

**ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

**DOTTORATO DI RICERCA IN**

**DISEGNO E METODI DELL'INGEGNERIA INDUSTRIALE**

**S.S.D ING-IND/15**

**XIX CICLO**

**STRUMENTI E METODI PER LA  
PROGETTAZIONE INDUSTRIALE  
APPLICATI ALLA CONSERVAZIONE E  
VALORIZZAZIONE DEI BENI CULTURALI**

**Il Coordinatore del Corso di Dottorato**  
Chiar.mo Prof. Ing. Franco Persiani

**Tutor**  
Chiar.mo Prof. Ing. Franco Persiani

**Candidato**  
Dott. Massimiliano Fantini



*La conservazione e la valorizzazione dei beni culturali e naturali è diventata parte integrante delle politiche di promozione del territorio: motore dello sviluppo durevole e sostenibile, strategia vincente per esprimere competitività all'interno di scenari internazionali.*

*In questo quadro il modello qualità Italia basato sulla ricchezza e la varietà del patrimonio culturale rappresenta un esempio in Europa e nel Mondo in grado di coniugare i rapporti socioeconomici con la tradizione e l'innovazione.*

Carlo Azeglio Ciampi, 2004



# Indice

<b>Introduzione .....</b>	<b>1</b>
<b>Capitolo 1 - <i>Time Compression Technologies</i> nella progettazione industriale .....</b>	<b>7</b>
1.1 Time to Market .....	7
1.2 Ingegneria Inversa .....	9
1.3 Realtà Virtuale .....	13
1.4 Prototipazione Rapida.....	16
<b>Capitolo 2 - Trasferimento Tecnologico nel campo dei Beni Culturali.....</b>	<b>23</b>
2.1 Conservazione e valorizzazione dei Beni Culturali.....	23
2.2 <i>Time Compression Technologies</i> nel campo dei Beni Culturali.....	23
2.3 Digitalizzazione dei Beni Culturali .....	28
2.3.1 La realizzazione dei modelli digitali dalla scansione 3D .....	34
2.3.2 La realizzazione dei modelli digitali dai dati CT .....	40
2.4 Modelli digitali e “ <i>Virtual Heritage</i> ”.....	43
2.5 Realizzazione di modelli fisici.....	50
2.6 Applicazioni ai Beni Culturali .....	55
<b>Capitolo 3 - Scansione 3D e prototipazione di resti scheletrici umani.....</b>	<b>59</b>
3.1 Il caso di studio del Romito 7 .....	59
3.2 Fase di scansione 3D .....	60
3.3 Rilievo antropometrico virtuale.....	62
3.4 Analisi delle sezioni ossee .....	63
3.5 Prototipazione dei modelli fisici.....	67
3.6 Conclusioni .....	71
<b>Capitolo 4 - Ottimizzazione dell’orientamento dei modelli 3D dei denti .....</b>	<b>73</b>
4.1 Il problema dell’orientamento .....	73
4.2 Digitalizzazione del campione di denti.....	76
4.3 Standardizzazione del sistema di orientamento.....	79
4.3.1 Preorientamento del modello 3D.....	80
4.3.2 Identificazione dei landmark .....	82
4.3.3 Orientamento del modello 3D .....	84
4.3.4 Valutazione quantitativa dei risultati .....	89
4.4 Conclusioni .....	91
<b>Capitolo 5 - Studio di una mummia peruviana smembrata .....</b>	<b>95</b>
5.1 Il problema dell’analisi di resti mummificati .....	95
5.2 Il caso di studio .....	97
5.3 Ricostruzione virtuale della mummia intera.....	99
5.3.1 Acquisizione dei dati tramite CT.....	100
5.3.2 Ricostruzione delle superfici .....	101
5.3.3 Assemblaggio virtuale .....	103

5.4	Misure antropometriche sui modelli digitali.....	106
5.4.1	Rilievo antropometrico virtuale.....	107
5.4.2	Analisi delle sezioni ossee.....	109
5.5	Valutazione della deformazione cranica artificiale .....	112
5.5.1	Identificazione degli indici antropometrici .....	115
5.5.2	Analisi comparativa dei dati.....	119
5.6	Conclusioni.....	124
<b>Capitolo 6 - La ricostruzione del volto di Dante.....</b>		<b>127</b>
6.1	Il caso di studio.....	127
6.2	Acquisizione 3D del calco del calvario .....	129
6.3	Acquisizione della mandibola di riferimento.....	132
6.4	Modellazione del modello digitale della mandibola.....	134
6.5	La prototipazione .....	138
6.6	Conclusioni.....	139
<b>Conclusioni.....</b>		<b>143</b>
<b>Bibliografia.....</b>		<b>147</b>

## **Ringraziamenti**

Un primo doveroso ringraziamento è rivolto alla mia famiglia per avermi sempre sostenuto in questi ulteriori tre anni di studio e di ricerca.

Un ringraziamento al Prof. Franco Persiani per l'entusiasmo dimostrato per le applicazioni nel campo della conservazione e valorizzazione dei Beni Culturali, così apparentemente lontane da quelle dell'ingegneria meccanica e areospaziale.

Infine un sentito ringraziamento all' Ing. Francesca De Crescenzo e al Prof. Leonardo Seccia per aver condiviso questo mio percorso e per il generoso e fondamentale supporto dimostrato non solo dal punto di vista professionale.



## Introduzione

Negli ultimi anni si sta assistendo ad un crescente interesse nell'ambito del trasferimento tecnologico dal campo industriale a quello del patrimonio culturale. In particolare, tecnologie quali Ingegneria Inversa, Realtà Virtuale e Prototipazione Rapida, stanno trovando sempre più applicazioni rivolte alla conservazione e valorizzazione dei Beni Culturali.

L'Ingegneria Inversa, la Realtà Virtuale e la Prototipazione Rapida sono, nell'ambito della progettazione industriale, comunemente note con il nome di *Time Compression Technologies*. La loro introduzione nel processo progettuale nasce principalmente dall'esigenza di ridurre il *Time to Market*, cioè l'intervallo di tempo che intercorre tra la progettazione di un nuovo prodotto o servizio e la sua commercializzazione.

Uno dei principali vantaggi legati all'applicazione di tali tecnologie nel campo della conservazione e valorizzazione dei Beni Culturali è la non invasività dei processi di rilievo. Questo permette di ottenere riproduzioni ad alta precisione, sia digitali che fisiche, dei reperti in esame, preservandone quindi l'integrità ed evitando il rischio di eventuali danneggiamenti.

Tali modelli possono essere proficuamente impiegati sia a scopo divulgativo che scientifico dei Beni Culturali: da un lato possono essere progettati nuovi sistemi di fruizione da parte del pubblico e, di conseguenza, nuove modalità di musealizzazione dei reperti, dall'altro, si possono fornire ad archeologi, antropologi e ricercatori nuovi strumenti finalizzati a semplificare lo studio dei Beni Culturali, a incrementare la

quantità e la qualità delle informazioni ottenibili da tali analisi oltre che a progettare diverse ipotesi di restauro.

Il primo capitolo della tesi è dedicato alla descrizione e all'analisi delle tecnologie di *Time Compression* (Ingegneria Inversa, Realtà Virtuale e Prototipazione Rapida) nell'ambito delle metodologie di progettazione del prodotto e del processo produttivo con l'obiettivo della riduzione del *Time to Market* in ambito industriale.

Il secondo capitolo ha il compito di definire le modalità e le peculiarità del trasferimento tecnologico, dal campo industriale a quello per la conservazione e valorizzazione dei Beni Culturali, delle tecnologie di *Time Compression* descritte nel capitolo precedente. In particolare è delineato il processo metodologico che consente di riprodurre o ricostruire la geometria, anche morfologicamente complessa, di oggetti creati manualmente (nel caso di reperti archeologici o opere scultoree) o presenti in natura (nel caso di resti paleoantropologici o mummificati) al fine di ottenere i relativi modelli digitali e fisici. Inoltre, sono descritte le risorse tecnologiche di cui è dotato, o si è dotato negli ultimi tre anni, il laboratorio di Realtà Virtuale della II Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna, impiegate nei casi di studio affrontati. Sono, infine, evidenziate le possibili applicazioni in questo campo, per la conservazione e valorizzazione dei Beni Culturali, con particolare riferimento ai diversi casi di studio affrontati nel corso di questi tre anni.

Nei capitoli successivi è proposta una serie di casi di studio specifici focalizzando, di volta in volta, aspetti e peculiarità diverse che intervengono nelle varie fasi volte all'applicazione di tecnologie innovative nel campo dei Beni Culturali al fine di dare, nell'insieme, un quadro sufficientemente rappresentativo delle problematiche e delle soluzioni individuate relative all'intero processo metodologico.

Nel terzo capitolo è descritto il processo per la scansione 3D e la prototipazione di reperti scheletrici, oggetto di studio in campo paleoantropologico, attraverso l'impiego di tecniche non invasive in alternativa all'approccio tradizionale che prevede la realizzazione di calchi a diretto contatto con gli esemplari in esame. I modelli digitali dei reperti scheletrici, ottenuti dal processo di scansione 3D tramite laser scanner, sono stati inoltre utilizzati per effettuare un insieme completo di analisi antropometriche, sia di tipo convenzionale che di tipo più avanzato, all'interno di ambienti CAD, incrementando la quantità e la qualità delle informazioni ottenute. Queste operazioni hanno in particolare evidenziato l'esigenza di stabilire procedure standardizzate volte all'estrapolazione di dati qualitativi e, soprattutto, quantitativi da utilizzare per ulteriori e successive analisi comparative.

Il quarto capitolo entra nel merito delle problematiche relative dell'orientamento dei modelli digitali 3D di forma geometrica complessa all'interno di un ambiente CAD per operazioni di analisi comparativa. Il confronto morfologico tra modelli tridimensionali necessita della scelta di un sistema di orientamento preciso e dell'individuazione di una rigorosa procedura per la standardizzazione della metodologia da seguire. Il problema è stato affrontato confrontando diversi sistemi di orientamento, alcuni presenti in letteratura, altri proposti per la prima volta, sui modelli digitali 3D di un campione di molari primi inferiori e superiori, scansionati tramite digitalizzatore piezoelettrico, al fine di stabilire il sistema migliore. In ambito archeologico e antropologico, infatti, l'analisi comparativa, da un punto di vista morfologico e morfometrico, di denti umani appartenenti a periodi diversi può fornire utili elementi per lo studio evolutivo della specie.

Nel quinto capitolo sono presentati i risultati di una complessa e completa analisi effettuata sui resti di una mummia peruviana smembrata in sei frammenti principali. A differenza dei casi illustrati precedentemente, il processo metodologico seguito in questo caso di

studio non si pone come alternativa ai procedimenti di analisi convenzionali, bensì diventa l'unica strada percorribile per la raccolta di dati e informazioni sull'oggetto in esame. Da un lato, infatti, la fragilità del reperto non consente operazioni di manipolazione diretta dei frammenti, per il rischio di danneggiamenti irreversibili, dall'altro il tessuto mummificato che ricopre la struttura scheletrica, impedisce le analisi antropometriche tradizionali che si basano sull'impiego di strumenti di misura a contatto con alcuni punti specifici sulle ossa. Partendo dai dati TAC dei frammenti, che restituiscono informazioni sull'intero volume scansionato e non solo sulla superficie, è stato possibile effettuare la ricostruzione geometrica dei modelli sia della struttura esterna, comprensiva dei tessuti molli mummificati, sia del distretto scheletrico interno. La prima parte del lavoro ha quindi visto, come obiettivo, la realizzazione di un modello virtuale completo della mummia nella propria posizione anatomica di sepoltura, assemblando, in un ambiente virtuale, i modelli digitali 3D dei sei frammenti principali. Inoltre, sui modelli digitali dei segmenti scheletrici, sono state eseguite, in ambiente CAD, tutte quelle misure non altrimenti possibili sui resti reali. Infine è stata valutata e classificata la deformazione cranica artificiale, indotta sul soggetto, tramite analisi comparativa tra i dati rilevati sul modello digitale del cranio e quelli presenti in letteratura.

Il sesto capitolo descrive infine un approccio combinato di impiego di metodologie tradizionali e manuali con metodologie innovative e digitali, nell'ambito della ricostruzione facciale. In questo caso quindi, le due diverse metodologie non si pongono in maniera alternativa o complementare, bensì sono impiegate in modo congiunto. Il caso di studio proposto si riferisce, in particolare, alla ricostruzione del volto del poeta medioevale italiano Dante Alighieri a partire dai dati e dagli elementi raccolti dall'antropologo Fabio Frassetto a seguito della ricognizione effettuata sui resti del Poeta nel 1921, sesto centenario della morte. Il lavoro è partito dalla scansione 3D del calco del calvario (cranio senza mandibola) realizzato dal Prof. Frassetto nella prima metà del 1900

e, considerando l'assenza della mandibola del Poeta tra i resti scheletrici ritrovati, è stato necessario ricostruirne *ex-novo* un modello digitale 3D che si adattasse perfettamente al modello del calvario acquisito tramite laser scanner. Per questo processo è stata selezionata una mandibola di riferimento, morfologicamente compatibile con il calvario di Dante, ed è stata riprodotta digitalmente per essere utilizzata come modello di partenza nelle successive operazioni di modellazione virtuale. E' stata eseguita una serie complessa di trasformazioni del modello al fine di renderlo accoppiabile con il calvario e di ottenere quindi, il modello digitale 3D del cranio completo di Dante. Infine, con un sistema di Prototipazione Rapida, sono stati realizzati i prototipi in scala 1:1 sia del calvario che della mandibola per poter essere impiegati nelle successive fasi di ricostruzione facciale attraverso l'impiego di tecniche di antropologia forense tradizionali.

Infine sono raccolte una serie di conclusioni relative ai risultati raggiunti nei progetti di natura interdisciplinare presentati, ponendo particolare attenzione sui benefici ottenuti grazie all'impiego delle tecnologie applicate, che permettono un'analisi non invasiva ed estremamente dettagliata dei casi in esame. E' inoltre proposta una serie di possibili sviluppi futuri insieme alla possibilità di trasferire questi processi metodologici in altri campi, primo fra tutti quello biomedicale.



# Capitolo 1 - *Time Compression Technologies* nella progettazione industriale

## 1.1 Time to Market

Al giorno d'oggi uno degli obiettivi principali per le aziende è la riduzione del tempo e dei costi di sviluppo di un nuovo prodotto e il raggiungimento della "qualità totale". Il *Time to Market* (TTM), ovvero l'intervallo di tempo che intercorre tra l'inizio della fase di progettazione di un nuovo prodotto o servizio e la sua commercializzazione, rappresenta l'indicatore globale del processo di sviluppo di prodotto in termini di tempo, costo e qualità. Riducendo il TTM, le aziende possono realizzare prodotti innovativi più aderenti alle necessità dell'utilizzatore e guadagnare maggiore competitività sul mercato.

L'innovazione di prodotto e la riduzione del TTM rappresentano quindi, nell'ambito della progettazione industriale, i fattori sui cui si gioca la competitività delle aziende. L'introduzione nel mercato di nuovi prodotti sempre più concorrenziali ed in tempi ridotti impone l'adozione di una serie di metodologie, comunemente note con il nome di *Time Compression Technologies* (TCT), la cui integrazione consente di ottenere significative riduzioni dei tempi di ideazione, progettazione ed ingegnerizzazione all'interno dell'intero processo produttivo [1].

Tra gli strumenti di *Time Compression* a supporto delle aziende per il raggiungimento di tali obiettivi, rientrano tecnologie innovative come l'Ingegneria Inversa (RE – *Reverse Engineering*), la Realtà Virtuale (VR – *Virtual Reality*) e la Prototipazione Rapida (RP – *Rapid Prototyping*), la cui introduzione nel sistema aziendale si traduce essenzialmente nella riduzione dei tempi e dei costi dell'intero processo produttivo e nel miglioramento della qualità [2].

In particolare, con il termine di Ingegneria Inversa si individua la metodologia che consente, partendo da un oggetto reale, di risalire al suo modello digitale attraverso processi di scansione 3D. Per Realtà Virtuale si intende un ambiente tridimensionale modellizzato al computer e percepito attraverso un'interazione uomo-macchina che permette all'utente di interagire in *real time* con i modelli digitali rappresentati. Infine, con il termine di Prototipazione Rapida si individua una serie di sistemi che, prescindendo dalla complessità costruttiva, sono in grado di realizzare un modello fisico per addizione di materiale *layer by layer*, a partire dalla sua definizione matematica specificata su un CAD tridimensionale ed utilizzando processi rapidi, flessibili e altamente automatizzati.

L'integrazione delle tradizionali risorse CAD-CAM [3] con i sistemi di Ingegneria Inversa, Realtà Virtuale e Prototipazione Rapida costituisce lo strumento che negli ultimi anni ha trasformato e potenziato in maniera radicale le attività della progettazione industriale. Questi strumenti consentono di soddisfare i bisogni della progettazione e della produzione in maniera rapida e flessibile, offrendo al progettista la possibilità di migliorare le diverse fasi di sviluppo di un prodotto, e lasciando alle diverse tecnologie il compito di rendere visibile, virtualmente e fisicamente, l'idea che ha in mente. I sistemi CAD-CAM, RE, VR e RP, integrati all'interno del processo produttivo, stanno trovando applicazione in ogni settore industriale, dal design all'industria meccanica, dal settore automobilistico a quello aerospaziale, offrendo soluzioni in grado di ridurre i tempi e i costi di progettazione, prototipazione e produzione.

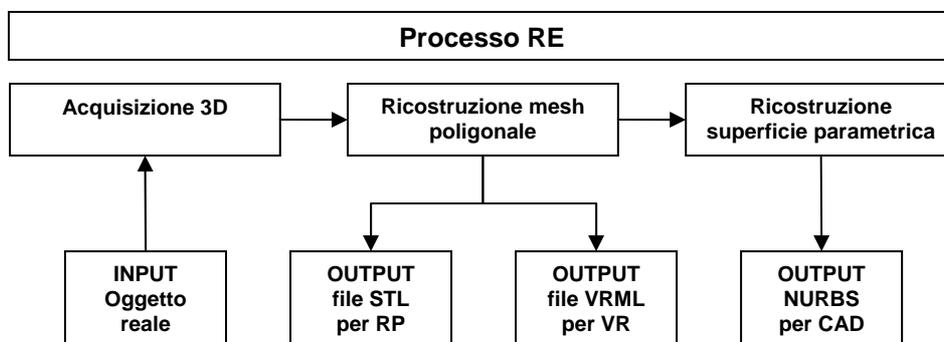
Per raggiungere questi obiettivi sono state definite quindi, nuove metodologie di progettazione del prodotto e del processo produttivo, dettate dalla necessità di avere a disposizione tecnologie integrate per simulare "tutto e subito" e che rappresentano una nuova filosofia di ingegnerizzazione del ciclo produttivo.

## 1.2 Ingegneria Inversa

Tra le tecnologie di Time Compression l'Ingegneria Inversa (RE – Reverse Engineering) può essere vista come il processo inverso della progettazione industriale, che consente di ottenere i dati di progetto dal prodotto anziché ottenere il prodotto dal progetto. Più comunemente si intende questo termine come legato al dato geometrico di forma e dimensioni e dunque l'Ingegneria Inversa può essere definita come una tecnologia che consente, partendo da un oggetto reale, di risalire alla sua descrizione matematica.

Mentre nel processo di ingegneria convenzionale l'idea del progettista sviluppata in ambiente CAD viene trasformata in un prodotto finito, in questo caso avviene il processo inverso, ossia oggetti reali sono trasformati in modelli digitali 3D in grado di poter essere poi integrati con le più tradizionali tecnologie CAD/CAM. Il processo quindi, consiste nell'ottenere una descrizione digitalizzata dell'oggetto in esame, definita dalla nuvola di punti acquisita che ne descrive la superficie. Questa procedura, all'interno del processo di progettazione di un prodotto, fornisce uno strumento che, in ambito industriale, semplifica i processi di design assistito al calcolatore, aumentandone l'efficienza e diminuendo il tempo necessario allo sviluppo del progetto stesso.

In generale, si possono distinguere tre diverse fasi del processo di Ingegneria Inversa, come indicato in Figura 1.1.



*Figura 1.1 Processo di Ingegneria Inversa*

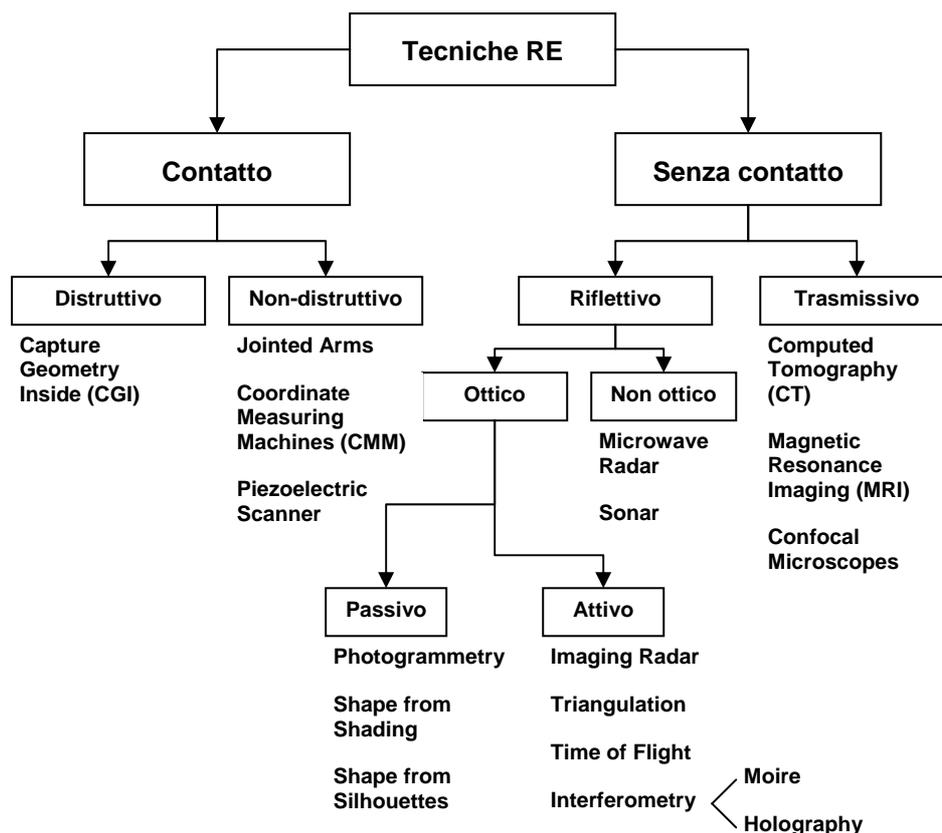
La prima fase del processo comprende l'acquisizione vera e propria dei dati e ha come input l'oggetto reale che si vuole digitalizzare. Successivamente questi dati vengono elaborati attraverso una serie di operazioni successive per la rappresentazione della superficie acquisita. Tale superficie è realizzata mediante elementi di tipo triangolare (triangolazione) che approssimano linearmente l'andamento della curvatura della superficie. Il risultato di questa fase è una rappresentazione dell'oggetto attraverso una *mesh* poligonale triangolata che può essere esportata direttamente in un formato STL (*Solid To Layer*) per l'impiego in sistemi CAM e di Prototipazione Rapida, o in formato VRML (*Virtual Reality Modelling Language*) per la fruizione attraverso sistemi di Realtà Virtuale o sul web. Infine, la fase di generazione di un modello costituito da superfici NURBS è la più delicata, ma permette di ottenere di un modello facilmente importabile e modificabile con i moderni sistemi CAD.

Le tecniche standard di acquisizione 3D possono essere suddivise, secondo quanto indicato in Figura 1.2, in due categorie principali [4]:

1. **Acquisizione tramite contatto**, che permette il rilievo del pezzo attraverso il contatto fisico tra un sensore e la superficie dell'oggetto in esame. I sensori a contatto sono tipicamente sonde, costituite da bracci meccanici o catene, la cui posizione nello spazio può essere determinata con precisione ad ogni istante. Attraverso il movimento della sonda a contatto della superficie di un oggetto è, quindi, possibile acquisire dati quantitativi sulla sua forma. In questa categoria rientrano le Coordinate Measuring Machines (CMM), ampiamente utilizzate per misure di precisione nell'industria meccanica, e i digitalizzatori piezoelettrici. In generale, questi strumenti sono abbastanza lenti e non forniscono le informazioni sull'apparenza dell'oggetto.

2. **Acquisizione senza contatto**, che permette la scansione dei punti sulla superficie del pezzo senza la necessità di un contatto fisico diretto ed è realizzata mediante tecniche indirette che richiedono normalmente l'invio di energia radiante sull'oggetto e la successiva rivelazione dell'energia trasmessa (**metodi trasmissivi**) o riflessa (**metodi**

riflettivi). In quest'ultima categoria, i **sistemi ottici** sono certamente molto diffusi e possono essere suddivisi ulteriormente in passivi o in attivi. In particolare, questi ultimi sono in grado di acquisire in maniera rapida e precisa una grande quantità di dati e, per questo, rappresentano attualmente le tecnologie più utilizzate.



*Figura 1.2: Tecniche di Ingegneria Inversa*

I **sistemi ottici passivi** (o a luce non strutturata) sono, in generale, basati sull'acquisizione di molte immagini RGB prese da diversi punti di vista, sulla ricostruzione del contorno dell'oggetto ripreso (silhouette) e, infine, sull'integrazione di tali profili per la ricostruzione del modello 3D. Questi sistemi definiscono le coordinate dell'oggetto soltanto tramite l'uso delle informazioni contenute nelle immagini acquisite (per esempio, la fotogrammetria). Sono estremamente economici, semplici da usare e producono direttamente un modello completo; al contrario, la qualità e

l'accuratezza del modello generato può risultare abbastanza bassa per alcune tipologie di applicazioni.

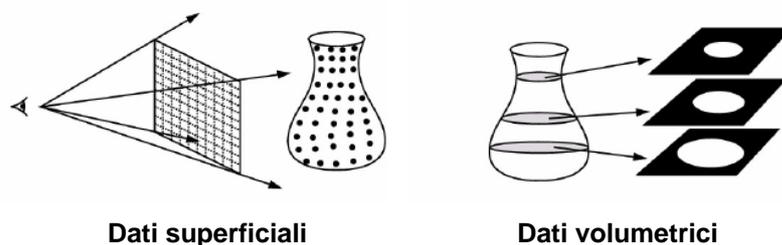
I **sistemi ottici attivi** (o a luce strutturata) sono costituiti da una sorgente e da un sensore, e, mentre la sorgente emette una determinata forma di fonte illuminante, il sensore acquisisce il segnale di ritorno riflesso dalla superficie dell'oggetto. La sorgente scandisce lo spazio in modo regolare ed il sistema restituisce una matrice 2D che identifica e codifica i punti rilevati (*range map*) sulla superficie dell'oggetto. Queste tipologie di sistemi possono essere ulteriormente classificati in **sistemi a triangolazione** e **sistemi a tempo di volo**.

Nei **sistemi a triangolazione** la geometria dell'oggetto è ricostruita tramite un processo di triangolazione basato sull'impiego di tre informazioni: la direzione di emissione della fonte illuminante e le posizioni relative sia della sorgente che del sensore. Come fonte di emissione possono essere usate sia sorgenti laser (laser scanner 3D) che sorgenti di luce bianca. Questi sistemi raggiungono un buon livello di accuratezza, ed in alcuni casi sono anche in grado di acquisire l'informazione di colore RGB.

I **sistemi a tempo di volo**, emettono un segnale ad impulsi ed utilizzano un sensore per la misura del tempo necessario per raggiungere la superficie dell'oggetto e ritornare in modo riflesso al dispositivo. In generale, sono meno precisi dei precedenti, ma permettono di acquisire superfici più ampie in una singola immagine.

Tra i **metodi trasmissivi** rientra invece la tomografia computerizzata (CT – *Computed Tomography*), che utilizza raggi X ad alta energia e misura l'energia trasmessa attraverso l'oggetto lungo una serie di fette successive (*slice*). Questo sistema consente, a differenza dei metodi riflessivi, di ottenere una rappresentazione volumetrica ad alta risoluzione della densità dello spazio scansionato, intorno e dentro all'oggetto. I dati volumetrici rilevati possono essere visualizzati direttamente o utilizzati come input per la ricostruzione della superficie dell'oggetto in esame (Figura 1.3). Inoltre il sistema risulta insensibile

alle proprietà di riflessione superficiale dell'oggetto e permette la rilevazione di eventuali cavità interne.



*Figura 1.3: Struttura dei dati*

Tra le principali applicazioni in campo industriale si distingue il **Reverse Modelling** come strategia progettuale per il disegno di prodotto, in quanto la necessità di riprodurre la geometria degli elementi creati manualmente dai modellisti è particolarmente presente nelle moderne strutture produttive che necessitano di un accurato modello CAD tridimensionale sia per la fase di prototipazione che per le successive fasi di sviluppo del processo produttivo. Tali applicazioni si trovano prevalentemente nel settore automobilistico e dell'ergonomia.

Inoltre in molte aree della produzione il **Controllo Qualità** richiede, sempre più frequentemente, ispezioni dei prodotti durante la fase di lavorazione stessa. Quindi, nell'ottica di una riduzione dei tempi e di un incremento dell'automazione, una serie di applicazioni di tecniche di Ingegneria Inversa sono volte ad ottenere un controllo dimensionale e di forma on-line direttamente sulla linea di produzione di prodotti il cui controllo manuale risulterebbe decisamente più lungo e meno pratico.

### **1.3 Realtà Virtuale**

La Realtà Virtuale nasce per descrivere ambienti grafici tridimensionali generati dal computer, che permettono all'utente di entrare ed interagire con realtà sintetiche, e riesce ad integrare solide tecnologie di base (quali la modellazione, la simulazione, la navigazione e l'animazione) che rendono visibili ed accessibili, insieme complessi come

fossero reali. In ambito industriale, attraverso questa tecnologia si è in grado di simulare perfettamente tutte le fasi di sviluppo di un progetto, per verificarne l'ergonomia, l'idoneità, la congruenza, l'accessibilità dei componenti, la montabilità e la smontabilità.

Le potenzialità della Realtà Virtuale sono difficili da sintetizzare in poche righe. Per poter essere applicata sono necessarie grandi quantità di dati digitali contenenti informazioni relative al prodotto: da quelle relative alla geometria a quelle che ne individuano gli aspetti funzionali, dalle modalità di assemblaggio e manutenzione fino alle metodologie di riciclaggio che devono essere applicate quando il prodotto giunge al termine della sua vita. A partire da questi dati digitali, è possibile realizzare un modello virtuale esattamente corrispondente a quello reale che si genererebbe attraverso la costruzione di un modello fisico.

Nasce così il concetto di *Virtual Environment* (VE), ovvero di un ambiente virtuale che riproduce il mondo reale, al fine di soddisfare specifiche esigenze applicative. Riproducendo fedelmente un ambiente esistente si permette così all'utente della Realtà Virtuale di potere effettuare le stesse esperienze sensoriali che otterrebbe con un oggetto materiale.

Attraverso la tecnologia della Realtà Virtuale si è dunque in grado di ridurre o eliminare i modelli fisici (*Physical Mock-Up*) di un prodotto introducendo, nelle varie fasi del suo sviluppo, il concetto di prototipazione virtuale (*Virtual Prototyping*), legato alla realizzazione di modelli digitali (*Digital Mock-Up*).

L'eliminazione di prototipi fisici e l'introduzione di prototipi digitali in un ambiente virtuale porta il progettista ad operare secondo una metodologia di prototipazione virtuale, a supporto delle attività di progettazione, produzione, assemblaggio e manutenzione di nuovi prodotti. Il *Virtual Prototyping* rappresenta una delle applicazioni più vantaggiose della Realtà Virtuale in campo industriale.

La prototipazione virtuale, intesa come metodologia progettuale basata su tecniche e tecnologie per l'immersione visiva e l'interazione in ambienti virtuali tridimensionali generati al computer, sta

progressivamente guadagnando l'attenzione della comunità ingegneristica. Tra i vantaggi derivati dalla sua applicazione c'è una generale riduzione di tempi e costi di progettazione dei prodotti e un corrispondente aumento della qualità, principalmente per la capacità di valutare e provare approfonditamente un prodotto fin da uno stadio preliminare della sua progettazione in un ambiente virtuale flessibile, altamente interattivo e facilmente riconfigurabile.

L'utilizzo di strumenti di visione stereoscopica di un oggetto virtuale consente all'utente di percepirne la profondità, mentre l'impiego di dispositivi di tracciamento avanzati (sistema di *Tracking*), che attraverso particolari sensori riproducono fedelmente i movimenti dell'utente in un ambiente virtuale, ne facilitano l'interazione.

Attraverso questa tecnologia si è dunque in grado di simulare perfettamente tutte le fasi di sviluppo di un prodotto: l'ergonomia, l'analisi della funzionalità, la costruzione, la pianificazione dell'assemblaggio, ma anche l'addestramento e la formazione.

Infatti, se si possiede un oggetto virtuale che genera in un operatore analoghe sensazioni di uno reale, oltre ad elaborare in modo più semplice le specifiche fasi progettuali, è possibile capire anche come deve essere organizzato lo spazio della produzione (gli impianti e le fasi di realizzazione), come deve avvenire la manutenzione su alcuni particolari dell'oggetto, sviluppare sedute di formazione ancor prima di aver avviato la produzione, organizzare un catalogo elettronico in grado di fornire al potenziale acquirente informazioni precise. E così il comfort e i dispositivi di cortesia nell'abitacolo di un'auto o la posizione dei pannelli di controllo e la disposizione dei comandi in un cockpit aeronautico, possono essere valutati da una larga fascia di utenti prima che il progetto inizi.

Da queste considerazioni sull'applicazione della Realtà Virtuale, nate dalle esigenze manifestate sia dall'industria automobilistica, sia da quella aeronautica, emerge la possibilità che progettisti, manutentori e utilizzatori partecipino attivamente al processo di sviluppo di un prodotto utilizzando lo stesso strumento, fornito dalla Realtà Virtuale.

### 1.4 Prototipazione Rapida

Un'ulteriore tecnologia a supporto alla progettazione in ambito industriale è la Prototipazione Rapida (RP – *Rapid Prototyping*), che consente di ottenere il modello fisico di un oggetto a partire dalla sua definizione matematica digitale realizzata su un CAD tridimensionale o acquisita tramite una scansione 3D [5].

Diversamente dai tradizionali sistemi CNC basati su processi “sottrattivi” e che lavorano quindi, per sottrazione di materiale da un blocco unico di partenza, i sistemi di Prototipazione Rapida utilizzano processi “additivi”, ossia costruiscono i pezzi con aggiunta di materiale in strati successivi (*layer by layer*), utilizzando procedimenti, rapidi, flessibili e altamente automatizzati.

Attraverso questi sistemi un prototipo industriale può essere, quindi, realizzato in tempi molto brevi e senza l'ausilio di attrezzature specifiche. Questo consente di materializzare più velocemente la forma fisica di quanto i progettisti disegnano sul computer, senza dover affrontare i costi e i rischi della realizzazione di un prototipo vero e proprio, ma soprattutto offre la possibilità di realizzare un prototipo, anche particolarmente complesso dal punto di vista morfologico, in un'ampia gamma di materiali, indipendentemente da forma e complicazione geometrica.

In generale il processo di Prototipazione Rapida può essere suddiviso in tre fasi principali, secondo quanto indicato nel layout in Figura 1.4.

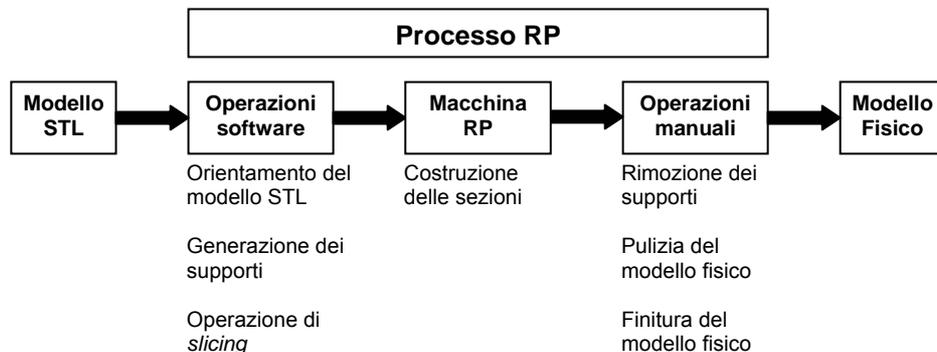


Figura 1.4: Processo di Prototipazione Rapida

Il primo passo è la generazione di un modello in formato STL, tramite CAD o scansione 3D, dell'oggetto che si vuole prototipare. Il file STL viene quindi, elaborato dal software di gestione del sistema per le fasi di orientamento del modello, di generazione dei supporti e di *slicing*. La scelta di orientamento del modello consente di stabilire la direzione di crescita del pezzo, mentre la generazione dei supporti è necessaria per alcune tecniche, per sostenere le eventuali parti a sbalzo del modello. Il file viene quindi sottoposto alla fase di *slicing*, ovvero di generazione delle sezioni attraverso una serie di piani ortogonali alla direzione di crescita. Ultime queste operazioni preliminari, il prototipo viene generato dalla macchina di Prototipazione Rapida. Infine, attraverso una serie di operazioni manuali, è necessario rimuovere gli eventuali supporti ed è possibile sottoporre il pezzo ad una serie di post-trattamenti per migliorarne le caratteristiche e la finitura superficiale.

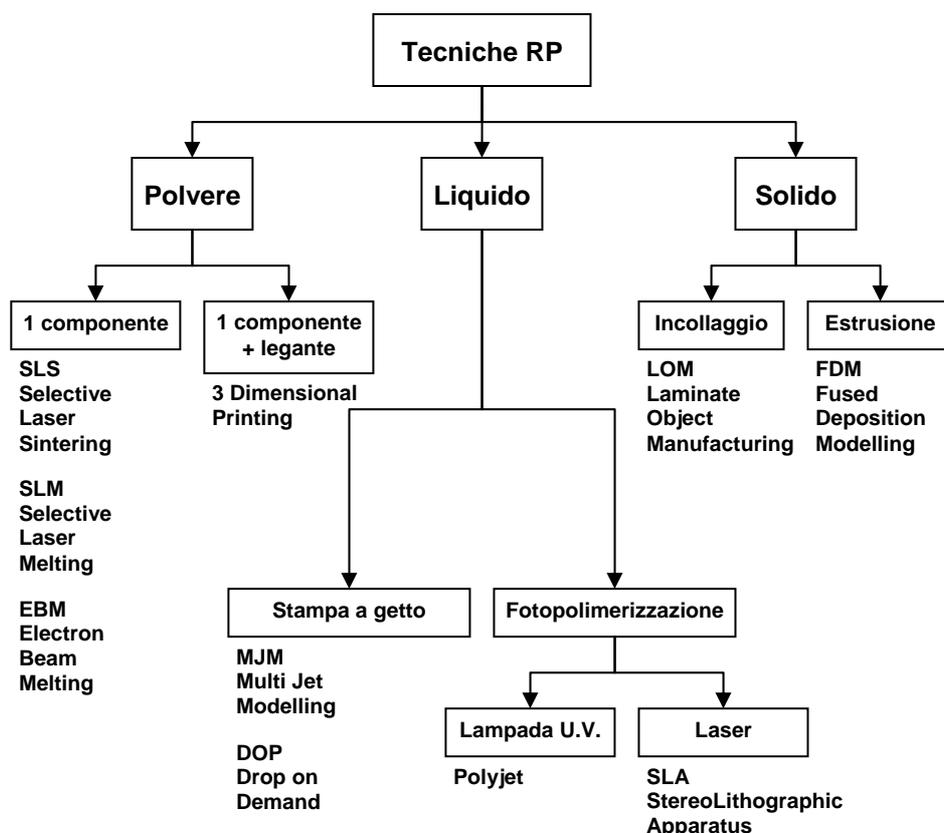


Figura 1.5: Tecniche di Prototipazione Rapida

Dai primi sistemi di Prototipazione Rapida, che utilizzavano resine polimeriche, si è giunti alla produzione di prototipi in materiali differenti, quali ad esempio gesso, metallo o plastica. Attualmente sono disponibili diverse tecniche che, in prima analisi, possono essere classificate in funzione della natura del materiale utilizzato per la realizzazione dei prototipi (polvere, liquido, solido) secondo quanto indicato in Figura 1.5.

- **SLA – StereoLithographic Apparatus**

La stereolitografia è stata la prima tecnica impiegata nel campo della Prototipazione Rapida. Il principio di funzionamento del sistema è legato all'impiego di un laser che individua la sezione del prototipo in costruzione sulla superficie di una vasca contenente resina epossidica allo stato liquido. Mentre il laser cede energia, la resina epossidica polimerizza dando origine ad uno strato solido. Successivamente viene aggiunto un altro strato di materiale liquido ed il procedimento si ripete fino al completamento del prototipo. Al termine del processo il prototipo è solidificato all'esterno ma non completamente all'interno: per completare la fase di solidificazione è necessaria l'esposizione del modello ad una lampada ad ultravioletti (UV).

- **Polyjet**

Questo sistema utilizza, per la realizzazione del prototipo, la stampa a getto di un fotopolimero. La testina di stampa multiugello trasla e depone in modo selettivo il fotopolimero, dopo aver determinato con l'operazione di *slicing* le sezioni del modello. Lo strato depositato viene completamente solidificato da lampade ad ultravioletti (UV). Ultimata la deposizione di ogni sezione, la tavola di costruzione si abbassa di una quantità pari allo spessore dello strato e il processo riprende fino alla completa costruzione del prototipo.

- **MJM – Multi Jet Modelling**

Questo sistema utilizza una tecnica simile a quella della stampa a getto di inchiostro ed è costituito da una testina stampante multiugello che

depone selettivamente, sulla piattaforma di lavoro, materiale termoplastico liquefatto. Il materiale rilasciato dagli ugelli solidifica e aderisce allo strato precedentemente depositato. Successivamente la piattaforma si abbassa e inizia la fase di deposizione dello strato successivo; il processo continua, strato dopo strato, fino alla realizzazione del modello completo.

- **DOP – Drop on Demand**

Questa tecnologia consiste nel depositare, attraverso due getti, il materiale termoplastico per la costruzione del modello e per la costruzione dei supporti. Oltre al processo additivo, tipico dei sistemi di Prototipazione Rapida, interviene un processo sottrattivo, tipico delle macchine CNC, costituito da una fresa che provvede a livellare lo strato di materiale depositato. Le testine, durante il loro movimento, depositano sulla piattaforma di lavoro prima il materiale di costruzione e poi quello di supporto che solidificano aderendo allo strato precedente. Dopo la deposizione di ogni strato, la piattaforma si abbassa e il processo continua fino al completamento del modello.

- **LOM – Laminate Object Manufacturing**

Questa tecnologia permette la realizzazione del prototipo attraverso il progressivo incollaggio di fogli di carta sovrapposti sui quali viene ricavata la sezione del pezzo in costruzione con taglio meccanico o laser. In questo caso la funzione di supporto è svolta dalla carta in eccesso alla sezione tagliata. Al termine del processo, infatti, si ottiene un parallelepipedo di materiale stratificato da cui è necessario estrarre il pezzo, isolandolo dal materiale in eccesso.

- **FDM – Fused Deposition Modelling**

In questo processo tecnologico le diverse sezioni sono realizzate tramite estrusione e deposizione di materiale, tipicamente ABS, allo stato fuso. La testa di estrusione fonde il materiale di costruzione e di supporto e lo deposita in sottili strati tramite un sistema a due ugelli che si muove

nel piano per generare la sezione in lavorazione: dopo aver realizzato i perimetri interno ed esterno di ogni sezione, viene riempito lo spazio compreso tra questi con il materiale di costruzione e viene successivamente depositato il materiale di supporto necessario. Le diverse sezioni sono realizzate su una base che si muove verticalmente e consente, quindi, la costruzione progressiva del prototipo.

- **SLS – Selective Laser Sintering**

Questi sistemi lavorano attraverso la sinterizzazione laser diretta di materiale che ha consistenza di polvere (materiali termoplastici, metalli, sabbia). Uno strato di polvere viene depositato da un rullo e pressato sulla piattaforma dell'elevatore. Successivamente la radiazione del laser sinterizza la polvere consolidando la sezione in lavorazione. L'elevatore si abbassa di una quantità pari allo spessore dello strato ed il processo si ripete fino alla completa realizzazione del prototipo. Con questo metodo costruttivo non sono necessari i supporti per il prototipo in lavorazione, in quanto le parti a sbalzo sono sostenute dalla polvere non sinterizzata.

- **SLM – Selective Laser Melting**

Questa metodologia si basa sull'impiego di polveri metalliche integrali, ossia senza l'ausilio di bassi fondenti, depositate, pressate e livellate sul piano di lavoro. Ne deriva che la radiazione laser, opportunamente focalizzata per fondere selettivamente le particelle metalliche e realizzare la sezione desiderata che aderisce a quella precedente, è più potente e permette di ottenere oggetti simili a quelli della produzione di serie. Allo scopo di prevenire l'ossidazione dei metalli nella camera di lavoro si ricrea un'atmosfera inerte. L'operazione è ripetuta fino al completamento del prototipo e ad ogni ciclo il piano di lavoro viene abbassato della quantità pari allo spessore dello strato realizzato.

- **EBM – Electron Beam Melting**

Questo sistema utilizza, per la realizzazione de prototipo, polvere metallica integrale senza l'aggiunta di elementi bassofondenti che viene depositata, pressata e livellata sul piano di lavoro. La focalizzazione di un fascio di elettroni fonde in modo selettivo le particelle metalliche realizzando in tal modo la sezione desiderata e facendola contemporaneamente aderire a quella precedente. Nella camera di costruzione viene eseguito il vuoto per prevenire la formazione di ossidi metallici nelle polveri. Il fascio elettronico, potendo concentrare una potenza di spot superiore rispetto al laser, può fondere polveri metalliche alto fondenti quali il titanio. L'elevatore collegato al piano di lavoro si abbassa di una quantità pari allo spessore dello strato e il processo continua fino alla completa costruzione del pezzo.

- **3 Dimensional Printing**

Nasce da una tecnologia sviluppata dal M.I.T. di Boston e prevede l'impiego di cartucce che spruzzano un collante, con la tecnica della stampa a getto di inchiostro, per l'unione dei successivi strati di polvere utilizzata per la realizzazione del prototipo (amido, gesso o polvere ceramica). Strato dopo strato, la cartuccia deposita il collante solo in corrispondenza della relativa sezione fino al completamento del prototipo sulla tavola di lavoro. La polvere utilizzata serve anche da supporto al modello stesso che, al termine del processo di costruzione, deve subire trattamenti di infiltrazione per aumentare la compattezza.

Oltre alla realizzazione di prototipi da impiegare per validazioni da un punto di vista funzionale o ergonomico, durante la fase di sviluppo di un nuovo prodotto, le applicazioni industriali di Prototipazione Rapida comprendono anche i settori del **Rapid Tooling** e del **Rapid Manufacturing**.

Con il termine **Rapid Tooling**, o attrezzaggio rapido, si descrive un insieme di tecniche mirate alla costruzione in tempi brevi di attrezzature destinate alla preserie. La realizzazione di attrezzature per la produzione

rappresenta, infatti, una delle fasi più dispendiose in termini di tempi e costi nello sviluppo di un nuovo prodotto. Tali tecniche possono essere classificate in:

- **tecniche di tipo diretto** in cui il sistema di Prototipazione Rapida produce direttamente l'attrezzatura idonea da impiegare per la realizzazione delle preserie;
- **tecniche di tipo indiretto** in cui si utilizza il prototipo rapido con processi tradizionali, come la realizzazione di stampi in silicone o per la creazione di modelli sacrificali da impiegare nei processi di fusione a cera persa.

Infine con il termine **Rapid Manufacturing** si descrivono i processi che permettono, con l'impiego di tecniche additive, di accorciare in modo sostanziale i tempi per ottenere pezzi definitivi, di geometria qualsiasi e con varietà di materiali (plastica, ceramica, metallo), da portare nel mercato, senza ausilio di stampi od attrezzature.

In un certo senso le macchine di Prototipazione Rapida possono essere viste come stampanti tridimensionali dei file, e hanno cambiato, sotto l'aspetto puramente industriale, l'organizzazione dell'intero processo produttivo: oggi tali tecnologie sono considerate, a pieno titolo, strumenti fondamentali per lo sviluppo rapido dei prodotti e delle attrezzature.

## **Capitolo 2 - Trasferimento Tecnologico nel campo dei Beni Culturali**

### **2.1 Conservazione e valorizzazione dei Beni Culturali**

L'articolo 9 della Costituzione della Repubblica Italiana recita, testualmente:

*“La Repubblica promuove lo sviluppo della cultura e la ricerca scientifica e tecnica. Tutela il paesaggio e il patrimonio storico e artistico della Nazione.”*

Queste poche righe sintetizzano e sottolineano l'importanza strategica di alcune linee guida del Paese. Tra queste figurano, da un lato, lo sviluppo della ricerca, dall'altro la tutela del patrimonio. E' naturale quindi, pensare anche alle modalità di interazione tra questi diversi aspetti, ossia al contributo che in generale la ricerca scientifica e tecnica può apportare nel campo della conservazione e valorizzazione del patrimonio culturale.

### **2.2 *Time Compression Technologies* nel campo dei Beni Culturali**

Attualmente le diverse problematiche legate alla conservazione e valorizzazione dei Beni Culturali, coinvolgono uno spettro sempre più ampio di discipline, alcune specifiche, altre mutate da altri settori scientifici di ricerca. In generale, nel contesto dell'insieme delle tecnologie applicate ai Beni Culturali, negli ultimi anni, un ruolo di crescente interesse è stato attribuito alle tecnologie di *Time Compression*, quali Ingegneria Inversa, Realtà Virtuale e Prototipazione Rapida.

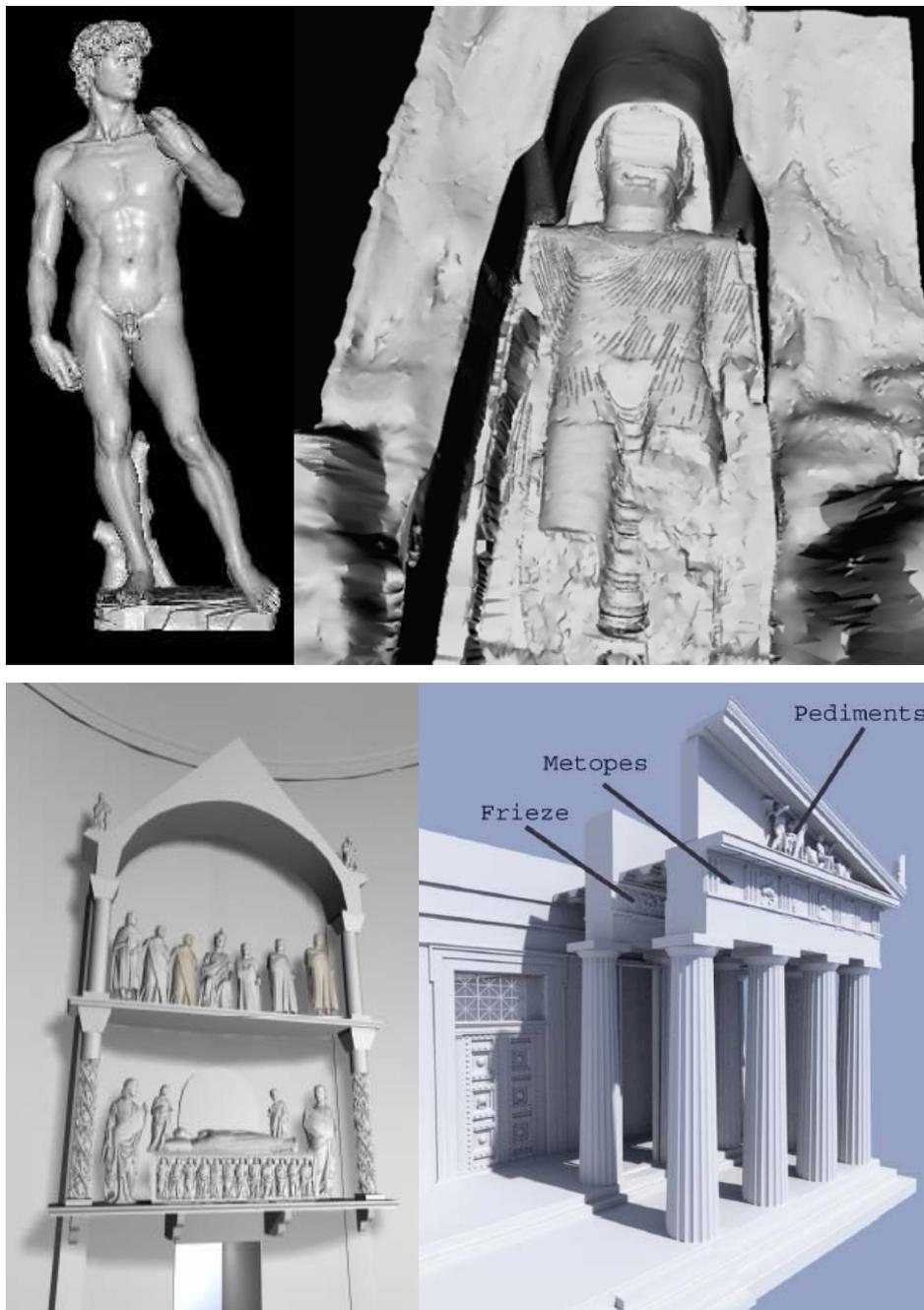
L'impiego di queste tecnologie, già consolidate nell'ambito della progettazione industriale come strumenti di grande efficacia per sostenere l'innovazione di prodotto e migliorare la competitività aziendale, consente, per la loro trasversalità e flessibilità, di progettare nuove modalità di intervento anche nel campo dei Beni Culturali. In generale, ogni *bene culturale* rappresenta infatti, per la propria unicità e complessità, un'occasione fondamentale per la validazione di approcci metodologici sempre più innovativi.

L'integrazione di tecnologie che consentono di riprodurre o ricostruire la geometria di oggetti creati manualmente (nel caso di reperti archeologici o opere scultoree) o presenti in natura (nel caso di resti paleoantropologici o mummificati) si è rivelata estremamente vantaggiosa per la ricerca in ambito archeologico e antropologico. Queste tecnologie permettono, infatti, di ottenere modelli ad alta precisione, sia digitali che fisici, dei reperti in esame, preservandone l'integrità ed evitando il rischio di eventuali danneggiamenti. La notevole complessità geometrica dei Beni Culturali, non consente infatti, di ottenere una loro rappresentazione digitale attraverso l'impiego dei tradizionali sistemi di modellazione solida [6] impiegati in campo industriale, ad esempio, per la realizzazione di particolari meccanici.

I sistemi per la riproduzione o ricostruzione della geometria di questi oggetti possono essere, quindi, raggruppati nelle tre aree tecnologiche descritte nel capitolo precedente. Il passaggio dal modello fisico al modello digitale e viceversa è lo scopo principale del loro uso congiunto all'interno di un processo metodologico ben definito.

Tra i progetti di maggior rilievo a livello mondiale che vedono l'applicazione di queste tecnologie ai Beni Culturali (Figura 2.1) si citano il *Digital Michelangelo Project* [7], volto alla scansione e realizzazione dei modelli geometrici tridimensionali delle opere di Michelangelo, la ricostruzione dei Buddha di Bamiyan in Afghanistan [8], la ricostruzione integrale del Partenone di Atene [9], la ricostruzione virtuale del monumento funebre dell'imperatore Arrigo VII [10] o la proposta di

creazione di un archivio virtuale dei reperti saccheggiati al museo di Baghdad.



*Figura 2.1 Esempi di applicazioni ai Beni Culturali: David di Michelangelo, Buddha di Bamiyan in Afghanistan, monumento funebre dell'imperatore Arrigo VII e Partenone di Atene*

Nel corso degli ultimi anni si sta, così, assistendo al consolidamento di esperienze interdisciplinari di trasferimento

tecnologico, orientate alla diffusione di strumenti e metodi tipici dell'ingegneria industriale nell'ambito della conservazione e valorizzazione dei Beni Culturali. In questo contesto l'idea del trasferimento tecnologico va intesa, non in senso verticale, dai centri di ricerca alle aziende, bensì in senso orizzontale, tra campi di ricerca tradizionalmente afferenti a discipline diverse. Queste esperienze interdisciplinari hanno pertanto reso necessaria l'introduzione di nuove figure professionali a supporto di quelle classiche dell'archeologo, dell'antropologo, del restauratore e del conservatore. Tra queste professionalità figurano, certamente, gli esperti di modellazione 3D, di Ingegneria Inversa e di Prototipazione Rapida.

Si può quindi sostenere che, per perseguire gli obiettivi volti alla conservazione e valorizzazione dei Beni Culturali, è necessario il coordinamento e l'interazione di gruppi di ricerca afferenti a diversi settori disciplinari, promuovendone le specifiche competenze, da un lato e favorendone l'integrazione, dall'altro. Proprio in quest'ottica è stata avviata una proficua collaborazione con il Dipartimento di Storie e Metodi per la Conservazione dei Beni Culturali (DISMEC) della Facoltà di Conservazione dei Beni Culturali dell'Università di Bologna (sede di Ravenna).

La ricerca di nuove metodologie di lavoro, basate sull'impiego di tecnologie innovative in questo campo, non può, infatti, prescindere dal confronto con l'approccio tradizionale, rispetto al quale, strumenti e metodi dell'ingegneria industriale possono porsi in maniera alternativa o complementare.

Generalmente il processo metodologico applicato nel campo della conservazione e valorizzazione dei Beni Culturali è individuato dal percorso tecnologico in Figura 2.2, ed è costituito da tre fasi distinte: quella di acquisizione della geometria del reperto con l'impiego di tecnologie di Ingegneria Inversa, quella di visualizzazione ed interazione con il modello digitale attraverso sistemi di Realtà Virtuale e, infine, quella di Prototipazione Rapida nel caso sia necessario riprodurre un modello fisico conforme all'originale.

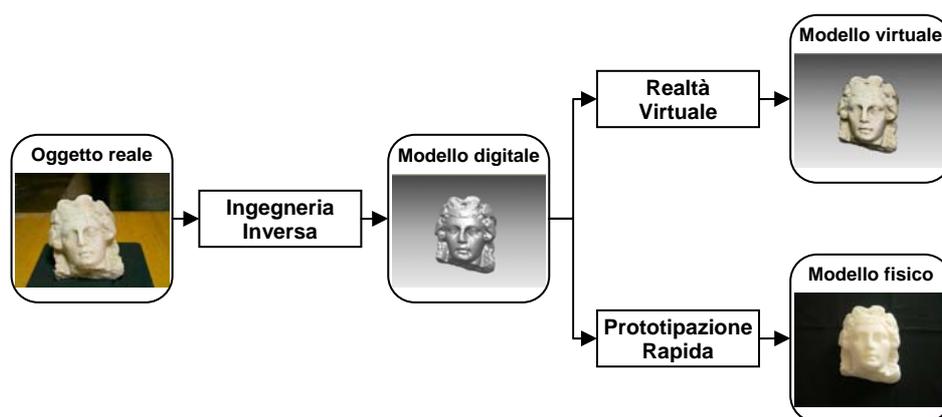


Figura 2.2 Layout del processo metodologico

La prima fase del processo è ovviamente quella volta alla digitalizzazione attraverso tecniche di Ingegneria Inversa del *bene culturale*, essendo questo già presente in natura e generalmente caratterizzato da una morfologia particolarmente complessa. Ottenuto quindi, il modello digitale tridimensionale del reperto in esame, è possibile importarlo in un ambiente CAD sfruttando tutte le potenzialità di questi sistemi. In particolare è possibile estrapolare tutta una serie di informazioni, quali dimensioni, misure o sezioni, difficilmente ottenibili sull'oggetto reale, tramite un approccio di analisi tradizionale, e senza correre il rischio di danneggiare il reperto. Inoltre è possibile utilizzare tutte le funzioni dei sistemi di modellazione CAD di tipo free-form, per modificare o ricostruire parti di un'opera ed eseguire una pianificazione dell'intervento di restauro. Il modello digitale può essere inoltre reso fruibile attraverso la rete o destinato ad applicazioni di Realtà Virtuale, con particolare attenzione alla visualizzazione stereoscopica, utilizzando il formato VRML. Infine, è possibile impiegare le tecniche additive, tipiche della Prototipazione Rapida, per realizzare le geometrie dei modelli digitali a disposizione, difficilmente realizzabili attraverso i sistemi di tipo sottrattivo delle macchine utensili tradizionali, a causa della complessità morfologica e della presenza di sottosquadri. Da un lato possono essere realizzate copie conformi all'originale a scopo di commercializzazione, dall'altro è possibile realizzare solo le parti

mancanti di un'opera e ricostruite virtualmente, da impiegare in successivi interventi di restauro.

Nei paragrafi che seguono verranno esaminate in dettaglio queste diverse fasi.

### 2.3 Digitalizzazione dei Beni Culturali

Con il processo di digitalizzazione dei Beni Culturali, attraverso sistemi di Ingegneria Inversa, si ottiene, a partire da un modello fisico, la sua descrizione matematica costituita dalle coordinate dei punti sulla sua superficie. Uno dei motivi del crescente successo di questi sistemi nell'ambito dei Beni Culturali risiede, senza dubbio, nel fatto che fra i più usati vi sono sensori ottici, principalmente laser, che non richiedono il contatto fisico con la superficie da misurare. Ciò consente di preservare i reperti dai eventuali danni dovuti al contatto diretto, garantendone, quindi, l'integrità.

Come visto nel capitolo precedente, esistono diversi procedimenti di scansione per ottenere un modello tridimensionale. La scelta del sistema opportuno è in relazione al tipo di oggetto che si vuole acquisire e al tipo di studio che si vuole effettuare.

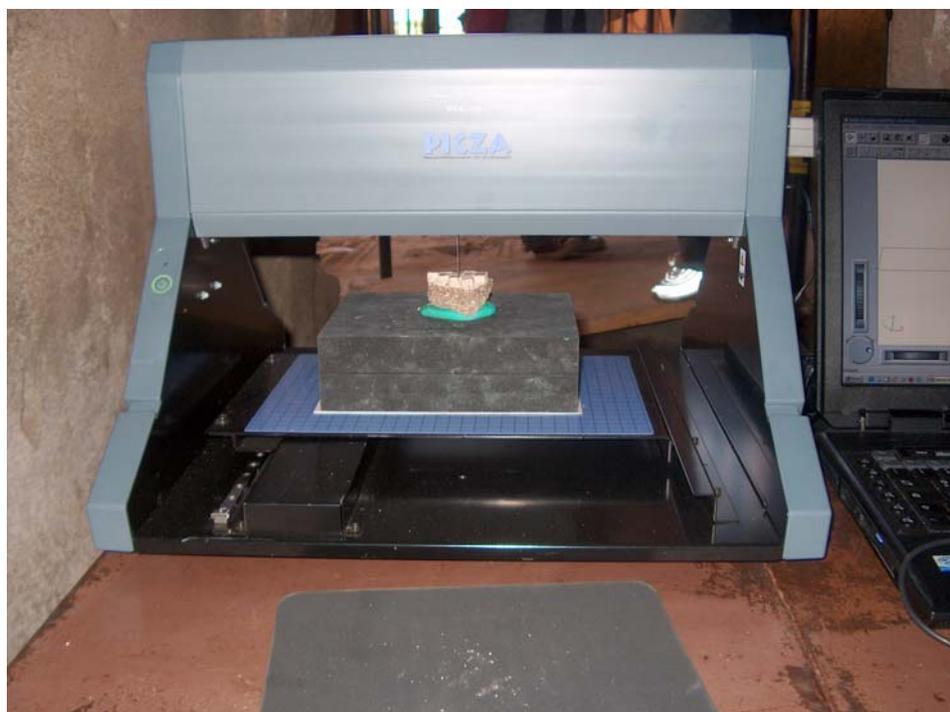
Il laboratorio di Realtà Virtuale è dotato di due sistemi di scansione 3D, tra cui il **Roland Picza Pix-30** (Figura 2.3).



*Figura 2.3 Roland Picza Pix-30*

Si tratta di un digitalizzatore piezoelettrico a coordinate per la scansione tridimensionale di oggetti di piccole dimensioni, basato sul lieve contatto tra un ago, ossia la sonda Roland Active Piezo Sensor (R.A.P.S.), e la superficie dell'oggetto da misurare. Può acquisire oggetti di dimensioni fino a 304.8 mm (larghezza, asse X) x 203.2 mm (profondità, asse Y) x 60.5 mm (altezza, asse Z) e caratteristiche tali da scansionare con passi di 0.025 mm, lungo l'asse Z, e da 0.05 mm fino a 5 mm, lungo gli assi X e Y.

Tale sistema risulta comunque non invasivo, considerato il lievissimo contatto che avviene con la superficie da acquisire, e permette di scansionare anche oggetti soffici, vetro o materiale trasparente, risultando insensibile alle eventuali proprietà riflettenti del materiale. Per contro, i tempi di acquisizione sono decisamente molto lunghi e non si ottengono informazioni sulle caratteristiche di colore. In Figura 2.4 è rappresentata la fase di acquisizione di un piccolo frammento di mosaico durante una campagna effettuata a Pompei nell'ottobre del 2005.



*Figura 2.4 Fase di acquisizione di un piccolo frammento di mosaico*

Il secondo sistema disponibile in laboratorio è il **NextEngine Desktop Scanner 3D** (Figura 2.5), ossia è un laser-scanner a triangolazione, basato sulla tecnologia *MultiStripe Laser Triangulation* (MLT). E' costituito da una sorgente che emette un fascio laser e un sensore che acquisisce il segnale di ritorno riflesso dalla superficie dell'oggetto, per cui la fase di scansione avviene senza contatto fisico con l'oggetto da acquisire.



*Figura 2.5 NextEngine Desktop Scanner 3D*

Il sistema può operare in modalità *macro* e *wide*, scansionando oggetti con area frontale rispettivamente di 96x129 mm e 256x342 mm, e ottenendo un'accuratezza dimensionale di  $\pm 0.13$  mm e  $\pm 0.38$  mm. La distanza ottimale tra lo scanner e l'oggetto da scansionare è di 177 mm in modalità *macro* e 406 mm in modalità *wide*. La correlazione geometrica delle diverse acquisizioni è favorita dalla cattura del colore (RGB) delle superfici scansionate in quanto lo scanner è anche provvisto di illuminatori integrati che garantiscono la corretta illuminazione dell'oggetto durante l'acquisizione delle informazioni di colore. Infine una tavola rotante ad alta precisione, controllata direttamente dallo scanner, può facilitare il processo di registrazione delle scansioni eseguite.

Nella Figura 2.6 è mostrata una fase di acquisizione, eseguita nel dicembre 2006, del piede destro dell'Ebe di Antonio Canova, conservata nel salone di ingresso presso la Pinacoteca Civica di Forlì.



Figura 2.6 Fase di acquisizione del piede destro dell'Ebe di Antonio Canova

Infine si cita il **Konica Minolta Vivid 910** (Figura 2.7), utilizzato in progetti svolti in collaborazione con il Centro DIAPReM, Dipartimento di Architettura dell'Università di Ferrara. Si tratta di un laser-scanner a triangolazione molto diffuso, con capacità di acquisizione della texture RGB del materiale e del dato geometrico. In generale, l'apparecchiatura è dotata di un gruppo di tre ottiche intercambiabili, *tele*, *middle* e *wide*, con distanza focale rispettivamente a 25, 14 e 8 mm e definizione compresa fra un massimo di 307000 punti (con area di scansione pari a 1300x1100 mm in condizione *fine*) e un minimo di 76000 punti (campo acquisibile pari a 111x84 mm in condizione *fast*). Per quanto riguarda l'accuratezza nelle condizioni ottimali (*tele/fine*) si ha: X:  $\pm 0.22$  mm, Y:  $\pm 0.16$  mm, Z:  $\pm 0.10$  mm.



*Figura 2.7 Konica Minolta Vivid 910*

Questa apparecchiatura è stata utilizzata per una campagna di scansione 3D di una serie di reperti conservati presso il Museo Archeologico “Tobia Aldini” di Forlimpopoli (FC), durante il mese di aprile del 2006 (Figura 2.8).



*Figura 2.8 Acquisizione tramite laser scanner di reperti*

Oltre all'impiego di laser-scanner o del digitalizzatore piezoelettrico, in alcuni casi particolari, si fa ricorso alla Tomografia Computerizzata (TC), come illustrato in Figura 2.9.



*Figura 2.9 Tomografia Computerizzata di un resto mummificato*

In particolare un'ampia bibliografia riguarda la scansione di reperti mummificati, in base alla quale dalle immagini tomografiche è possibile ricostruire le superfici sia dei tessuti molli che di quelli ossei. Questi sistemi, infatti, permettono di ottenere informazioni non solo sulla superficie, ma anche sull'intero volume scansionato.

La scelta del particolare sistema di scansione dipende quindi, dal caso di studio da esaminare e dalla tipologia di analisi da effettuare. In generale vengono utilizzati sistemi per l'acquisizione superficiale nel caso di reperti archeologici, opere scultoree o resti paleoantropologici, mentre diviene necessaria un'acquisizione volumetrica nel caso di reperti mummificati.

Nei paragrafi che seguono vengono descritte le fasi necessarie per la realizzazione dei modelli digitali secondo queste due diverse procedure. Il risultato di questo processo è una rappresentazione dell'oggetto

attraverso una *mesh* poligonale triangolata visibile con i moderni sistemi CAD, esportabile in un formato STL (*Solid To Layer*) per l'integrazione con sistemi CAM e di Prototipazione Rapida, o fruibile in formato VRML (*Virtual Reality Modelling Language*) attraverso sistemi di Realtà Virtuale o su internet.

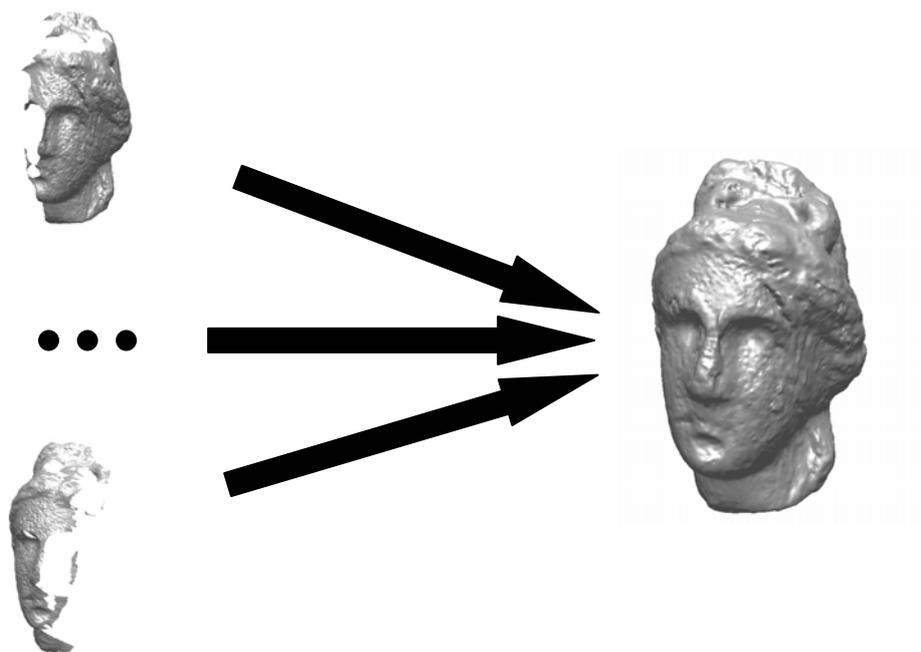
### 2.3.1 La realizzazione dei modelli digitali dalla scansione 3D

A prescindere dal dispositivo impiegato per effettuare la scansione 3D, laser scanner o digitalizzatore piezoelettrico, è necessario effettuare un post-processing dei dati acquisiti, costituito da una serie di operazioni in cascata, normalmente definita *pipeline di acquisizione* [11], per la realizzazione del modello digitale dell'oggetto scansionato. Di seguito sono descritte le diverse fasi del processo [12] realizzate attraverso il software **Rapidform**:

- pianificazione delle riprese
- acquisizione dei dati
- allineamento delle *range map*
- fusione delle *range map*
- editing del modello digitale
- semplificazione del modello digitale
- applicazione della texture
- archiviazione e conversione dei dati

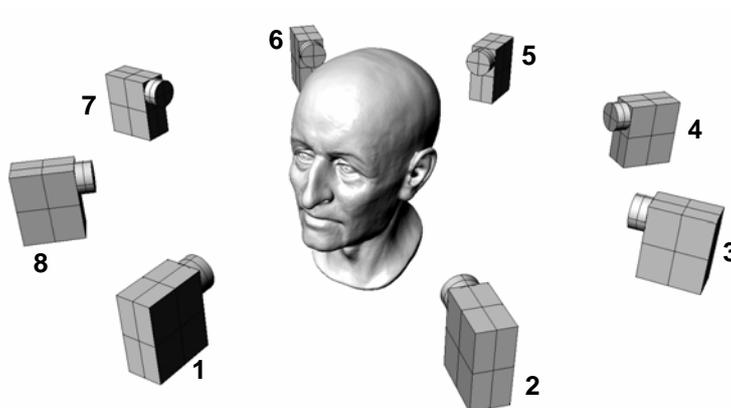
- **Pianificazione delle riprese**

Prima di iniziare la fase di acquisizione vera e propria, occorre procedere ad una pianificazione delle riprese necessarie. Infatti, per la realizzazione di modello digitale 3D completo è necessario effettuare più riprese da diversi punti di vista, come schematicamente illustrato in Figura 2.10.



*Figura 2.10 Per generare un modello digitale 3D completo è necessario utilizzare diverse riprese*

L'acquisizione deve quindi, garantire la totale copertura della superficie dell'oggetto con il minor numero di riprese. Ad esempio, per la realizzazione del modello digitale di un busto, è opportuno effettuare una prima serie di scansioni intorno all'oggetto con angoli di  $45^\circ$ , al fine di assicurare una sufficiente sovrapposizione tra riprese successive, per facilitare la fase di allineamento, (Figura 2.11), seguite da una serie di acquisizioni dall'alto, dal basso, e da riprese mirate per i particolari più complessi (naso, orecchie, ecc.).



*Figura 2.11 Esempio di pianificazione delle riprese*

- **Acquisizione dei dati**

Ogni singola ripresa produce come output una *range map*, ovvero una matrice 2D dei punti rilevati. Tale matrice può essere visualizzata e gestita come una nuvola di punti o come una superficie triangolata (Figura 2.12) nelle fasi successive di post-processing.

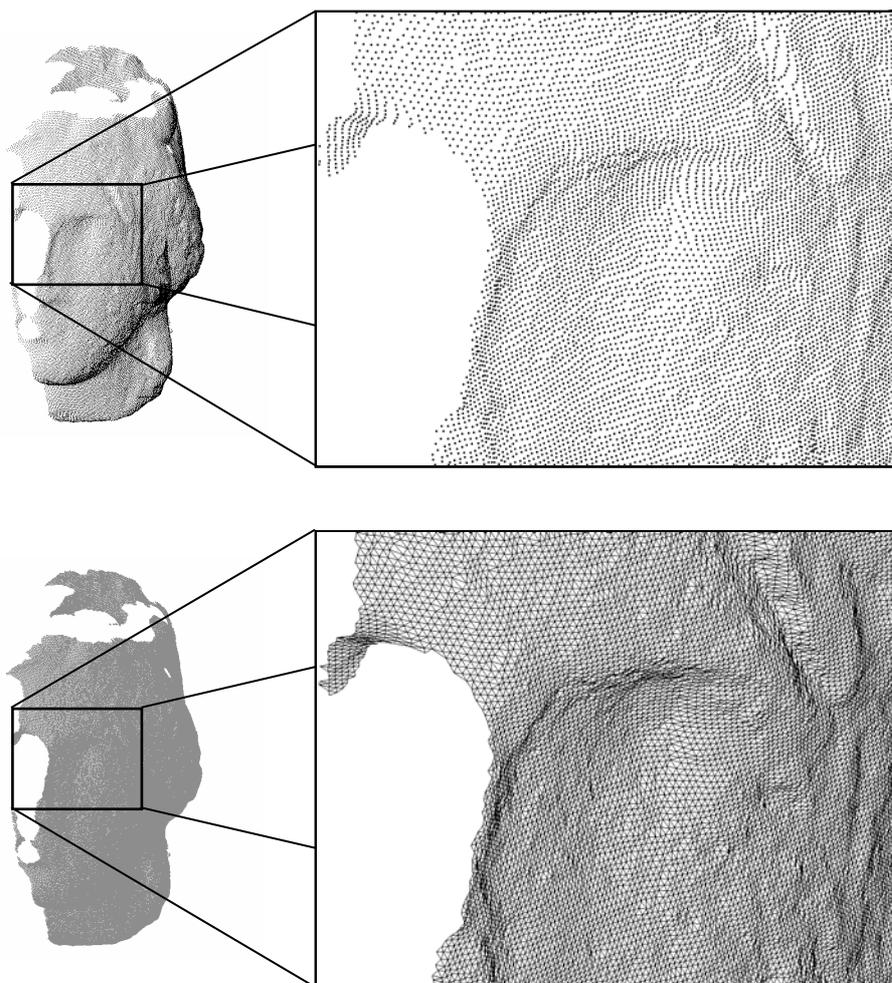


Figura 2.12 *Range map* rappresentata come nuvola di punti (sopra) e come superficie triangolata (sotto)

- **Allineamento delle range map**

Le singole *range map* ottenute dalla fase di acquisizione conservano un proprio sistema di riferimento e per ottenere un modello digitale completo è necessario allineare tutte le scansioni secondo uno stesso sistema.

L'allineamento avviene individuando almeno tre punti omologhi presenti all'interno di due scansioni adiacenti (elementi morfologici riconoscibili o target artificiali), come indicato in Figura 2.13. Questi punti, la cui posizione è nota nei rispettivi sistemi di riferimento, permettono, nella fase iniziale, un primo avvicinamento delle due scansioni, ossia una registrazione grezza. Una volta effettuato questo procedimento per tutte le scansioni acquisite è opportuno effettuare un affinamento dell'allineamento, in modo che le diverse *range map* preregistrate combacino perfettamente e che l'errore di allineamento precedentemente introdotto sia minimizzato. Questa operazione sfrutta l'algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*) [13].

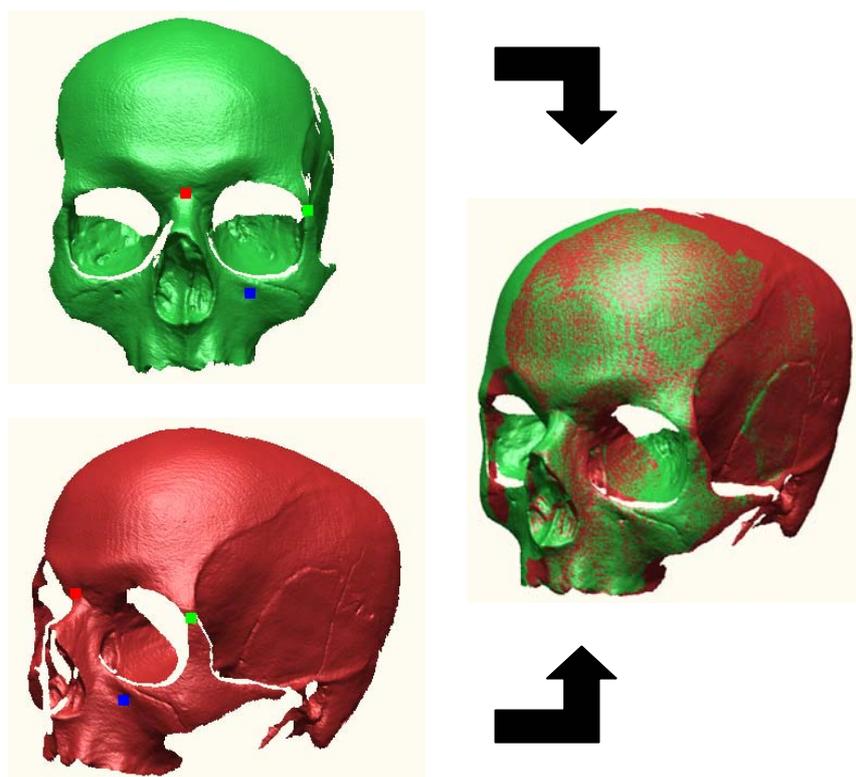
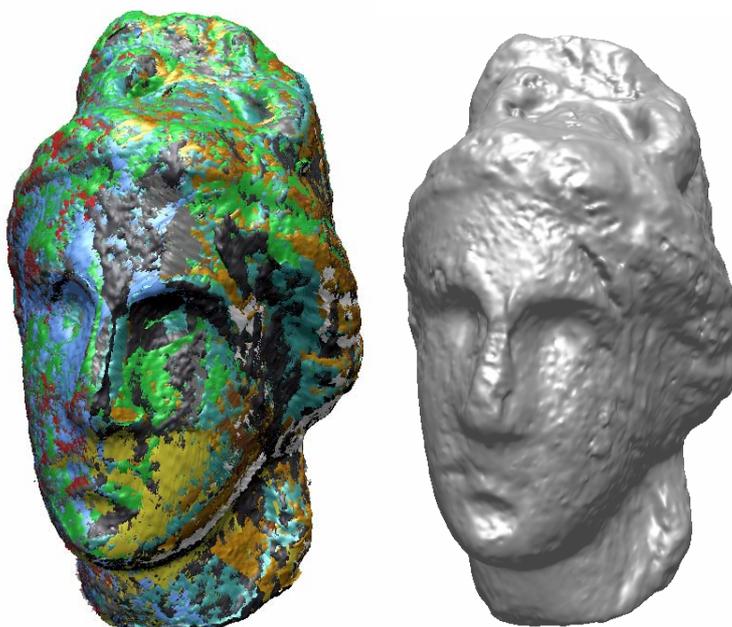


Figura 2.13 Allineamento di due scansioni adiacenti attraverso l'individuazione di tre punti omologhi

- **Fusione delle range map**

Il risultato finale della fase precedente restituisce un insieme di *range map* allineate in un sistema di riferimento comune. Attraverso il

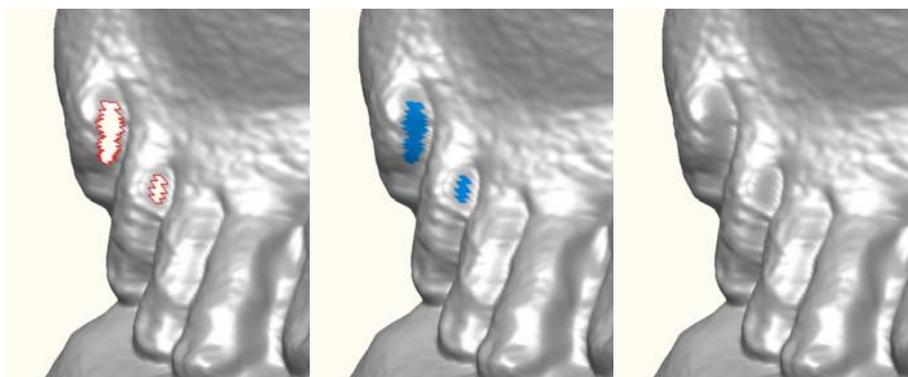
processo di fusione le *range map* vengono unite tra loro in un unico modello digitale rappresentato da una *mesh* triangolata e le parti ridondanti vengono eliminate (Figura 2.14).



*Figura 2.14 Fusione delle range map allineate e rappresentate con colori diversi (sinistra) in un unico modello digitale (destra)*

- **Editing del modello digitale**

Il modello digitale prodotto deve essere riparato da eventuali anomalie topologiche, facce degeneri, buchi o imperfezioni (Figura 2.15), che devono essere rimosse. Le applicazioni di Prototipazione Rapida, ad esempio, richiedono che il modello 3D sia completo e privo di lacune.



*Figura 2.15 Individuazione e chiusura dei buchi sul modello digitale*

- **Semplificazione del modello digitale**

Solitamente il modello digitale ottenuto risulta composto di un numero eccessivo di punti tale da renderlo non direttamente utilizzabile per applicazioni interattive. La semplificazione geometrica del modello può ridurre sensibilmente il numero dei punti della *mesh* mantenendo comunque un buon grado di accuratezza (Figura 2.16).

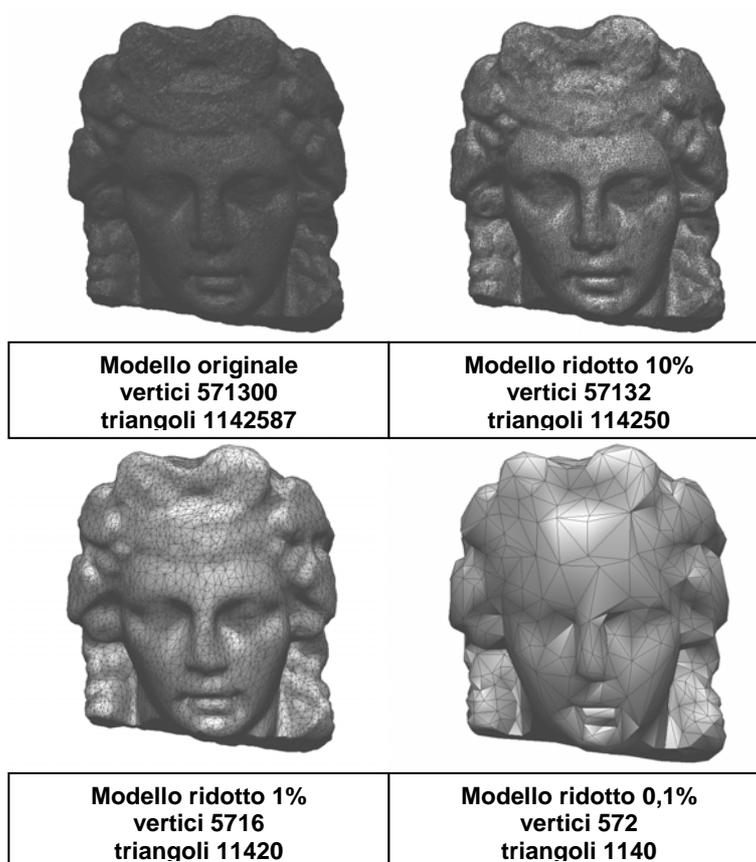
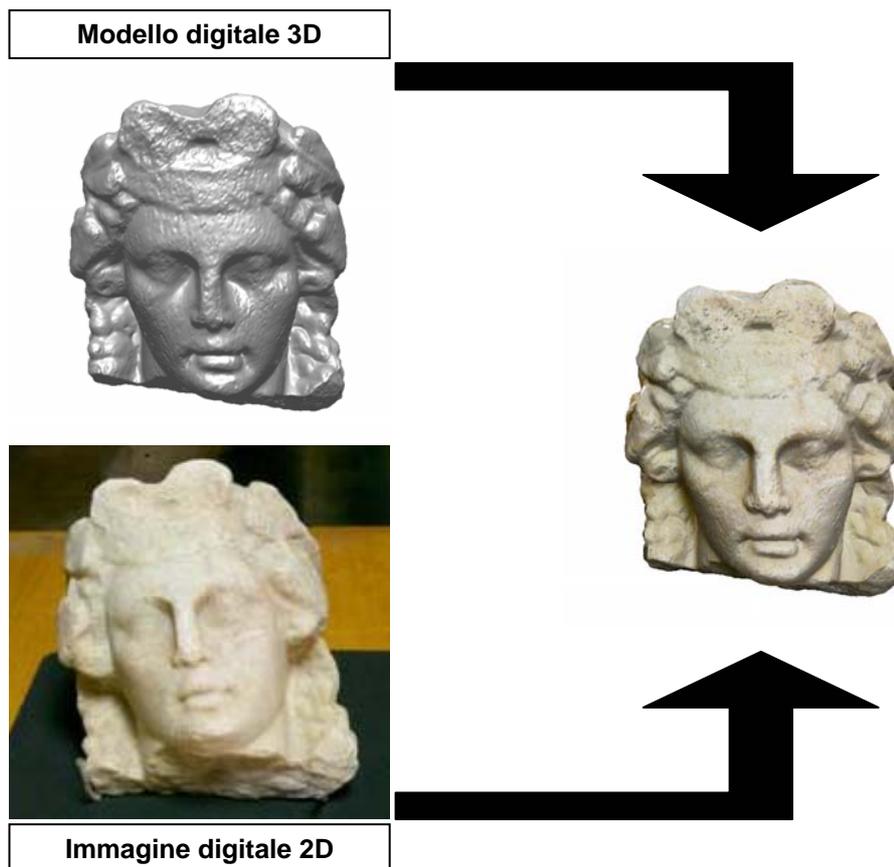


Figura 2.16 Esempi di semplificazione geometrica progressiva a partire dal modello originale

- **Applicazione della texture**

Qualora sia necessario, può essere opportuno aggiungere le informazioni sul colore al modello digitale in modo da rappresentarlo non solo da un punto di vista quantitativo, ma anche qualitativo. E' quindi possibile applicare una serie di texture, registrando le immagini 2D acquisite, al modello digitale ottenuto (Figura 2.17).



*Figura 2.17 Applicazione della texture al modello digitale 3D*

- **Archiviazione e conversione dei dati**

La fase finale del processo consiste nella conversione del modello digitale realizzato nel formato più opportuno per le eventuali successive operazioni e nell'archiviazione dei dati. Per applicazioni di Realtà Virtuale è opportuno convertire il modello in formato VRML, mentre per realizzare anche un modello fisico, tramite sistemi di Prototipazione Rapida, il formato di esportazione è l'STL.

### **2.3.2 La realizzazione dei modelli digitali dai dati CT**

Diversamente da quanto accade nel processo descritto precedentemente, la tomografia computerizzata (CT – *Computed Tomography*) infatti, permette di ottenere informazioni non solo sulla superficie, ma anche sull'intero volume scansionato. Si tratta quindi, di un **metodo trasmissivo** che utilizza raggi X ad alta energia e misura

l'energia trasmessa, appunto, attraverso l'oggetto lungo una serie di fette successive (*slice*). Questo sistema di indagine non invasiva, diffuso in campo medico, già da diversi anni è impiegato nelle analisi di reperti mummificati e consente, una rappresentazione volumetrica dell'oggetto sotto esame.

L'output di questo processo di acquisizione è dato da una sequenza di immagini radiografiche, generalmente con una risoluzione pari a 512 per 512 pixel, in cui sono rappresentate le diverse densità dei tessuti attraverso una rappresentazione in scala di grigio in cui i tessuti più duri hanno intensità maggiore e appaiono più chiari, mentre i tessuti più molli hanno intensità minore e quindi risultano più scuri (Figura 2.18). Questo permette quindi una differenziale selezione dei tessuti, essendo questi costituiti con materiali diversi e quindi rispondenti in modo differente alle radiazioni ionizzanti della CT che ne discrimina dunque in parte la consistenza.

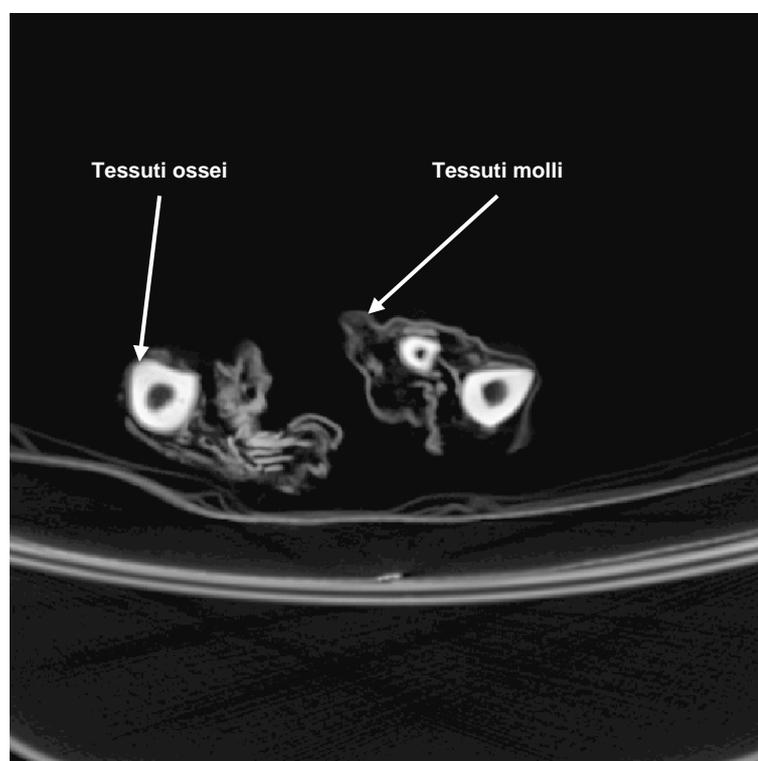
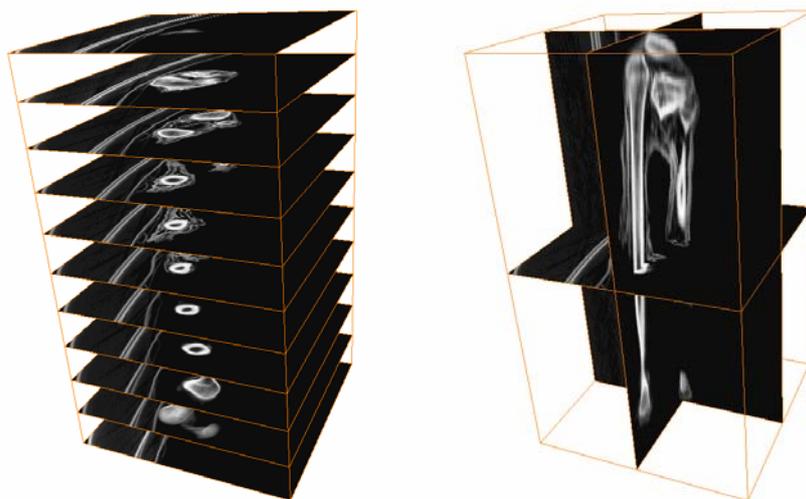


Figura 2.18 Esempio di immagine CT

Durante il processo di acquisizione è necessario impostare alcuni parametri come lo spessore delle *slice* l'intervallo tra le *slice* successive: questo determina il numero totale delle *slice* per completare l'acquisizione (Figura 2.19) e i dati ottenuti sono salvati in formato DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*).



*Figura 2.19 Serie di slice assiali all'interno del bounding box rappresentante il volume scansionato (sinistra) e rappresentazione delle slice assiale, coronale e sagittale passanti per il centro del bounding box (destra)*

La ricostruzione delle strutture anatomiche o ossee, a partire da immagini di questo tipo, è possibile grazie all'utilizzo di software dedicati, come **Amira**, che permettono all'operatore di selezionare i contorni delle regioni che appartengono alle zone di interesse da rilevare. Per esempio, facendo riferimento alle immagini CT è possibile individuare ed estrarre dalle varie immagini, costituenti la sequenza completa di acquisizione, i contorni delle strutture anatomiche di interesse attraverso una selezione basta sui toni di grigio. Infine, una volta isolati i contorni, è possibile realizzare il modello digitale 3D come *mesh* poligonale, triangolarizzando la superficie tramite un algoritmo di tipo *marching cubes* (Figura 2.20) [14].

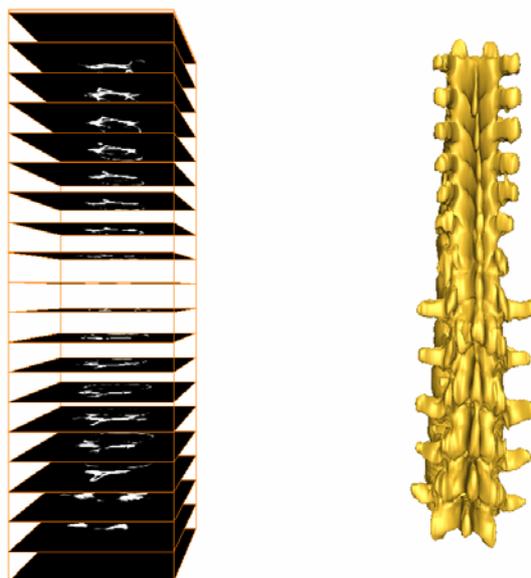


Figura 2.20 Confronto tra il dataset di immagini CT e il relativo modello digitale 3D ottenuto

Anche in questo caso, come nel processo precedente, il modello digitale prodotto deve essere sottoposto ad operazioni per l'eliminazione di eventuali anomalie topologiche, facce degeneri, buchi o imperfezioni e può essere sottoposto ad un processo di semplificazione geometrica volto alla riduzione del numero dei punti che compongono la *mesh* finale.

### 2.4 Modelli digitali e “*Virtual Heritage*”

Partendo dal presupposto di avere ottenuto una serie di modelli digitali 3D attraverso i processi di digitalizzazione descritti precedentemente, è possibile sfruttare tali dati per una serie di applicazioni di ricerca e di divulgazione dei *beni digitali*.

La Realtà Virtuale, integrata con l'impiego di modellatori CAD tridimensionali, rappresenta uno strumento fondamentale attraverso cui è possibile comunicare, analizzare e modificare i modelli digitali dei reperti acquisiti. I vantaggi offerti dalla visualizzazione stereoscopica e dall'interazione con i modelli in ambienti virtuali sono, infatti, stati ampiamente sottolineati nell'ultimo decennio [15].

In prima analisi, i modelli digitali possono essere direttamente importati in ambiente CAD per effettuare una serie di analisi morfometriche in maniera precisa e ripetibile, potendo memorizzare sulla superficie del modello tutti i landmark necessari alle misure. In questo modo è possibile utilizzare esattamente gli stessi landmark, nel caso in cui più misure partano dagli stessi punti, o nel caso sia necessario effettuare ulteriori analisi in momenti successivi. Grazie alla possibilità di sviluppare metodi computazionali per l'analisi (orientamento, confronto morfologico) dei modelli, le cui features possono essere codificate a partire dai landmark (punti) per arrivare a linee o superfici, è inoltre possibile non solo svolgere le classiche misurazioni di un reperto, ma estrapolare al contempo altre informazioni, come ad esempio aree e perimetri di sezioni rappresentative, impossibili da ottenere con l'approccio tradizionale sull'oggetto reale. L'accuratezza e la ripetibilità della misura permette così, di impostare campagne di monitoraggio, per beni a rischio, attraverso il confronto geometrico tra acquisizioni successive e permette di valutare eventuali spostamenti o cedimenti dell'opera.

Un altro importante utilizzo dei modelli virtuali è quello legato alla catalogazione dell'opera d'arte. La progressiva introduzione di modelli digitali 3D nella catalogazione dei Beni Culturali, in luogo delle più tradizionali immagini 2D o delle descrizioni testuali, permette la più completa descrizione del bene e consente di mettere virtualmente a disposizione degli studiosi, anche quei reperti che, per particolari esigenze di conservazione o nel caso di lunghi periodi di restauro, non siano direttamente analizzabili.

Quando il reperto è incompleto, diviso in più frammenti o costituito da parti conservate in luoghi diversi, è possibile realizzare una ricostruzione virtuale al fine di ricostruire la geometria originale in modo da offrire agli studiosi una visione dell'opera nella sua completezza. Opportuni strumenti software, infatti, consentono di simulare e mostrare i risultati di un restauro virtuale. Il riassetto virtuale di oggetti, di cui siano stati preventivamente acquisite le diverse parti, rappresenta

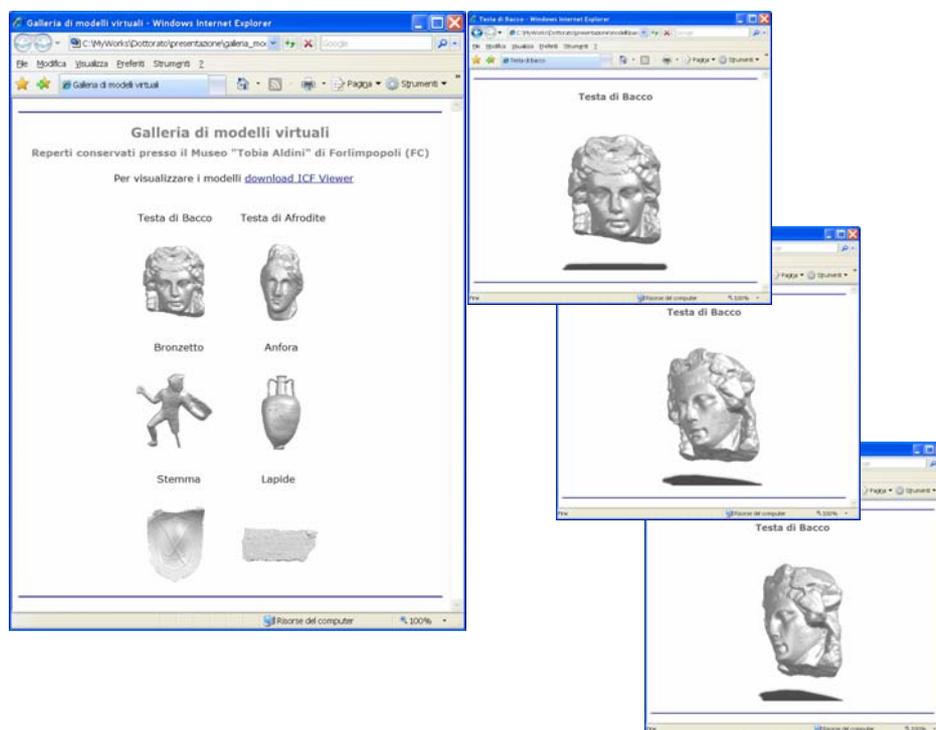
un'enorme potenzialità del restauro assistito al calcolatore. Il riassetto virtuale, infatti, risulta essere non invasivo e reversibile, diventando uno strumento utile con cui testare le diverse ipotesi di restauro. In questo modo potrà essere fornito al restauratore un modello 3D da utilizzare come guida per le diverse fasi in cui sarà successivamente articolato il restauro reale, avendo a disposizione non solo l'immagine integrale del modello definitivo, ma anche la successione logica e corretta delle diverse fasi dell'intervento.

Da un punto di vista divulgativo, inoltre, l'impiego di tecniche di Realtà Virtuale nel campo dei Beni Culturali ha dato origine al termine di *Virtual Heritage (Virtual Reality + Cultural Heritage)* [16], con l'intento di sottolineare la possibilità di *musealizzare il virtuale* [17].

L'idea di museo virtuale non è ovviamente limitata alla sola rappresentazione passiva di un modello digitale tridimensionale, ma sta aprendo la strada verso nuove modalità di interazione. Attraverso installazioni dedicate, è, infatti, possibile coinvolgere attivamente il pubblico facendolo interagire direttamente con il sistema informatizzato. Questa modalità permette di ottenere informazioni più specifiche, tramite un approccio virtuale in grado di facilitare la comprensione dei beni digitali, rispetto a quelle più limitate desumibili dai tradizionali pannelli esplicativi. Il modello virtuale può, infatti, essere visualizzato da diversi punti di vista o ruotato, consentendo anche di ingrandire parti specifiche e meritevoli di particolare attenzione. Inoltre, è possibile collocare virtualmente il reperto digitale nell'ambientazione originale, contestualizzandola attraverso la creazione di scenari adeguati, e fornendo così al pubblico la possibilità di comprendere pienamente l'ambito di pertinenza del reperto, senza la necessità, per il museo, di dover allestire un apposito spazio dedicato a ricostruzioni in scala reale. Tutto ciò non solo accresce la conoscenza del bene stesso, ma certamente rappresenta un importante veicolo promozionale e didattico.

Sistemi di interazione possono essere pensati anche per la fruizione dei beni digitali tramite internet, facilitando l'accessibilità al patrimonio culturale, attraverso la realizzazione di un'interfaccia per la

visualizzazione interattiva dei modelli digitali 3D, come quella realizzata, a titolo esemplificativo, per alcuni reperti conservati presso il Museo Archeologico “Tobia Aldini” di Forlimpopoli (FC).



*Figura 2.21 Esempio di interfaccia realizzata per la visualizzazione interattiva via internet dei modelli digitali 3D di alcuni reperti conservati presso il Museo Archeologico “Tobia Aldini” di Forlimpopoli (FC)*

Il Laboratorio di Realtà Virtuale è munito di tre diversi sistemi dedicati alla visualizzazione stereoscopica, che bene si prestano alle possibili applicazioni descritte sopra: i sistemi **I.R.R. (Immersive Reconfigurable Room)**, **P.S.T. (Passive Stereo Theatre)** e **TABO (Tabletop at uniBO)**.

Il sistema semi-immersivo **I.R.R. (Immersive Reconfigurable Room)** [18] è completamente riconfigurabile per poter supportare diverse applicazioni di Realtà Virtuale (Figura 2.22). Essenzialmente è costituito da tre moduli composti da schermi retroproiettati di dimensioni 2.5 x 1.9 m predisposti per la visualizzazione tridimensionale in stereoscopia attiva.

I due schermi laterali possono ruotare intorno all'unità centrale assumendo le due configurazioni limite di tipo CAVE (con angoli di 90°) e di tipo WALL (con angoli di 180°). Le grandi dimensioni degli schermi permettono un utilizzo di tipo collaborativo del sistema, permettendo agli utenti di muoversi e avvicinarsi alle immagini retroproiettate dei modelli senza il rischio di interferire con la proiezione stessa; inoltre è possibile visualizzare di modelli di grandi dimensioni in scala 1:1.



*Figura 2.22 Sistema I.R.R. (Immersive Reconfigurable Room)*

Il **P.S.T. (Passive Stereo Theatre)** è un sistema di visualizzazione tridimensionale basato sulla stereoscopia passiva ottenuta attraverso l'utilizzo di filtri e occhiali a polarizzazione lineare (Figura 2.23). Il sistema è costituito da uno schermo Silver Da-lite di dimensioni di 2x2,5 m, due videoproiettori DLP montati su supporto dedicato, una workstation con 4G di memoria RAM per la gestione di mesh e nuvole di punti di grandi dimensioni, e scheda grafica NVidia della serie FX Quadro 3400 e un set di occhiali polarizzati. Questo sistema permette la visualizzazione dei modelli digitali da parte di più utenti contemporaneamente, ma la proiezione frontale limita le possibilità di

interazione con l'ambiente virtuale dal momento che avvicinandosi allo schermo viene ostacolato il cammino ottico di proiezione.

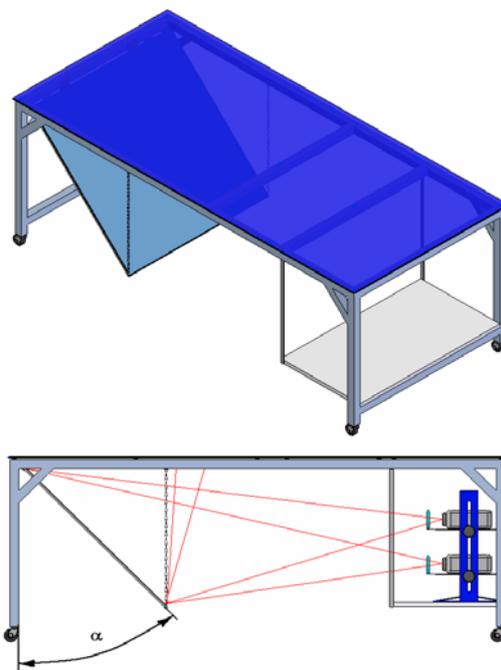


*Figura 2.23 Sistema P.S.T. (Passive Stereo Theatre)*

Infine, a differenza dei sistemi precedenti basati su schermi di proiezione verticali, il sistema **TABO (Tabletop at uniBO)** è un sistema tabletop che sfrutta un piano orizzontale per la visualizzazione tridimensionale con stereoscopia passiva a polarizzazione lineare. Il sistema, realizzato con una struttura tubolare di acciaio di dimensioni pari a 2,2x1x0.75(h) m, è costituito da una workstation con 4G di memoria RAM e scheda grafica NVidia della serie FX Quadro 3400, due videoproiettori DLP montati su supporto dedicato, uno specchio, di dimensioni 1x1 m, e infine una lastra di vetro sabbato che funge sia da schermo di proiezione che da parte superiore del tavolo (Figura 2.24 e Figura 2.25).

La soluzione adottata per lo schermo di proiezione, ossia la scelta della lastra di vetro sabbato, nasce dall'esigenza di trovare un compromesso tra stereoscopia passiva, retroproiezione, disposizione orizzontale e contenuti costi di realizzazione. Questa soluzione, infatti,

consente la retroproiezione delle immagini e, al contempo, la conservazione della polarizzazione.



*Figura 2.24 Struttura del tabletop*



*Figura 2.25 TABO (Tabletop at uniBO)*

E' opportuno infine, osservare come questa nuova forma dei Beni Culturali, ossia quella digitale, pone nuove problematiche da affrontare,

legate alla intrinseca deperibilità delle memorie digitali, conservate su supporti magnetici o ottici, e impone quindi lo studio di nuove metodologie in grado di garantire l'assoluta integrità dei dati raccolti e la loro conservazione nel tempo.

### **2.5 Realizzazione di modelli fisici**

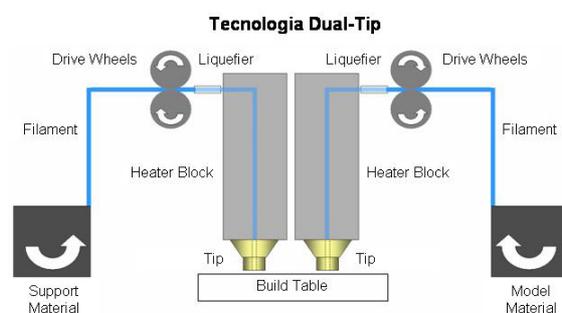
L'ultima fase del percorso metodologico, che segue quella di acquisizione descritta precedentemente, si riferisce alla realizzazione del modello fisico di un reperto attraverso l'impiego di tecnologie di Prototipazione Rapida.

Il ricorso a tecniche additive, proprie della Prototipazione Rapida, rispetto a quelle di tipo sottrattivo utilizzate dalle macchine CNC, è dovuto al fatto che generalmente, i reperti, sia archeologici che antropologici, sono caratterizzati da una notevole complessità morfologica e dalla presenza di sottosquadri, non facilmente raggiungibili dagli utensili per l'asportazione del materiale. La possibilità offerta dalle tecniche di Prototipazione Rapida di realizzare modelli fisici di geometria comunque complessa, presenta indubbi vantaggi nelle applicazioni ai Beni Culturali.

Il laboratorio di Realtà Virtuale è dotato di una stampante 3D Dimension SST, ossia un sistema di Prototipazione Rapida basato sulla tecnica FDM (Fused Deposition Modelling). È l'unico sistema che impiega fili e barrette di materiale avvolto in bobine per costruire il prototipo. In questo processo tecnologico le diverse sezioni sono realizzate tramite estrusione e deposizione di filamenti di materiale termoplastico allo stato fuso. Questa tecnologia prevede la generazione di supporti, che vengono pianificati automaticamente dal software di gestione, e depositati in materiale differente da quello di apporto. La testa di estrusione fonde il materiale di costruzione e di supporto e lo deposita in sottili strati tramite un sistema a due ugelli che si muove nel piano per generare la sezione in lavorazione, ad una temperatura tale che il filamento possa aderire perfettamente a quello costituente lo strato inferiore (Figura 2.26). Dopo aver realizzato i perimetri interno ed esterno

di ogni sezione, viene riempito lo spazio compreso tra questi con il materiale di costruzione e viene successivamente depositato il materiale di supporto necessario. Le diverse sezioni sono realizzate su una base che si muove verticalmente e consente, quindi, la costruzione progressiva del prototipo.

Il prodotto non necessita di post-trattamento, escluso il distacco dei supporti del pezzo e la finitura manuale per migliorare eventualmente l'aspetto superficiale. Il processo ha il vantaggio di essere pulito dal punto di vista ambientale, e la stazione di lavoro può essere installata a fianco di un sistema CAD.



*Figura 2.26 Schema di funzionamento*

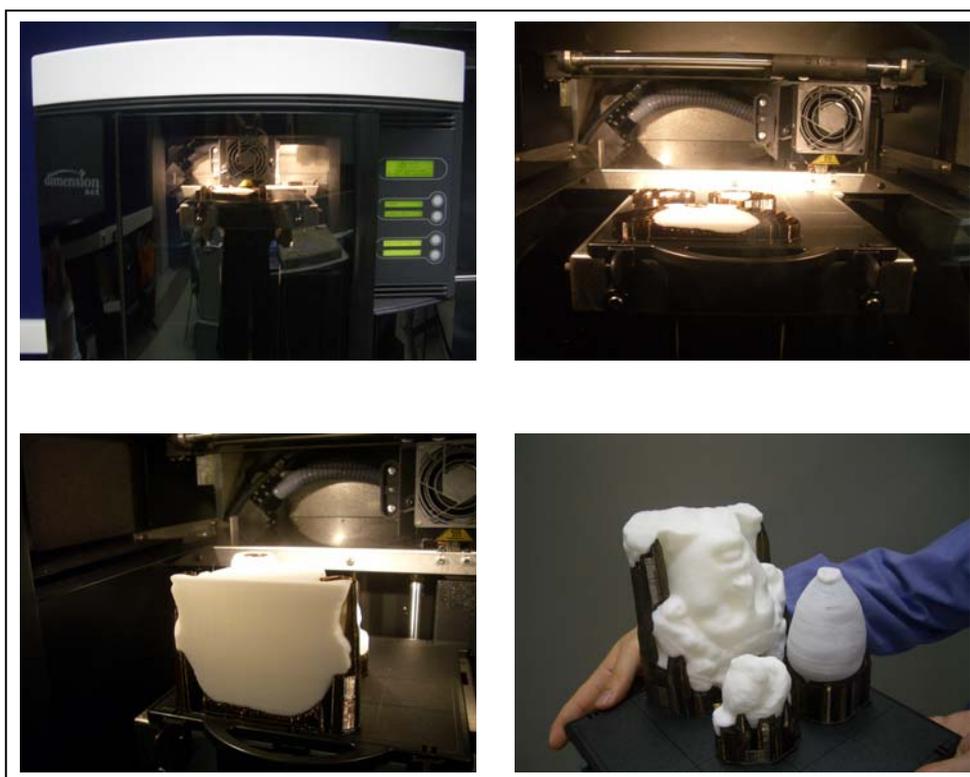
La stampante Dimension SST (Soluble Support Technology), in Figura 2.27, consente di realizzare modelli in ABS ed è dotata di un sistema automatizzato di eliminazione del supporto. E' sufficiente togliere il modello dal sistema e collocarlo nella stazione di lavaggio. Si tratta di un sistema di mescolamento che impiega un bagno di acqua calda e sapone per eliminare automaticamente tutte le strutture di supporto.



*Figura 2.27 Dimension SST*

Lo spessore degli strati di materiale è di 0.254 mm, la temperatura di fusione dell'ABS è di circa 265°C, e solidifica nella camera di lavoro a circa 65°C. Il volume di lavoro massimo è 203 x 203 x 305 mm. I prototipi realizzati con questa macchina hanno una resistenza a trazione di circa 22 MPa. La Dimension SST è munita del software di preprocessing **Catalyst** che crea automaticamente le strutture di supporto necessarie per realizzare il modello e calcola il percorso della testa.

In Figura 2.28 sono raffigurate alcune fasi durante il processo di realizzazione di modelli fisici, mentre in Figura 2.29 è rappresentato il risultato finale relativo ad una testa in marmo di Bacco (II sec. d.C.) conservata presso il Museo Archeologico "Tobia Aldini" di Forlimpopoli (FC).



*Figura 2.28 Fasi di realizzazione dei modelli fisici conservati presso il Museo Archeologico "Tobia Aldini" di Forlimpopoli (FC): testa in marmo di Bacco (II sec. d.C.), testina in marmo di Afrodite (II sec. d.C.) e anfora realizzata in scala 1:2*



*Figura 2.29 Modello fisico di una testa in marmo di Bacco (II sec. d.C.) conservata presso il Museo Archeologico “Tobia Aldini” di Forlimpopoli (FC)*

Nel caso di un reperto estremamente fragile e delicato, ad esempio, con questa metodologia è possibile ottenerne una copia, perfetta, da un punto di vista geometrico, nel completo rispetto dell'integrità dell'originale, contrariamente a quanto avviene con le più invasive procedure tradizionali che utilizzano calchi in gesso o silicone eseguiti direttamente sull'opera per la realizzazione del negativo.

In generale, con la Prototipazione Rapida è quindi possibile ottenere una copia, di un reperto da utilizzare per fini didattici o di ricerca, senza la possibilità di danneggiare l'originale, conservato in un luogo sicuro e protetto. Sono, infatti, noti i limiti dovuti alle restrizioni dei vari musei, enti culturali o dipartimenti, che si dimostrano spesso ostili alla pubblica fruizione dei beni custoditi.

Tra gli impieghi legati all'utilizzo dei modelli fisici di opere d'arte si possono citare quelli volti alla sostituzione di originali per motivi di sicurezza, o quando occorre proteggere un'opera esposta al degrado a causa di agenti atmosferici o inquinanti. In questi casi l'originale viene musealizzato e viene sostituito dalla sua copia.

Copie di opere d'arte, in scala 1:1 o ridotta, possono essere impiegate per fini promozionali o commerciali, o essere destinate all'esposizione, temporanea o permanente, in mostre e musei.

Il modello fisico può essere inoltre, un valido supporto per la valorizzazione e la divulgazione di opere d'arte nei confronti delle persone non vedenti cui viene data la possibilità di toccare la copia senza nessuna preoccupazione legata all'eventuale degrado.

Nel caso di reperti di elevato valore, la copia può essere utilizzata per la progettazione dell'imballaggio più idoneo per il trasporto dell'opera nelle condizioni di massima sicurezza. Inoltre l'imballaggio stesso può essere ricavato, attraverso le tecniche di Prototipazione Rapida, come negativo dell'opera, realizzando uno scudo di protezione perfettamente combaciante con le superfici dell'oggetto.

Nel caso di resti mummificati è inoltre possibile prototipare la sola struttura scheletrica estrapolata dall'elaborazione dei dati provenienti dalla Tomografia Computerizzata. In questo caso quindi è possibile rendere visibile e tangibile ciò che nella realtà non lo può essere. Nel caso di reperti scheletrici, la copia del cranio può fornire la struttura di base per la ricostruzione facciale attraverso le tradizionali tecniche di antropologia forense.

Infine queste tecniche possono fornire anche un valido supporto negli interventi di restauro grazie alla possibilità di realizzare le parti mancanti o gravemente danneggiate di un'opera [19]. Inoltre, sempre nel campo del restauro, le copie fisiche di un reperto possono essere utilizzate per testare e validare un intervento di riparazione prima di intervenire direttamente sull'opera stessa. Le operazioni di restauro, infatti, non possono essere standardizzati, ma devono essere progettate e pianificate, di volta in volta, in funzione dell'intervento da eseguire. Parafrasando una sentenza spesso ripetuta in ambito medico, *non esiste la Malattia, ma esistono i malati*, in questo caso, si potrebbe quasi dire paradossalmente che *non esiste il Restauro, ma esistono oggetti unici da restaurare*.

### 2.6 Applicazioni ai Beni Culturali

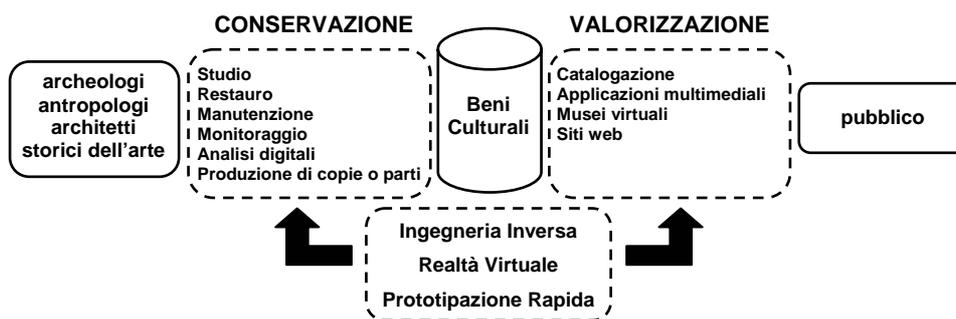
Nei paragrafi precedenti sono state descritte diverse applicazioni legate all'impiego di strumenti e metodi dell'ingegneria industriale nel campo della conservazione e valorizzazione dei Beni Culturali, grazie ai benefici indotti dal trasferimento tecnologico di risorse quali Ingegneria Inversa, Realtà Virtuale e Prototipazione Rapida.

Conservazione e valorizzazione sono due termini indipendenti ma che concorrono parallelamente per indicare che un *bene culturale* deve essere in primo luogo conservato, ma al tempo stesso deve essere valorizzato per evitare che perda il suo reale significato.

Tenendo a mente questa considerazione, si può comunque pensare ad una prima suddivisione delle applicazioni delle tecnologie descritte in questo campo [20], tra quelle volte alla conservazione del bene e quelle volte alla sua valorizzazione (Figura 2.30).

Nel campo della conservazione, infatti, la possibilità di fornire modelli virtuali o riproduzioni fisiche di un determinato reperto agli studiosi, siano essi archeologi, antropologi, architetti o storici dell'arte, può aprire la strada a nuove modalità di indagine volte alla salvaguardia del bene stesso. L'impiego di modelli, facilmente riproducibili e continuamente accessibili, che rappresentano fedelmente le condizioni in cui i reperti si presentano, possono essere il punto di partenza per pianificare eventuali interventi di restauro o per eseguire sempre più approfondite ricerche, lasciando intatto l'oggetto originale.

Dall'altro lato, grazie alla presenza di modelli fedeli, risulta più facile valorizzare ai fini della fruizione pubblica, i reperti stessi. Attraverso l'approccio virtuale è possibile, infatti, sviluppare le potenzialità del reperto reale, senza comunque sminuirne il ruolo, attraverso opportuni sistemi multimediali o la divulgazione tramite internet. In questo modo è possibile coinvolgere direttamente il pubblico nell'interazione con elaborazioni virtuali che possono fornire una serie di informazioni ulteriori rispetto a quelle legate alla sola visione del reperto reale.



*Figura 2.30 Applicazioni ai Beni Culturali*

I casi di studio proposti nei prossimi capitoli sono finalizzati alla descrizione di esempi concreti di trasferimento tecnologico delle tecniche di Ingegneria Inversa, Realtà Virtuale e Prototipazione Rapida descritte nel campo della conservazione e valorizzazione dei Beni Culturali, evidenziando quindi, la flessibilità e la trasversalità di queste tecnologie applicate. Sono inoltre focalizzati, di volta in volta, aspetti principali legati ad ognuno dei casi esaminati, fornendo, nell'insieme, un quadro sufficientemente rappresentativo delle problematiche e delle soluzioni individuate relative all'intero processo metodologico.

In particolare sono proposti una serie di casi interessanti in campo paleoantropologico e archeoantropologico, relativi allo studio di resti di uno scheletro del Paleolitico Superiore, indicato come Romito 7, di un campione di denti, proveniente da alcune necropoli medievali e di una mummia peruviana smembrata in sei frammenti principali. Infine è proposto un approccio combinato di impiego di metodologie tradizionali e manuali con metodologie innovative e digitali, nell'ambito della ricostruzione facciale applicate al caso di studio del poeta medioevale Dante Alighieri.

Alla luce della natura interdisciplinare dei progetti, per quanto evidenziato nei paragrafi precedenti, tutti i lavori sono stati condotti in stretta collaborazione con il Laboratorio di Antropologia del Dipartimento di Storie e Metodi per la Conservazione dei Beni Culturali dell'Università di Bologna (sede di Ravenna), diretto dal Prof. Giorgio Gruppioni e con la collaborazione del Dott. Stefano Benazzi. Infine, nei casi di studio sul

Romito 7 e sulla ricostruzione del volto di Dante, la collaborazione si è estesa al Dipartimento di Biologia dell'Università degli Studi di Pisa con il Prof. Francesco Mallegni.



## Capitolo 3 - Scansione 3D e prototipazione di resti scheletrici umani

### 3.1 Il caso di studio del Romito 7

In questo primo caso di studio viene descritto il processo metodologico seguito per la scansione 3D e la prototipazione dei resti di uno scheletro del Paleolitico Superiore ritrovato presso la grotta del Romito a Papisidero, vicino a Cosenza, nel corso di uno scavo nel 2001, e denominato Romito 7 (Figura 3.1) [21], [22], [23].



*Figura 3.1 La tomba del Romito 7*

E' noto che in ambito archeologico e antropologico i resti scheletrici umani rivestono un ruolo fondamentale, anche in considerazione della scarsità dei reperti disponibili, in quanto possono fornire, alla paleoantropologia, le informazioni necessarie per ricostruire la storia evolutiva e le abitudini di vita dell'uomo. La difficoltà con cui avviene il processo di fossilizzazione rende questi resti ancora più importanti, e conseguentemente diventa necessario adottare specifici provvedimenti per la loro conservazione e valorizzazione.

Per questo motivo, solitamente, vengono realizzati i calchi dei campioni più rappresentativi al fine di salvaguardare il reperto originale e allo stesso tempo rendere disponibile la copia fisica ad altri utenti, sia a scopo di ricerca che di musealizzazione.

Nell'approccio tradizionale il processo per la realizzazione di copie fisiche di reperti ossei può essere distinto in due fasi successive. La prima prevede la realizzazione del calco in gesso ricavato direttamente sul reperto oggetto di studio. Nella seconda fase, il calco in gesso che, una volta indurito, costituisce il negativo della forma, viene utilizzato per la realizzazione vera e propria delle repliche. Gli svantaggi di questo processo possono essere individuati, in primo luogo, nelle modalità invasive con cui vengono realizzati i calchi, a diretto contatto con gli esemplari ossei da preservare, in secondo luogo, nella necessità di impiegare personale specializzato per la realizzazione di ogni ulteriore modello fisico che si rendesse necessario.

Il processo metodologico, qui descritto, permette di superare questi limiti attraverso l'impiego delle tecnologie non invasive descritte nei capitoli precedenti e di ottenere un qualsivoglia numero di modelli, sia digitali che fisici, ad alta precisione del reperto scheletrico studiato.

### 3.2 Fase di scansione 3D

Dovendo realizzare i modelli fisici delle singole ossa ed essendo, quindi, necessarie le sole informazioni sulla superficie esterna, la prima fase del lavoro ha visto l'impiego del laser scanner 3D Konica Minolta 9i per l'acquisizione dei reperti. La fase di scansione delle ossa relative agli arti superiori e al bacino, è stata effettuata montando un obiettivo *tele* ( $f=25$  mm), mentre, per il resto delle ossa, è stata scelta un'ottica *middle* ( $f=14$  mm). La superficie opaca e di colore tendenzialmente uniforme delle ossa non ha evidenziato problemi o disturbi durante la scansione. Le diverse *range map*, acquisite per ogni distretto scheletrico, sono state quindi, registrate e fuse insieme, secondo il processo descritto nel capitolo precedente, per la realizzazione dei relativi modelli digitali (Figura 3.2).

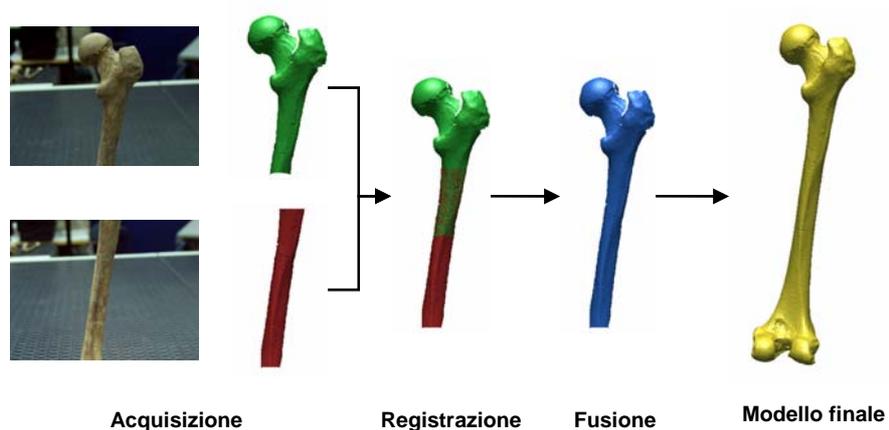


Figura 3.2 Fasi relative alla realizzazione dei modelli digitali

Per la fase di post-processing è stato utilizzato il software **Rapidform**. Nella tabella 3.1 è riportato l'elenco del numero di range map acquisite per ogni reperto osseo, insieme al numero di punti e di triangoli relativi ai relativi modelli digitali finali.

	N. di range map	N. di punti	N. di triangoli
<b>Cranio</b>	17	653.461	1.299.060
<b>Omero dx</b>	22	464.684	929.364
<b>Radio dx</b>	21	155.678	311.344
<b>Ulna dx</b>	23	200.696	401.388
<b>Omero sx</b>	25	334.865	669.726
<b>Radio sx</b>	25	155.338	310.672
<b>Ulna sx</b>	23	193.346	386.688
<b>Coxale dx</b>	21	656.715	1.313.430
<b>Coxale sx</b>	25	511.180	1.023.560
<b>Sacro</b>	11	302.216	600.193
<b>Femore dx</b>	19	391.762	783.520
<b>Tibia dx</b>	16	405.128	810.252
<b>Fibula dx</b>	19	135.098	270.192
<b>Femore sx</b>	18	484.518	969.032
<b>Tibia sx</b>	15	412.233	824.462
<b>Fibula sx</b>	16	130.517	261.030

Tabella 3.1 Elenco del numero di range map acquisite per ogni reperto osseo, insieme al numero di punti e di triangoli relativi ai relativi modelli digitali finali

### 3.3 Rilievo antropometrico virtuale

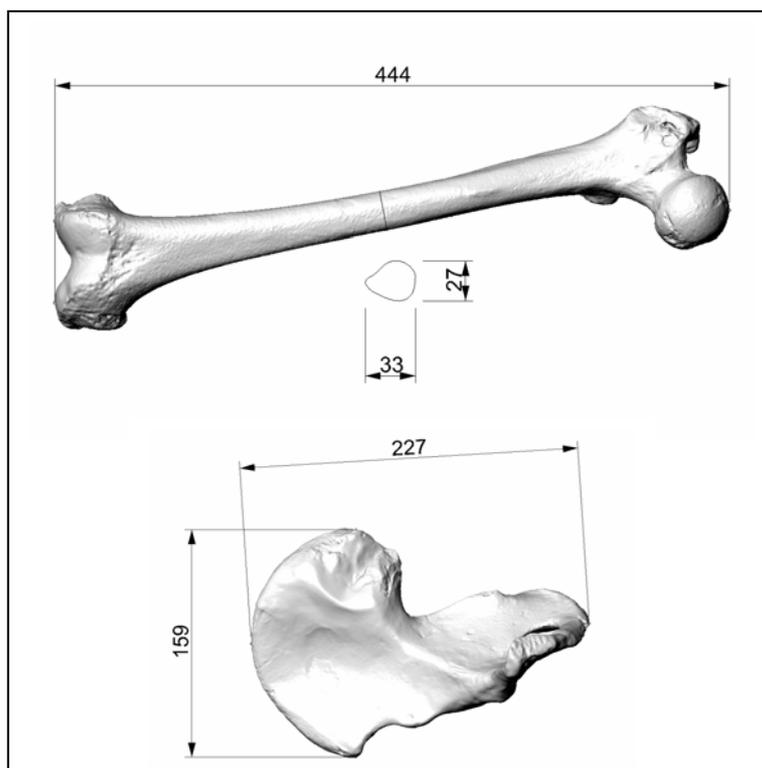
I modelli digitali realizzati risultano essere rappresentazioni fedeli e misurabili delle singole ossa che costituiscono lo scheletro del Romito 7. La disponibilità di queste rappresentazioni tridimensionali ha reso quindi, possibile ogni sorta di manipolazione dei modelli senza arrecare danni ai reperti reali.

La prima fase del lavoro è stata quella di effettuare un'indagine osteometrica sui modelli digitali delle singole ossa, che si prestano, in primo luogo, a rilevazioni analoghe a quelle che tradizionalmente si effettuano su reperti ossei.

Dopo aver importato tali modelli nell'ambiente CAD **Rhino**, è stato possibile individuare i landmark utili per le successive operazioni di misurazione. Si tratta di una serie di punti localizzati sulla superficie dei modelli 3D delle ossa nelle medesime posizioni dei punti di repere impiegati nei metodi e con i criteri di misurazione in uso sui reperti reali (Martin Saller, 1956-1959). Questa operazione di rilievo antropometrico, effettuata in ambiente CAD, garantisce di ottenere misure che possono essere rigorosamente comparate con quelle raccolte sui reperti reali mediante i metodi classici. Nella Figura 3.3 sono mostrate, come esempio, le misure sui modelli digitali del femore destro e del coxale destro nell'ambiente CAD.

Dopo aver definito tutti i punti determinanti per le misurazioni, questi sono stati memorizzati sulla superficie del modello 3D. Ciò permette di utilizzare sempre i medesimi landmark, nel caso di ulteriori misurazioni sui modelli, garantendo quindi, l'esatta ripetibilità di tutte le operazioni eseguite.

Le misurazioni sui modelli virtuali sono dunque più rigorose di quelle effettuate secondo l'approccio tradizionale, in quanto risultano meno inficiate da errori accidentali che inevitabilmente si presentano nelle fasi di rilievo manuale sui reperti fisici, soprattutto nel caso in cui queste operazioni di misura vengano ripetute più volte, magari da rilevatori inesperti o da soggetti differenti.



*Figura 3.3 Misure antropometriche sui modelli digitali del femore destro e del coxale destro in ambiente CAD riportate in mm*

### 3.4 Analisi delle sezioni ossee

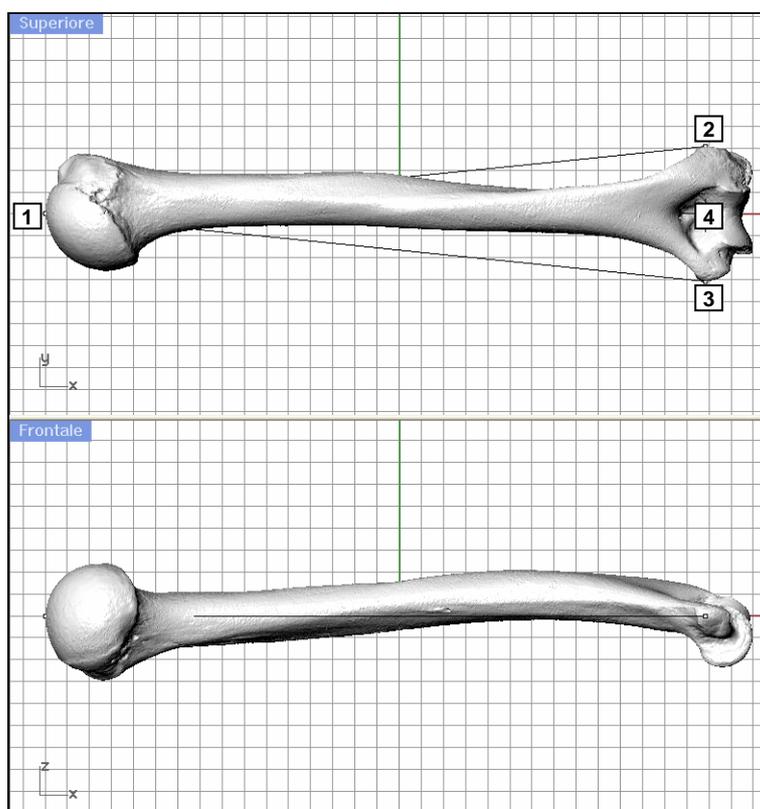
Oltre alla semplice analisi osteometrica descritta, è stato eseguito uno studio più dettagliato sui modelli digitali 3D degli omeri, analizzando aree e perimetri di una serie di sezioni, allo scopo di sottolineare le potenzialità dell'analisi in ambiente CAD e le ultime prospettive di sviluppo nelle ricerche di morfologia e morfometria scheletrica.

Conformemente a ciò che avviene nella realtà, in cui durante le indagini antropometriche i resti ossei vengono posizionati su piani di riferimento precisi, convenzionalmente stabiliti dalle tecniche di antropometria classica, i modelli scheletrici digitali delle ossa sono stati orientati secondo la procedura descritta di seguito, all'interno dell'ambiente CAD **Rhino**.

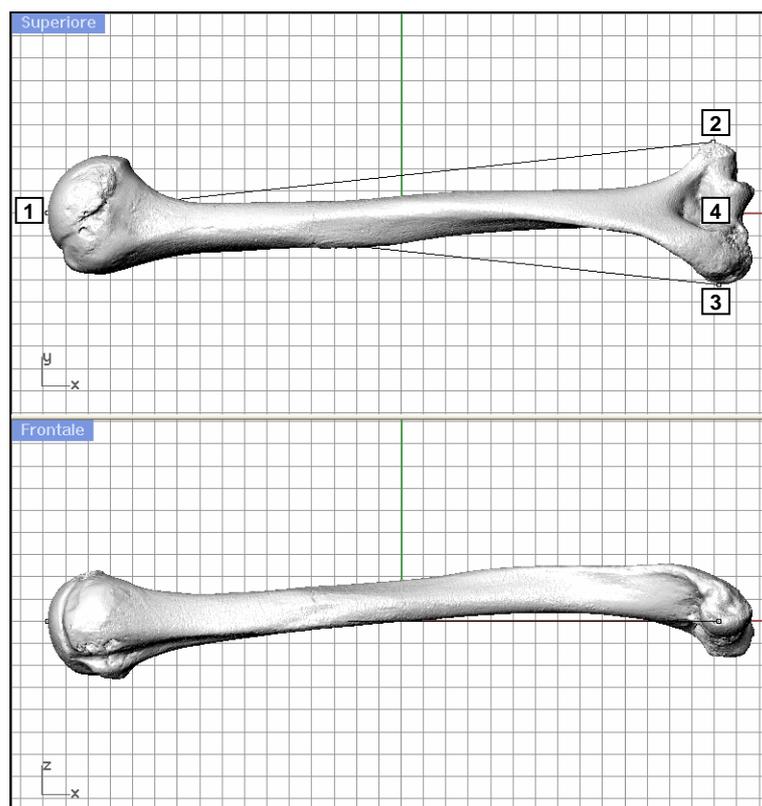
Dal momento che in letteratura non esistono sistemi convenzionali di orientamento dei modelli digitali delle singole ossa, in questo caso, come primo passo, sono stati selezionati tre landmark: il punto estremo

dell'epifisi prossimale (punto 1) e i punti più esterni rispettivamente dei due epicondili nell'epifisi distale (punti 2 e 3). Questi tre punti hanno permesso l'individuazione del piano di riferimento XY. Per completare l'orientamento, è stato identificato un quarto landmark nel punto medio del segmento compreso tra i punti 2 e 3, precedentemente individuati, e corrispondente, indicativamente, al punto medio della troclea (punto 4). Il segmento che congiunge il punto estremo dell'epifisi prossimale (punto 1) con il punto medio della troclea (punto 4), approssima l'asse longitudinale dell'osso ed è stato scelto come asse di riferimento X.

Queste operazioni sono state eseguite per entrambi i modelli digitali degli omeri, orientando ogni modello in maniera simmetrica rispetto al relativo controlaterale come indicato in Figura 3.4 e Figura 3.5, al fine di poter eseguire successive analisi comparative sulle sezioni ricavate in direzione dell'asse X, assunto come asse longitudinale dell'omero.



*Figura 3.4 Orientamento dell'omero destro*



*Figura 3.5 Orientamento dell'omero sinistro*

Disponendo così della coppia di omeri orientati con la medesima procedura è stato possibile effettuare una serie di 31 sezioni, con un interasse pari a 7 mm, delle diafisi, a partire da quella passante per il punto mediano dell'asse longitudinale (Figura 3.6). Per tutte le sezioni sono state calcolate l'area e il perimetro, le cui misure sono riportate in Tabella 3.2, insieme ai valori medi, e rappresentate nei grafici di Figura 3.7.

Questa analisi evidenzia come le aree e i perimetri dei due omeri presentino valori marcatamente differenti per ogni coppia di sezioni corrispondenti e in particolare si può notare un indice di una maggiore robustezza dell'arto superiore destro rispetto al sinistro più gracile.

A questo punto, si può sottolineare come le misure estrapolate dall'analisi dei modelli digitali non si sarebbero potute ottenere nella realtà, senza ricorrere a complessi calcoli o a danneggiamenti dell'integrità dei reperti scheletrici, soprattutto per quanto riguarda i dati inerenti alle aree delle sezioni individuate.

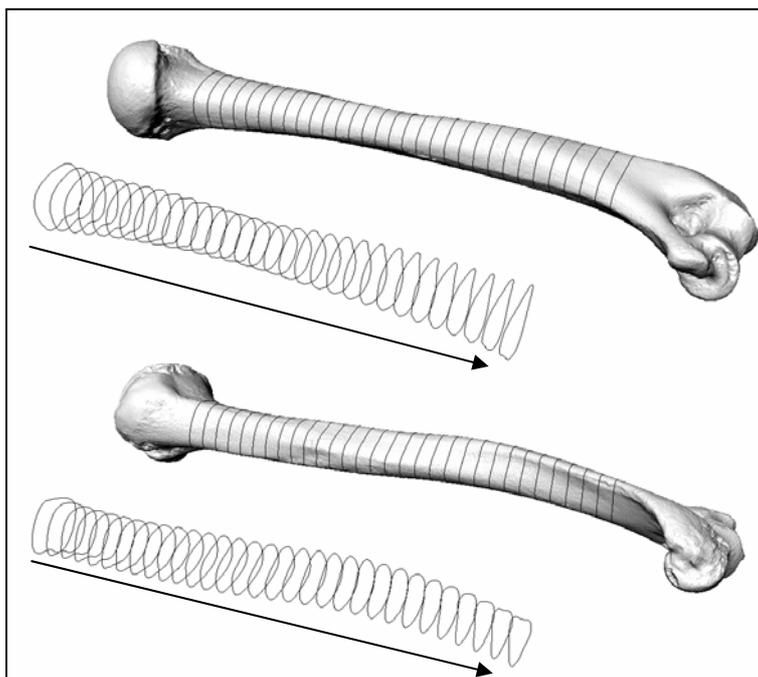


Figura 3.6 Estrapolazioni delle sezioni ossee sui modelli digitali dell'omero destro (sopra) e sinistro (sotto)

sezione	omero sx		omero dx	
	Area mm <sup>2</sup>	Perimetro mm	Area mm <sup>2</sup>	Perimetro mm
1	552	86	636	92
2	457	78	554	86
3	401	74	513	82
4	376	71	484	80
5	364	70	464	78
6	353	68	452	77
7	346	67	442	76
8	343	67	433	75
9	341	67	427	75
10	333	66	419	74
11	329	66	409	74
12	324	66	404	73
13	319	65	400	73
14	312	65	392	72
15	305	64	386	71
16	298	63	380	71
17	292	63	375	70
18	288	62	375	70
19	287	62	374	70
20	286	62	372	70
21	285	62	369	69
22	285	62	367	69
23	286	62	364	69
24	287	62	364	69
25	287	62	360	69
26	286	63	359	69
27	288	63	357	70
28	289	64	357	70
29	294	66	361	72
30	308	68	370	74
31	334	72	393	77
<b>media</b>	<b>327</b>	<b>66</b>	<b>410</b>	<b>74</b>

Tabella 3.2 Aree e perimetri relativi alle sezioni degli omeri

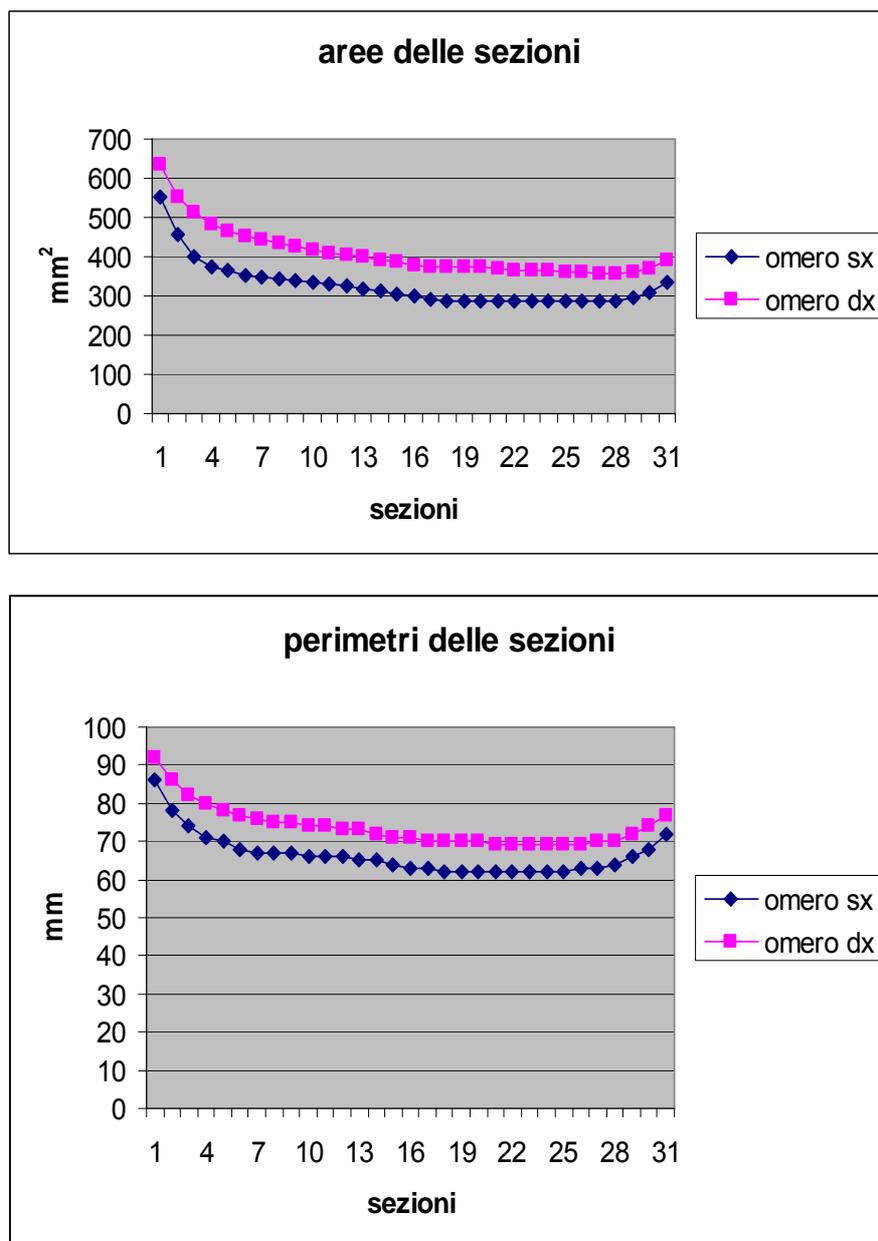


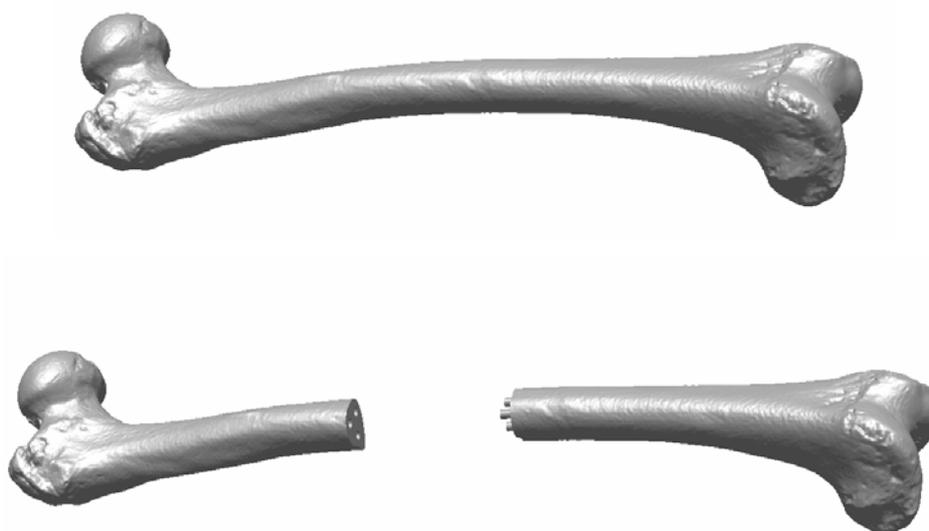
Figura 3.7 Grafici delle aree e perimetri relativi alle sezioni degli omeri

### 3.5 Prototipazione dei modelli fisici

Nella fase finale del lavoro, tramite l'impiego di un sistema di Prototipazione Rapida, che consente di ottenere modelli di forma libera complessa come quelli delle ossa attraverso un processo di addizione di materiale *layer by layer*, sono stati realizzati i modelli fisici in materiale termoplastico.

Nello specifico sono stati riprodotti il femore destro e l'osso coxale destro e la macchina utilizzata per tale operazione è la Dimension SST (Solubile Support Technology), che realizza prototipi attraverso il sistema Fused Deposition Modelling (FDM).

Considerando il volume di lavoro del sistema di Prototipazione Rapida, pari a 203 x 203 x 303 cm, è stato necessario suddividere il modello del femore in due parti all'interno dell'ambiente CAD **Rhino**. Oltre alla suddivisione, sono state realizzate tre spine di riferimento al fine di poter procedere al corretto assemblaggio delle due parti prototipate (Figura 3.8).



*Figura 3.8 Divisione del modello del femore destro in due parti con la realizzazione di spine di riferimento per il corretto assemblaggio delle due parti da realizzare tramite Prototipazione Rapida*

I prototipi sono stati realizzati in materiale termoplastico (ABS) di colore bianco (Figura 3.9) con dei tempi di lavorazione di 10h 47 min e 10h 49 min per le due parti del femore, e 21h per il coxale.



*Figura 3.9 Modelli fisici in ABS del femore destro (sopra) e del coxale destro (sotto)*

I modelli realizzati sono caratterizzati da proprietà quali leggerezza e resistenza che ne permettono una facile e sicura fruibilità a costi relativamente contenuti.

Inoltre, al fine di validare l'accuratezza dei modelli realizzati, sono state eseguite le tradizionali misure antropometriche sia sul reperto originale sia sulla copia fisica (Figura 3.10), evidenziando la possibilità di utilizzare tali modelli al posto degli originali, custoditi in luogo protetto presso l'Università degli Studi di Pisa, per motivi di ricerca. Inoltre tali misure sono state comparate anche con quelle rilevate precedentemente sui modelli digitali.



*Figura 3.10 Confronto tra le misure antropometriche eseguite sui reperti originali a Pisa e sui modelli fisici a Forlì*

Come si può osservare dai risultati conseguiti e riportati in Tabella 3.3, la variazione dei rilievi antropometrici tra i vari modelli è minima e le differenze più cospicue non superano mai il millimetro.

	Misure reperti reali (mm)	Misure modelli digitali (mm)	Misure modelli fisici (mm)
Femore dx: lunghezza	445	444	445
Femore dx: diametro sagittale	33	33	33
Femore dx: diametro trasverso	27	27	27
Coxale dx: altezza	226	227	227
Coxale dx: larghezza iliaca	160	159	160

*Tabella 3.3 Confronto tra le misure antropometriche sui reperti reali, sui modelli digitali e sui modelli fisici*

### 3.6 Conclusioni

Da questo primo lavoro si può osservare, innanzitutto, come la metodologia proposta possa portare ad ottimi risultati per quanto riguarda la realizzazione di modelli digitali e fisici di resti scheletrici paleoantropologici, in alternativa ai metodi utilizzati tradizionalmente per la realizzazione di calchi, nel più completo rispetto per la conservazione dei reperti. I prototipi fisici realizzati possono essere, infatti, impiegati sia a scopo didattico che di ricerca e possono essere utilizzati per esposizioni museali in luogo degli originali, custoditi in luoghi sicuri.

E' importante sottolineare inoltre, come la possibilità di avere a disposizione anche copie digitali fedeli agli originali, passaggio necessario per la realizzazione delle copie fisiche, possa permettere una serie di misure antropometriche rigorose, sia di tipo convenzionale, sia più approfondite, come l'esempio di analisi condotte sulle sezioni degli omeri, aumentando qualità e quantità delle informazioni ottenibili. In questo secondo caso, comunque, occorre stabilire delle precise procedure di orientamento dei modelli digitali all'interno dell'ambiente CAD utilizzato per le analisi al fine di avere un insieme di dati che possano essere comparati con analoghe misure effettuate su altri campioni.

La scelta dell'orientamento risulta fondamentale, se si tiene conto che non esistono metodologie standardizzate per l'analisi in un ambiente virtuale, e il rischio che quindi si corre in questi casi, è quello di proporre orientamenti arbitrari che portano all'estrapolazione di dati utili per le

analisi all'interno di uno stesso progetto, ma difficilmente esportabili per confronti con risultati di altri lavori. E' evidente, infatti, che, partendo da condizioni diverse sull'orientamento degli omeri, si sarebbe giunti ad una diversa definizione della direzione delle sezioni e quindi a misure di aree e perimetri diversi.

Il problema dell'orientamento è quindi affrontato in maniera specifica nel capitolo seguente utilizzando i modelli digitali di un campione di denti provenienti da necropoli medioevali.

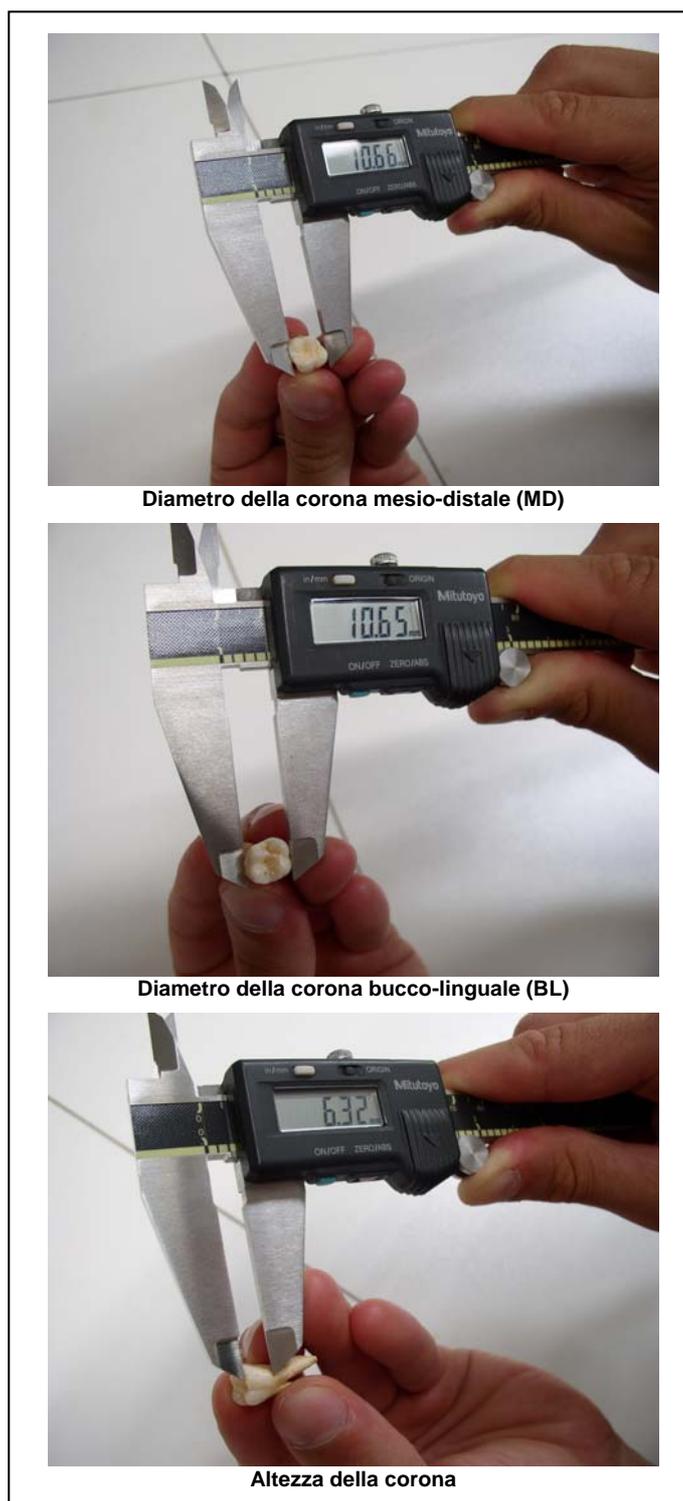
## **Capitolo 4 - Ottimizzazione dell'orientamento dei modelli 3D dei denti**

### **4.1 Il problema dell'orientamento**

Nel capitolo precedente è emerso come, nel caso sia necessario effettuare analisi comparative, il problema dell'orientamento dei modelli digitali 3D all'interno di un ambiente CAD sia di fondamentale importanza. Il confronto morfologico tra modelli di forma geometrica complessa non può, infatti, prescindere dalla scelta di un sistema di orientamento preciso e dall'individuazione di una rigorosa procedura per la standardizzazione della metodologia da seguire. In questo capitolo viene quindi affrontato il problema dell'individuazione del sistema migliore di orientamento per modelli digitali complessi come i denti.

In ambito antropologico, nello specifico paleoantropologico e archeoantropologico, i denti rivestono un ruolo di fondamentale importanza e proprio per questo motivo sono oggetto di studi particolareggiati dal punto di vista morfologico e morfometrico. Trattandosi dei resti umani in particolare, di più frequente ritrovamento nei contesti archeologici, l'analisi della forma e delle dimensioni dei denti può fornire utili informazioni per lo studio dell'evoluzione della specie.

Per quanto riguarda l'analisi morfometrica dei denti, si può distinguere un approccio tradizionale ed una serie di sviluppi successivi o approcci innovativi. L'approccio tradizionale è solitamente incentrato sulla rilevazione di tre misure tramite l'ausilio di un calibro: i due diametri fondamentali della corona, mesio-distale (MD, lunghezza) e bucco-linguale (BL, larghezza), e l'altezza della corona, come mostrato in Figura 4.1.



*Figura 4.1 Approccio tradizionale nell'analisi morfometrica dei denti*

É evidente che l'approccio tradizionale presenta notevoli limiti. In primo luogo queste misure non possono rendere pienamente conto della reale forma del dente. Inoltre, la mancanza di punti anatomici facilmente

distinguibili rende tali misurazioni condizionabili dall'inesperienza dell'operatore.

In lavori più recenti alcuni ricercatori hanno fatto ricorso ad analisi d'immagine della norma occlusale del dente ottenuta tramite fotocamera [24], [25], [26], [27].

Dato che la stessa immagine 2D pone dei grossi limiti dovuti sia al ristretto numero di misure che da queste è possibile ottenere (bidimensionali), sia alla necessità di disporre di denti sostanzialmente non usurati, recentemente alcuni ricercatori hanno fatto uso di tecnologie più sofisticate attraverso cui riprodurre modelli tridimensionali dei denti. Alcune restituzioni 3D sono state effettuate tramite Tomografia Computerizzata [28] o Microtomografia Computerizzata [29], [30] che consentono oltretutto di analizzare l'interno del dente. Altri lavori hanno sfruttato tecnologie meno costose, di più facile impiego ma contemporaneamente di minor potenziale informativo, volte alla sola restituzione tridimensionale della morfologia esterna del dente. A questo proposito, è stato utilizzato il digitalizzatore elettromagnetico [31], il microscopio laser confocale [32], e lo scanner laser [33], dimostrando che l'approccio 3D può garantire i migliori risultati per uno studio completo della morfologia e della morfometria del dente.

In ogni caso, per l'analisi sia delle immagini 2D che dei modelli digitali 3D, è possibile comparare denti tipologicamente simili avendo previamente proceduto ad un loro opportuno orientamento. Questa condizione diventa di fondamentale importanza soprattutto per l'analisi d'immagine 2D, dato che la superficie occlusale del dente va fotografata dopo averlo orientato. Nell'approccio virtuale invece, si può procedere con una scansione integrale del dente e procedere successivamente, all'orientamento del modello digitale 3D all'interno dell'ambiente CAD. La mancanza di un sistema convenzionalmente riconosciuto consente allo studioso di orientare i denti a propria discrezione, e ne deriva che i risultati delle singole ricerche non solo siano difficilmente comparabili tra loro. In alcuni lavori recenti [34], [35] viene, infatti, rilevato come una serie di errori nelle analisi sia dovuta ad un errato orientamento del dente,

sottolineando quindi l'importanza della scelta di un opportuno sistema di riferimento.

Scopo del presente caso di studio è quello di confrontare diversi sistemi di orientamento sui modelli digitali 3D di un campione di molari primi inferiori e superiori, scansionati attraverso un opportuno strumento di digitalizzazione, e standardizzare conseguentemente un sistema di orientamento che possa essere pratico ed affidabile.

### **4.2 Digitalizzazione del campione di denti**

Nell'intento di confrontare diversi sistemi di orientamento presenti in letteratura insieme con altri metodi proposti per la prima volta nel presente lavoro, è stato scansionato un campione di denti, proveniente da alcune necropoli medievali, in buono stato di conservazione, costituito da 15 molari superiori non usurati e 15 molari inferiori, tre dei quali con una leggera traccia di usura.

Per l'acquisizione del campione di denti in esame, è stato utilizzato il digitalizzatore piezoelettrico Roland Picza PIX-30 (Figura 4.2). Considerando, infatti, le ridotte dimensioni dei denti, il fatto che lo smalto della corona crea problemi di riflessione e la necessità di avere dei modelli digitali ad alta definizione, il laser scanner, impiegato nel precedente caso di studio, non si è dimostrato adeguato. Il sistema a coordinate scelto per la digitalizzazione, invece, si basa sul lieve contatto tra un ago e la superficie dell'oggetto da misurare, risultando pertanto insensibile alle eventuali proprietà riflettenti. Il digitalizzatore è inoltre in grado di rilevare nuvole di punti dislocate su una griglia tridimensionale con una risoluzione massima di 0,05 mm. Tale sistema risulta comunque non invasivo, considerato il lievissimo contatto che avviene con la superficie da acquisire, ed è quindi particolarmente adatto all'uso nel campo dei beni culturali di piccole dimensioni. Per contro, i tempi di acquisizione sono decisamente più lunghi e non si ottengono informazioni, peraltro non indispensabili in questo studio, sulle caratteristiche di colore.



Figura 4.2 Roland Picza PIX-30

Lo strumento di scansione utilizzato soddisfa i seguenti requisiti:

- Non invasivo: di primaria importanza rimane sempre l'integrità del dente, in modo particolare quando i denti scansionati presentano interesse paleoantropologico.
- Alta risoluzione e precisione: la scansione deve fornire copie virtuali del dente ad alta risoluzione, con una precisione che si spinge al di sotto del decimo di millimetro (Figura 4.3).

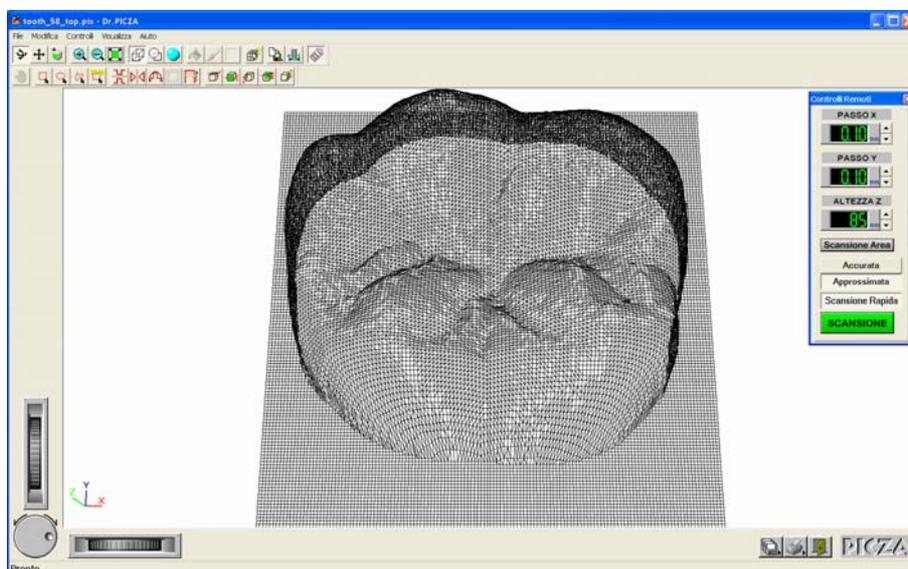
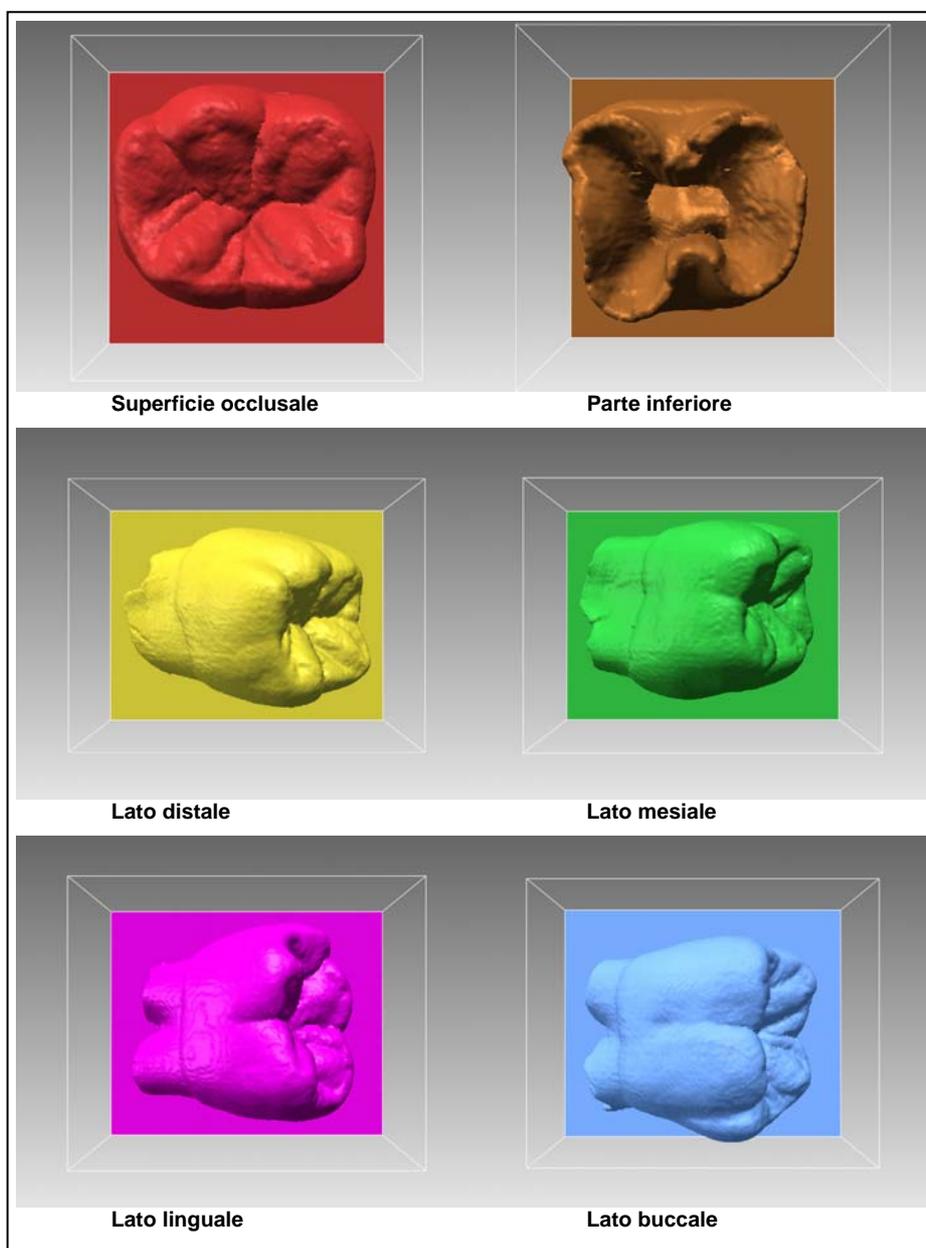


Figura 4.3 Range map acquisita della superficie oclusale di un molare primo inferiore

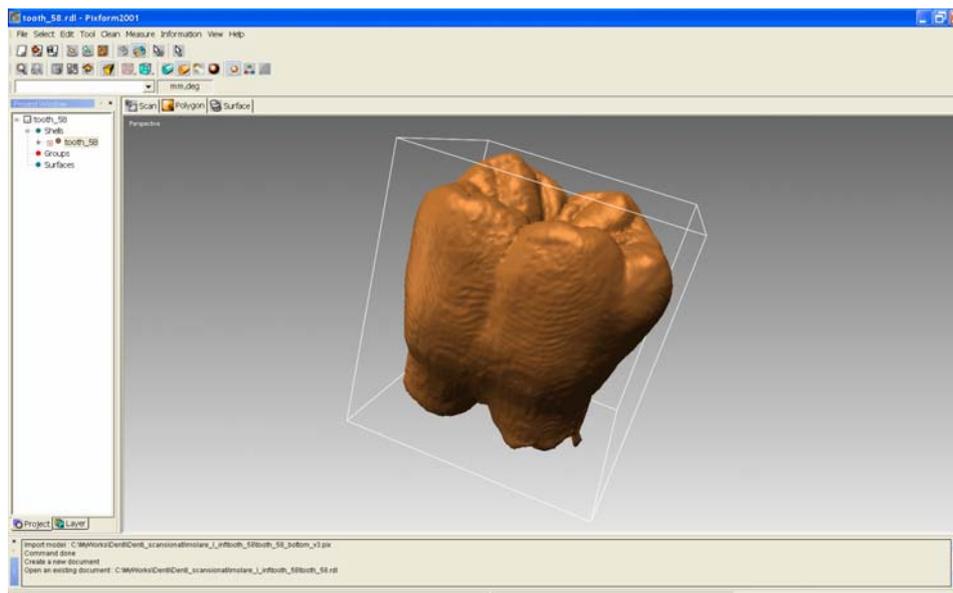
Per ogni dente del campione in esame, attraverso il software **Dr. Picza** sono state acquisite sei nuvole di punti con una risoluzione pari a 0,1 mm, relative alla superficie oclusale, alle quattro superfici laterali e alla parte inferiore del dente, come indicato in Figura 4.4. In particolare

l'acquisizione delle superfici laterali è stata effettuata in modo da rendere visibili tutte le cuspidi del dente in modo da aver elementi morfologici riconoscibili ai fini di una corretta registrazione delle diverse *range map*.



*Figura 4.4 Le sei range map acquisite per la ricostruzione del modello digitale di un molare primo inferiore*

Successivamente, utilizzando il software **Pixform**, le sei nuvole di punti sono state registrate e unite in un'unica mesh triangolare generando il modello 3D del dente completo (Figura 4.5).



*Figura 4.5 Il modello digitale 3D completo di un molare primo inferiore composto da 39.751 vertici e da 79.498 facce triangolari*

Tali modelli sono infine stati importati nell'ambiente CAD **Rhino**, in cui è stato possibile identificare una serie di landmark ed estrarre profili e sezioni utili per standardizzare un sistema di orientamento per ciascuna delle due tipologie dentali prese in considerazione, molare primo inferiore e molare primo superiore.

### **4.3 Standardizzazione del sistema di orientamento**

La procedura volta all'ottimizzazione dell'orientamento dei modelli digitali 3D e quindi, alla standardizzazione del processo metodologico è stata articolata in quattro diverse fasi:

- preorientamento del modello 3D;
- identificazione dei landmark;
- orientamento del modello 3D;
- valutazione quantitativa dei risultati.

Attraverso questo processo sono stati esaminati, oltre ai sistemi proposti in letteratura da vari ricercatori, anche nuovi sistemi di orientamento, sperimentati per la prima volta in questo lavoro, al fine

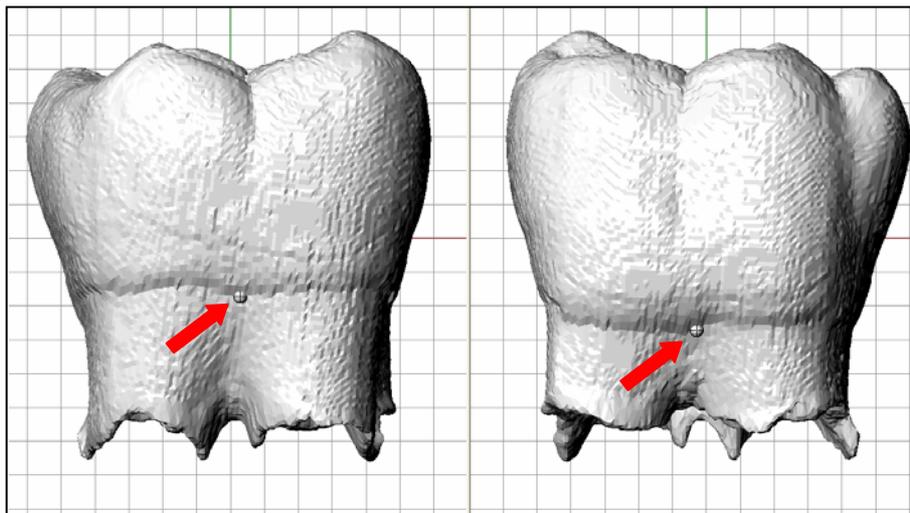
stabilire, attraverso una valutazione quantitativa, il sistema di orientamento migliore.

### 4.3.1 Preorientamento del modello 3D

Tutti i sistemi di orientamento testati prevedono la scelta di determinati landmark sul modello digitale 3D del dente. Per facilitare l'identificazione di tali landmark è stato eseguito un primo preorientamento del dente. Il modello digitale del dente è stato importato all'interno dell'ambiente CAD **Rhino** e posizionato manualmente con la superficie oclusale rivolta verso l'alto. Selezionando la vista superiore, e quindi osservando il dente dall'alto, si è proceduto ad una prima rotazione del modello con lo scopo di far corrispondere le viste laterali nel sistema di Riferimento, rispettivamente ai lati buccale, linguale, mesiale e distale del dente.

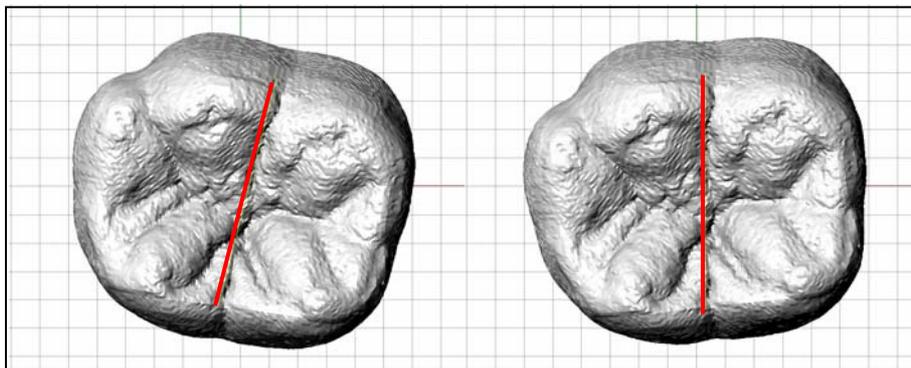
Una volta che, tramite rotazione, sono stati definiti i quattro lati del dente, la successiva operazione di orientamento sarà vincolata da movimenti basculanti rispettivamente in direzione vestibolo-linguale e mesio-distale. Proprio nell'ottica di questa progressiva riduzione dei gradi di libertà del dente possiamo giustificare la necessità di un opportuno preorientamento.

Si è ritenuto opportuno sperimentare un sistema di preorientamento basato su due specifici landmark, anche se per velocizzare l'operazione si è proceduto comunque ad un orientamento preventivo approssimando quella che dovrà essere la posizione finale del dente. Nei molari, sia nel lato linguale che buccale, solitamente è possibile riscontrare una inflessione della linea cervicale in direzione della biforcazione radicolare (Figura 4.6).



*Figura 4.6 Immagine linguale (sinistra) e buccale (destra) di un primo molare inferiore con evidenziati i landmark in corrispondenza del punto di massima inflessione della linea cervicale verso la biforcazione radicolare.*

Congiungendo i due punti così identificati nella linea cervicale del lato buccale e linguale, si ottiene un segmento che è stato assunto convenzionalmente come l'asse per il preorientamento del dente (Figura 4.7). Il segmento avrà una certa inclinazione che dipende dalla differenza di quota che intercorre tra i due punti estremi. Questa inclinazione non interessa ai fini del preorientamento in quanto viene utilizzata come riferimento la proiezione di tale segmento sul Piano Cartesiano di Riferimento. Per definire rispettivamente i lati buccale, linguale, mesiale e distale del dente, il modello geometrico è stato ruotato portando la proiezione sul Piano di Riferimento Cartesiano del segmento congiungente i due punti parallela all'asse Y.



*Figura 4.7 Preorientamento del dente sull'asse bucco-linguale. Nell'immagine è evidenziato il segmento ottenuto congiungendo i due punti utili per il preorientamento.*

### **4.3.2 Identificazione dei landmark**

È evidente che la scelta dei landmark riveste una parte fondamentale nella presente ricerca, anche se la peculiare conformazione di ogni singolo dente rende difficile una loro identificazione: a questo proposito l'approccio informatico interviene per ridurre al minimo eventuali errori dovuti a considerazioni poco oggettive.

Sul modello preorientato vengono a questo punto definiti una serie di landmark, oltre ai due già identificati nell'operazione precedente. Il dente non può più ruotare attorno al proprio asse z, quindi selezionando le varie viste (occlusale, mesiale, distale, buccale, linguale) è possibile identificare una serie di punti oggettivi.

I metodi di orientamento riportati nella letteratura scientifica hanno spesso interessato i molari inferiori, per i quali si dispone dunque di alcuni riferimenti per la scelta dei landmark, generalmente selezionati sulla corona del dente oppure lungo la linea cervicale. Ad ogni modo non tutti i punti rilevati nei molari inferiori possono essere riconosciuti in quelli superiori.

Di seguito è riportato l'elenco dei landmark identificati nel molare inferiore, a cui vanno aggiunti i due punti già selezionati (9,10) per il preorientamento (Figura 4.8):

- apice delle cuspidi (1,2,3,4,5);
- punto inferiore nella fossa mesiale e distale (6,7);
- punto di giunzione tra le creste che connettono metaconide e entoconide (8);
- punti più esterni della corona (13,14,15,16);
- punti medi nella linea cervicale sul lato mesiale e distale (11,12).

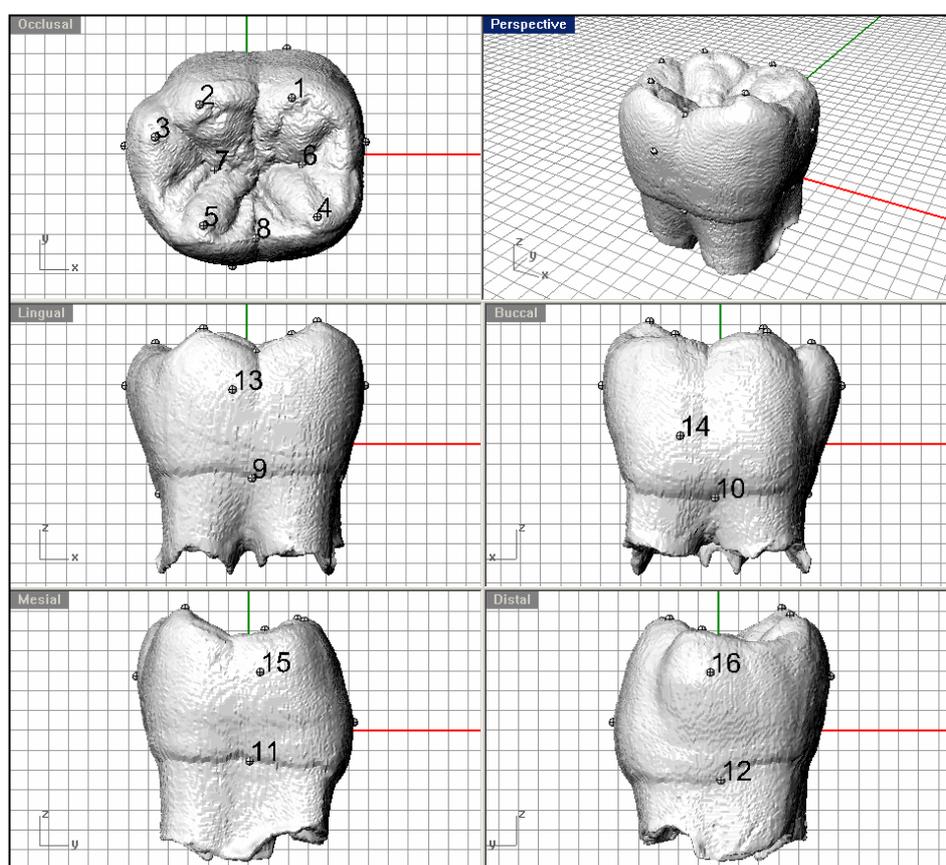


Figura 4.8 Identificazione dei landmark sul molare primo inferiore

In maniera analoga, nei molari superiori sono stati indicati gli apici delle cuspidi, i punti di massima estensione coronali del dente e i punti medi sulla linea cervicale.

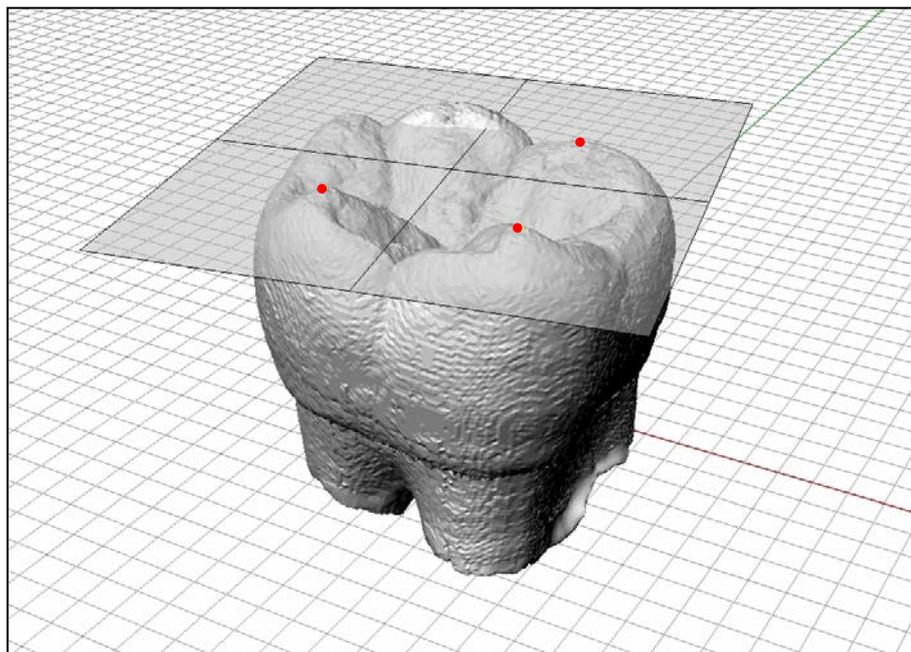
### 4.3.3 Orientamento del modello 3D

Nella tabella 4.1 sono riportati i sistemi di orientamento considerati nella presente ricerca: otto sistemi per il primo molare inferiore, sei sistemi per il primo molare superiore. Considerando, ad esempio, il primo molare inferiore, due metodi prevedono l'utilizzo degli apici delle cuspidi, un metodo è basato su punti identificati nella superficie oclusale, quattro metodi sui punti medi al colletto ed infine un metodo è incentrato sui punti di massima estensione della corona. In particolare, mentre i metodi 1-3-8 sono già presenti nella letteratura scientifica, i restanti metodi sono qui proposti per la prima volta e sono stati elaborati ad hoc ai fini di questo studio.

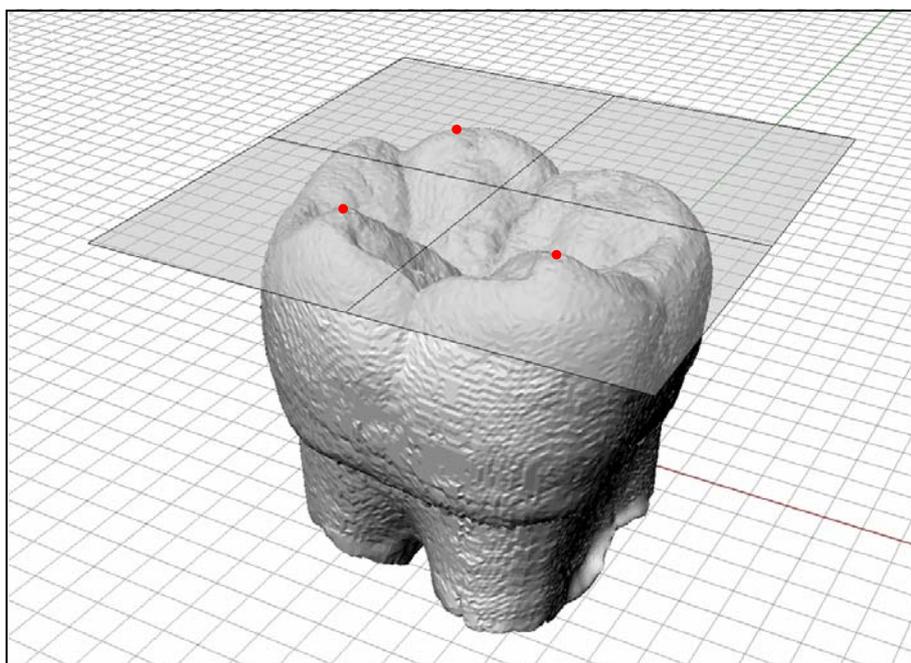
Metodi di orientamento	Landmark		Riferimenti
	Molare primo inferiore	Molare primo superiore	
<b>1) pr-me-en cusps / pa-me-pr cusps</b>	1,4,5	1,2,3	Jernvall-Selänne (1999) [32]
<b>2) ip-me-en cusps</b>	2,4,5	NA	*
<b>3) mesial fossa-distal fossa-met/ent</b>	6,7,8	NA	Ungar-Williamson (2000) [36]
<b>4) l-m-d cervical</b>	9,11,12	5,7,8	**
<b>5) l-b-d cervical</b>	9,10,12	5,6,8	**
<b>6) m-d-b cervical</b>	10,11,12	6,7,8	**
<b>7) m-b-l cervical</b>	9,10,11	5,6,7	**
<b>8) max-ext-points</b>	13,14,15,16	9,10,11,12	Robinson et al. (2002) [34]
*Modificato da Jernvall e Selänne (1999) [32]: questi utilizzavano per il molare primo inferiore: protoconide, metaconide, entoconide. In questo caso invece si fa ricorso a ipoconide, metaconide, entoconide.			
**Modificati da Bailey (2004) [24], Bailey e Lynch (2005) [25] e: questi utilizzavano l'andamento della linea cervicale del lato buccale e distale. In questo caso invece si fa ricorso ai punti medi dei lati.			

*Tabella 4.1 Elenco dei sistemi di orientamento presi in considerazione*

Come evidenziato nella tabella 4.1, la maggior parte dei sistemi di orientamento necessita di tre punti (non allineati), attraverso cui è possibile identificare un piano che viene considerato il piano XY del Sistema di Riferimento Cartesiano (Figura 4.9 e Figura 4.10). Nei tre molari inferiori in cui è stata rilevata una lieve usura a livello degli apici delle cuspidi, i metodi di orientamento incentrati sulle cuspidi non sono stati effettuati.

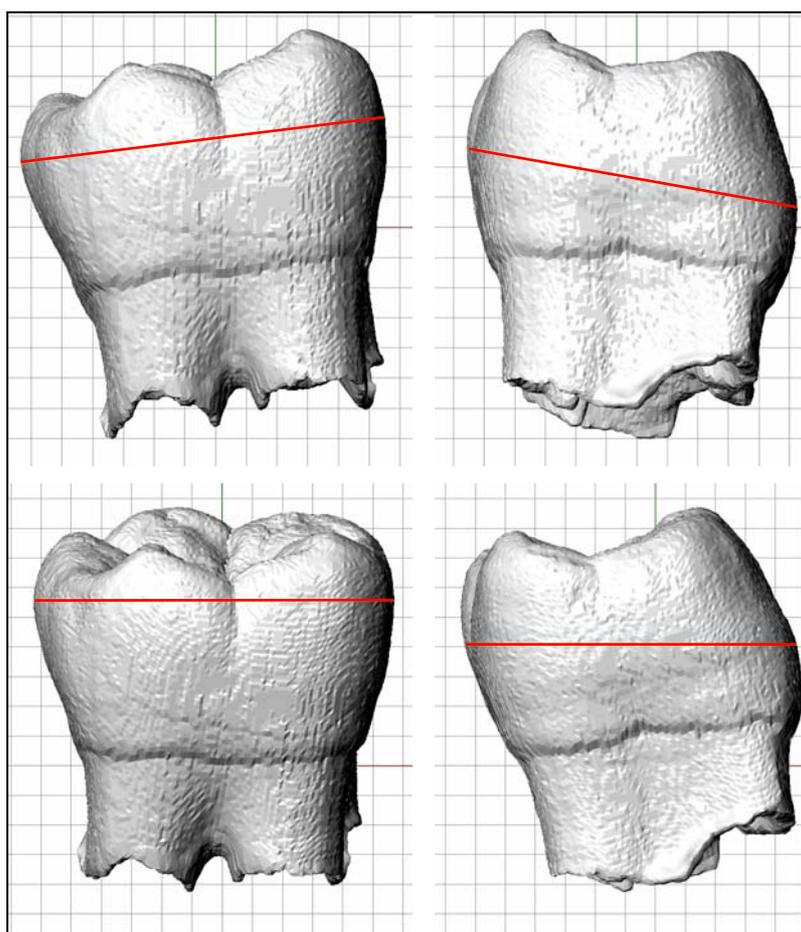


*Figura 4.9 Esempio della procedura di orientamento di un primo molare inferiore. Il piano è identificato dagli apici rispettivamente del protoconide, metaconide ed entoconide.*



*Figura 4.10 Esempio della procedura di orientamento di un primo molare inferiore. Il piano è identificato dagli apici rispettivamente dell'ipoconide, metaconide ed entoconide.*

Differente risulta essere il metodo dei massimi punti esterni della corona. In questo caso, infatti, tali punti permettono di identificare due segmenti, uno avente direzione bucco-linguale, l'altro con direzione mesio-distale. Avendo già definito tramite il preorientamento i lati del dente è possibile lavorare nelle viste ortogonali, e quindi utilizzare le proiezioni di tali segmenti nelle rispettive viste. Osservando il dente in norma linguale o buccale, il segmento che congiunge il massimo punto esterno mesiale con quello distale avrà una certa inclinazione. L'orientamento prevede, in questo caso, di portare la proiezione di tale segmento su di un piano parallelo a quello del Sistema Cartesiano di Riferimento. Stessa cosa verrà effettuata per l'altro segmento, lavorando tuttavia in norma mesiale o distale (Figura 4.11).



*Figura 4.11 Il dente è stato ruotato portando le proiezioni sul Piano di Riferimento Cartesiano delle linee congiungenti i punti più esterni della corona parallele ai rispettivi assi*

Una volta definite le modalità attraverso cui avviene il processo di orientamento, è necessario definire i parametri che permettono di valutare la minore o maggiore affidabilità di un sistema a scapito dell'altro. Anche in questo caso non esistono contributi significativi nella letteratura scientifica, e per questo motivo le scelte effettuate sono dovute a considerazioni sulla base della morfologia della corona.

Nello specifico, per ciascuno dei sistemi di orientamento valutati sul singolo dente, sono stati determinati:

1. una sezione del dente a livello del punto medio linguale cervicale, parallela al Piano Cartesiano di Riferimento (SC);
2. la proiezione sul Piano Cartesiano di Riferimento del poligono occlusale (OP), ottenuto congiungendo gli apici delle cuspidi;
3. la proiezione sul Piano Cartesiano di Riferimento del profilo occlusale della corona (OC).

I tre profili così ottenuti, sono relativi a parti differenti della corona: una parte inferiore (SC), una parte superiore (OP) e una parte approssimativamente intermedia tra le due precedenti (OC). Per ognuno di questi profili, rappresentati sul Piano Cartesiano di Riferimento XY è stato calcolato il baricentro geometrico (centroide)  $G \equiv (x_G, y_G)$ .

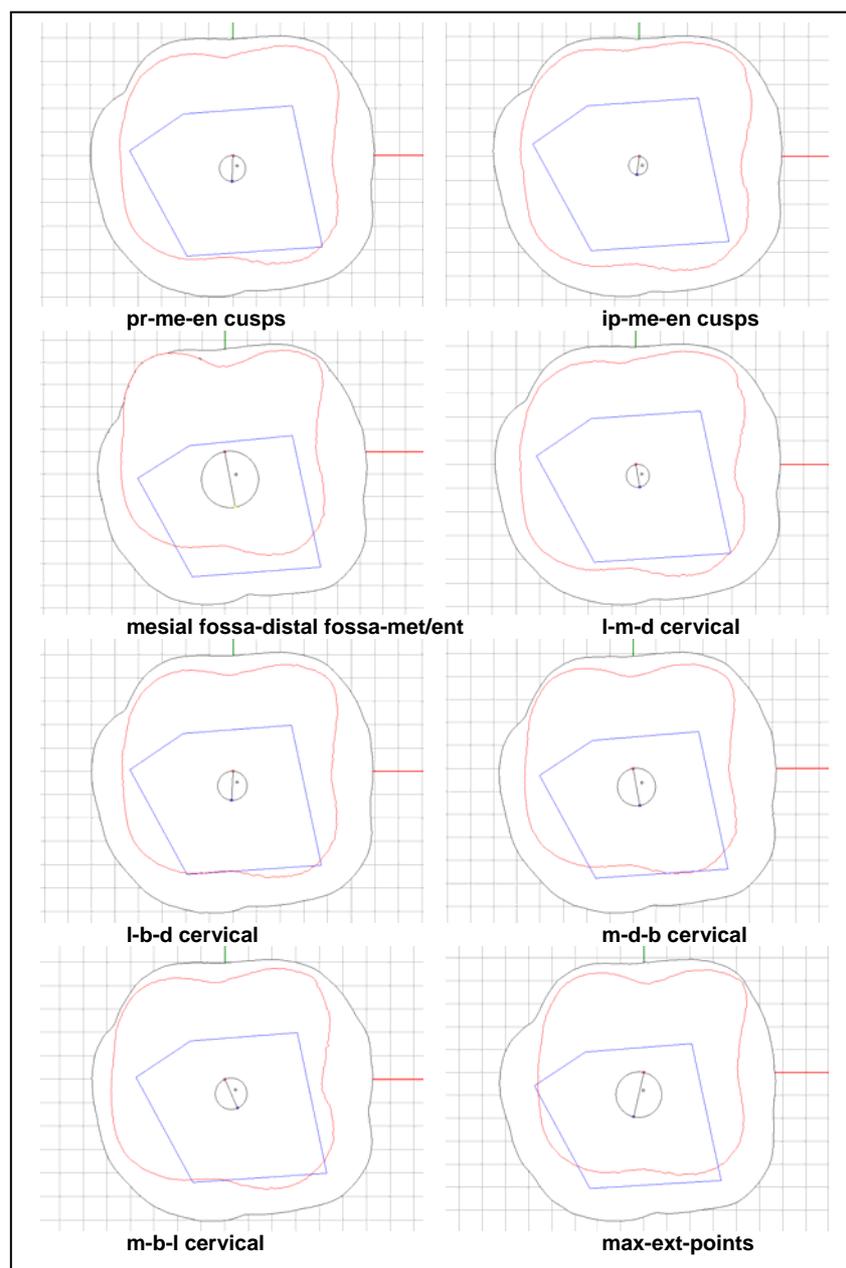
$$x_G = \frac{1}{A(S)} \iint_S x dx dy$$

$$y_G = \frac{1}{A(S)} \iint_S y dx dy$$

$$A(S) = \iint_S dx dy$$

Considerando dunque che i tre profili definiscono le parti salienti dell'intera corona, la condizione di orientamento ideale è quella con centroidi coincidenti, poiché indica che le differenti parti della corona tendono a disporsi lungo l'asse fittizio della stessa. Al contrario, un dente fortemente inclinato restituisce un OP che esce di gran lunga dai confini definiti dal profilo della sezione, oppure la sezione stessa può oltrepassare il profilo OC.

Secondo quanto detto, risulta valido il sistema di orientamento che restituisce i centroidi più ravvicinati. Per comparare e quantificare la distanza dei centroidi ottenuti nei differenti sistemi di orientamento è stata calcolata la superficie del cerchio avente come diametro il segmento che congiunge i centroidi più distanti (Figura 4.12).



*Figura 4.12* Proiezione del profilo della corona (OC) in nero, sezione del dente identificata a livello del colletto (SC) in rosso, proiezione del poligono (OP) in blu e cerchio (C) avente come diametro il segmento che congiunge i centroidi più distanti

#### **4.3.4 Valutazione quantitativa dei risultati**

Nel caso del molare primo inferiore, il metodo di orientamento basato sugli apici del ipoconide-metaconide-entoconide (ip-me-en) restituisce le condizioni migliori, con un valore medio dell'area del cerchio notevolmente inferiore rispetto a quella ottenuta attraverso gli altri metodi (Tabella 4.2, Figura 4.13). Questo metodo, proposto per la prima volta in questo studio, risulta molto più affidabile rispetto a quello presente nella letteratura scientifica, relativo alle cuspidi principali protoconide-metaconide-entoconide (pr-me-en) che, in definitiva, fornisce cerchi di maggiore dimensione. Se il nuovo metodo alle cuspidi vanta i migliori risultati, è necessario considerare che i resti dentali solitamente recuperati in campo paleoantropologico o in contesti archeologici, risultano spesso usurati, condizione che inficia pesantemente entrambe i metodi basati sulle cuspidi. Infatti, in presenza di usura, le cuspidi risultano generalmente compromesse e pertanto non è possibile l'identificazione precisa dei landmark corrispondenti agli apici. Anche nel campione di molari primi inferiori, utilizzato in questo studio, non è stato possibile applicare i metodi basati sulle cuspidi per tutti i 15 denti. Infatti, sono stati utilizzati solo 13 denti per il metodo ip-me-en, mentre il numero è sceso a 11, per il metodo pr-me-en. Per questo motivo è stato scelto come sistema di orientamento per il primo molare inferiore il metodo definito dai punti medi linguale-mesiale-distale sulla linea cervicale (l-m-d).

	ip-me-en cusps	pr-me-en cusps	Fossae met-ent	l-m-d cervical	l-b-d cervical	m-d-b cervical	m-b-l cervical	max-est
<b>N</b>	13	11	15	15	15	15	15	15
<b>Media</b>	<b>0,42</b>	0,92	2,05	<b>0,63</b>	2,28	4,97	2,41	1,54
<b>S.D.</b>	0,31	0,45	1,66	0,46	0,91	3,21	1,36	1,12

*Tabella 4.2 Valore medio e deviazione standard dell'area dei cerchi relativi ai diversi sistemi di orientamento sperimentati sul primo molare inferiore (mm<sup>2</sup>)*

Il metodo l-m-d restituisce superfici dei cerchi che si discostano poco da quelle ottenute attraverso il metodo delle cuspidi ip-me-en, con la

prerogativa di non essere inficiato dai processi di usura occlusale ed interprossimale a cui è sottoposta la corona del dente.

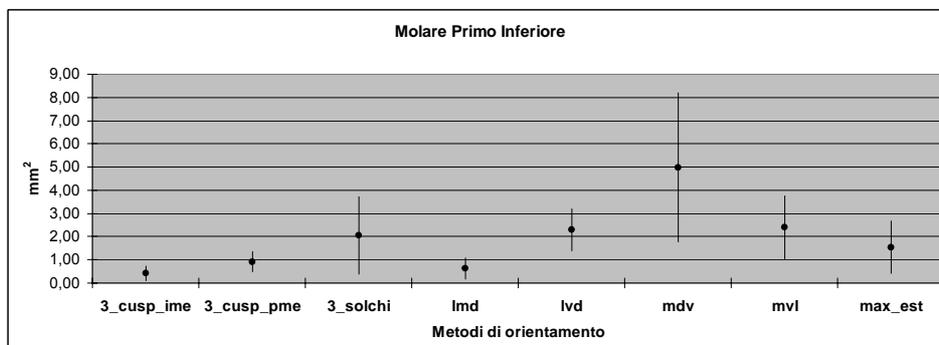


Figura 4.13 Valore medio e deviazione standard dell'area dei cerchi relativi ai diversi sistemi di orientamento sperimentati sul primo molare inferiore

A differenza del primo molare inferiore, i sei metodi di orientamento testati sul primo molare superiore restituiscono in genere centroidi molto vicini, e quindi valori medi dell'area dei cerchi molto bassi. Anche in questo caso comunque il metodo delle cuspidi paracono-metacono-PROTOCONO (pa-me-pr) fornisce i risultati più soddisfacenti (Tabella 4.3, Figura 4.14). Considerando però, come detto precedentemente, che le cuspidi sono facilmente soggette ad usura, è necessario determinare un metodo che difficilmente risente di un processo, l'usura appunto, in grado di cancellare completamente la manifestazione delle cuspidi, anche se, in questo caso, sul campione di molari primi superiori utilizzato, è stato comunque possibile applicare il metodo basato sulle cuspidi su tutti i denti selezionati.

	pa-me-pr cusps	l-m-d cervical	l-b-d cervical	m-d-b cervical	m-b-l cervical	max-ext
<b>N</b>	15	15	15	15	15	15
<b>Media</b>	<b>0,31</b>	0,68	0,67	<b>0,50</b>	0,54	0,88
<b>S.D.</b>	0,28	0,53	0,76	0,29	0,41	0,79

Tabella 4.3 Valore medio e deviazione standard dell'area dei cerchi relativi ai diversi sistemi di orientamento sperimentati sul primo molare superiore (mm<sup>2</sup>)

Non si riscontra una particolare distinzione tra i risultati dei singoli metodi, e quindi la selezione di un metodo a scapito di un altro deve essere, almeno per il primo molare superiore, ulteriormente convalidato incrementando il campione scansionato. Ad ogni modo, il metodo che più si avvicina a quello delle cuspidi risulta essere quello dei punti medi mesiale-distale-buccale al colletto (m-d-b).

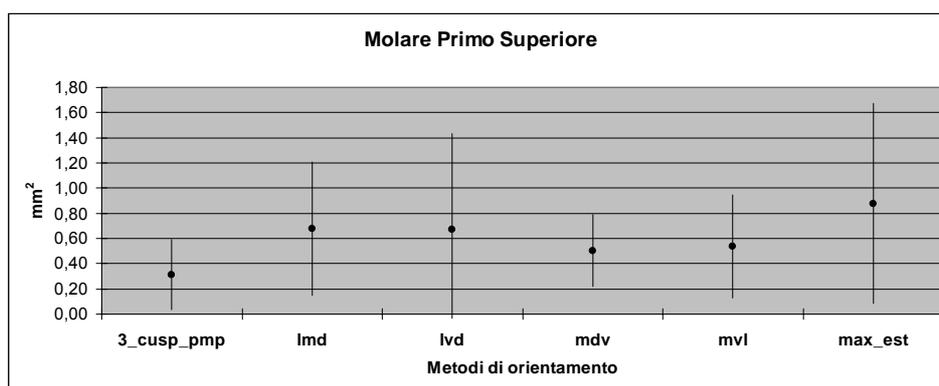


Figura 4.14 Valore medio e deviazione standard dell'area dei cerchi relativi ai diversi sistemi di orientamento sperimentati sul primo molare superiore

### 4.4 Conclusioni

Le tecnologie di scansione 3D applicate a questo caso di studio hanno consentito di ottenere modelli digitali dei denti ad alta risoluzione, successivamente analizzati tramite il software **Rhino**, aumentando notevolmente la quantità e la qualità dei dati disponibili.

Allo stesso tempo, poter disporre di modelli 3D di denti di ominidi svincola il ricercatore da tutte quelle limitazioni che solitamente il resto fossile comporta: se l'approccio tradizionale prevede un contatto diretto con il dente sia per la descrizione morfologica sia, in modo particolare, per la sua misurazione, con i limiti dovuti alle restrizioni dei vari musei, dipartimenti, ecc., che si dimostrano spesso ostili alla pubblica fruizione del bene, il modello 3D non solo permette a qualsiasi studioso di accedere al resto fossile, ma allo stesso tempo riduce al minimo le possibilità di danneggiare il reperto originale.

Se dunque si registra una sensibilizzazione delle ricerche verso approcci innovativi che fanno ricorso a tecnologie sempre più sofisticate, si tende comunque a trascurare un problema fondamentale, un problema che si pone a priori dello studio analitico dei denti, e che non essendo affrontato e risolto secondo una modalità convenzionalmente riconosciuta non consente ai risultati dei singoli lavori scientifici di poter essere utilizzati come confronto o come punto di partenza per successive analisi: si richiede, infatti, la standardizzazione di sistemi di orientamento specifici per ciascuna tipologia dentale.

Il presente lavoro vuole essere il primo di una serie di ricerche volte alla standardizzazione dei metodi di orientamento dei denti. Incentrato su due tipologie dentali che ricorrono frequentemente nella letteratura scientifica, rispettivamente il primo molare inferiore e superiore, ha fornito l'occasione di confrontare vari sistemi di orientamento, in parte noti in parte qui per la prima volta testati, di un campione di denti non usurati di uomo anatomicamente moderno.

In entrambi i molari, i metodi alle cuspidi (ip-me-en per il primo molare inferiore, e pa-me-pr per il primo molare superiore) forniscono i risultati migliori. Tuttavia il sistema di orientamento che ci si propone di convalidare non deve dipendere dal grado di usura del dente. Conseguentemente i metodi di orientamento che fanno riferimento a specifici punti che l'usura tende ad eliminare, e quindi i metodi basati sull'apice delle cuspidi, devono essere scartati. Nel presente lavoro sono stati comunque adottati anche questi metodi, dove applicabili, al fine di valutare qualitativamente e quantitativamente i risultati di ciascun metodo nella condizione ideale, in presenza cioè di denti non usurati. Sulla base di queste considerazioni, sia per il primo molare inferiore sia per quello superiore sono stati scelti due metodi basati su tre punti medi identificati a livello della linea cervicale, raramente intaccati dall'usura della corona. Nello specifico, per il primo molare inferiore il metodo l-m-d (punti medi al colletto linguale-mesiale-distale) ha restituito risultati estremamente significativi, che ben si prestano a sostituire il metodo delle cuspidi ip-me-en. Per il primo molare superiore tutti i metodi hanno restituito

superfici medie dei cerchi decisamente inferiori rispetto a quelle ottenute per il primo molare inferiore, ad indicare che in particolare l'andamento della linea cervicale nel primo molare superiore si presenta più regolare rispetto a quella del molare inferiore. La scelta del metodo è stata dunque più ardua, indirizzata verso il sistema m-d-b (punti medi al colletto mesiale-distale-buccale), sia per il valore medio della superficie dei cerchi, leggermente più basso rispetto a quello ottenuto per gli altri metodi, sia soprattutto per la relativa deviazione standard simile a quella ottenuta con il metodo delle cuspidi pa-me-pr ed in generale tra le più basse riscontrate nel presente lavoro.

Questo primo lavoro, volto alla standardizzazione delle procedure di analisi del primo molare inferiore e superiore, deve essere certamente incrementato con ulteriori campioni di denti di uomo anatomicamente moderno. Scopo finale non è solamente quello di standardizzare un metodo, ma di creare una prima banca dati virtuale di denti facilmente accessibile da qualsiasi ricercatore che intenda affrontare studi sulla forma e la dimensione dei denti. È possibile comprendere le potenzialità di un archivio virtuale così impostato, implementato con una sezione dedicata ai denti di primati estinti e non, supportata di opportuni sistemi standardizzati di orientamento per ciascuna singola tipologia dentale e, in un futuro certamente non troppo lontano, coadiuvata da software appositamente programmati in cui l'intervento del ricercatore, a cui certamente non si può prescindere, viene comunque limitato ad alcune fasi specifiche, come ad esempio il preorientamento del dente (necessario per definire i primi due punti) e la fase di raccolta dati.



## **Capitolo 5 - Studio di una mummia peruviana smembrata**

### **5.1 Il problema dell'analisi di resti mummificati**

In questo capitolo sono presentati i risultati di una complessa e completa analisi effettuata sui resti di una mummia peruviana smembrata in sei frammenti principali. A differenza dei casi illustrati precedentemente, il processo metodologico seguito in questo caso di studio, non si pone come alternativa ai procedimenti di analisi convenzionali, bensì diventa l'unica strada percorribile per la raccolta di dati e informazioni sull'oggetto in esame.

E' noto, infatti, che le mummie costituiscono un patrimonio storico, culturale e scientifico di estrema importanza ma, a causa della fragilità dei tessuti molli e della presenza di strutture di rivestimento, il loro studio deve essere condotto mediante tecniche di analisi non invasive. Da un lato, infatti, la fragilità del reperto non consente operazione di manipolazione diretta dei frammenti, per il rischio di danneggiamenti irreversibili, dall'altro il tessuto mummificato che ricopre la struttura scheletrica, impedisce le analisi antropometriche tradizionali che si basano sull'impiego di strumenti di misura a contatto con alcuni punti specifici sulle ossa. Partendo quindi, dai dati ottenuti tramite CT (*Computed Tomography*) dei frammenti, che restituiscono informazioni sull'intero volume scansionato e non solo sulla superficie, è stato possibile effettuare la ricostruzione geometrica dei modelli sia della struttura esterna, comprensiva dei tessuti molli mummificati, sia del distretto scheletrico interno.

La prima parte del lavoro ha quindi visto, come obiettivo, la realizzazione di un modello virtuale della mummia intera nella propria

posizione anatomica di sepoltura, assemblando, in un ambiente virtuale, i modelli digitali 3D dei sei frammenti principali. In secondo luogo, sui modelli digitali dei segmenti scheletrici, sono state eseguite, in ambiente CAD, tutte quelle misure antropometriche non altrimenti possibili sui resti reali. Infine, è stata valutata e classificata la deformazione cranica artificiale, indotta sul soggetto, tramite analisi comparativa tra i dati rilevati sul modello digitale del cranio e quelli presenti in letteratura.

E' noto che le mummie costituiscono un patrimonio storico, culturale e scientifico di estrema importanza. Considerata, inoltre, la loro fragilità e naturale tendenza al disfacimento se ripetutamente manipolate o conservate in ambiente differente da quello originario, gli studi e le analisi sono condotte con tecnologie sofisticate non invasive. In particolare modo, da quasi 30 anni si fa ricorso alla CT, perchè la possibilità di effettuare sezioni trasversali ad elevata risoluzione spaziale e ricostruzioni 3D dell'intera mummia, costituisce un miglioramento delle tecniche radiologiche, sebbene questa innovazione non precluda il ricorso alla radiologia classica. È evidente però che la generale tendenza nello studio delle mummie prevede l'utilizzo della CT sia per corpi integralmente conservati [37], sia per le sole teste mummificate [38], [39]. La grande maggioranza di questi lavori ha interessato mummie egiziane [37], [40], anche se non mancano mummie provenienti da altre regioni [41]. Tramite la CT è stato possibile indagare le tecniche di mummificazione [42], svolgere ricerche di paleopatologia [43], [44], misurare direttamente le dimensioni dei vari distretti corporei [45], ecc. Attraverso le moderne tecniche di computer grafica è poi possibile utilizzare i dati della CT per costruire modelli tridimensionali delle mummie [46], [47] sui quali vengono effettuate svariate operazioni di "manipolazione" virtuale, preservando i reperti originali da eventuali danni, o per successive operazioni di ricostruzione facciale [48], [49].

### 5.2 Il caso di studio

Oggetto di questo studio è una mummia peruviana, conservata presso i Civici Musei di Reggio Emilia e sottoposta a diverse indagini per scopi di ricerca ed eventuali interventi conservativi [50]. Trasportata in Italia dal Perù nel 1893, la mummia proviene dalla necropoli di Ancòn, nella costa centro-meridionale del Perù e il periodo cronologico di appartenenza può essere circoscritto al X e XI sec. d.C.

La mummia è apparsa in pessimo stato di conservazione; gli arti, in parte non più in connessione anatomica con il tronco, erano mantenuti insieme, riproducendo la posizione fetale tipica delle modalità di sepoltura, con gli arti inferiori e superiori flessi e le mani appoggiate sul viso o sulla bocca. Solo l'arto superiore sinistro è rimasto in connessione con il tronco e con la mano appoggiata al volto, nella posizione originale. Rimosso lo spago che la teneva precariamente insieme, la mummia si è presentata smembrata in sei frammenti principali (Figura 5.1): parte del busto con la testa e l'arto superiore sinistro, l'arto superiore destro, la colonna vertebrale, il bacino e i due arti inferiori. La parte inferiore dell'addome presentava un'ampia lacuna e nelle porzioni prossimali degli arti sono andati perduti i tessuti molli periarticolari.

I risultati di una serie analisi antropologiche eseguite hanno permesso di riconoscere che si tratta di un individuo di sesso femminile morto all'età di circa 14-15 anni, di circa 144-150 cm di statura, sottoposto durante l'infanzia a deformazione cranica intenzionale, sia pure di grado lieve, elemento indicativo di appartenenza ad una classe sociale elevata.



*Figura 5.1 I sei frammenti principali della mummia oggetto di studio: parte del busto con la testa e l'arto superiore sinistro, l'arto superiore destro, la colonna vertebrale, il bacino e i due arti inferiori*

Le indagini radiografiche e tomografiche hanno, inoltre, rivelato la presenza di masse radiopache all'interno della scatola cranica interpretabili come residui del cervello il che potrebbe indicare una probabile mummificazione naturale favorita dal clima arido della costa peruviana, in quanto nella mummificazione artificiale il cervello veniva estratto. Sul parietale di sinistra è stata evidenziata una formazione radiopaca probabilmente riferibile ad una tumefazione calcificata dei tessuti molli, esito di un possibile trauma, e la presenza di oggetti metallici, che mediante XRF (Spettroscopia di Fluorescenza di Raggi X)

si sono rivelati essere costituiti prevalentemente da rame (con argento, ferro e tracce di cromo e piombo), che occupano la cavità buccale dell'individuo e di cui un frammento fuoriesce leggermente dalle semiarcate dentarie del lato destro.

### **5.3 Ricostruzione virtuale della mummia intera**

La prima fase del presente lavoro è stata volta alla ricostruzione virtuale della mummia, gravemente compromessa quanto a stato di conservazione, ri assemblando, in un ambiente virtuale, i modelli digitali 3D dei sei frammenti principali, al fine di ricreare la tipica posizione anatomica di sepoltura.

Considerata la sua delicatezza, le operazioni di manipolazione diretta del reperto avrebbero provocato danni inevitabili, in particolare la perdita ulteriore dei già compromessi tessuti molli mummificati. Del resto l'unicità del reperto e la sua importanza come testimonianza d'interesse bio-culturale hanno imposto di adottare tutte le precauzioni possibili volte a preservarlo da ulteriore degrado. La soluzione ottimale a questo fine si è ritenuto potesse consistere nel costruire il modello virtuale della mummia a partire da immagini 3D acquisite mediante CT, per eseguire su di esso le necessarie operazioni di manipolazione virtuale. In primo luogo, data la necessità di restaurare la mummia per riportarla al suo aspetto originario ricongiungendo le diverse porzioni ora separate, la ricostruzione preventiva virtuale e la conseguente validazione del modello da un punto di vista antropologico potrà semplificare le successive operazioni di ricostruzione e restauro reale della mummia, limitando al minimo le manipolazioni del reperto. Infine, un ulteriore obiettivo che ci si è proposti riguarda la valorizzazione della mummia come bene culturale e la comunicazione delle informazioni che essa contiene. Solitamente questi reperti, quando non restano nei magazzini, abbandonati a progressivo irrimediabile degrado, vengono esposti nei musei come oggetti poco più che da guardare. La restituzione virtuale del reperto con la possibilità di visualizzazione stereoscopica del modello in scala 1:1, accanto alla

ostensione del reperto originale, ne consentirà una fruibilità interattiva real time, molto più efficace in termini di trasmissione delle informazioni e delle conoscenze.

### 5.3.1 Acquisizione dei dati tramite CT

L'intero processo di acquisizione dei dati è stato eseguito presso il Dipartimento di Radiologia dell'Ospedale di Faenza nell'aprile del 2005. I sei frammenti della mummia sono stati sottoposti singolarmente ad una scansione tramite CT (*Computed Tomography*) utilizzando il sistema Philips Mx8000 Dual Scanner, come mostrato in Figura 5.2.



*Figura 5.2 Processo di acquisizione tramite TAC*

Durante il processo di acquisizione sono stati impostati come parametri lo spessore delle *slice* pari a 6,5 mm e l'intervallo tra le *slice* successive pari a 1,5 mm. Il numero di *slice* ottenute dalla scansione 3D, costituite da immagini di risoluzione pari a 512 per 512 pixel, è riportato in Tabella 5.1 e i relativi dati sono stati salvati in formato DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*).

	N. di slice
Busto + Testa + Arto superiore sx	267
Bacino	162
Colonna	192
Arto superiore dx	203
Arto inferiore sx	212
Arto inferiore dx	201
<b>TOTALE</b>	<b>1237</b>

Tabella 5.1 Elenco del numero di slice acquisite per ogni frammento mummificato

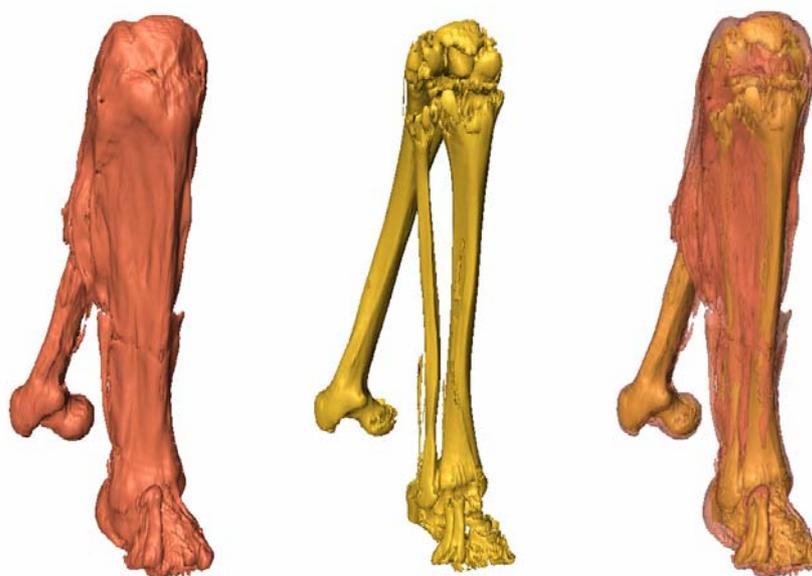
### 5.3.2 Ricostruzione delle superfici

Come descritto nel capitolo 2, dalle immagini risultanti dal processo di scansione 3D tramite CT, è possibile ricostruire sia i modelli digitali dei tessuti mummificati che quelli relativi alla sola struttura scheletrica. E' noto, infatti, che le immagini CT rappresentano le diverse densità dei tessuti attraverso una rappresentazione in scala di grigio: i tessuti duri, come le ossa, hanno intensità maggiore e appaiono più chiari, mentre i tessuti molli, come la pelle, hanno intensità minore e quindi risultano più scuri.

La realizzazione dei modelli digitali, quindi, dei tessuti mummificati e dei tessuti ossei, è stata ottenuta, attraverso un procedimento di ricostruzione superficiale, utilizzando il software **Amira**.

Le immagini, caricate nell'ambiente di lavoro **Amira**, sono state segmentate in modalità semi-automatica, basata sull'impostazione di opportuni valori di sogliatura sulla scala di grigio, in modo da mettere in evidenza i contorni delle strutture anatomiche di interesse. Isolati i contorni è stato possibile realizzare i modello digitali 3D come mesh poligonale triangolare tramite un algoritmo di tipo *marching cubes*.

Le *mesh* realizzate sono state quindi, raffinate manualmente, al fine di eliminare gli eventuali errori presenti, attraverso la chiusura di buchi e l'eliminazione di facce degeneri, ottenendo i modelli digitali finali (Figura 5.3).



*Figura 5.3 Modello digitale dell'arto inferiore destro con la rappresentazione dei tessuti mummificati (sinistra) e con la sola rappresentazione dei tessuti ossei (centro). Infine, modello digitale con la rappresentazione sia dei tessuti molli, visualizzati in semi-trasparenza, che dei tessuti duri (destra)*

Nella Tabella 5.2 sono riportati il numero di punti e triangoli relativi ai modelli digitali finali dei tessuti molli e dei tessuti ossei.

	Tessuti molli		Tessuti ossei	
	N. di punti	N. di facce	N. di punti	N. di facce
<b>Busto + Testa + Arto superiore sx</b>	302.871	607.618	791.320	1.583.204
<b>Bacino</b>	276.783	553.850	279.005	558.926
<b>Colonna</b>	913.922	1.828.538	853.910	1.709.682
<b>Arto superiore dx</b>	241.018	482.559	138.294	277.076
<b>Arto inferiore sx</b>	458.963	915.217	299.296	600.614
<b>Arto inferiore dx</b>	409.513	820.188	248.465	498.470
<b>TOTALE</b>	<b>2.603.070</b>	<b>5.207.970</b>	<b>2.610.290</b>	<b>5.227.972</b>

*Tabella 5.2 Elenco del numero di punti e di triangoli relativi ai modelli digitali finali dei tessuti molli e dei tessuti ossei*

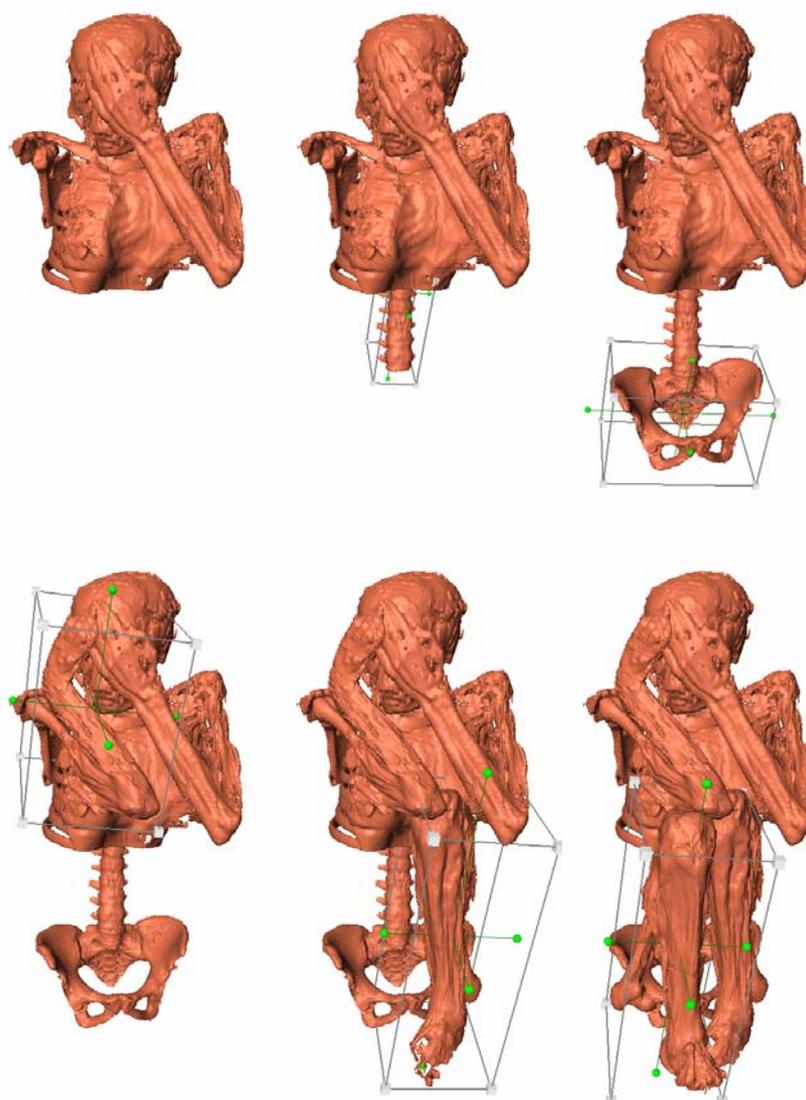
### 5.3.3 Assemblaggio virtuale

Una volta ottenuti gli elementi digitali relativi ai singoli frammenti della mummia in esame, si è proceduto alla fase di assemblaggio virtuale al fine di ottenere il modello digitale della mummia intera nella corretta posizione anatomica di sepoltura.

Questa operazione è stata eseguita attraverso un processo iterativo, volto all'ottimizzazione del posizionamento dei singoli frammenti digitali, grazie ad un ambiente virtuale collaborativo, dove esperienze e conoscenze interdisciplinari di ingegneri e antropologi si sono integrate, grazie alla possibilità di una visualizzazione stereoscopica dei modelli in scala reale (Figura 5.4). Considerando, infatti, che la condizione dei resti mummificati non ha permesso l'esatta individuazione delle zone di contatto tra i diversi frammenti, tutto il processo di ricostruzione è avvenuto, passo dopo passo, attraverso un attento confronto visivo guidato da antropologi esperti nel campo del restauro di questi reperti (Figura 5.5).

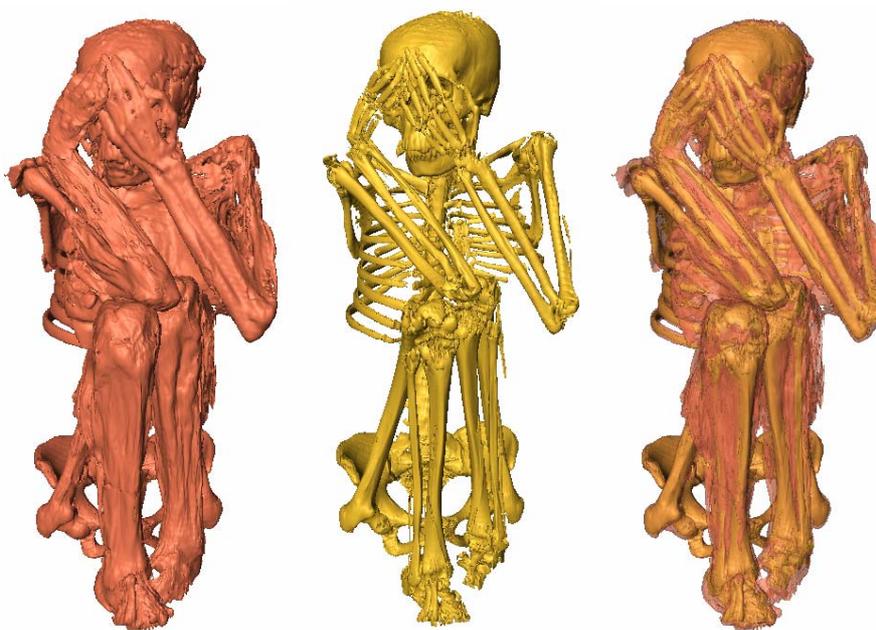


*Figura 5.4 Fase di assemblaggio virtuale degli frammenti digitali della mummia*



*Figura 5.5 Fasi relative all'assemblaggio virtuale dei diversi elementi virtuali al fine di ottenere il modello digitale della mummia intera nella corretta posizione anatomica di sepoltura*

La ricostruzione virtuale della mummia intera è rappresentata in Figura 5.6, con tutti i frammenti principali disposti in posizione anatomica adeguata. Questo è il risultato del processo iterativo realizzato in ambiente virtuale che ha portato, di fatto, all'individuazione delle matrici di rototraslazione necessarie per il riferimento dei sei modelli digitali. Come prevedibile il risultato finale, convalidato dagli antropologi che hanno partecipato al progetto, rappresenta la posizione fetale tipica delle modalità di sepoltura delle mummie peruviane.



*Figura 5.6 Modello digitale della mummia intera nella corretta posizione anatomica di sepoltura con la rappresentazione dei tessuti mummificati (sinistra) e con la sola rappresentazione dei tessuti ossei (centro). Infine, modello digitale con la rappresentazione sia dei tessuti molli, visualizzati in semi-trasparenza, che dei tessuti duri (destra)*

Il modello digitale della mummia intera nella posizione di sepoltura è stato, infatti, confrontato, come ulteriore elemento di validazione del risultato ottenuto, con una serie di esemplari noti e relativi a mummie provenienti dal Perù e appartenenti allo stesso periodo cronologico (Figura 5.7).



*Figura 5.7 Mummie peruviane di riferimento*

### 5.4 Misure antropometriche sui modelli digitali

Analogamente a quanto effettuato sui modelli digitali dei resti dello scheletro del Romito 7 nel capitolo 3, anche in questo caso di studio sono state eseguite una serie di misure antropometriche in ambiente virtuale sulla struttura scheletrica della mummia. E' importante sottolineare come, mentre nel caso precedente la metodologia proposta si pone come alternativa rispetto al rilievo antropometrico tradizionale, se si esclude l'analisi delle sezioni ossee con l'estrapolazione delle misure relative alle aree e ai perimetri, in questo caso diviene l'unica strada percorribile.

I resti umani mummificati rappresentano un archivio di informazioni di estrema importanza, dato che essi conservano non solo l'apparato scheletrico ma anche i tessuti molli, trasformati dal processo di mummificazione, ed il loro studio antropologico richiede un approccio che per vari aspetti si differenzia da quello normalmente seguito nello studio dei resti scheletrici.

È evidente, infatti, che la presenza dei tessuti molli consente di effettuare una serie di analisi biologiche e chimico-fisiche, non praticabili sui soli resti ossei, che contribuiscono ad arricchire il quadro delle conoscenze sulle antiche popolazioni e civiltà di appartenenza. Allo stesso tempo però, le classiche analisi morfologiche e morfometriche normalmente condotte sui resti scheletrici non sono applicabili in presenza di resti mummificati in quanto risulta impossibile accedere ad alcuni punti di repere sulla struttura scheletrica o inadeguato utilizzare i tradizionali sistemi di misura a contatto sui punti visibili sulle ossa, per il rischio di danneggiare l'integrità della mummia (Figura 5.8).

Lo scopo di questa fase del lavoro è quindi, la realizzazione di un insieme dettagliato di misure antropometriche, eseguite sui modelli digitali dei singoli distretti scheletrici evitando gli interventi diretti sulla mummia, che ne avrebbero irrimediabilmente compromesso il già precario stato di conservazione.



*Figura 5.8 Esempio di misure antropometriche su reperti scheletrici che risultano essere impossibili (A) o inadeguate (B) sul resto mummificato dell'arto superiore destro della mummia in esame*

#### **5.4.1 Rilievo antropometrico virtuale**

Le misure antropometriche relative ai singoli distretti scheletrici, i cui modelli digitali sono stati preventivamente isolati dal resto della

struttura scheletrica, sono state eseguite nell'ambiente CAD **Rhino** (Figura 5.9) analogamente a quanto precedentemente descritto per il caso del Romito 7, e i risultati, relativi come esempio agli omeri, sono riportati nella Tabella 5.3.

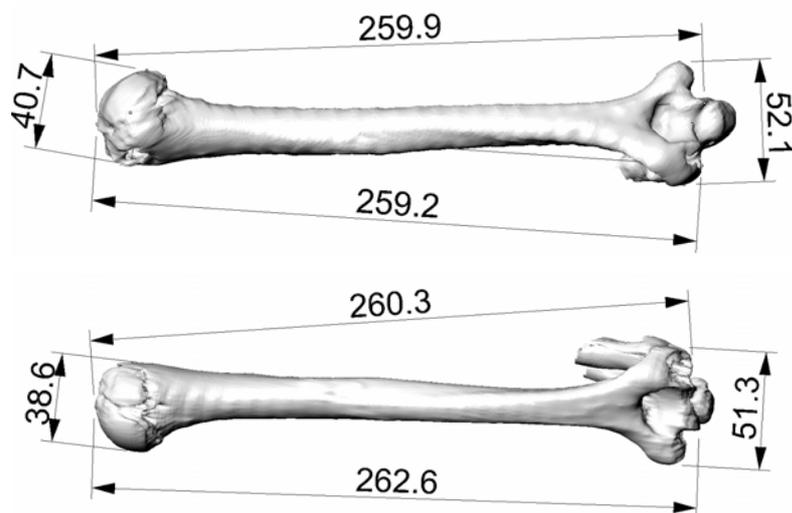


Figura 5.9 Misure antropometriche sui modelli digitali dell'omero sinistro (sopra) e dell'omero destro (sotto) della mummia in ambiente CAD riportate in mm

OMERO	VALORI (mm)	
MISURE	S	D
lu. max.	259,9	262,6
lu. fis.	259,2	260,3
la. ep. sup.	40,7	38,6
la. estr. inf.	52,1	51,3
d. max. med.	19,2	18,1
d. min. med.	14,1	13,2
circ. min. dia.	50,5	47,3
circ. med.	59,0	51,8
larg. max tes.	34,0	35,4
alt. max tes.	32,0	30,1
INDICI OMERO	S	D
Indice di robustezza	19,4	18,0
Indice diafisario	73,4	72,9
Indice della testa	106,3	117,6

Tabella 5.3 Misure e indici antropometrici relativi all'omero sinistro all'omero destro della mummia

I dati rilevati sulla lunghezza massima degli omeri hanno inoltre permesso di stimare la statura dell'individuo, di sesso femminile, attraverso l'applicazione della formula di Trotter e Gleser [51], secondo quanto riportato nella Tabella 5.4.

RICOSTRUZIONE DELLA STATURA DALL'OMERO				
METODO	SINISTRA		DESTRA	
	Maschi	Femmine	Maschi	Femmine
Trotter e Gleser	150,50	145,30	151,33	146,20
<b>Maschi</b>	$3,08 * \text{lu. max. omero} + 70,45 (\pm 4,05)$			
<b>Femmine</b>	$3,36 * \text{lu. max. omero} + 57,97 (\pm 4,45)$			

*Tabella 5.4 Metodo per la stima della statura della mummia a partire dalla misura della lunghezza massima degli omeri*

#### **5.4.2 Analisi delle sezioni ossee**

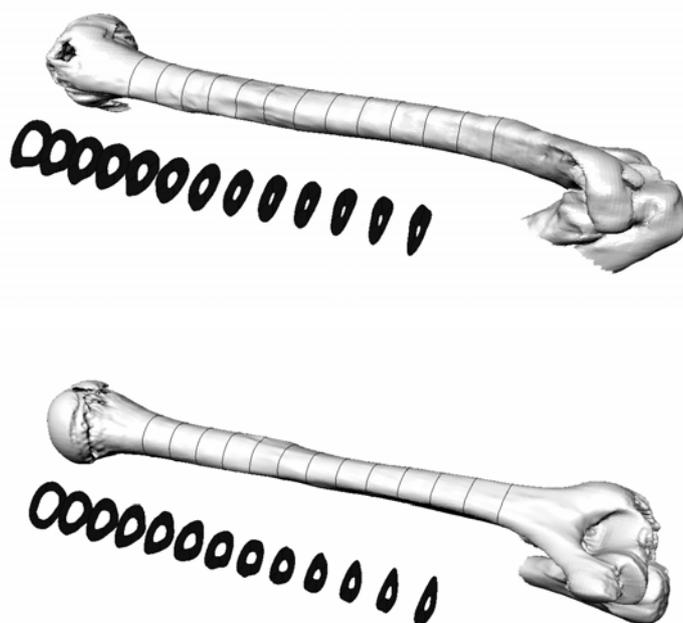
Anche in questo caso, sempre conformemente a quanto già eseguito sui resti del Romito 7, è stata effettuata un'ulteriore analisi sulle sezioni degli omeri.

E' opportuno ricordare che in questo caso i modelli digitali dei distretti scheletrici sono stati realizzati attraverso una ricostruzione a partire dai dati ottenuti da una Tomografia Computerizzata e non attraverso un'acquisizione tramite laser-scanner come nel caso del Romito. Come già ricordato, questa operazione consente di avere informazioni di tipo volumetrico e non solo superficiale, sulle strutture scheletriche analizzate, e quindi, permette, nel caso di analisi delle sezioni ossee, di ottenere informazioni sulla superficie totale, corticale e midollare dei modelli digitali della mummia.

Viene quindi, presentato uno studio di morfometria virtuale degli omeri reso possibile grazie all'impiego di modelli 3D completi delle superfici esterne ed interne dell'osso, evidenziando le potenzialità

dell'approccio virtuale e le prospettive di sviluppi innovativi che esso può offrire nel campo della morfologia e morfometria scheletrica.

Sui modelli 3D degli omeri della mummia in esame è stata effettuata una serie di sezioni virtuali delle diafisi al fine di analizzare le aree e i perimetri di ogni sezione. Dopo aver orientato l'osso, secondo lo stesso procedimento descritto nel capitolo relativo all'analisi del Romito 7, sono stati determinati i limiti della diafisi da sottoporre a sezione. Nello specifico, partendo dall'epifisi distale, sono state eseguite 13 sezioni diafisarie, secondo un passo pari al 5% della lunghezza fisiologica dell'omero, comprese tra il 20% e l'80% di detta lunghezza, in modo tale da escludere entrambe le epifisi. Le 13 sezioni ottenute sono quindi relative al 60% della lunghezza fisiologica dell'omero (Figura 5.10) [52].



*Figura 5.10 Estrapolazione delle sezioni della diafisi con passo pari al 5% della lunghezza fisiologica dell'omero sinistro (sopra) e dell'omero destro (sotto) della mummia in ambiente CAD*

Nella Tabella 5.5 vengono riportate le superfici (totale, corticale e midollare) ed i perimetri (esterno ed interno) delle sezioni identificate limitatamente al 20, 35, 50, 65 e 80% della lunghezza degli omeri. Le

## Studio di una mummia peruviana smembrata

sezioni eseguite sull'omero sinistro rivelano aree delle superfici di sezione totale e corticale, maggiori rispetto a quelle mostrate dall'osso controlaterale destro, dovute in particolare ad un aumento della parte corticale dell'osso, a cui si associa una diminuzione dell'area di sezione del canale midollare.

% lung	area totale			area interna			area corticale			perimetro esterno		perimetro interno	
	S	D	S-D	S	D	S-D	S	D	S-D	S	D	S	D
20	2,09	1,94	0,15	0,10	0,17	-0,07	1,99	1,77	0,22	5,33	5,15	1,16	1,52
35	1,95	1,70	0,25	0,08	0,16	-0,08	1,87	1,54	0,33	5,05	4,73	1,07	1,51
50	2,21	2,01	0,20	0,24	0,32	-0,08	1,97	1,69	0,27	5,39	5,18	1,79	2,06
65	2,51	2,19	0,32	0,36	0,42	-0,05	2,14	1,77	0,37	5,72	5,37	2,17	2,36
80	3,13	2,88	0,25	0,99	1,01	-0,02	2,14	1,87	0,27	6,44	6,14	3,60	3,65

*Tabella 5.5 Metodo per la stima della statura della mummia a partire dalla misura della lunghezza massima degli omeri*

Nella Figura 5.11, relativa alla sezione effettuata al 50% della lunghezza, è possibile valutare visivamente, non solo la differenza nella morfologia della sezione fra le due ossa controlaterali, ma appare anche evidente il differente sviluppo morfometrico e, in particolare, dello spessore della corticale, nei due omeri.



*Figura 5.11 Confronto delle sezioni a metà diafasi degli omeri*

### 5.5 Valutazione della deformazione cranica artificiale

Nell'ultima fase di questo progetto, infine, è stata valutata e classificata la deformazione cranica artificiale, indotta sul soggetto in esame, tramite analisi comparativa tra i dati rilevati sul modello digitale del cranio e quelli presenti in letteratura.

Le deformazioni craniche artificiali, imputabili alla tradizione culturale locale, erano, infatti, particolarmente diffuse tra le civiltà precolombiane nell'America Latina [53], [54]. Si tratta di un argomento più volte trattato nella letteratura scientifica, non solo per il fascino che riveste, ma soprattutto per il fatto che diverse popolazioni, nel corso della storia delle civiltà, hanno fatto ricorso e continuano a coltivare questa pratica.

Generalmente sono riconosciuti due metodi di deformazione, quella anulare e quella tabulare. La prima prevede l'utilizzo di bende che vengono avvolte attorno al cranio dell'individuo, mentre la seconda fa ricorso a tavolette, posizionate sul cranio e fissate a questo tramite cinghie o bende, oppure ad apposite culle. Entrambe le tipologie, in relazione a vari accorgimenti che logicamente dipendono dall'esatta posizione del bendaggio (per quella anulare) e delle tavolette (per quella tabulare), sono suddivise in oblique o erette. Inoltre, anche all'interno di questa grossolana suddivisione è possibile riconoscere ulteriori sottotipi che rivestono la condizione di varianti regionali o popolazionistiche.

Lo studio delle deformazioni craniche ha una lunga storia, principalmente basata sul confronto degli indici antropometrici e in presenza di resti scheletrici, l'analisi morfometrica del cranio viene condotta mediante gli strumenti meccanici tipici dell'approccio antropologico tradizionale (Figura 5.12). E' evidente però, che le operazioni di misurazione, facilmente eseguibili sullo scheletro, diventano problematiche sul cranio mummificato sia per la presenza di materia organica che ostacola la misurazione, sia perché molte delle misure utili non possono concretamente essere effettuate, sia perché l'utilizzo di strumenti di misura meccanici possono gravemente danneggiare l'integrità della mummia.



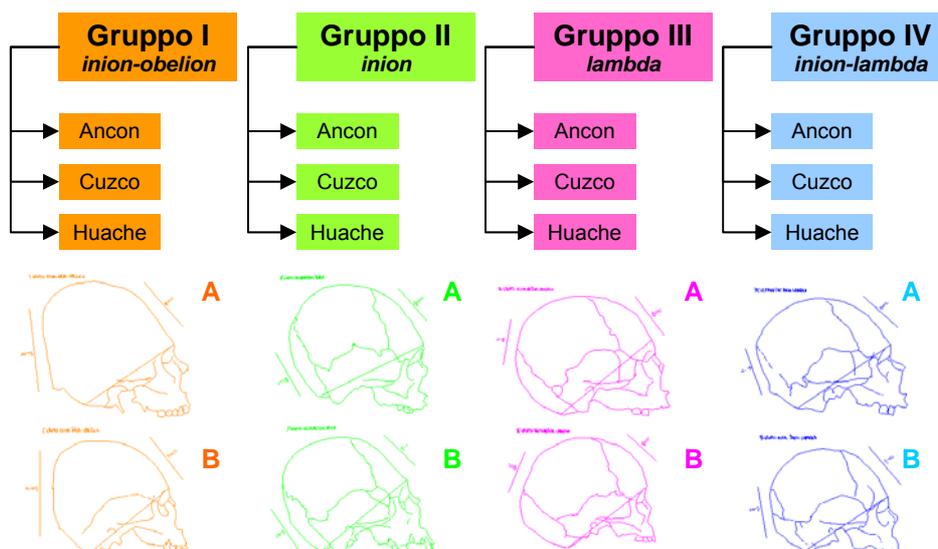
*Figura 5.12 Esempio di misura del cranio mediante gli strumenti meccanici tipici dell'approccio antropologico tradizionale*

Nel caso di resti mummificati quindi, è necessario ricorrere a tecnologie più sofisticate per evitare di danneggiare il tessuto organico che riveste le parti scheletriche. A questo proposito, ci si avvale di tecniche radiografiche ma soprattutto si fa ricorso alla tomografia computerizzata [55], [56](Hughes et al., 2005; Winder et al., 2006), attraverso cui è possibile ottenere modelli digitali della sola struttura scheletrica del resto mummificato e determinare tutte le misure utili per il calcolo degli indici antropometrici necessari.

Considerando la provenienza dalla necropoli peruviana di Ancòn della mummia oggetto di studio, sono stati presi come riferimento, per le analisi comparative delle deformazioni craniche, i lavori del Pardini inerenti la necropoli di Ancòn, a cui sono stati aggiunti, per avere un quadro di confronto più rappresentativo, i lavori relativi alle necropoli peruviane di Cuzco e di Huache. Nello specifico, Pardini riconosce che la maggior parte delle regioni peruviane sono caratterizzate da deformazione di tipo tabulare, antero-posteriore, e distingue quattro gruppi [57], [58], [59], (Figura 5.13):

- Gruppo I: deformazione tipo inion-obelica;
- Gruppo II: deformazione tipo iniaca;
- Gruppo III: deformazione tipo lambdica;
- Gruppo IV: deformazione tipo inion-lambdica.

Inoltre, Pardini, per ogni tipo di classificazione, individua alcuni profili tipici (indicati con A e B), con la posizione delle tavolette impiegate per indurre la relativa deformazione e raccoglie i valori medi di una serie di indici antropometrici, per una valutazione quantitativa delle deformazioni stesse.



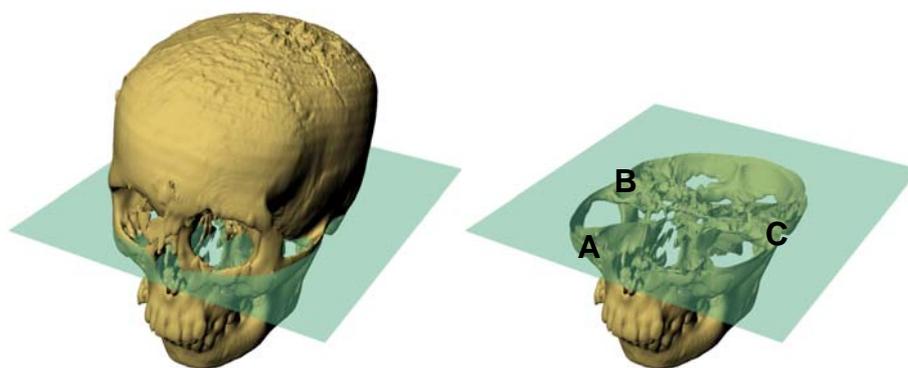
Indici antropometrici	Gruppo I			Gruppo II			Gruppo III			Gruppo IV		
	inion-obelion			inion			lambda			inion-lambda		
	Ancon	Cuzco	Huache	Ancon	Cuzco	Huache	Ancon	Cuzco	Huache	Ancon	Cuzco	Huache
I. cr. orizz. (8/1)	93,27	76,81	96,20	96,19	72,04	99,72	82,14	77,17	82,64	88,89	77,31	90,33
I. alt./larg. (17/8)	88,70	105,64	85,86	80,80	104,08	77,95	92,69	97,50	90,07	87,66	101,11	86,83
I. alt./lung. (17/1)	82,42	81,39	82,10	77,47	74,85	77,64	75,96	75,08	74,33	77,75	78,02	78,44
I. medio di alt. (17½(1+8))	85,35	91,72	83,67	79,04	87,22	77,79	83,40	84,54	81,40	82,38	88,15	82,39
I. fronto-trasv. (9/10)	78,58	80,36	77,66	80,45	82,60	75,94	81,34	80,29	80,05	79,48	80,22	78,37
I. seg. ant. /3	50,10	47,09	48,90	46,54	46,14	47,04	47,46	45,53	45,96	51,42	45,67	47,93
I. curv. del pariet. (30/27)	86,36	83,83	85,60	90,82	85,36	90,72	89,84	89,12	89,92	89,90	88,03	89,16
I. curv. dell'occ. sup (31a/28a)	98,29	97,01	98,38	94,50	93,89	94,95	95,51	91,66	95,12	96,30	94,63	97,98
Angolo di Reicher	129,38	133,46	128,50	132,87	136,00	132,00	122,40	122,35	119,17	126,49	125,00	125,67
Angolo di Falkenburger I	87,78	88,54	86,17	88,70	91,20	88,50	89,12	87,50	88,25	88,90	87,57	87,67
Angolo di Falkenburger II	0,48	1,30	1,67	5,90	3,18	5,00	2,06	2,35	2,33	4,38	3,71	3,67
Angolo di Klaatsch	92,18	94,38	90,33	93,19	99,37	93,50	90,68	90,92	91,17	92,79	93,64	91,00
Angolo basion-opistion (34)	-4,08	-6,27	-7,50	-2,03	1,07	-0,67	-6,28	-8,78	-6,50	-3,90	-0,30	-3,00
I. faciale sup. (48/45)	50,96	52,88	49,93	50,15	53,11	50,26	50,67	49,94	50,24	51,32	50,88	51,91
I. nasale (54/55)	46,21	47,04	43,81	45,86	47,83	44,89	48,85	51,19	48,49	47,73	49,91	45,91
Ang. Nasion-prostion (72)	83,34	79,33	83,17	82,24	79,75	81,33	82,32	84,93	82,20	82,49	82,93	83,33

Figura 5.13 Classificazione delle deformazioni craniche artificiali, relativa alla posizione delle tavolette e al luogo di origine, secondo Pardini: esempi di profili tipici e tabella riassuntiva con gli indici antropometrici per la valutazione quantitativa delle deformazioni

### 5.5.1 Identificazione degli indici antropometrici

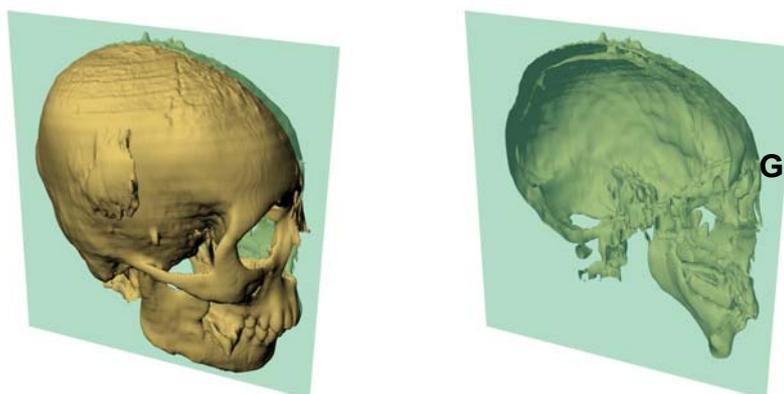
Le misure e, conseguentemente, gli indici antropometrici utilizzati da Pardini per caratterizzare i quattro gruppi sono stati calcolati per il cranio della mummia oggetto di studio.

Innanzitutto il modello 3D del cranio, preventivamente isolato dal resto del busto, è stato orientato secondo il piano di Francoforte, identificando preventivamente i tre punti di repere impiegati nei metodi di misurazione tradizionale: il margine inferiore dell'orbita sinistra (punto A), ed i due porion rispettivamente sinistro e destro (punti B e C), come indicato in Figura 5.14.



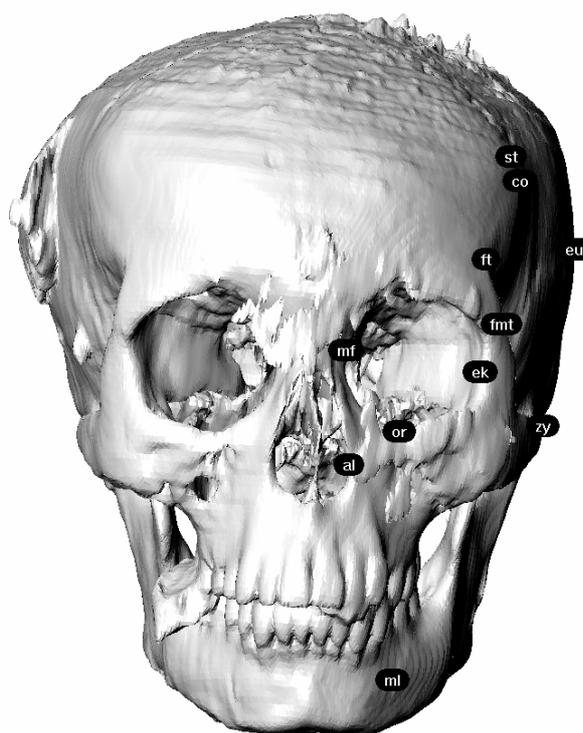
*Figura 5.14 Identificazione del piano di Francoforte*

Per definire i landmark utili per le successive operazioni di misurazione è stato quindi, necessario determinare il piano sagittale mediano. Nell'approccio tradizionale si considera generalmente come piano mediano sagittale quello passante per la sutura sagittale. Tuttavia nell'approccio digitale emergono maggiormente gli errori dovuti ad un piano così definito, dato che la sutura sagittale si presenta generalmente ad andamento irregolare. Per determinare un procedimento più oggettivo, nel presente studio l'asse sagittale mediano è stato identificato come l'asse passante per la glabella (punto G) ed il punto medio del segmento congiungente i due porion (punti B e C), precedentemente individuati (Figura 5.15).



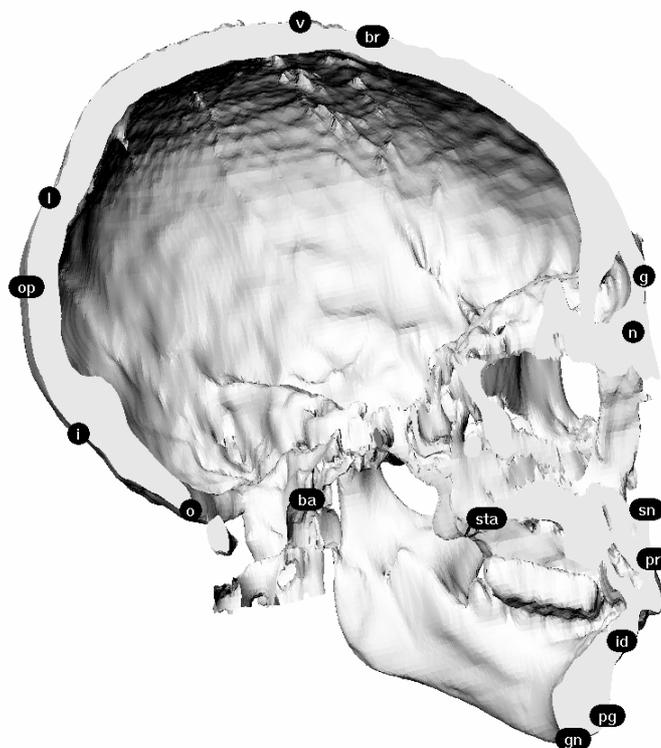
*Figura 5.15 Identificazione del piano sagittale mediano*

Successivamente è stato quindi, possibile identificare sul modello digitale del cranio una prima serie di landmark bilaterali (Figura 5.16) da utilizzare per la successiva analisi comparativa.



*Figura 5.16 Identificazione dei landmark bilaterali: mental foramen (ml), gonion (go), ectomolare (ecm), inferior zygion-maxillary point (zmi), alare (al), zygion (zy), lower inferior orbital point (or), ectoconchion (ek), maxillofrontale (mf), fronto-zigomatic (fnt), frontotemporale (ft), coronale (co), euryon (eu), stefanion (st)*

Inoltre, sezionando il cranio lungo il piano sagittale mediano, è stata identificata una seconda serie di landmark necessari per effettuare l'analisi comparativa (Figura 5.17).



*Figura 5.17 Identificazione dei landmark sulla sezione medio-sagittale: gnation (gn), pogonion (pg), infradentale (id), prosthion (pr), staphilion (sta), subnasale (sn), nasion (n), glabella (g), bregma (br), vertex (v), obelion (ob), lambda (l), opistocranion (op), inion (i), opistion (o), basion (ba)*

Oltre ai landmark individuati, sono state ricavate, sempre sulla sezione medio-sagittale, una serie di misure angolari (Figura 5.18).

Così facendo, sono state raccolte quindi, tutte le misure, lineari ed angolari, e sono stati calcolati tutti gli indici antropometrici (Tabella 5.6) necessari per effettuare il confronto, in analogia ai dati raccolti da Pardini e utilizzati per discriminare sia la tipologia di deformazione, che il luogo di appartenenza dei soggetti esaminati.

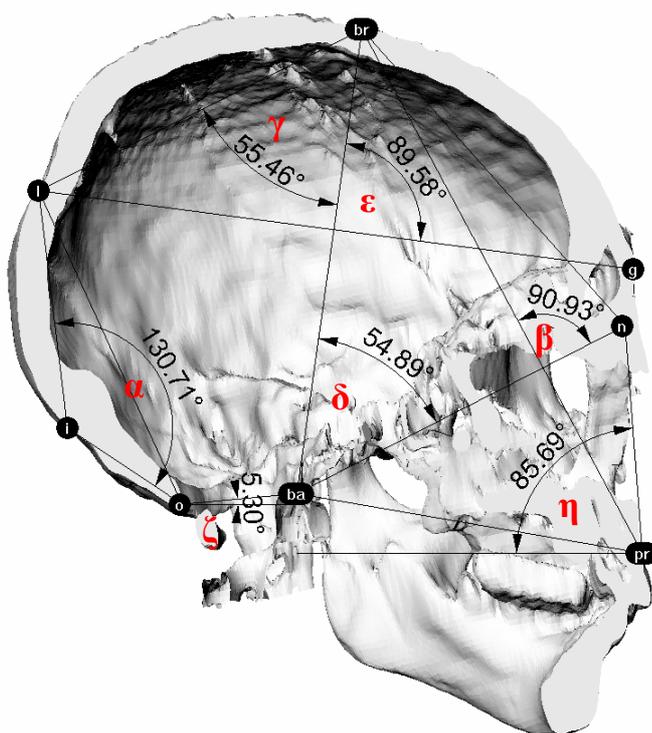


Figura 5.18 Identificazione degli angoli utilizzati da Pardini: Reicher ( $\alpha$ ), Falkenburger I ( $\beta$ ), Falkenburger II ( $\gamma$ - $\delta$ ), Klaatsch ( $\epsilon$ ), basion-opistion ( $\zeta$ ), nasion-prostion ( $\eta$ )

N.	Indici antropometrici	Misura
1	I. cr. orizz (8/1)	85,93 mm
2	I. alt./larg. (17/8)	88,24 mm
3	I. alt./lung. (17/1)	75,83 mm
4	I. medio di alt. ( $17\frac{1}{2}(1+8)$ )	81,56 mm
5	I. fronto-trasv. (9/10)	82,41 mm
6	I. seg. ant. /3	50,57 mm
7	I. curv. del pariet. (30/27)	85,38 mm
8	I. curv. dell'occ. sup (31a/28a)	93,46 mm
9	Angolo di Reicher ( $\alpha$ )	130,71°
10	Angolo di Falkenburger I ( $\beta$ )	90,93°
11	Angolo di Falkenburger II ( $\gamma$ - $\delta$ )	0,57°
12	Angolo di Klaatsch ( $\epsilon$ )	89,58°
13	Angolo basion-opistion (34) ( $\zeta$ )	-5,30°
14	I. faciale sup. (48/45)	49,13 mm
15	I. nasale (54/55)	41,84 mm
16	Ang. Nasion-prostion (72) ( $\eta$ )	85,69°

Tabella 5.6 Indici antropometrici calcolati per il cranio della mummia oggetto di studio con i numeri di riferimento proposti da Martin Saller, 1956-1959 [60]

### **5.5.2 Analisi comparativa dei dati**

Come si è visto, gli studi antropometrici forniscono rilevanti banche dati che si riferiscono alle molteplici misurazioni effettuate. Usualmente i dati vengono organizzati sotto forma di una matrice del tipo:

$$\mathbf{X} \equiv \mathbf{X}_{n,p} \equiv (x_{ij})$$

chiamata anche matrice unità-variabili, in quanto le righe descrivono  $n$  unità statistiche, caratterizzate da  $p$  variabili quantitative espresse tramite le colonne. In questo caso le unità statistiche sono rappresentate dalle 12 tipologie di deformazioni craniche individuate da Pardini (suddivise nei 4 gruppi) e dal caso di studio in esame, mentre le variabili sono rappresentate dai 16 indici antropometrici raccolti (vedi tabella 5.6).

È evidente, quindi, che, se si hanno molte unità statistiche individuate da numerose variabili, un loro confronto diretto rischia di diventare estremamente complesso; pertanto si ricorre all'utilizzo di tecniche matematiche di analisi multidimensionali dei dati [61], [62], [63], come:

1) la *cluster analysis* che consente di raggruppare le curve in vari insiemi di riferimento, mediante procedure agglomerative gerarchiche operanti su una matrice delle distanze riferita sempre allo spazio multidimensionale  $R^p$ . Si noti che di questi metodi esistono molteplici varianti, ed è consigliabile utilizzarne diversi contemporaneamente sullo stesso insieme di dati: infatti, la loro convergenza permette in molti casi di confermare in modo più preciso precedenti ipotesi relazionali fra i dati e/o di suggerirne di nuove;

2) l'*analisi in componenti principali* (PCA: *principal component analysis*) consente invece di interpretare le unità come  $n$  punti in uno spazio astratto a più dimensioni ( $R^p$ ), da cui estrarre sezioni significative (cioè, in pratica aggregazioni di punti) in familiari spazi a due od al

massimo tre dimensioni, ricavate combinando linearmente le variabili iniziali.

In questo lavoro sono presentati soltanto i risultati ottenuti con la *cluster analysis*, anticipando, tuttavia, che attraverso la PCA, il cui sviluppo sarà presentato in successivi lavori, si può ottenere una loro ulteriore conferma. Per quanto riguarda la tecnica utilizzata in questo caso, si è partiti sostituendo alla matrice dati iniziale una matrice con i dati standardizzati,

$$x_{ij} \rightarrow \frac{x_{ij} - m_j}{s_j}$$

dove  $m_j$  e  $s_j$  sono rispettivamente il valor medio e la deviazione standard della  $j$ -esima colonna della matrice. In questo modo, si superano limitazioni connesse al fatto che i dati possono presentare unità di misure diverse e/o ordini di grandezza molto variabili. Successivamente è stata definita una distanza (o metrica) di tipo euclideo tra due punti  $x_i, x_j \in R^p$  della nuova matrice, che è un caso particolare di una distanza di Minkowsky di ordine  $k$  quando  $k = 2$ :

$${}_k d_{ij} = \left[ \sum_{s=1}^p |x_{is} - x_{js}|^k \right]^{1/k}, \quad k \geq 1$$

L'utilizzo di questa distanza  ${}_2 d_{ij}$  si è dimostrato adeguato per i nostri dati, e, comunque, viene confermato sfruttando, ad esempio, altre distanze, come la cosiddetta distanza a blocchi (o di Manhattan) data da  ${}_1 d_{ij}$ .

A questo punto, sfruttando il toolbox *Statistics* che lavora in ambiente **Matlab**, è stata prodotta una matrice delle distanze fra le  $n$  unità statistiche in esame, di dimensione  $n \times n$ , che risulta simmetrica e semidefinita positiva, con valori nulli sulla diagonale principale (le

## Studio di una mummia peruviana smembrata

distanze di una unità da se stessa sono ovviamente zero), rappresentata in Figura 5.19.

		Gruppo I			Gruppo II			Gruppo III			Gruppo IV		
		Ancòn	Cuzco	Huache	Ancòn	Cuzco	Huache	Ancòn	Cuzco	Huache	Ancòn	Cuzco	Huache
Gruppo I	Ancòn	0,00	5,07	2,57	5,60	7,77	5,58	4,69	6,45	5,40	3,86	5,18	3,28
	Cuzco	5,07	0,00	6,19	7,42	5,23	7,97	5,75	7,08	6,64	6,12	5,06	5,91
	Huache	2,57	6,19	0,00	5,76	9,24	5,56	5,38	6,62	5,56	4,84	6,12	3,72
Gruppo II	Ancòn	5,60	7,42	5,76	0,00	7,05	2,72	4,62	6,04	4,66	3,75	5,10	3,87
	Cuzco	7,77	5,23	9,24	7,05	0,00	8,03	6,63	7,84	7,32	6,82	5,47	7,35
	Huache	5,58	7,97	5,56	2,72	8,03	0,00	5,73	7,11	5,43	4,32	6,05	4,00
Gruppo III	Ancòn	4,69	5,75	5,38	4,62	6,63	5,73	0,00	3,38	1,70	3,34	3,69	3,59
	Cuzco	6,45	7,08	6,62	6,04	7,84	7,11	3,38	0,00	3,15	5,53	4,11	5,55
	Huache	5,40	6,64	5,56	4,66	7,32	5,43	1,70	3,15	0,00	4,06	4,01	3,81
Gruppo IV	Ancòn	3,86	6,12	4,84	3,75	6,82	4,32	3,34	5,53	4,06	0,00	4,51	2,65
	Cuzco	5,18	5,06	6,12	5,10	5,47	6,05	3,69	4,11	4,01	4,51	0,00	4,23
	Huache	3,28	5,91	3,72	3,87	7,35	4,00	3,59	5,55	3,81	2,65	4,23	0,00
Mummia		5,62	7,70	6,07	6,09	8,07	7,06	5,17	6,34	5,87	5,57	6,87	6,03

*Figura 5.19 Analisi della distanza euclidea standardizzata al quadrato*

Dall'analisi dei dati si deduce che la mummia oggetto di studio è stata sottoposta a una deformazione cranica artificiale del gruppo III, ossia una deformazione di tipo lambda, e viene confermata la provenienza dalla necropoli di Ancòn. Inoltre si può evidenziare, per ogni tipologia di deformazione, la maggior similitudine con i dati relativi alla necropoli di Ancòn, rispetto a quelli delle necropoli di Cuzco e di Huache, a maggior conferma quindi dell'origine dei resti mummificati. In ultima analisi, si può osservare che, come secondo risultato di similitudine, emerge la deformazione cranica artificiale del gruppo IV, sempre di Ancòn, che, congruentemente con i profili tracciati da Pardini e rappresentati in Figura 5.13, è quella che meno si discosta dal gruppo III.

Oltre all'analisi quantitativa appena descritta, si è proceduto poi ad un confronto del profilo della volta cranica del modello del cranio della mummia, sezionato sul piano medio-sagittale, con le immagini dei profili A e B rappresentativi del gruppo di deformazione cranica di riferimento riportati da Pardini in Figura 5.13.

Ciascun profilo di riferimento (A e B) è stato ruotato e scalato in modo da sovrapporre la linea congiungente i punti opisthion e glabella con i rispettivi punti del profilo del cranio della mummia, in modo da poter effettuare un confronto attraverso un sistema oggettivo e riproducibile (Figura 5.20). Da un'analisi qualitativa e quantitativa, basata sul confronto delle aree comprese tra il profilo della volta cranica e la congiungente opisthion-glabella, è emersa una buona corrispondenza con il profilo A.

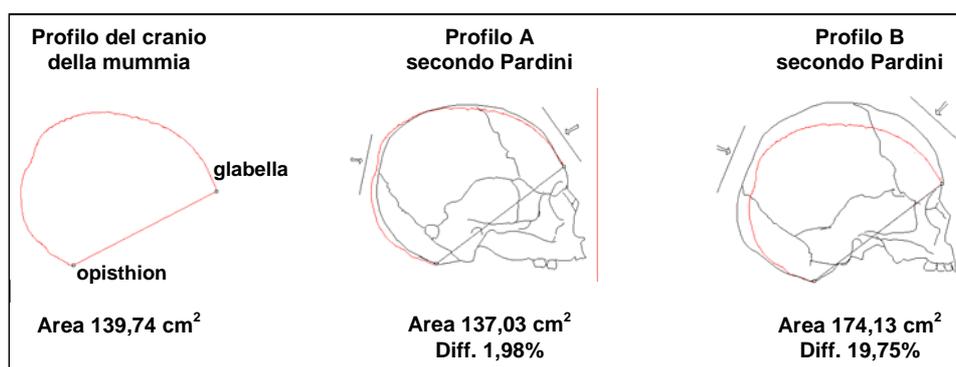
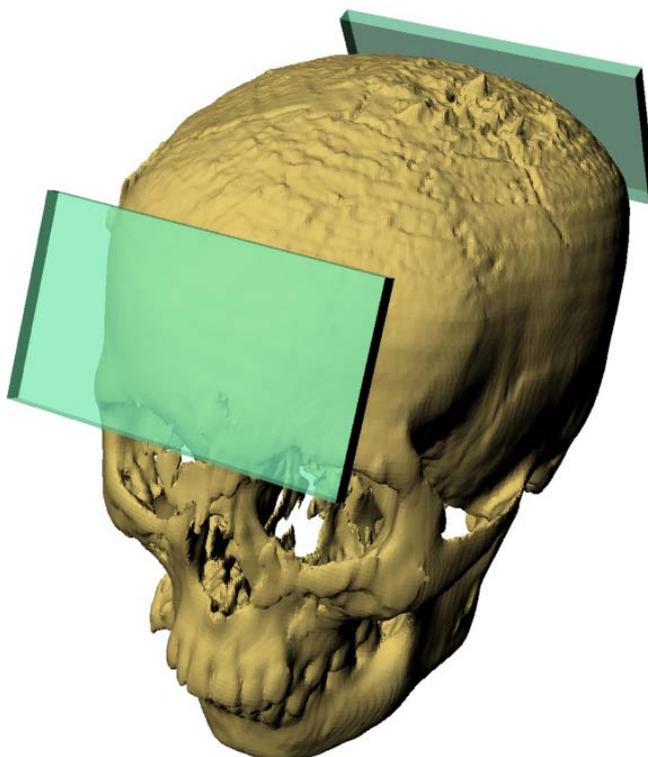


Figura 5.20 Confronto tra il profilo del cranio della mummia e i profili di riferimento disegnati da Pardini e relativi alla deformazione lambdaica di Ancòn

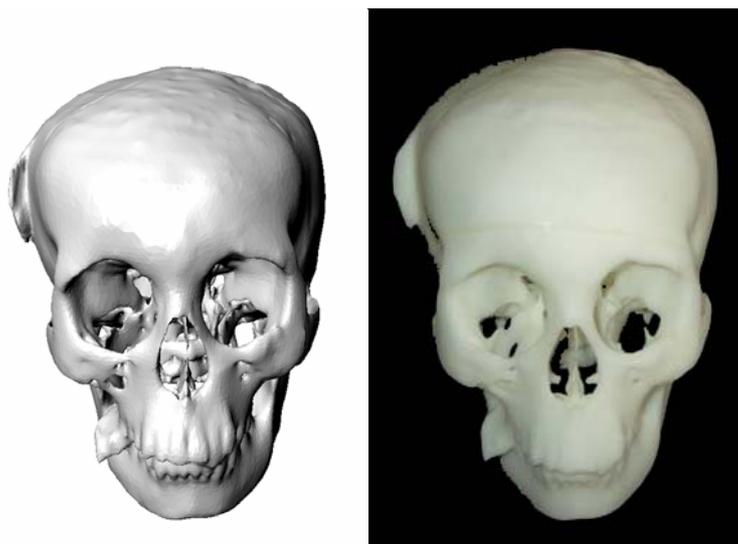
Questo ha permesso di stimare la posizione delle tavolette sul cranio della mummia, prendendo come riferimento le posizioni disegnate da Pardini e relative al profilo A. In conclusione, è stato quindi, possibile passare dal modello bidimensionale, disegnato da Pardini, ad un modello tridimensionale, modellato in ambiente CAD, in cui sono state disegnate in 3D le tavolette di compressione cranica nella posizione relativa al modello digitale del cranio della mummia in esame (Figura 5.21).



*Figura 5.21 Posizione delle tavolette di compressione cranica nella posizione relativa al modello digitale del cranio della mummia in esame*

Infine, attraverso il sistema di Prototipazione Rapida Dimension SST, è stato realizzato un modello fisico del cranio della mummia (Figura 5.22). Dall'analisi quindi, sia del modello digitale che di quello fisico realizzato, è stato possibile sottolineare alcuni particolari presenti sul reperto mummificato, come l'esistenza di una tumefazione calcificata sul parietale destro e la presenza di un artefatto posto nella bocca della mummia.

E' opportuno ricordare come l'analisi visiva e tattile del solo cranio della mummia non sia assolutamente possibile avendo a disposizione solo i resti reali mummificati, proprio per la presenza dei tessuti molli rimasti attaccati alla struttura scheletrica. L'esistenza di modelli digitali e fisici, rimane quindi, l'unica possibilità per indagini più approfondite del reperto.



*Figura 5.22 Confronto tra il modello digitale e il modello fisico del cranio della mummia*

### **5.6 Conclusioni**

Il processo metodologico descritto in questo progetto ha permesso di superare i diversi problemi che normalmente si riscontrano nel momento in cui l'oggetto di studio è rappresentato da resti umani mummificati. A partire da questi problemi, che rendono riduttivo e deleterio, per l'integrità del bene stesso, un approccio tradizionale, le competenze antropologiche classiche hanno trovato un utile supporto nell'utilizzo di metodologie non invasive che, a partire dalla scansione del reperto, hanno consentito di lavorare sul modello virtuale della mummia. L'approccio virtuale è stato, quindi, suddiviso in diverse fasi, alcune necessarie alla restituzione tridimensionale del reperto, altre utili per l'acquisizione di informazioni d'interesse antropologico o per la conservazione e la valorizzazione del reperto.

In primo luogo, l'operazione di riassettaggio dei modelli digitali dei singoli frammenti in un unico modello completo della mummia è risultata particolarmente significativa e di indubbia utilità, in quanto ha permesso di eseguire un restauro virtuale evitando i problemi che inevitabilmente si riscontrano al momento dell'effettivo restauro delle mummie. È evidente infatti che ogni operazione manuale sul reperto

mummificato avrebbe potuto provocare danni irreparabili, e le diverse operazioni necessarie allo scopo di ricongiungere i diversi frammenti avrebbero aumentato notevolmente la probabilità di tali danni. Poter disporre di un modello virtuale da impiegare per testare le diverse ipotesi e soluzioni di intervento, ri assemblando per esempio le parti smembrate, può fornire al restauratore un modello 3D come guida per le diverse fasi in cui si articolerà successivamente il restauro reale. Questo processo mette a disposizione non solo l'immagine integrale del modello definitivo, cioè il risultato a cui si vuole giungere, ma anche la successione logica e corretta delle diverse fasi che devono susseguirsi per il raggiungimento del risultato finale nel minor numero di passaggi possibile.

Infine, una serie di analisi antropologiche sono state, quindi, effettuate esaminando virtualmente la struttura scheletrica interna della mummia:

- i modelli scheletrici digitali sono stati orientati e misurati secondo le procedure convenzionalmente stabilite oppure, nel caso non siano presenti, in base a nuovi criteri e metodi elaborati di proposito;

- è stato possibile definire e memorizzare sul modello digitale 3D i landmark in corrispondenza dei punti di repere utili per le successive operazioni di misurazione o di ricostruzione virtuale;

- le misurazioni sul modello virtuale sono risultate rigorose, in quanto meno inficiate da errori accidentali, e ripetibili, per la presenza dei landmark memorizzati;

- i modelli 3D ottenuti tramite CT hanno consentito di effettuare rilevazioni morfometriche impossibili sul reperto reale originale, come ad esempio l'acquisizione di dati sulle sezioni rispettivamente della corticale e del canale midollare della diafisi degli omeri;

- il modello 3D del cranio è stato utilizzato per valutare la presenza e la tipologia di deformazione cranica artificiale presente sul soggetto confrontando i dati rilevati sul modello digitale con quelli presenti in letteratura e ottenuti attraverso misurazioni su resti esclusivamente scheletrici.



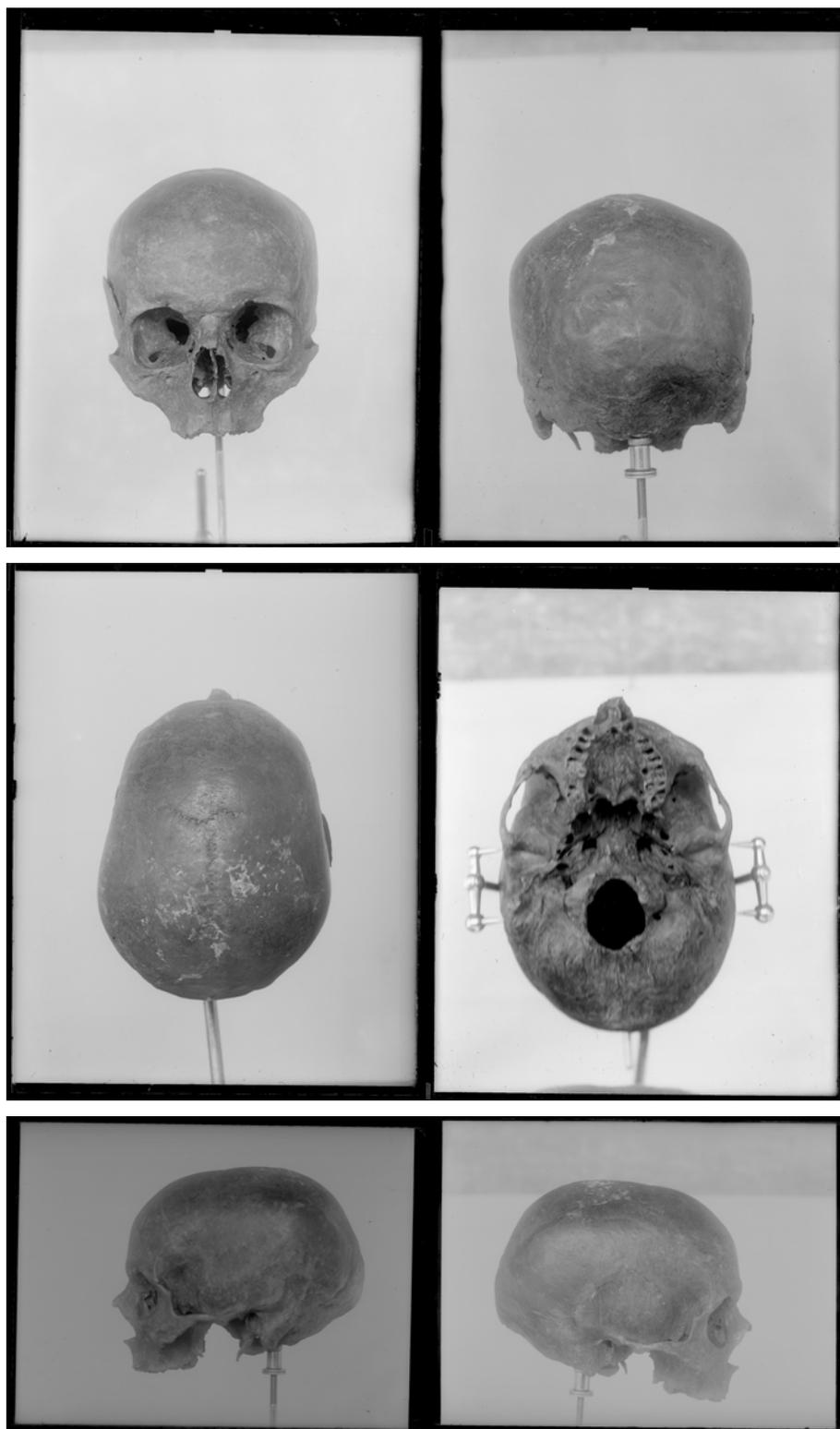
## **Capitolo 6 - La ricostruzione del volto di Dante**

### **6.1 Il caso di studio**

A differenza dei casi di studio precedenti, questo capitolo descrive un approccio combinato di impiego di metodologie tradizionali e manuali con metodologie innovative e digitali, e i risultati che il loro utilizzo in modo congiunto può portare nell'ambito della ricostruzione facciale.

Il caso di studio proposto si riferisce alla ricostruzione del volto del poeta medioevale italiano Dante Alighieri a partire dai dati e dagli elementi raccolti dal Prof. Fabio Frassetto, docente di Antropologia presso l'Università di Bologna, a seguito della ricognizione effettuata sui resti del Poeta, conservati a Ravenna, nel 1921, sesto centenario della morte. Grazie a questo studio è possibile disporre di una descrizione molto accurata delle ossa di Dante corredata da ben 297 dati metrici inerenti tutto lo scheletro e da numerose fotografie in scala del calvario, cioè del cranio privo della mandibola (Figura 6.1), nelle diverse norme e di molte altre ossa [61]. Tra i resti, infatti, i denti e la mandibola non furono rinvenuti, perciò su di essi non esiste alcuna documentazione oggettiva, né morfometrica né fotografica, ma solo considerazioni di tipo ipotetico.

Il Frassetto, in base ai dati morfologici e metrici e alle fotografie del cranio di Dante, rilevati nel corso della ricognizione del 1921, riuscì a realizzare, nella metà del 1900, un calco del calvario del Poeta e quindi un modello che ne riproduceva fedelmente le caratteristiche morfologiche, dimensioni e le proporzioni antropometriche rilevate direttamente sullo reperto originale.



*Figura 6.1 Fotografie del calvario di Dante (fonte Mazzotti)*

E' evidente che per procedere alla ricostruzione del volto attraverso le tradizionali tecniche di antropologia forense è necessario disporre di un modello fisico completo del cranio. Nel presente lavoro si

descrive, quindi, il processo di ricostruzione geometrica del cranio di Dante Alighieri, completo di mandibola, attraverso l'impiego e l'integrazione degli strumenti e delle tecnologie, descritte nei primi capitoli, e la realizzazione del relativo modello fisico. L'aspetto maggiormente rilevante riguarda, in particolare, la metodologia di modellazione proposta per la generazione *ex-novo* della forma della mandibola partendo da un modello acquisito come riferimento. Il modello del cranio prototipato è servito poi da base per la fase successiva di ricostruzione facciale il cui risultato finale è stato reso possibile dal concorso, appunto, di tecnologie tradizionali e innovative.

### 6.2 Acquisizione 3D del calco del calvario

Il lavoro di questo progetto è partito dalla scansione 3D del calco in gesso del calvario eseguito dal Prof. Frassetto e rappresentato in Figura 6.2. In questa fase è stato utilizzato, come sistema di acquisizione, il laser scanner Konika Minolta VI910.



*Figura 6.2 Calco del calvario di Dante eseguito dal Prof. Frassetto*

Come già accennato, si tratta di un processo non invasivo in quanto basato sulla ripresa ottica dell'oggetto, che avviene quindi senza contatto fisico diretto.

Per campionare l'intera superficie del cranio è stato necessario effettuare 38 prese in totale: alcune dall'alto, altre dal basso e altre

lateralmente, ottenute ruotando il cranio su se stesso con angoli di 45°. L'acquisizione è stata effettuata montando l'ottica *middle* e cercando di garantire una sufficiente sovrapposizione tra le diverse prese, al fine di facilitarne l'allineamento attraverso il successivo procedimento di registrazione, come illustrato in Figura 6.3. Una volta terminata la registrazione di tutte le *range map* si è proceduto alla loro fusione in un'unica superficie poligonale che approssima la superficie del calco. La *mesh* finale è stata, inoltre, corretta in modo da risultare chiusa e priva di bordi aperti, nell'ottica della successiva fase di prototipazione, e il modello finale del calvario è risultato composto da 700.820 punti e 1.401.644 triangoli.

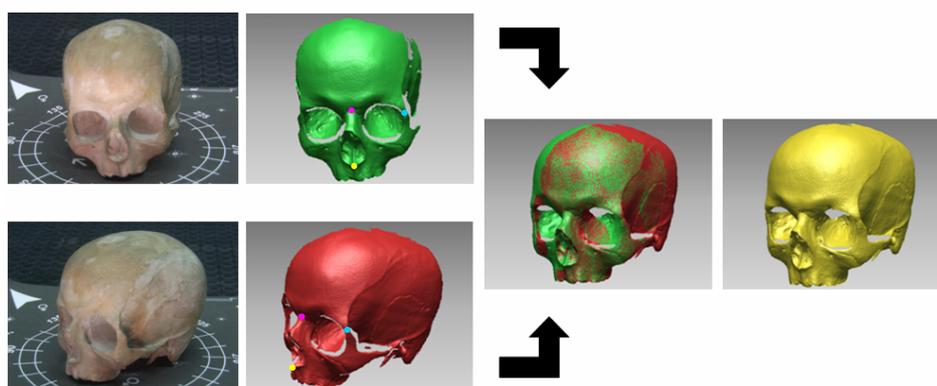


Figura 6.3 Ricostruzione del modello digitale del calvario

Al fine di verificare l'accuratezza del modello digitale ottenuto, attraverso il confronto con le misure eseguite dal Prof. Fassetto direttamente sul cranio di Dante, è stato eseguito un rilievo antropometrico virtuale, analogamente a quanto descritto nei precedenti casi di studio, nell'ambiente CAD **Rhino**.

In Figura 6.4 è rappresentato un disegno del cranio di Dante, eseguito dallo stesso Frassetto, con l'indicazione dei punti principali utilizzati per effettuare il rilievo antropometrico sul reperto originale durante la ricognizione effettuata.

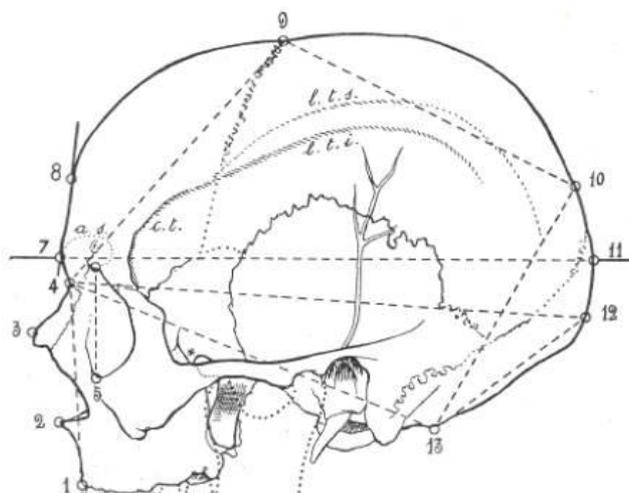


Figura 6.4 Disegno del cranio di Dante eseguito dal Prof. Frassetto, con l'indicazione dei punti utilizzati per le misure

Sul modello digitale sono stati, quindi, identificati e memorizzati gli stessi landmark utilizzati da Frassetto per le misure, come indicato in Figura 6.5.

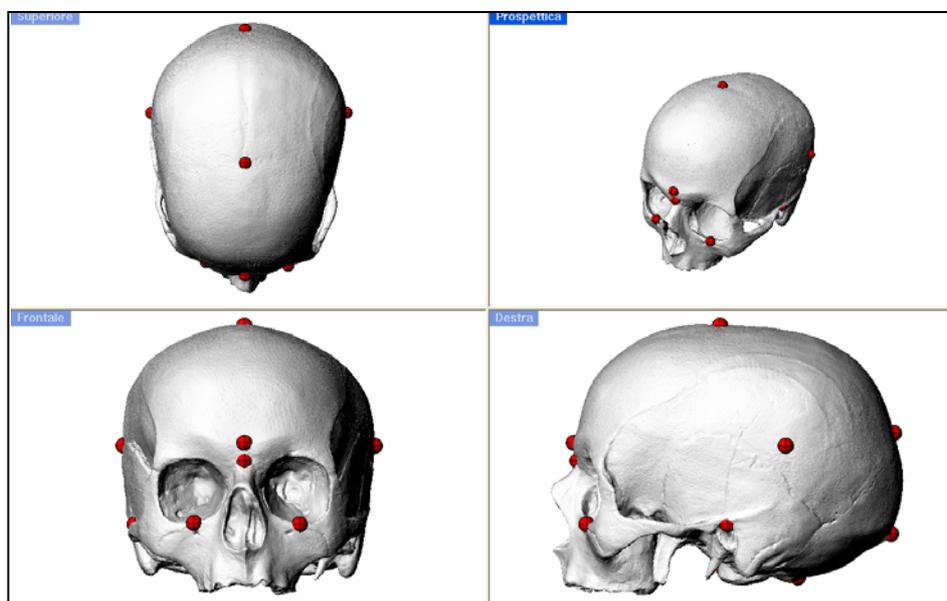


Figura 6.5 Identificazione dei landmark sul modello digitale

Le analisi morfometriche sono state eseguite rilevando, all'interno del sistema CAD, le quote sul modello digitale realizzato appoggiandosi ai landmark individuati, come illustrato in Figura 6.6, e sono state successivamente confrontate con quelle rilevate dal Frassetto direttamente

sul cranio originale. Il risultato di tale confronto ha confermato l'accuratezza del modello digitale, dal momento che il massimo scostamento rilevato per le principali misure è risultato sotto il millimetro.

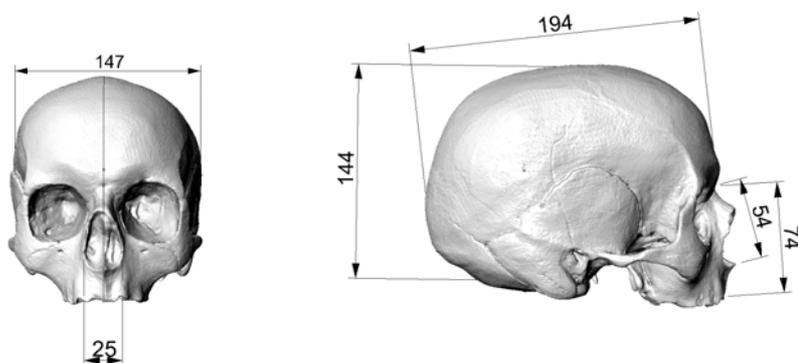


Figura 6.6 Misure antropometriche sul modello digitale del calvario

### 6.3 Acquisizione della mandibola di riferimento

A prescindere dagli accorgimenti tecnici necessari per la ricostruzione del volto (orientamento degli spessori, quantità di tessuto molle utilizzato), nonché di quelli più soggettivi che riguardano specifici distretti facciali (occhi, naso, bocca e orecchie), il problema fondamentale da risolvere riguarda la realizzazione della mandibola, dal momento che durante il sopralluogo del 1921, alcune ossa, tra cui purtroppo questa, non sono state rinvenute.

Considerando infatti che senza la mandibola non sarebbe possibile effettuare una ricostruzione facciale, è stato necessario ricostruire una mandibola che rispondesse per morfologia e morfometria alle caratteristiche del cranio di Dante, o meglio, che si adattasse al modello digitale del cranio realizzato. Se da un lato la ricostruzione *ex-novo* di una mandibola deve presentare certi requisiti che riflettono l'architettura intrinseca del cranio, dall'altro vi sono alcune caratteristiche che non possono essere congetture sulla base di questo (altezza e spessore del corpo mandibolare, dimensione del mento, ecc), caratteristiche che proprio per questo motivo rendono unica la mandibola di ciascun individuo. Le tecnologie di modellazione adottate hanno consentito non

solo la realizzazione di un modello digitale 3D della mandibola, ma anche di operare un maggior controllo nelle varie fasi in cui è stata articolata la ricostruzione.

La prima fase del lavoro ha previsto la selezione di una mandibola di riferimento da cui partire durante le successive fasi di modellazione. Sono stati quindi, esaminati 90 crani nella collezione di scheletri conservata presso l'Area di Antropologia de Dipartimento di Biologia Evoluzionistica Sperimentale dell'Università di Bologna, perché, dovendo operare una scelta, è sembrato opportuno selezionare la mandibola pertinente ad un cranio che, in primo luogo, per morfologia e, in secondo luogo (ma non necessariamente), per morfometria, somigliasse il più possibile al cranio del Poeta, come illustrato in Figura 6.7.

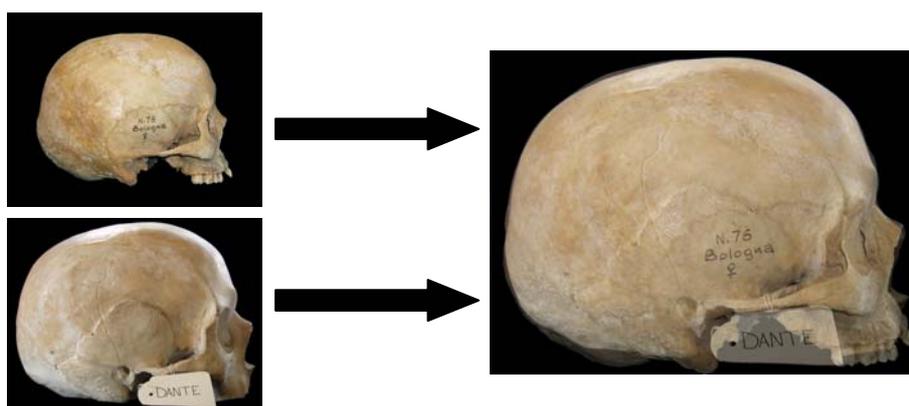


Figura 6.7 Scelta del cranio di riferimento

La mandibola di riferimento è stata, quindi, scansionata sempre con il laser scanner Konika Minolta VI910, ottenendo un modello digitale rappresentato da una *mesh* di 123.928 punti e 247.852 triangoli (Figura 6.8).

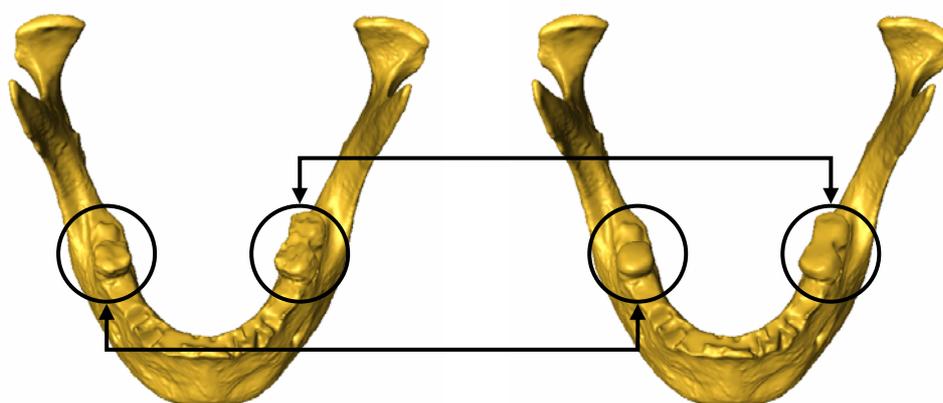


Figura 6.8 Mandibola di riferimento e relativo modello digitale

### 6.4 Modellazione del modello digitale della mandibola

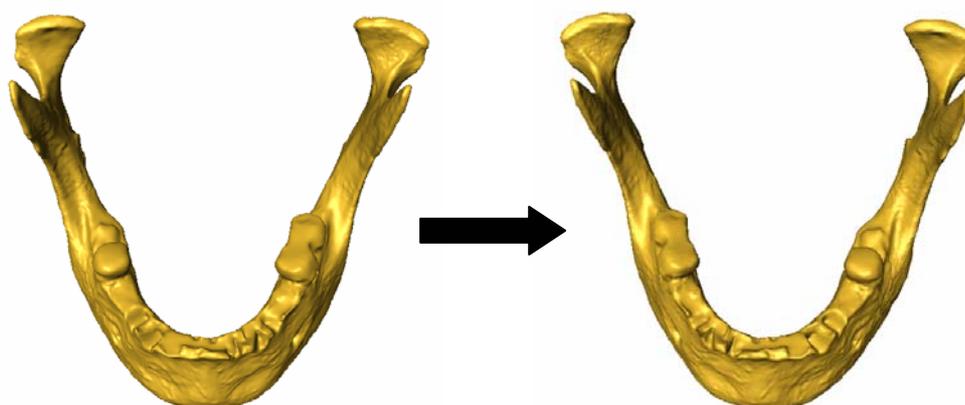
Questa mandibola è stata tuttavia sottoposta ad alcune trasformazioni al fine di risultare perfettamente compatibile con il calvario di Dante. La compatibilità ha comportato principalmente la corrispondenza di alcuni punti di riferimento tali da consentire il corretto accoppiamento delle ossa nelle superfici di contatto. Il passaggio dal modello scansionato al modello finale si è composto di una serie di passaggi intermedi riguardanti la simulazione della condizione di usura, l'asimmetria presente sia nella mandibola che nel cranio e l'adattamento della mandibola alla particolare morfologia del calvario, allargato nella parte posteriore e più stretto in quella anteriore.

Considerando che la mandibola di riferimento appartiene ad un soggetto relativamente giovane (sui 30 anni di età), i denti sono stati virtualmente "usurati", attraverso un'operazione di *smoothing*, fino a portare l'altezza della corona ad una misura compatibile con un soggetto di oltre 50 anni di età (Figura 6.9).



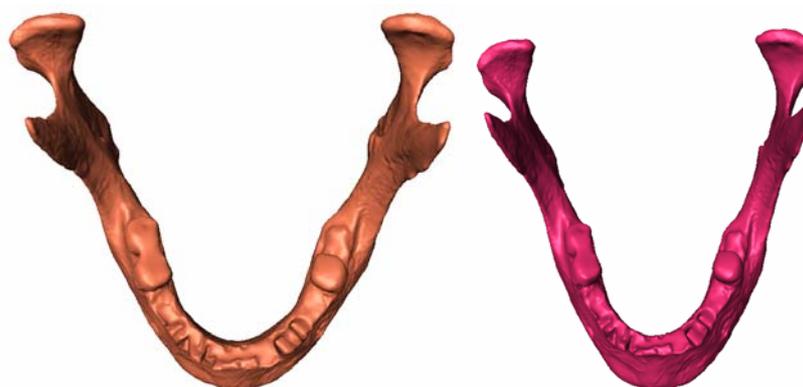
*Figura 6.9 Usura virtuale dei denti*

Il modello così ottenuto è stato successivamente specchiato rispetto al piano medio-sagittale, in quanto il processo condiloideo sinistro della mandibola risultava più grande del destro, mentre la superficie temporo-mandibolare del calco del calvario di Dante presentava la condizione opposta (Figura 6.10).



*Figura 6.10 La mandibola è stata specchiata rispetto al piano medio-sagittale*

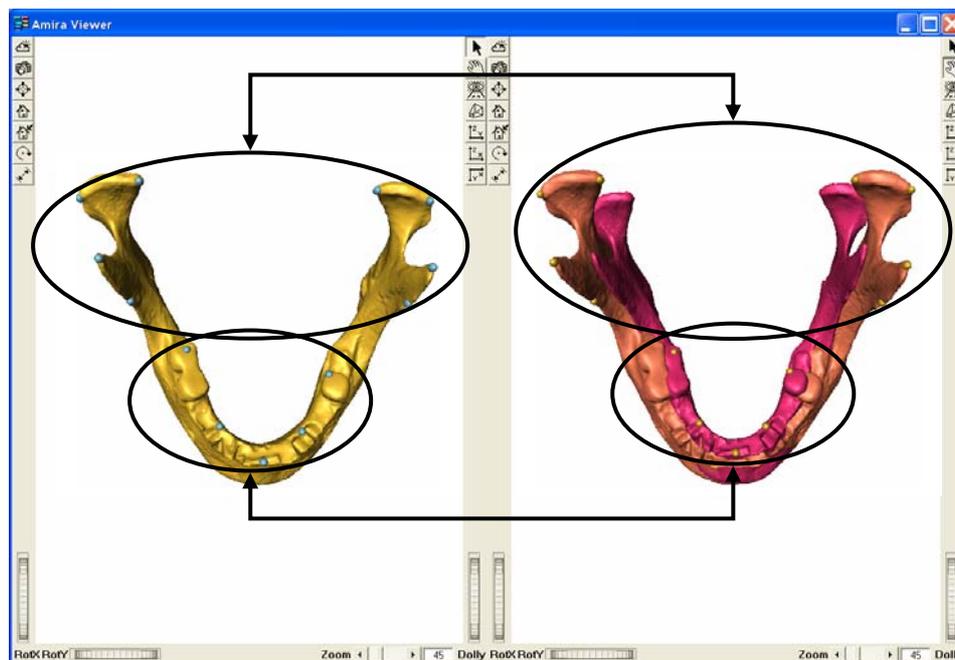
Da quest'ultimo modello ne sono stati ricavati due intermedi, necessari per guidare la successiva operazione di *warping*. Tali modelli, indicati di seguito con modello A e B, sono stati ottenuti con operazioni di scalatura all'interno dell'ambiente CAD **Rhino**. Il modello A rappresenta un ingrandimento della mandibola tale da garantire un perfetto accoppiamento tra la superficie articolare dei condili e quella dell'articolazione temporo-mandibolare. Il modello B rappresenta un restringimento della mandibola sulla base della larghezza dell'arcata alveolare (Figura 6.11).



*Figura 6.11 Modello A (sinistra) e modello B (destra)*

A questo punto è stata eseguita un'operazione di *warping*, eseguita con **Amira**, ossia una deformazione non lineare che ha portato alla

realizzazione del modello finale. Questa deformazione consente di trasformare una forma geometrica di partenza verso una forma geometrica di destinazione. In questo caso oltre alla forma di partenza, rappresentata dal modello precedentemente usurato e specchiato, sono state considerate due diverse forme di destinazione, il modello A e il modello B. Il modello di partenza, cioè la mandibola usurata e specchiata rappresentata in Figura 6.10, è stato, quindi, virtualmente deformato in modo da adattarsi al modello A, nella parte posteriore, e al modello B, nella parte anteriore. La deformazione si basa sulla definizione di punti corrispondenti su entrambe le forme che, al termine della trasformazione, portano la forma di partenza a sovrapporsi a quella di destinazione.



*Figura 6.12 Rappresentazione dei punti omologhi sulla mandibola di partenza (sinistra), e sui modelli A e B (destra)*

Per eseguire questa operazione, i punti di riferimento sulla mandibola di partenza sono stati suddivisi in due sottoinsiemi, dei quali uno, corrispondente ai punti che si trovano nella parte posteriore, è stato sovrapposto ai punti omologhi della mandibola A, e l'altro, corrispondente ai punti appartenenti alla parte anteriore, è stato riferito ai punti omologhi della mandibola B, come illustrato in Figura 6.12.

L'operazione di *warping* ha così condotto al risultato finale, rappresentato in Figura 6.13, in cui il modello digitale della mandibola da accoppiare al calvario risulta caratterizzato, nella parte posteriore, dal modello A, mentre, nella parte anteriore, si avvicina al modello B.

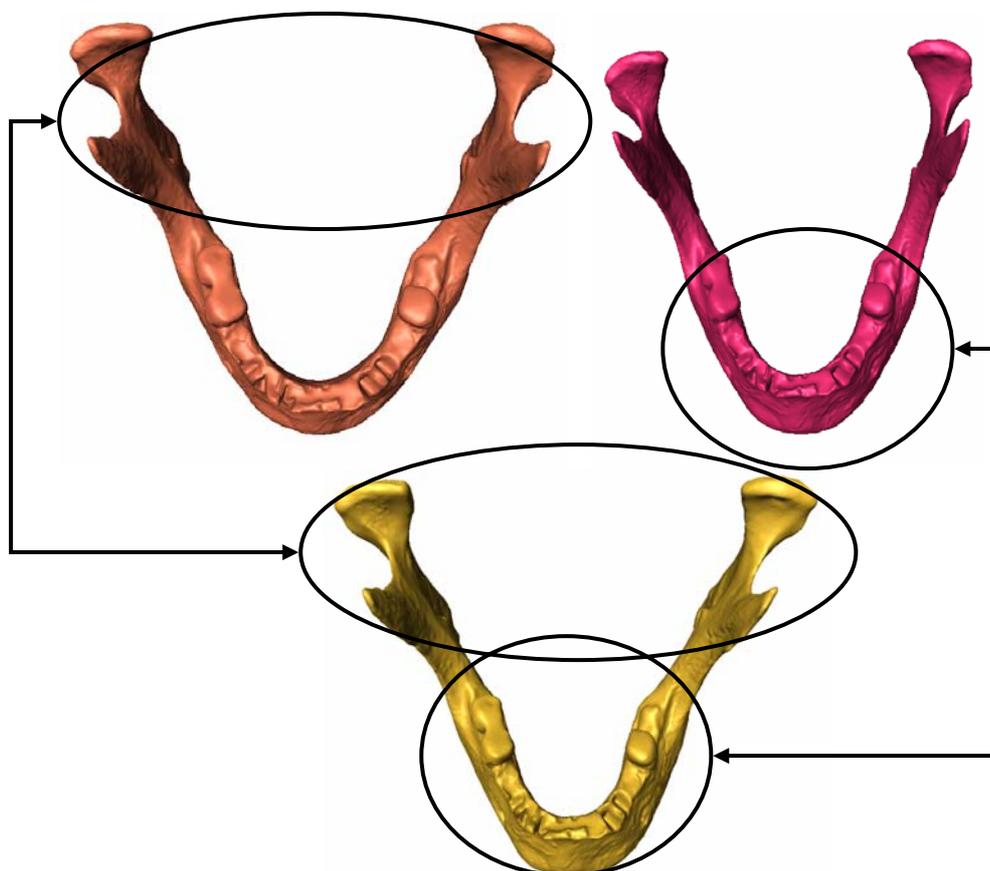
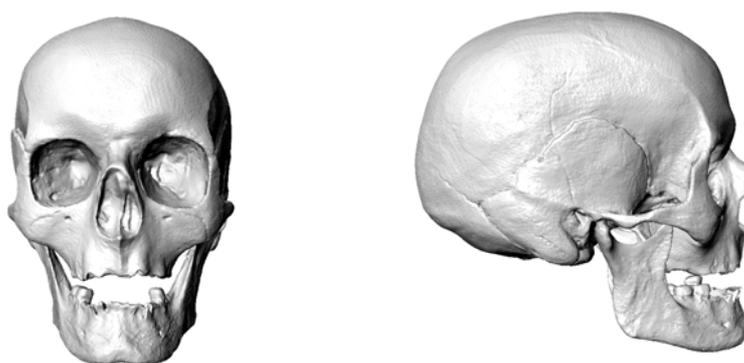


Figura 6.13 Trasformazione della mandibola attraverso l'operazione di *warping*



Figura 6.14 Confronto tra il modello della mandibola acquisita tramite laser scanner e il modello finale ottenuto dopo tutti i passaggi descritti

La mandibola, così modellata (Figura 6.14), è stata virtualmente assemblata al calvario ottenendo quindi, il modello digitale del cranio completo, che è stato, in prima analisi, analizzato e validato, da un punto di vista antropologico, all'interno dell'ambiente CAD (Figura 6.15).



*Figura 6.15 Modello digitale del cranio intero*

### 6.5 La prototipazione

Infine, è stato realizzato un prototipo in scala 1:1, in materiale termoplastico di colore bianco, sia del calvario che della mandibola, tramite la stampante Dimension SST. La realizzazione dei prototipi, rappresentati in Figura 6.16, è avvenuta in due sessioni distinte di lavoro impiegando 47 ore e 3 minuti per il modello del calvario e 7 ore 9 minuti per quello della mandibola.



*Figura 6.16 Modello del cranio di Dante realizzato in Prototipazione Rapida*

Il modello del cranio così prototipato è servito quindi, da base per la fase successiva di ricostruzione facciale, basata sulle tecniche di antropologia forense tradizionali.

### 6.6 Conclusioni

Il lavoro di ricostruzione geometrica del cranio di Dante ha rappresentato un interessante caso di integrazione multidisciplinare di tecniche e conoscenze diverse. Non ci si è limitati, infatti, all'applicazione di tecnologie di sviluppo prodotto al campo dei Beni Culturali. La ricerca è stata condotta attraverso lo sviluppo metodologico che unisce competenze antropologiche, capacità tecnico-progettuali e abilità nel conseguire requisiti di precisione, affidabilità e ripetibilità del processo.

Il presente lavoro si inserisce come modulo intermedio tra lo studio della ricognizione del Frassetto, condotta dal Laboratorio di Antropologia del Dipartimento di Storie e Metodi per la Conservazione dei Beni Culturali dell'Università di Bologna (Prof. Giorgio Gruppioni) e la ricostruzione facciale, eseguita mediante tecniche forensi (Figura 6.17), dal Dipartimento di Biologia dell'Università degli Studi di Pisa (Prof. Francesco Mallegni).



*Figura 6.17 Fasi di ricostruzione facciale tramite tecniche di antropologia forense*

Le tecniche di ricostruzione facciale (*facial reconstruction*) vengono usualmente impiegate sia in campo forense che in campo archeologico. Negli ultimi tempi, a fianco del tradizionale metodo di

ricostruzione manuale, si sta assistendo allo sviluppo di diversi progetti di ricerca finalizzati all'impiego di tecniche di Computer Graphic a supporto di queste applicazioni. Il processo tradizionale [62], [63] prevede la ricostruzione di un volto utilizzando un calco del cranio in esame come base. Su questo è previsto il posizionamento, in punti specifici, di una serie di pioli, aventi gli spessori desiderati per indicare la profondità del tessuto molle, e utilizzati per guidare la successiva fase di modellazione manuale del volto, mediante l'uso di creta o plastilina, nel rispetto dei vincoli di spessore imposti. Questo processo, molto dispendioso in termini di tempo, richiede contemporaneamente buone conoscenze di anatomia e spiccate doti artistiche. L'impiego di queste tecniche conduce a risultati molto realistici, ma congelati ad una sola delle possibili soluzioni ottenibili dallo stesso cranio di partenza: basti pensare ai diversi aspetti legati, ad esempio, ad una maggiore magrezza o, al contrario, ad una evidente obesità del volto.

Dall'altro lato, le tecniche di Computer Graphic applicate alla ricostruzione facciale [64] conducono alla realizzazione di modelli digitali che possono essere semplicemente modificati, in modalità interattiva, per fornire diverse ipotesi, ma, al giorno d'oggi, non possono ancora competere, in termini di realismo, con l'approccio manuale tradizionale.

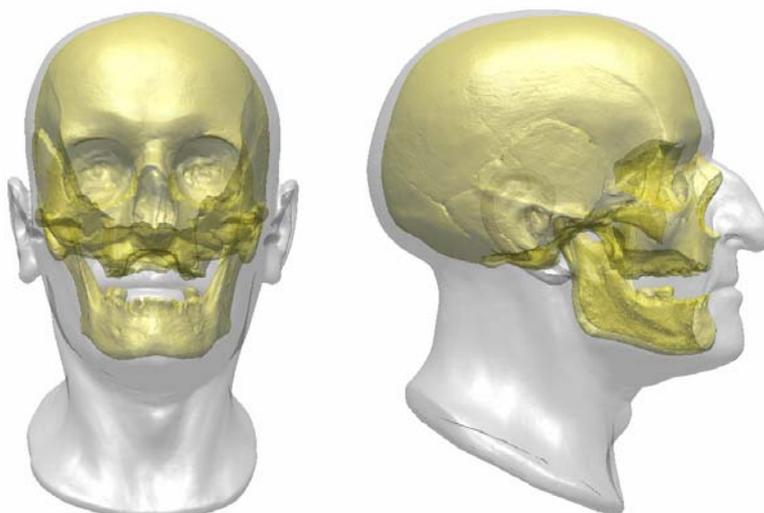
Un'idea per superare i limiti di entrambi i metodi potrebbe essere quindi, quella di utilizzare un approccio combinato di entrambe le modalità: manuale e digitale. In quest'ottica, il modello digitale ottenuto dalla scansione 3D di una prima ricostruzione manuale di un volto, può essere sottoposto, in tempi rapidi, a successive modifiche virtuali al fine di rappresentare le diverse ipotesi dell'aspetto, mantenendo comunque la precisione dei particolari modellati manualmente.

Un primo passo compiuto in questa direzione è stata la realizzazione del modello digitale 3D del volto, eseguito mediante tecniche forensi dal Dipartimento di Biologia dell'Università degli Studi di Pisa, tramite l'impiego del laser-scanner per la fase di acquisizione (Figura 6.18).



*Figura 6.18 Ricostruzione manuale (sinistra) e modello digitale (destra)*

Questo ha permesso un primo confronto tra i modelli digitali del volto e del cranio, rappresentati in Figura 6.19, evidenziandone la conformità morfologica. E' opportuno infine, sottolineare, come tale confronto tridimensionale non sia possibile nella realtà, dal momento che la realizzazione del volto sottrae alla vista il modello del cranio, lasciando quindi, la sola possibilità di sovrapposizione delle relative immagini fotografiche e riducendo il confronto ad un livello unicamente bidimensionale.



*Figura 6.19 Confronto tra i modelli digitali del volto e del cranio*



## Conclusioni

I casi di studio descritti in questo lavoro hanno dimostrato come l'impiego integrato di un insieme di tecnologie, applicate primariamente in campo industriale, possa portare notevoli benefici e condurre a importanti risultati anche nel campo della conservazione e valorizzazione dei Beni Culturali. Tra queste si distinguono, per la loro trasversalità e flessibilità, Ingegneria Inversa, Realtà Virtuale e Prototipazione Rapida, come elementi centrali del processo di trasferimento tecnologico orizzontale tra settori di applicazione tradizionalmente differenti.

L'interesse della comunità scientifica nei confronti di questo processo è sottolineato, inoltre, dall'attenzione che sempre più convegni, sia nazionali che internazionali, dimostrano verso questo tipo di applicazioni e il termine "Beni Culturali" (o "*Cultural Heritage*") sta entrando di diritto tra i casi di studio proposti.

Tutti i progetti presentati in questo lavoro rientrano a pieno titolo in questo settore di ricerca e il risultato comune raggiunto può essere individuato, in prima analisi, nella realizzazione di modelli digitali (e in alcuni casi anche fisici) di una serie di reperti, attraverso diversi processi di scansione 3D (laser-scanner, digitalizzatore piezoelettrico, tomografia computerizzata).

Preservando quindi gli originali, è stato possibile effettuare una serie di analisi morfometriche, precise e ripetibili, incrementando qualità e quantità delle informazioni utili per la classificazione dell'oggetto in esame. La possibilità, poi, di poter catalogare il reperto come modello

## Conclusioni

---

digitale tridimensionale lo rende fruibile per ulteriori eventuali analisi, attraverso una descrizione geometrica decisamente più esaustiva rispetto alle tradizionali immagini fotografiche bidimensionali.

Durante il corso dei lavori, è inoltre emerso il problema dell'orientamento dei modelli digitali rappresentanti forme geometriche complesse, come nel caso di reperti paleoantropologici e archeoantropologici, all'interno di un ambiente CAD, dal momento che, rispetto a rappresentazioni digitali di particolari meccanici, ad esempio, non è possibile individuare univocamente superfici di riferimento. E' evidente infatti, la necessità di individuare una procedura di orientamento standard e condivisa al fine di ottenere dati morfometrici omologhi relativi ad oggetti di una stessa categoria (molari primi inferiori, molari primi superiori, omeri, ecc.) al fine di poter effettuare analisi comparative e confronti. Questo problema è stato affrontato e risolto nel caso nel caso di molari primi inferiori e superiori, proponendo, nel caso di studio esaminato, una metodologia di orientamento innovativa rispetto agli approcci presentati nella letteratura scientifica. Questo lavoro deve essere visto come il primo di una serie di ricerche volte alla standardizzazione dei metodi di orientamento di forme geometricamente complesse come quelle rappresentanti, non solo le diverse tipologie dentali, ma anche tutti i distretti scheletrici dei reparti paleoantropologici e archeoantropologici.

Inoltre la realizzazione di modelli, digitali e fisici, non deve essere intesa come puro esercizio di stile per "copiare la realtà", ma deve fornire interpretazioni dei casi di studio che superino i limiti imposti dalla mera osservazione della realtà stessa, come nel caso della rappresentazione del modello digitale della mummia peruviana nella posizione anatomica di sepoltura o della modellazione della mandibola del poeta Dante Alighieri. In entrambi i casi infatti, l'approccio metodologico seguito ha reso disponibile ciò che nella realtà non lo è.

Come ultima considerazione si riporta il possibile feed-back che le metodologie proposte in queste applicazioni hanno avuto anche da altri campi, quale il bio-medicale. Infatti, come ha sottolineato un medico

ricercatore in visita presso il laboratorio di Realtà Virtuale, si tratterebbe di trasferire sui vivi ciò che è stato sperimentato efficacemente sui morti.



## Bibliografia

- [1] Ulrich K. T., Eppinger S. D., *Progettazione e sviluppo di prodotto*, McGraw-Hill, 2001.
- [2] Caputo F., Martorelli M., 2003, *Disegno e progettazione per la gestione industriale*, Edizioni Scientifiche Italiane, Napoli
- [3] McMahan C., Browne J., *CAD CAM from principles to practice*, Addison-Wesley, 1994.
- [4] Curless B., Seitz S., *3D Photography*, in ACM SIGGRAPH 00 Course Notes, Course No. 19, 2000.
- [5] Gatto A., Iuliano L., 1998, *Prototipazione Rapida: le tecnologie per la competizione globale*, Tecniche Nuove.
- [6] Mortenson M. E., 1985, *Geometric Modeling*, John Wiley & Sons, New York.
- [7] Levoy M., Pulli K., Curless B., Rusinkiewicz S., Koller D., Pereira L., Ginzton M., Anderson S., Davis J., Ginsberg J., Shade J., Fulk D., 2000, *The Digital Michelangelo Project: 3D scanning of large statues*, in SIGGRAPH 2000, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, Addison Wesley, July 24-28, 2000, pp. 131–144.
- [8] Gruen A., Remondino F., Zhang L., 2003, *Computer reconstruction and modeling of the great Buddha statue in Bamiyan, Afghanistan*, CIPA 2003, 19th International Symposium, Antalya, Turkey, 2003.
- [9] Stumpfel J., Tchou C., Yun N., Martinez P., Hawkins T., Jones A., Emerson B., Debevec P., *Digital Reunification of the Parthenon and its Sculptures*, in VAST 2003, 4th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage, Brighton, UK, 2003, pp. 2–10.

- [10] Baracchini C., Brogi A., Callieri M., Capitani L., Cignoni P., Fasano A., Montani C., Nenci C., Novello R. P., Pingi P., Ponchio F., Scopigno R., 2004, *Digital reconstruction of the Arrigo VII funerary complex*, in VAST 2004, 5th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage, Bruxelles, 6-10 December, 2004, pp. 145–154.
- [11] Bernardini F., Rushmeier H. E., 2002, *The 3D Model Acquisition Pipeline*, Computer Graphics Forum 21, March 2002, pp. 149–172.
- [12] Scopigno R., *Gestione Efficiente dei Dati Prodotti dai Sistemi di Scansione Tridimensionale*, Laser Scanner e GPS: Paesaggi Archeologici e Tecnologie Digitali, 4 Marzo, 2005, pp 41–68.
- [13] Zhang Z. Y., 1994, *Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces*, International Journal of Computer Vision, 13(2), October 1994, pp 119–15.
- [14] Lorensen W. E., Cline H. E., *Marching cubes: a high-resolution 3D surface construction algorithm*. (Proceedings of SIGGRAPH '87), Vol. 21, No. 4, pp. 163–169.
- [15] Barcelo J. A., 2000, *Visualizing what might be: "An introduction to virtual reality techniques in archaeology*, ArcheoPress, april 2000.
- [16] Addison A. C., 2000, *Emerging trends in virtual heritage*, IEEE MultiMedia 7, 2 (2000), pp. 22–25.
- [17] Forte M., Pietroni E., Rufa C., 2002, *Musealising the Virtual: the Virtual Reality Project of the Scrovegni Chapel of Padua*, in VSMM 2002, Proceedings of the Eighth International Conference on Virtual Systems and Multimedia, "Creative and digital culture", Gyeongju, Korea, 25-27 September 2002, pp. 43–52.
- [18] Liverani A., Persiani F., De Crescenzo F., 2001, *An immersive reconfigurable room (I.R.R.) for virtual reality simulations*, in Proceedings of the XII ADM International Conference (2001), pp. E1–9/E1–15.
- [19] AA.VV., 2004, *Archiviazione e restauro di reperti archeologici mediante tecniche CAD-RP*, Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli, giugno 2004
- [20] Owen R., Buhalis D., Pletinckx D., *Identifying technologies used in Cultural Heritage*, in VAST 2004, 5th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage, Bruxelles, 6-10 December, 2004, pp. 155–163

- [21] Bisconti M., Mallegni F., Martini F., Ricci S., 2003, *Le sepolture Romito 7 e Romito 8: paleobiologia dei resti umani*, in Atti del XV congresso dell'Associazione Antropologica Italiana, Chieti, 28-30 settembre, 2003, pp. 101–109.
- [22] Rambelli C., Nider F., Grotta del Romito, 2004, *il QTVR object (QuickTime Virtual Reality) della sepoltura Romito 7 come documentazione complementare*, in Atti della XXXVII Riunione Scientifica: Preistoria e Protostoria della Calabria, 29 settembre-4 ottobre, 2003, Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria, Firenze, 2004.
- [23] Viti S., *La sepoltura Romito 7 di Papasidero. Integrazione della documentazione grafica tradizionale con l'applicazione di nuove tecnologie*, in Atti della XXXVII Riunione Scientifica: Preistoria e Protostoria della Calabria, 29 settembre-4 ottobre, 2003, Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria, Firenze, 2004.
- [24] Bailey S. E., 2004, *A morphometric analysis of maxillary molar crowns of Middle-Late Pleistocene hominins*, *Journal of Human Evolution* 47, pp. 183–198.
- [25] Bailey S. E., Lynch J. M., 2005, *Diagnostic Differences in Mandibular P4 Shape between Neandertals and Anatomically Modern Humans*, *American Journal of Physical Anthropology* 126, pp. 268–277.
- [26] Harris E. F., Dinh D. P., 2006, *Intercusp Relationships of the Permanent Maxillary First and Second Molars in American Whites*, *American Journal of Physical Anthropology*, 130, pp. 514–528.
- [27] Kondo S., Townsend G. C., 2006, *Associations between Carabelli trait and cusp areas in human permanent maxillary first molars*, *American Journal of Physical Anthropology* 129; pp. 196–203.
- [28] Alt K. W., Buitrago-Téllez C. H., 2004, *Dental paleoradiology: applications in paleoanthropology and paleopathology*. *Canadian Association of Radiologists Journal*. 55(4), pp. 258–63.
- [29] Avishai G., Müller R., Gabet Y., Bab I., Zilberman U., Smith P., 2004, *New Approach to Quantifying Developmental Variation in the Dentition Using Serial Microtomographic Imaging*, *Microscopy Research and Technique*. 65, pp. 263–269
- [30] McErlain D. D., Chhem R. K., Bohay R. N., Holdsworth D. W., 2004, *Micro-computed tomography of a 500-year-old tooth: technical note*, *Canadian Association of Radiologists Journal* 55(4), pp. 242–245.

- [31] Zuccotti L. F., Williamson M. D., Limp W. F., Ungar P., 1998, *Technical Note: Modeling Primate Occlusal Topography Using Geographic Information Systems Technology*, American Journal of Physical Anthropology 107, pp. 137–142.
- [32] Jernvall J., Selänne L., 1999, *Laser Confocal Microscopy and Geographic Information System in the Study of Dental Morphology*, Paleontologia Electronica vol 1, issue 2.
- [33] Ungar P., 2004, *Dental topography and diets of Australopithecus afarensis and early Homo*, Journal of Human Evolution 46, pp. 605–622.
- [34] Robinson D. L., Blackwell P. G., Stillman E. C., Brook A. H., 2002, *Impact of landmark reliability on the planar Procrustes analysis of tooth shape*, Archives of Oral Biology 47, pp. 545–554.
- [35] Bailey S. E., Pilbrow V. C., Wood B.A., 2004. *Interobserver error involved in independent attempts to measure cusp base areas of Pan MIs*, Journal of Anatomy 205, pp. 323–331.
- [36] [35] Ungar P., Williamson M., 2000, *Exploring the effects of tooth wear on functional morphology: a preliminary study using dental topographic analysis*, Palaeontologia Electronica, vol. 3, issue 1, art 1.
- [37] Cesarani F., Martina M. C., Ferraris A., Grilletto R., Boano R., Marochetti E. F., Donadoni A. M., Gandini G., 2003, *Whole-Body Three-Dimensional Multidetector CT of 13 Egyptian Human Mummies*, American Journal of Roentgenology 180, 3 (2003), pp. 597–606.
- [38] Cesarani F., Martina M. C., Grilletto R., Boano R., Roveri A. M. D., Capussotto V., Giuliano A., Celia M., Gandini G., 2004, *Facial Reconstruction of a Wrapped Egyptian Mummy Using MDCT*, American Journal of Roentgenology 183, 3 (2004), pp. 755–758.
- [39] Hoffman H., Hudgins P. A., 2002, *Head and Skull Base Features of Nine Egyptian Mummies: Evaluation with High-Resolution CT and Reformation Techniques*, American Journal of Roentgenology 178, 6 (2002), pp. 1367–1376.
- [40] Hoffman H., Torres W. E., Ernst R. D., 2002, *Paleoradiology: Advanced CT in the Evaluation of Nine Egyptian Mummies*, Radiographics 22, 2 (2002), pp. 377–385.
- [41] Previgliano C. H., Ceruti C., Reinhard J., Araoz F. A., Diez J. G., 2003, *Radiologic Evaluation of the Llullaillaco Mummies*, American Journal of Roentgenology 181, 6 (2003), pp. 1473–1479.

- [42] Jansen R. J., Poulus M., Taconis W., Stoker J., 2002, *High-resolution spiral computed tomography with multiplanar reformatting, 3D surface- and volume rendering: a non-destructive method to visualize ancient Egyptian mummification techniques*, *Computerized Medical Imaging and Graphics* 26, 4 (Jul 2002), pp. 211–216.
- [43] Ruhli F. J., Hodler J., Boni T., 2002, *Technical note: CT-guided biopsy: A new diagnostic method for paleopathological research*, *American Journal of Physical Anthropology* 117, 3 (Mar 2002), pp. 272–275.
- [44] Ruhli F. J., Chhem R. K., Boni T., 2004, *Diagnostic paleoradiology of mummified tissue: interpretation and pitfalls*, *Canadian Association of Radiologists Journal* 5, 4 (Oct 2004), pp. 218–227.
- [45] Gardner J. C., Garvin G., Nelson A. J., Vascotto G., Conlogue G., 2004, *Paleoradiology in mummy studies: the Sulman mummy project*, *Canadian Association of Radiologists Journal* 55, 4, October 2004, pp. 228–234.
- [46] Takami Y., Shigeki Y., Hiroshi O., Junichiro T., 1992, *3d visualization of an ancient Egyptian mummy*, *IEEE Computer Graphics and Applications* 12, 3 (1992), pp. 13–17.
- [47] Seipel S., Lindkvist M. Pettersson L. W., *Interactive virtual mummy dissections in a historical anatomic theatre*, in VAST 2003, 4th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage, Brighton, UK, 2003, pp. 101–110.
- [48] Attardi G., Betrò M., Forte M., Gori R., Guidazzoli A., Imboden S., Mallegni F., *3D facial Re-construction and Visualization of Ancient Egyptian Mummies using spiral CT data*, 26th International Conference on Computer Graphics, SIGGRAPH 99, CD e Conference Abstracts and Applications, Los Angeles 1999, 223.
- [49] Gill-Robinson H., Elias J., Bender F., Allard T. T., Hoppa R. D., 2006, *Using image analysis software to create a physical skull model for the forensic facial reconstruction of an akhmimic mummy*, *Journal of Computing and Information Technology* 14, 1, pp. 45–51.
- [50] Lenares M., Longhena M., Orzincolo C., Vandini M., Bernabò-Brea M., Macellari R., Lorusso S., Gruppioni G., 2003, *Studio etnoantropologico su una mummia andina conservata presso i civici musei di Reggio Emilia*, *Quaderni di Scienza della Conservazione* 3 (2003), pp. 69–84.

## Bibliografia

---

- [51] Trotter M., Gleser G. C., 1952, *Estimation of stature from long bones of American Whites and Negroes*, American Journal of Physical Anthropology 10, 4 (Dec 1952), pp. 463–514.
- [52] Rhodes J. A., Knusel C. J., 2005, *Activity-related skeletal change in medieval humeri: cross-sectional and architectural alterations*, American Journal of Physical Anthropology 128, pp. 536–546.
- [53] Schijman E., 2005, *Artificial cranial deformation in newborns in the pre-Columbian Andes*, Child's Nervous System 21, pp. 945–950.
- [54] Rhode M. P., Arriaza B. T., 2006, *Influence of cranial deformation on facial morphology among prehistoric south central Andean populations*, American Journal of Physical Anthropology 130, pp. 462–470.
- [55] Hughes S., Wright R., Barry M. 2005, *Virtual reconstruction and morphological analysis of the cranium of an ancient Egyptian mummy*, Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine 28, pp. 122–127.
- [56] Winder R. J., Glover W., Golz T., Wulf J., McClure S., Cairns H., Elliott M. 2006. *“Virtual unwrapping” of a mummified hand*, Studies in Health Technology and Informatics 119, pp. 577–582.
- [57] Pardini E. 1970, *I calvari della necropoli di Ancon*, Archivio per l'Antropologia e l'Etnologia 100:29.
- [58] Pardini E. 1971, *I calvari della Huache di Lima*, Archivio per l'Antropologia e l'Etnologia 101:105.
- [59] Pardini E. 1974, *I calvari del Cuzco*, Archivio per l'Antropologia e l'Etnologia 104:113.
- [60] Martin R., Saller K., 1956-1959, *Lehrbuch der Anthropologie in Systematischer Darstellung*, Fischer ed., Stuttgart.
- [61] Fabris L., 1997, *Statistica Multivariata*, McGraw-Hill, Milano.
- [62] Bolasco S., 1999, *Analisi Multidimensionale dei Dati*, Carocci editore, Roma.
- [63] Jolliffe, I. T., 2002, *Principal Component Analysis*, Second Edition, Springer-Verlag, New York.
- [64] Frassetto F., *Dantis Ossa, La forma corporea di Dante – maschere e busti*, Bologna - Istituto di Antropologia, 1933.

- [65] Prag J., Neave R., 1997, *Making Faces*, London, British Museum Press.
- [66] Wilkinson C., *Forensic Facial Reconstruction*, Cambridge, Cambridge University Press, 2004.
- [67] Clement J., Murray K., *Computer-Graphic Facial Reconstruction*, Elsevier Academic Press, 2005.