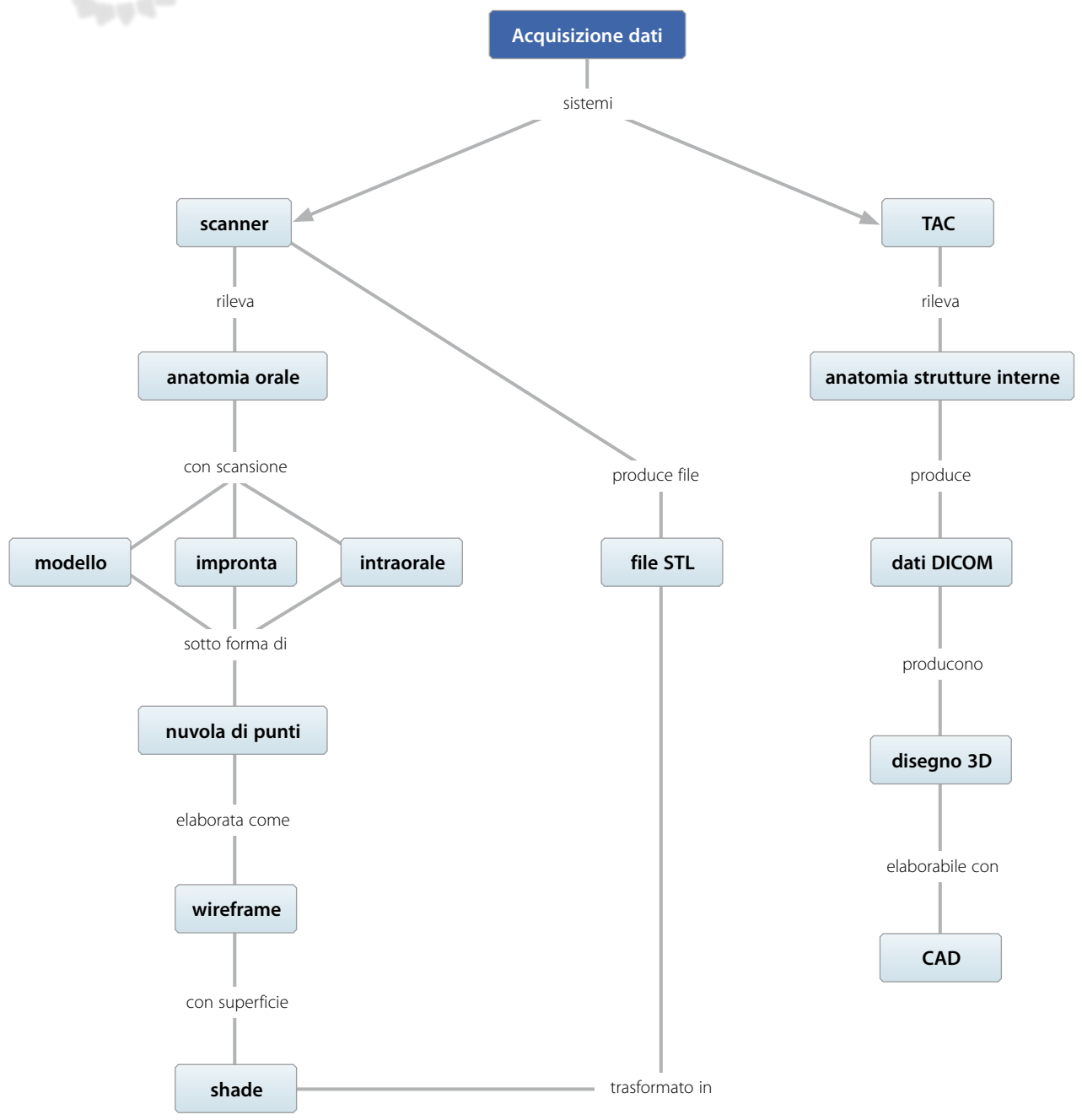


◀ L'esame radiologico viene eseguito sul paziente con le dime in posizione (il paziente le indossa durante l'esame). È importante che il dispositivo guida sia radiopaco.



▶▶ Grazie alla presenza, in ogni rilevamento, dello stesso dispositivo-guida (di forma e misure note al software), è possibile mettere in relazione reciproca tutte le varie scansioni e i dati DICOM provenienti dall'esame radiologico, ottenendo una riproduzione virtuale molto precisa del paziente.







■ Modellazione CAD

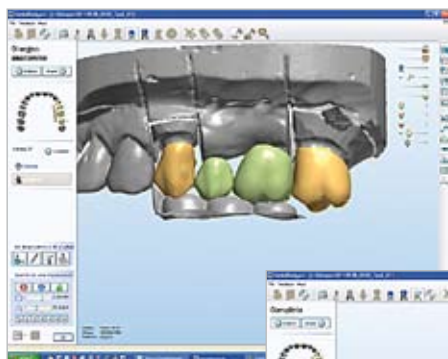


Una volta ottenuto il modello virtuale, la protesi viene progettata al computer utilizzando un software di disegno CAD.

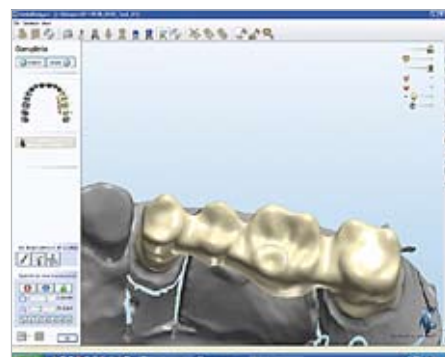
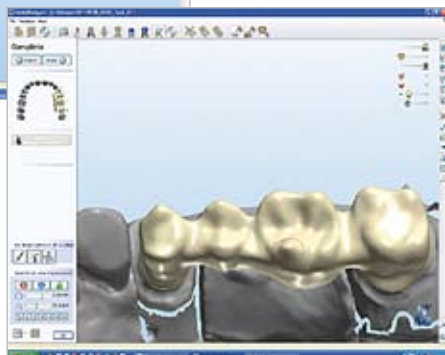
In questa fase, il lavoro viene svolto interamente al computer, definendo tipo, rapporti volumetrici, morfologia, dimensione delle connessioni ecc. tramite il programma CAD. È un procedimento di disegno virtuale che negli anni ha visto avvicinarsi software sempre più precisi e dalle possibilità sempre più ampie. Senza entrare nel dettaglio, si pensi solo che oggi è possibile acquisire un'immagine della morfologia craniale del paziente attraverso la TAC o un esame analogo, rilevare tramite scansione la morfologia delle arcate, mettere in masticazione i modelli virtuali e simularne i movimenti attraverso un articolatore anch'esso virtuale, quindi realizzare la protesi con sistemi CAM, stereolitografia o laser sinterizzazione, realizzare dime guida per il clinico, e fornirgli tutto il necessario per una protesi a supporto implantare (dime e protesi finita) ancora prima che sia stata praticata la prima incisione con il bisturi.

Queste procedure sono estremamente complesse e, almeno attualmente, necessitano di attrezzature notevolmente costose e soprattutto di operatori all'altezza delle lavorazioni da svolgere. Tuttavia è probabile che nei prossimi anni lo sviluppo tecnologico permetta ad una platea sempre più ampia di protesisti di accedere, se non a tutto il sistema nel suo complesso, almeno ad una parte di esso, delegando a pochi centri specializzati la realizzazione dei passaggi tecnici più difficili o costosi.

CAD



◀▶ Analisi CAD di un ponte di tre elementi e modifica al computer di una zona di contatto occlusale sul primo molare.



Le differenze tra i vari sistemi di elaborazione CAD sono notevoli, e il loro continuo sviluppo non permette di definirne caratteristiche comuni, poiché cambiano continuamente. Tuttavia, alcune funzioni possiamo ormai considerarle un requisito imprescindibile di ogni sistema:

- **Archivio.** Ogni sistema dispone di un archivio dati della singola lavorazione svolta. Questo permette di ripetere un lavoro ottenendone sempre una copia perfetta e può risultare molto utile per i controlli a distanza, per le protesi ortodontiche e per eventuali controversie legali.
- **Parametri personalizzati.** Tra i più importanti, si possono in genere personalizzare lo spessore della struttura di supporto, le dimensioni delle connessioni con gli elementi intermedi, il contorno cervicale, altezza e forma delle spalle a livello periferico, lo spessore da lasciare per il rivestimento estetico, definire l'asse di inserimento protesico, scaricare eventuali sottosquadri ecc.
- **Modellazione.** Il cuore del software, che permette di intervenire sulle modellazioni eseguite dal computer modificandole con il mouse allo stesso modo di come si farebbe con cera e spatolino. Questa opportunità risulta molto utile per irrobustire le connessioni, creare battute in metallo in antagonismo, personalizzare l'estetica ecc.
- **Librerie.** Ogni sistema di modellazione CAD dispone di librerie di elementi protesici. Una libreria è una raccolta di forme già disegnate e predefinite dallo sviluppatore e che possono essere utilizzate e modificate a piacimento. Oltre alle **librerie morfologiche**, che permettono di ottenere la forma dei denti, sono oggi molto importanti le **librerie degli abutment implantari**, attraverso le quali si possono realizzare pilastri personalizzati e perfettamente paralleli tra loro, con il vantaggio di potersi servire di una lavorazione meccanica di precisione realizzata a freddo, senza l'incognita delle variazioni dimensionali dovute al CDT dei materiali (gesso, cere, rivestimento, metallo ecc.).

A questo proposito, i produttori di impianti dentali dispongono molto spesso di apposite librerie relative alla componentistica virtuale dei loro impianti.

Una volta terminata la progettazione CAD, il computer produce un file STL, che può essere utilizzato in vari modi:

- **fresatura CAM;**
- **stampa 3D;**
- **stereolitografia;**
- **laser sinterizzazione.**

■ Fresatura CAM

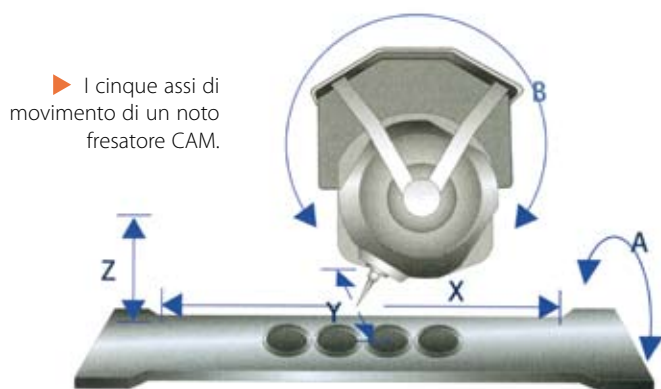
È il più diffuso sistema di realizzazione delle protesi progettate con tecnica CAD. Con questa tecnica, il file STL viene inviato ad un software di fresatura che lo “traduce” in una serie di movimenti impartiti ad un fresatore che ha un supporto sul quale alloggia un blocco del materiale prescelto per la realizzazione del dispositivo protesico.

CAM



Supporto e fresatore possono muoversi secondo vari assi di movimento. Il loro movimento combinato permette di ottenere tutte le forme progettate a livello CAD, asportando materiale dal blocchetto fissato sul supporto. Si tratta quindi di una **prototipazione per sottrazione** (come vedremo, altre tecniche si servono invece di tecniche **per addizione**).

I fresatori hanno in genere una struttura molto solida, poiché durante la lavorazione devono assorbire senza oscillazioni le notevoli vibrazioni generate dalla testa motorizzata. Quando si procede a lavorazioni su materiali duri, con numero di giri elevato della fresa (decine di migliaia al minuto), si impiegano liquidi lubrificanti per ridurre l'attrito e il surriscaldamento di fresa e pezzo fresato.



Una volta terminata la lavorazione (da eseguirsi su entrambi i lati del blocchetto), il lavoro viene controllato, eventualmente rifinito, quindi, se il processo di lavoro lo prevede, colorato e infine sinterizzato in un apposito **sinterizzatore**, nel quale il materiale assume tutte le caratteristiche fisiche definitive. Poiché durante la sinterizzazione si ha una forte **contrazione del materiale** (che può arrivare fino al 25%), durante la fresatura il software modifica i dati STL provenienti dal sistema CAD in modo da realizzare una **struttura sovradimensionata**, cioè "più grande" a seconda del materiale utilizzato (quindi, anche del 25%). Le due variazioni dimensionali si compensano a vicenda e il lavoro finito risulta quindi delle dimensioni definite in fase di progettazione.



Il grande vantaggio della lavorazione di alcuni materiali con i sistemi CAD CAM (per esempio, l'ossido di zirconio) è che li si può lavorare più agevolmente nella fase bianca, quando cioè sono ancora teneri, e quindi, successivamente alle varie lavorazioni, sinterizzarli per farli diventare rigidi e resistenti.



▲ Fresatura di una corona singola in titanio. Si può notare come tutto il processo avvenga per sottrazione di materiale dal blocchetto iniziale.

SINTERIZZAZIONE

VARIAZIONI DIMENSIONALI

STAMPA 3D

Stampa 3D



Il processo di stampa 3D è un sistema con il quale si realizza un dispositivo con una *tecnica per addizione*, stampandolo a strati.

Il sistema è molto simile al funzionamento di una normale stampante a getto di inchiostro, sebbene il macchinario che lo esegue sia molto più complesso.

Il software di stampa trasforma l'oggetto 3D del file STL in una serie di strati singoli che poi stampa deponendo su un piano dei sottilissimi strati del materiale che costituirà l'oggetto. Alla fine, si otterrà l'oggetto originale (come se, dopo aver affettato un salame, lo si ricomponesse con cura deponendone una fetta sopra all'altra).

Questo sistema è molto utilizzato per produrre i numerosi modelli che servono a realizzare i sistemi ortodontici a mascherine progressive (es. Invisalign).

Stereolitografia



Tecnica conosciuta già dagli anni '80, la stereolitografia è un procedimento *per addizione* abbastanza simile alla stampa 3D, ma in questo caso il materiale non viene *depositato a strati*, ma *polimerizzato a strati*.

Si parte sempre da un disegno scomposto in moltissimi strati. Ognuno di questi strati rappresenta il percorso compiuto da un raggio luminoso (in genere, un laser) sulla superficie di un materiale allo stato liquido (per esempio, una resina). La zona colpita dalla luce si indurisce, mentre il resto del materiale rimane liquido. Si passa quindi allo strato successivo: la zona indurita scende di livello e il raggio colpisce nuovamente il materiale liquido, indurendolo solo in alcuni punti. Al termine dei numerosissimi passaggi, l'oggetto solido viene estratto dal bagno di materiale liquido e, a seconda dei casi, ulteriormente rifinito, polimerizzato, sinterizzato ecc.

Laser sinterizzazione

Sostanzialmente simile alla prototipazione eseguita con stereolitografia, questa *tecnica per addizione* si può eseguire con i metalli.

In questo caso il laser non colpisce un bagno di materiale liquido, come nella stereolitografia, ma un sottile strato di polvere metallica, sinterizzandola solo nella zona colpita dalla luce. Dopo che la sinterizzazione del primo strato è stata completata, la macchina deposita un ulteriore strato di polvere metallica sopra al primo strato, e il

STEREOLITOGRAFIA



Video

Stereolitografia

LASER SINTERIZZAZIONE



laser sinterizza anche il secondo strato (solo nella zona colpita dalla luce). Ogni strato è di circa 0,1 mm di spessore, quindi molto sottile. Al termine del processo, si ottiene un blocco di polvere metallica all'interno della quale si trova l'oggetto di metallo sinterizzato. Eliminata la polvere (che viene recuperata per il prossimo ciclo), l'oggetto metallico può essere ulteriormente rifinito, lucidato ecc.

