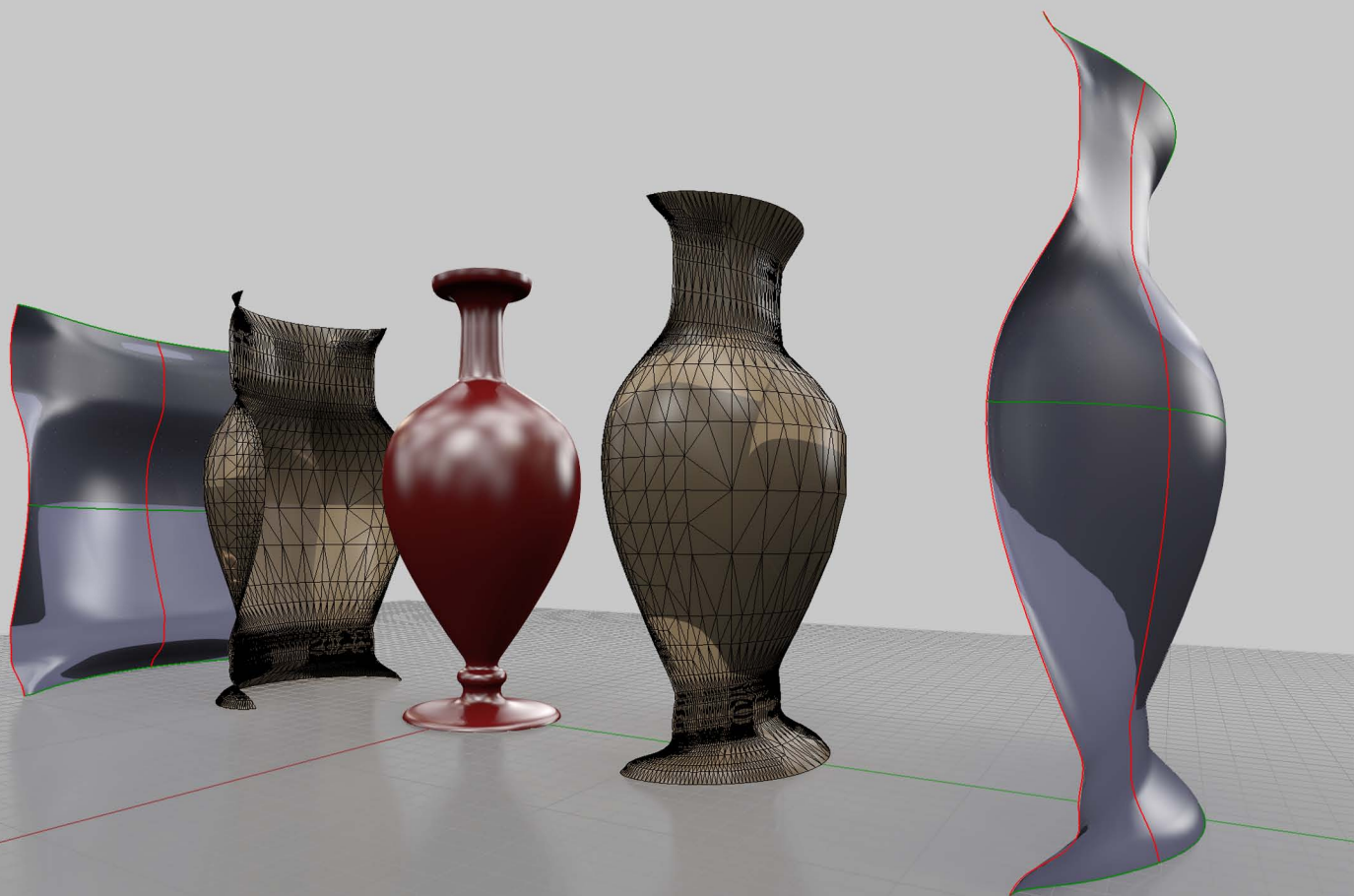




*Michele Calvano*

## **Il Reverse Modeling per il progetto di design**

*Problemi, Metodi e Tecniche di conversione della rappresentazione numerica nella rappresentazione matematica*



Tesi di Dottorato di Ricerca D.P.R. 11/7/1980 - Ciclo XXIV - I sessione 2012



Università degli Studi di Roma “Sapienza”  
Dottorato di Ricerca in *Scienze della Rappresentazione e del Rilievo* - Settore disciplinare ICAR 17

Tesi di Dottorato di Ricerca D.P.R. 11/7/1980 - Ciclo XXIV - I Sessione 2012

*Michele Calvano*

## **Il Reverse Modeling per il progetto di Design**

Problemi, Metodi e Tecniche di conversione della rappresentazione numerica  
nella rappresentazione matematica

*Tutor: Andrea Casale*



*Scuola Nazionale di Dottorato in Scienze della Rappresentazione e del Rilievo*

Università degli Studi di Roma "Sapienza", Dipartimento di Storia Disegno e Restauro dell'Architettura, Roma 2012

Tutti i diritti sono riservati:

nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcun modo (comprese fotocopie e microfilms) senza il permesso scritto del dottorando di ricerca in "Scienze della Rappresentazione e del Rilievo"

Scuola Nazionale di Dottorato IV ciclo - 2008/2011  
in Scienze della Rappresentazione e del Rilievo

*Sede centrale di coordinamento*

Università degli Studi di Firenze

*Direttore*

Emma Mandelli

*Sedi consorziate*

Politecnico di Bari

Università di Catania - Siracusa

Università degli studi "G. D'Annunzio" Chieti - Pescara

Università degli Studi di Firenze

Università degli Studi di Palermo

Università Mediterranea di Reggio Calabria

Università degli Studi di Roma "Sapienza"

*Università degli Studi di Roma "Sapienza"*

Dottorato di Ricerca in Scienze della Rappresentazione e del Rilievo

XXIV Ciclo - Settore disciplinare ICAR 17

*Coordinatore*

Cesare Cundari

*Collegio del Dottorato*

Piero Albisinni, Laura Baratin, Carlo Bianchini, Laura Carnevali, Anna Laura Carlevaris, Marco Carpiceci, Carlo Carreras, Andrea Casale, Antonio Catizzone, Emanuela Chiavoni, Cesare Cundari, Laura De Carlo, Marco Fasolo, Antonino Gurgone, Elena Ippoliti, Carlo Inglese, Alfonso Ippolito, Fabio Lanfranchi, Maria Martone, Riccardo Migliari, Lia Maria Papa, Leonardo Paris, Paola Quattrini, Luca Ribichini, Biagio Roma, Rocco Sinisgalli, Graziano Mario Valenti.

<i>Dottorando</i> Michele Calvano	<i>Coordinatore del Dottorato</i> prof. Cesare Cundari
<i>Tutor</i> prof. Andrea Casale	
<i>Co-Tutor</i> :	
	data .....



## **Ringraziamenti**

*Alcune righe per esprimere la mia gratitudine a chi ha reso possibile la buona riuscita della ricerca.*

*Innanzitutto, voglio ringraziare il **Prof. Andrea Casale**, per il suo generoso supporto, le intuizioni ed i ragionamenti che hanno sempre mantenuto il lavoro in ambiti stimolanti, ricchi di spunti di cui la ricerca si è costantemente alimentata.*

*Voglio inoltre ringraziare il **prof. Riccardo Migliari**, con cui mi sono confrontato in alcuni importanti momenti del percorso. Ma soprattutto essendo la persona che, attraverso le lezioni per il dottorato di ricerca, ha insinuato nella mia mente i valori di alcuni concetti fondativi contenuti nel testo.*

*Particolari ringraziamenti sono rivolti al **prof. Graziano Mario Valenti**, per la sapiente guida e il supporto in quegli aspetti del lavoro legati ai nuovi metodi di rappresentazione.*

*Non posso dimenticare tutti i membri del collegio di dottorato guidati dalla **prof.ssa Laura De Carlo** ed il **prof. Cesare Cundari**. Li ringrazio per il supporto accademico ed il valido aiuto durante il periodo di formazione e di ricerca.*

*Con piacere voglio menzionare tutti i colleghi dottorandi con cui ho condiviso l'importante percorso formativo di questi tre anni.*

*In fine voglio dire un immenso grazie a **Francesca Guadagnoli**, compagna in questo percorso e nella vita, che si è fatta carico della lettura e la revisione del testo.*

# Indice

<b>Introduzione</b>	7		
<b>1. <i>Pensare il modello e creare con i modelli</i></b>	9	<b>5. <i>Conclusioni: dal modello fisico al modello matematico</i></b>	111
1.1 Il prototipo nell'era pre-informatica	10	5.1 Le ragioni del prototipo per il designer	111
1.2 Il prototipo nell'era informatica	12	5.2 Il percorso del progetto di design	112
1.3 Gli obiettivi della ricerca	14	5.3 Un altro metodo risolutivo	114
<b>2. <i>Stato dell'arte e tematiche di ricerca</i></b>	19		
2.1 Le fasi del processo di Reverse Modeling	20	<b>Bibliografia</b>	123
2.2 Gli hardware: sensori tridimensionali per il rilevamento	24		
2.3 I formati di scambio	26	<b>Abstract</b>	125
2.4 I software per l'acquisizione ed il Reverse Modeling	31		
2.5 Le aree disciplinari d'interesse	34		
<b>3. <i>Analisi e rappresentazione matematica degli oggetti di design</i></b>	41		
3.1 L'albero del design: caratteristiche dei modelli reali	41		
3.2 Gli spazi R e le entità che partecipano alla rappresentazione matematica	43		
3.3 La forma del design: gli attributi di stile e le geometrie strutturanti	50		
3.4 Modello matematico e modello numerico	52		
3.5 Oggetti ad asse di rivoluzione	55		
3.6 Oggetti a piano di simmetria	65		
<b>4. <i>Fase sperimentale</i></b>	77		
4.1 La scelta della tecnica	77		
4.2 Presentazione dei casi studio: SIT Siemens S62	81		
4.3 Primo caso studio: oggetto con piano di simmetria	82		
4.4 Primo caso studio: operazioni di Reverse Modeling	91		
4.5 Secondo caso studio: oggetto composto da più geometrie strutturanti	96		
4.6 Secondo caso studio: operazioni di Reverse Modeling	103		



# introduzione

*Il Reverse Modeling (RM) è il processo con il quale è possibile dedurre la rappresentazione della forma dall'acquisizione digitale del modello fisico.*

*Le finalità del processo possono essere diverse, nel design può essere utilizzato sia per le operazioni di restyling che per operazioni più prettamente progettuali. Attualmente le metodologie e le tecniche utilizzate non seguono delle procedure standard, mostrano invece una dicotomia di comportamenti nei confronti del problema, in alcuni casi sono prevalenti le operazioni artigianali, in altri le azioni mirano al massimo rigore per il conseguimento dell'estrema accuratezza nel risultato.*

*Nel processo progettuale dell'oggetto di design, il RM ha un ulteriore compito, risolvere lo scollamento esistente tra il prototipo ed il modello progettato, assumendo un ruolo attivo nel percorso ideativo dell'oggetto.*

*Solo una ricerca sperimentale di tipo applicativo consente di analizzare i problemi, i metodi e le tecniche di conversione da un modello numerico (nuvola di punti, rilievo) al modello matematico (progetto digitale).*

*Lo studio si prefigge quindi l'obiettivo di risolvere le problematiche insite nel processo di RM applicato al progetto di design. Esperienza svolta avvalendosi delle nuove potenzialità offerte dai dispositivi digitali, asservendoli agli strumenti tipici del disegno e della geometria descrittiva nella loro accezione più contemporanea. Inoltre la ricerca ha portato risultati alternativi alle odierne tecniche computazionali in uso nelle procedure risolutive del problema.*

*La ricerca è stata affrontata secondo una metodologia sistematica, articolata in una prima fase di indagine conoscitiva che precede quella di analisi, in seguito il rilievo e quindi un'applicazione sperimentale.*

*La fase conoscitiva ha indagato gli strumenti di rilievo digitale, i software per l'analisi e l'editing del dato numerico e i software di modellazione matematica.*

*La fase di analisi è stata rivolta ai problemi propri della rappresentazione matematica negli oggetti di design.*

*La successiva fase di rilievo è stata caratterizzata dalla ricerca delle entità geometriche proprie dell'oggetto, dedotte dal dato numerico acquisito.*

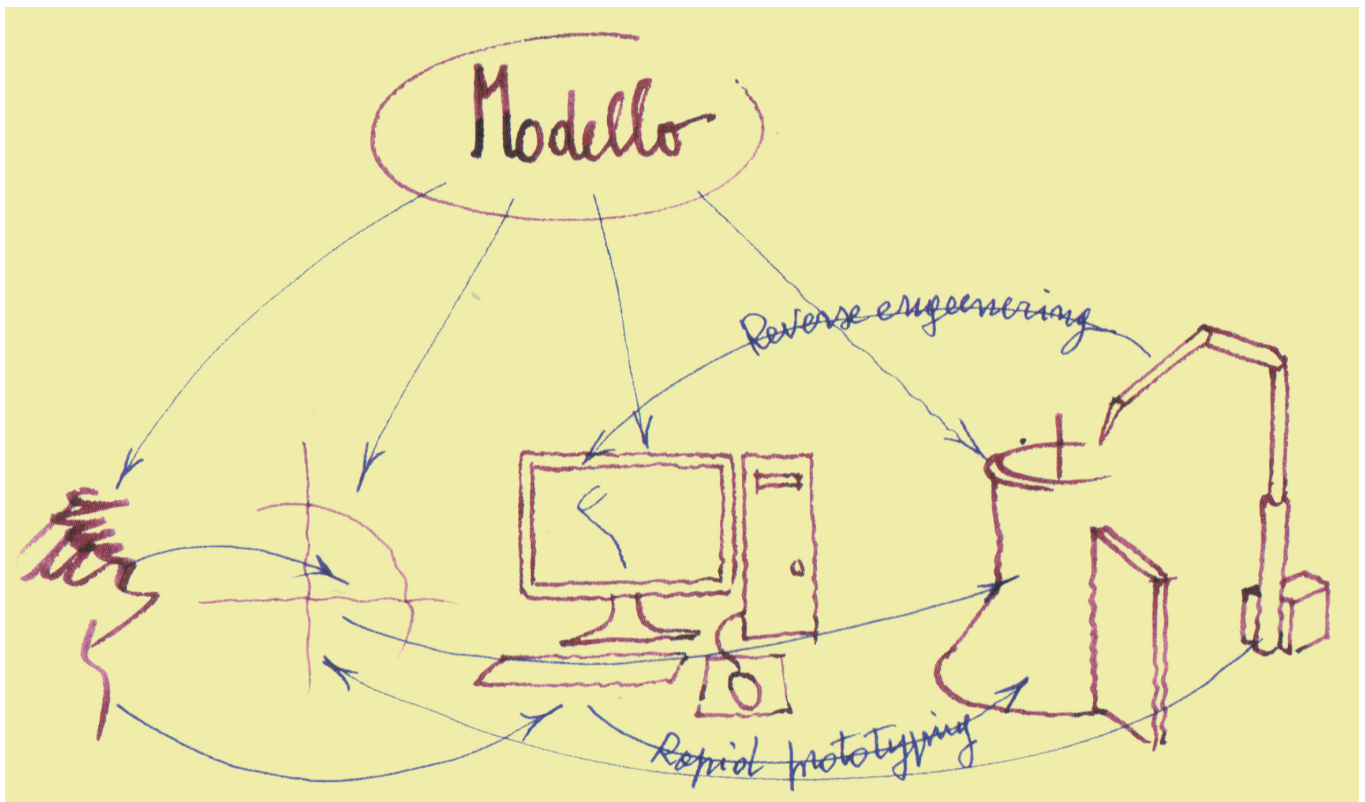
*Quindi la sperimentazione ha risolto le relazioni tra prototipo, dato acquisito e modello matematico, ricostruendo l'antico rapporto tra prototipo, disegno e modello mentale ideativo.*

*Gli esiti vengono attraverso strumenti propri della nostra area, che esprimono nella ricerca il loro potenziale come mezzi di comprensione e soluzione del processo di Reverse Modeling.*





## 1. Pensare il modello e creare con i modelli



1.01\_ Schema della metamorfosi dei modelli ( di Riccardo Migliari, tratto dal testo “Disegno come Modello”, edizioni Kappa).

Il professor Migliari, nella prima parte del testo “Disegno come Modello”, descrivendo il “teorema fondamentale del Modello di architettura”, racconta il rapporto esistente tra modello **M** e i modelli **m**. Nell’enunciato **M** rappresenta l’idea di una forma ed **m**, le sue possibili rappresentazioni (fig. 1.01).

I modelli **m** si manifestano attraverso elaborati che vanno dallo schizzo a mano libera, fino ad arrivare a disegni tecnici ed esecutivi. Di questa tipologia espressiva, fanno anche parte i modelli digitali numerici e matematici e tutte le

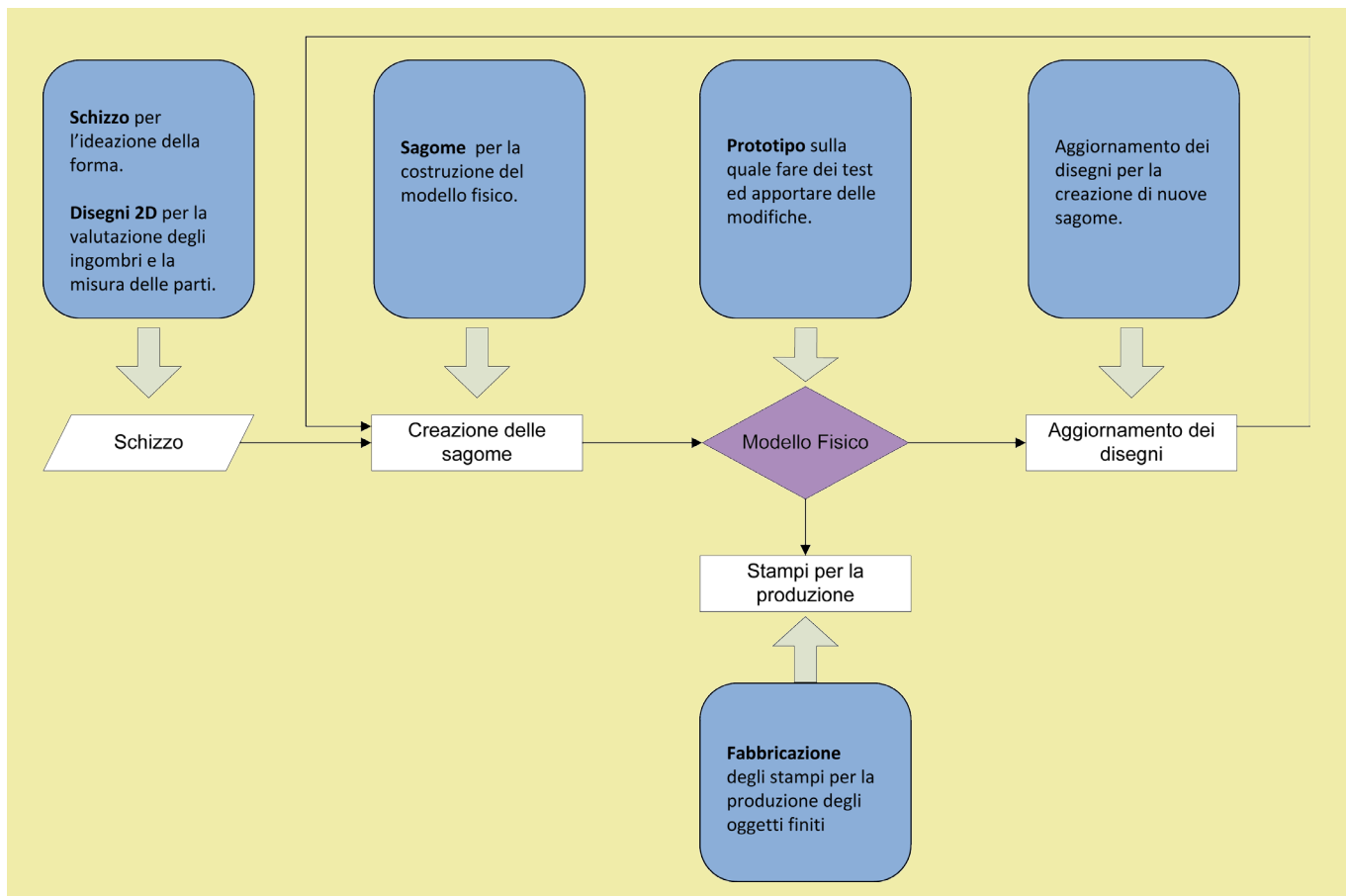
rappresentazioni derivate da essi, come i rendering statici e dinamici, sino ad arrivare ai modelli fisici. Questi ultimi si distinguono in modelli multi materiale, generalmente utilizzati per l’architettura, oppure modelli fisici frutto di stampe 3D. Tutte le rappresentazioni descritte, mirano ad **M**, costruendo un percorso ideativo che lascia traccia in ognuna di esse. Infatti le rappresentazioni si confrontano e si fondono “senza soluzione di continuità, in un processo a spirale che converge verso il modello **M** e lo perfeziona, senza mai raggiungerlo”<sup>1</sup>.

**1.1 Il prototipo nell'era pre-informatica**

Il disegno del prof. Migliari e il suo scritto contemplano un rapporto dinamico ed evolutivo, considerando passaggi rapidi da una rappresentazione all'altra. La logica che emerge dal testo, è quella ordinariamente adoperata dal designer durante il suo percorso progettuale. Una circolarità che funziona come idea, ma che nella realtà trova delle limitazioni, riguardanti le relazioni esistenti tra modello fisico e modello matematico. Rallentamenti che impediscono al modello fisico di entrare a far parte del percorso progettuale in maniera rapida. In questa sede si vuole par-

lare principalmente dell'importanza del modello fisico per il designer, che assume un ruolo diverso da quello che può avere lo stesso modello per l'architetto.

Prima dell'avvento del computer, il modello fisico rappresentava per il designer uno strumento fondamentale. L'immagine mentale veniva inizialmente schizzata per catturarne l'essenza e poi disegnata su carta attraverso i metodi classici della rappresentazione (fig. 1.02). Attraverso gli elaborati grafici bidimensionali, si passava direttamente alla creazione del prototipo generalmente in scala 1:1 (fig. 1.03). La dimensione reale permetteva sia una com-



1.02\_ Nello schema è rappresentato il rapporto tra designer e modello fisico prima dell'introduzione del computer nel processo progettuale.



1.03\_ Prototipo in scala 1:1 della FIAT 500, modello illustrativo.

preensione della forma che la visualizzazione del rapporto tra modello e contesto. Tra le caratteristiche formali che si potevano valutare attraverso il modello fisico, vi era il rapporto tra pieno e vuoto, l'ergonomia e il disegno delle linee di stile. In base alle riflessioni fatte su ognuna di queste categorie, l'oggetto poteva essere modificato artigianalmente ottenendo un modello **m** molto simile ad **M**. A questo punto le possibilità erano due, o si creavano su di esso gli strumenti per la produzione seriale continuando il ciclo del prodotto, o si tornava indietro per approfondire il modello, investigando nuove qualità anche di carattere tecnologico. Il prototipo, veniva rilevato attraverso dime ed altri strumenti di rilievo, con cui riportare il profilo modificato sul foglio di carta (fig. 1.03). I nuovi disegni modificati, una volta approfonditi, erano pronti per una successiva fase di prototipazione. Il ciclo si reiterava sin quando il modello **m** non era simile al Modello ideale e quindi pronto per passare alla produzione.

Il percorso ideativo trovava centro nel modello fisico, il prototipo; davanti al modello reale si decideva se il prodotto era pronto per il mercato o ulteriormente valutabile (fig. 1.04), creando una consequenzialità circolare, in cui il modello fisico era alla base delle valutazioni per l'interruzione della ciclicità?

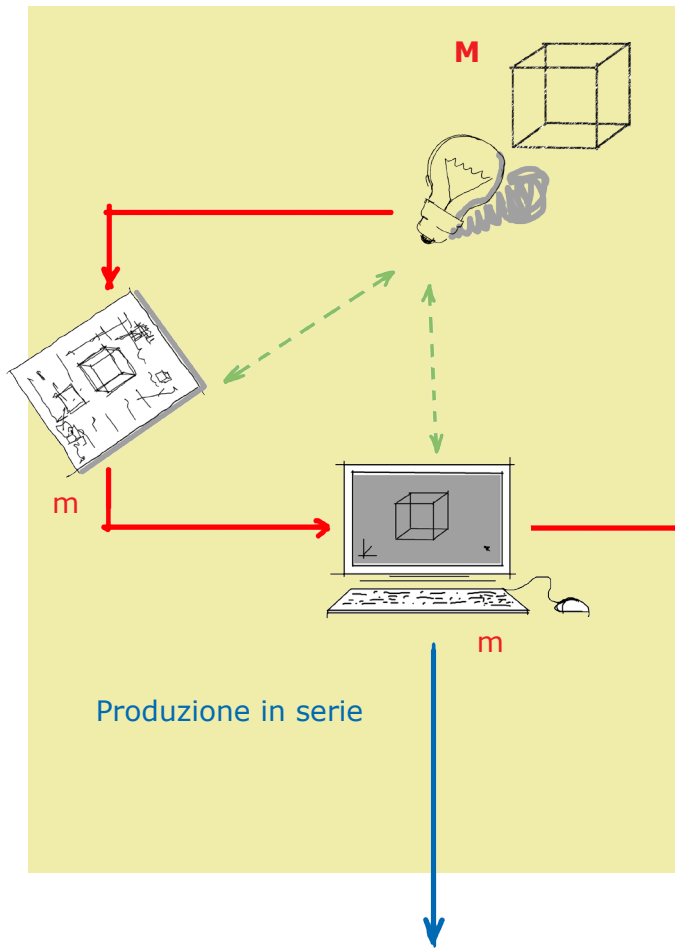


1.04\_ Scheletro per il prototipo della carena di una barca.

Tutti questi passaggi di approfondimento reiterato, esigevano ed esigono ancora oggi, una velocità di esecuzione dovuta alla necessità di valutazione sempre imminente. Per questo uno strumento, per essere considerato materiale di progetto, deve essere immediato nell'utilizzo e nella comprensione. Lo è lo schizzo, lo è il disegno tecnico, lo è sempre di più la rappresentazione digitale, grazie ad interfacce grafiche estremamente comunicative. La modellazione digitale di un manufatto si è ormai affermata per le fasi di concept, di redesign o di restyling. Questa costituisce oggi uno strumento di rappresentazione irrinunciabile per la definizione del progetto, serve alla fase di presentazione del prodotto e costituisce un'interfaccia standard verso la fase di produzione.

L'avvento dell'era informatica nel disegno e nella modellazione, ha sicuramente velocizzato il percorso verso il prototipo, ma ha reso più complesso il passaggio inverso per l'acquisizione delle modifiche.

1.2 Il prototipo nell'era informatica

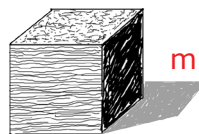


1.06\_ Rapporto esistente tra modello fisico m e modello mentale M.

Bozzetti e maquettes sono ancora oggi, strumenti principali per rappresentare e capire il progetto di design, per questo negli anni '70, le nuove tecnologie informatiche hanno sviluppato un percorso aggiuntivo basato sulla prototipazione rapida effettuata con particolari strumenti, che a partire dai profili matematici o da modelli in stereolitografia (.stl), producono velocemente il modello fisico (fig. 1.05). Nella figura di apertura abbiamo visto il percorso progettuale per l'avvicinamento, attraverso il susseguirsi di modelli m, al modello mentale M. In un disegno che in nessun modo vuole essere comparato a quello iniziale, si

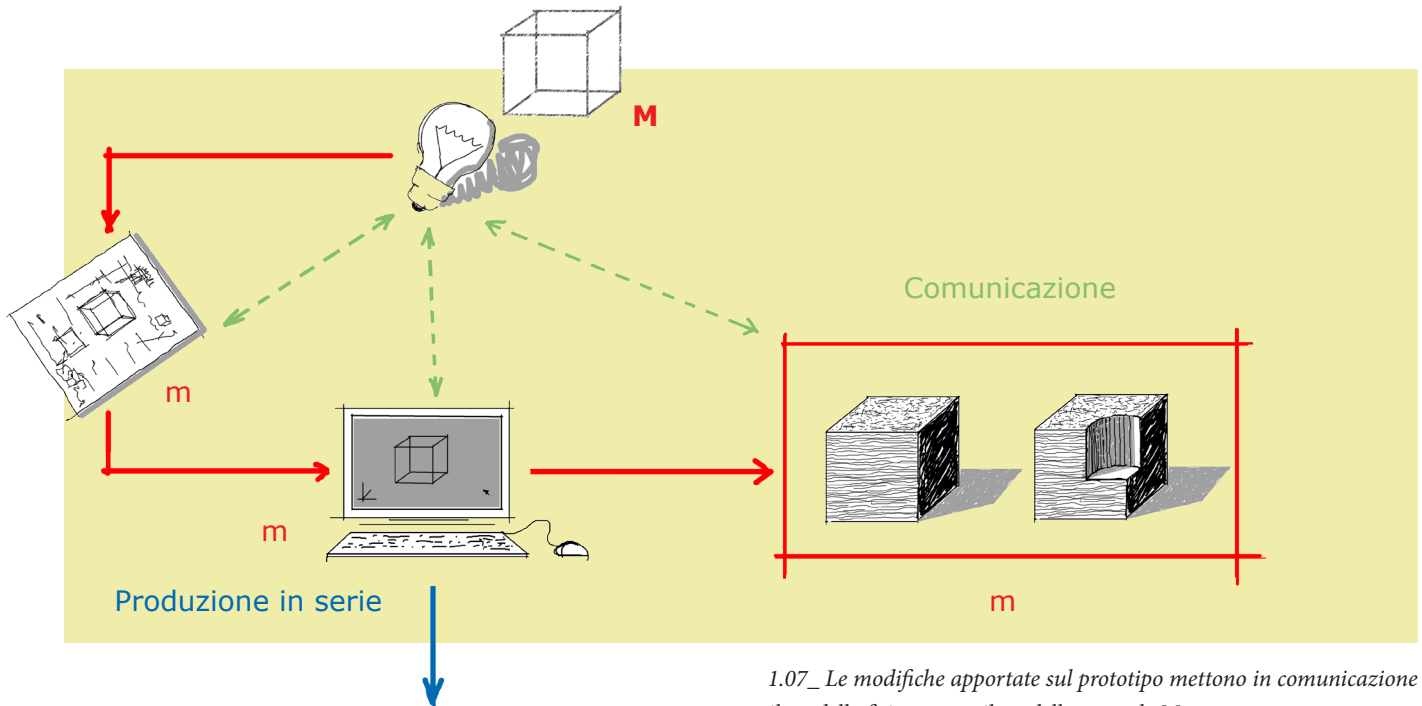


1.05\_ Stampante 3D Zprinter per il Rapid Prototyping.



vuole fare uno zoom concettuale della parte riguardante il rapporto tra Modello mentale M, e le sue rappresentazioni fisiche e digitali m, indagandone il ruolo nel processo progettuale (fig. 1.06)<sup>3</sup>.

L'immagine mentale viene rivelata in maniera rapida e gestuale attraverso schizzi su carta qualunque e disegni piani effettuati con i metodi classici della geometria descrittiva. Contemporaneamente si elaborano i modelli 3D digitali di natura numerica e matematica, all'inizio intesi per catturare la forma, poi sempre più dettagliati a supporto dell'aspetto esecutivo del progetto. Il rapido susseguirsi di modelli di natura diversa, richiede anche la presenza del prototipo, per una chiara valutazione della forma. Rispetto alla situazione precedente, questo passaggio è molto più veloce: se il progetto è rappresentato matematicamente, appositi algoritmi tassellano il modello continuo, e lo traspongono numericamente, rappresentandolo mediante una superficie poliedrica<sup>4</sup>. Il modello numerico è l'unico in grado di essere letto dal prototipatore che lo rappresenta fisicamente, il tempo necessario è quello della stesura layer by layer richiesto dalla stampante 3D, o della velocità di taglio di un cutter automatico. Sempre nella stessa



1.07\_ Le modifiche apportate sul prototipo mettono in comunicazione il modello fisico *m* con il modello mentale *M*.

figura vediamo, attraverso le frecce verdi, come i diversi modelli *m* si confrontano con il modello mentale *M*, grazie alla possibilità di aggiornamento che ognuno di loro ha e soprattutto grazie al rapporto diretto con il computer, oggi vero luogo di legame tra processo produttivo e processo ideativo. Tanto più il modello sarà interfacciabile con il calcolatore, tanto più rapido ed utile sarà il supporto che questo dà al percorso progettuale. Quindi il prototipo, per essere strumento progettuale, deve partecipare in maniera attiva e non essere semplicemente il congelamento di uno stato, da mostrare a terzi attori.

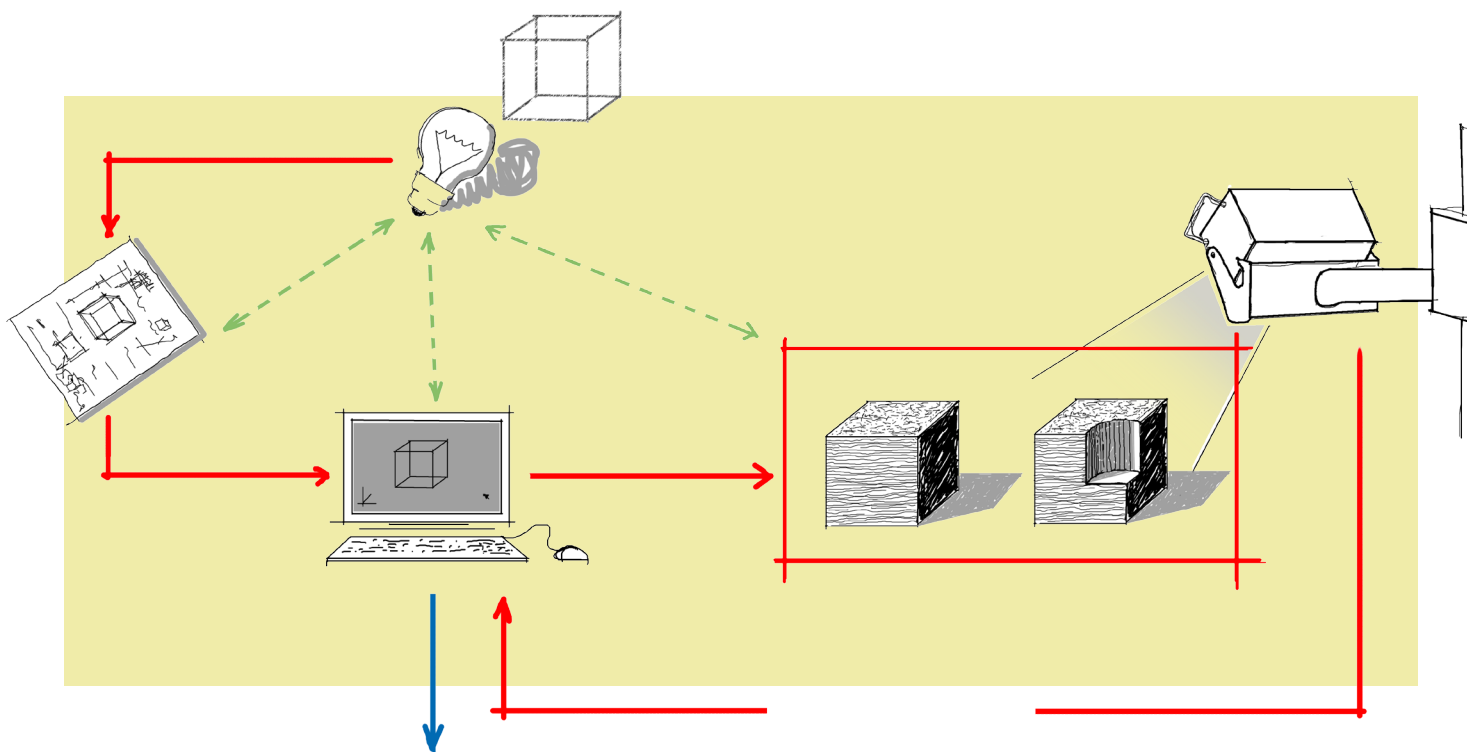
Se l'era pre-informatica vedeva nel prototipo il momento di scelta verso la produzione o verso la reiterazione del processo, adesso siamo in presenza di un percorso senza uscita. Il prototipo è muto, non interagisce con l'idea del designer, e non partecipa al ciclo progettuale innescato nel momento in cui, nella mente del progettista, si insinua l'immagine del modello mentale *M*. Il prototipo rimarrà concettualmente statico sin quando il progettista non agirà fisicamente su di esso, togliendo o aggiungendo materiale, rapportandosi in maniera interattiva con il prodotto che si crea davanti a lui, instaurando un dialogo biunivoco tra il

modello reale e l'immagine mentale (fig. 1.07).

Le modifiche effettuate sul modello fisico devono dunque tornare nel calcolatore attraverso il processo di Reverse Engineering. Esattamente a questo punto si crea la rottura della ciclicità, in quanto le variazioni sul prototipo dovrebbero essere riportate in maniera intelligente e veloce sul modello progettato al CAD, strumento di rappresentazione matematica. Le moderne tecniche di rilievo consentono di acquisire la forma discretizzando il dato in una nuvola di punti importabile nello spazio digitale, dove la forma può essere rappresentata con una mesh, che opportunamente editata diventerà la rappresentazione numerica del prototipo modificato (fig. 1.08).

Quali possono essere le necessità espresse dal progettista in questa fase del processo ideativo? Una tra tutte è approfondire l'aspetto tecnologico dell'oggetto: la scelta del materiale ed il tipo di tecnologia per la produzione impongono l'adozione di spessori, flange, tagli e giunti da aggiungere al modello digitale.

Il tipo di accoppiamento tra le parti comporta il disegno di fori, asole, filettature, elementi di estrema precisione che sottostanno a parametri di tolleranza. Può il modello nu-



1.08\_ *L'acquisizione permette il confronto tra il modello numerico modificato e il modello matematico.*

merico essere d'ausilio allo sviluppo di questa fase? Ovviamente la sua natura discreta è un vincolo troppo forte a queste azioni, per cui si impone un ennesimo passaggio dalla rappresentazione discreta del modello acquisito alla rappresentazione continua.

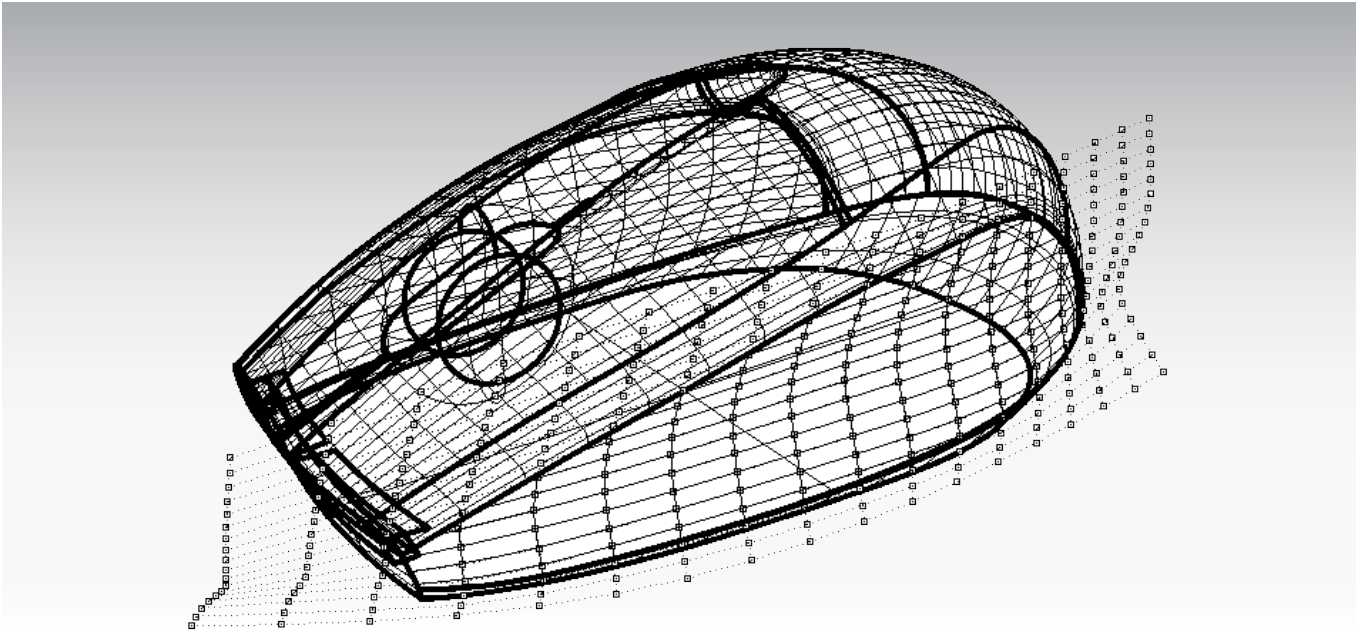
Le azioni elencate, vengono dette di ingegnerizzazione e si effettuano per articolare ulteriormente il modello, una volta resa chiara la forma. Il passaggio dalla rappresentazione numerica alla rappresentazione matematica è indispensabile anche quando, effettuata la modifica sul modello ed acquisito il dato, si vuole descrivere e controllare in maniera esatta le operazioni di modifica effettuate sul prototipo. Azioni espressive ma allo stesso tempo legate alla genesi dell'oggetto che si sta delineando, attente alle sue geometrie e al disegno complessivo della forma. Il controllo può avvenire solo grazie agli strumenti di costruzione ed analisi che i software di rappresentazione matematica mettono a disposizione.

### 1.3 *Gli obiettivi della ricerca*

Il passaggio appena descritto richiede una riflessione sui due tipi di modelli: da una parte il modello digitale matematico, dall'altra il modello digitale numerico.

Il modello matematico è il frutto di una serie di scelte effettuate sulle primitive che lo compongono. Il punto di partenza può essere una collezione di entità matematiche a cui si applicano trasformazioni successive. Un caso tipo vede come inizio una serie di curve NURBS che sintetizzano con linee, la forma ideata. Tra queste si stendono le superfici utilizzando il metodo più consono al caso e, tramite la variazione dei punti di controllo e le diverse operazioni di trasformazione, si applicano le modifiche sulla forma. In seguito progettiamo la continuità delle parti e applichiamo nuove trasformazioni che possono influire sulle dimensioni e sulla topologia dell'oggetto (fig. 1.09). Un'altra scelta può vedere l'interazione di solidi 3D su cui effettuare operazioni booleane, per proseguire con successive trasformazioni che esalteranno e avvicineranno il disegno all'idea del prodotto presente nella testa del progettista.

Il modello numerico acquisito con lo scanner laser 3D, invece, involuppa in maniera più o meno aderente, l'intero oggetto in un'unica mesh che non racconta nulla della sto-



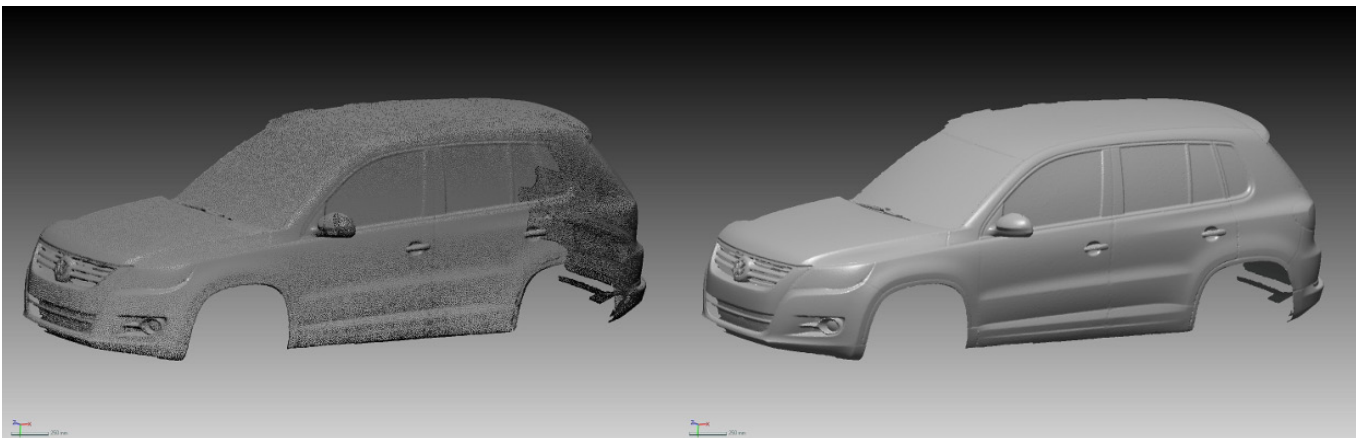
1.09\_ Attraverso la lettura delle isoparametriche, delle curve di bordo, e dei punti di controllo, è possibile ipotizzare la storia di costruzione.

ria di costruzione del progetto (fig. 1.10).

In una situazione di estrema diversità, diventa difficile confrontare i modelli individuando le parti modificate acquisite, con l'obiettivo di aggiornare il modello matematico alle modifiche effettuate sul modello fisico.

La tesi vuole ragionare sul delicato passaggio dalla rappresentazione numerica alla rappresentazione matematica,

per dare un apporto importante a due situazioni ricorrenti nel progetto di design: in primo luogo, l'aggiornamento del modello matematico in funzione di modifiche effettuate sul modello fisico e poi la definizione di un metodo per affrontare la ricorrente operazione di restyling del prodotto. L'ipotesi metodologica che si vuole sperimentare per l'aggiornamento del modello matematico, parte dall'idea



1.10\_ La rappresentazione numerica avvolge tutto in un'unica superficie per la quale è impossibile estrapolare le caratteristiche geometriche.



di confrontare i due modelli digitali, ed il confronto avviene a seguito del riconoscimento, nel modello numerico, delle caratteristiche geometriche presenti nel modello matematico. Parte importante sarà l'approccio con il quale rilevare le "geometrie strutturanti": il piano di simmetria e l'asse di rivoluzione.

Attraverso riflessioni legate alla natura delle superfici esatte, si capirà come individuare e disegnare le curve di stile che aiutano alla costruzione delle superfici per il modello matematico. A seguito delle operazioni elencate, sarà possibile sovrapporre le due rappresentazioni di cui si riconoscono entità geometriche strutturanti comuni; il risultato della sovrapposizione renderà evidenti le parti modificate che, ricostruite con primitive NURBS, andranno ad interagire con il modello matematico d'origine, aggiornandolo.

Oltre a quest'atteggiamento innovativo, che restaura il rapporto tra designer e modello fisico riportandolo ad un dialogo dinamico e ciclico, si vuole anche approfondire il processo di Reverse Engineering di un oggetto ideato prima dell'avvento del digitale. Per questo, il caso trattato nel capitolo riguardante la fase sperimentale, sarà un oggetto di modernariato di cui non esistono disegni di progetto in digitale. La logica del Restyling nasce dalla necessità di inserire un vecchio oggetto di design in un nuovo ciclo produttivo e per questo deve essere aggiornato attraverso modifiche che si effettuano passando per lo strumento informatico.

Sono due i casi che si possono presentare: la modifica, riguarda le componenti formali e ingegneristiche del prodotto e allora si parla di Redesign; oppure la modifica ha come finalità la trasformazione prevalente della sola forma, limitandoci a quello che viene chiamato Restyling.

In ambedue i casi sarà necessario il rilievo del prodotto esistente, attraverso il processo di Reverse Engineering in quanto, in assenza di una base dati, non si potrà parlare né di Redesign, né di Restyling, ma esclusivamente di progettazione di un nuovo prodotto.

Prima di cominciare la trattazione è importante spendere alcune righe per chiarire il significato di Reverse Engineering e Reverse Modeling. Un primo significato al Reverse Engineering è dato da alcune pubblicazioni del

1970, le quali identificavano questo processo come la serie di operazioni finalizzate alla "copia dell'originale". Il termine indica la collezione di tecnologie che consentono la creazione di un modello digitale, utilizzando i dati raccolti da un oggetto esistente. Nei termini più generali, per Reverse Engineering intendiamo l'identificazione dei processi funzionali di un dispositivo, anche immateriale come un software, attraverso l'analisi del suo comportamento.

I processi funzionali, se non parliamo di prodotti immateriali, sono riconducibili a dei meccanismi che attraverso il Reverse Engineering, saranno compresi e ricostruiti. Molto più legato ai nostri interessi di settore, è il processo di Reverse Modeling, con il quale si cerca di cogliere l'essenza di un processo formale attraverso un rilievo digitale delle superfici dell'oggetto. Per processo formale intendiamo quella serie di operazioni che hanno portato alla rappresentazione della forma realizzata. Il modello matematico, a differenza del modello numerico, rivela la sua genesi compositiva, grazie al suo esprimersi per mezzo di strumenti esatti<sup>5</sup>.

Il Reverse Modeling mira sicuramente alla costruzione di un modello digitale, ma ancor di più mira alla restituzione di superfici polinomiali (B-Splines, NURBS, Subdivision Surfaces) in grado di approssimare al meglio le entità e le caratteristiche che compongono la forma. Ci rendiamo conto che il processo preso in esame rappresenta il sistema per passare dal reale al digitale, che è appunto l'atteggiamento inverso al normale processo progettuale, in cui un primo approccio analogico fatto di schizzi e disegni manuali, è seguito da una serie di elaborazioni digitali 2D e 3D, da cui scaturisce il modello fisico.

E' evidente che questa ricerca trova ampio respiro nell'ambito del Reverse Modeling per cui sarà questo il termine che useremo quando tratteremo i problemi, i metodi e le tecniche di conversione della rappresentazione numerica nella rappresentazione matematica.

Note:

1. R. Migliari «Disegno come Modello», Roma, Edizioni Kappa, 2004.
2. R. De Fusco «Storia del design», Roma-Bari, Editori Laterza, 1985.
3. AA.VV., «La rappresentazione riconfigurata. Un viaggio lungo il processo di produzione del progetto di disegno industriale», Milano, ed. Poli.Design, 2006.
4. R. Migliari «Geometria descrittiva» Vol. II, Trofarello (TO), Città Studi edizioni, 2010.
5. F. Brevi «Dal fisico al virtuale: un percorso per il riuso in ambito progettuale dei modelli di disegno industriale» in “Metodi e tecniche integrate di rilevamento per la realizzazione di modelli virtuali dell’architettura della città” a cura di Mario Docci, Roma, Gangemi Editore, 2004.

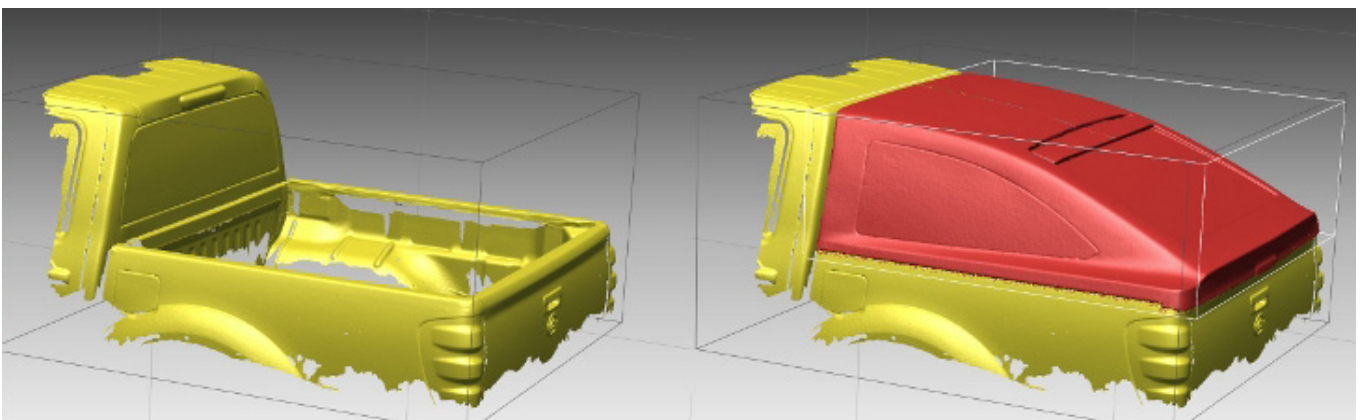


## 2 Stato dell'arte e tematiche di ricerca

Poiché ogni ricerca si fonda su testimonianze che la precedono e la contestualizzano, è doveroso delineare lo “stato dell'arte” nel momento in cui la ricerca si trova ad operare. Per l'argomento trattato, la lettura dello stato dell'arte si articola in tre tematiche di carattere culturale, metodologi-

co e tecnico che a mio avviso influiscono sul processo di Reverse Modeling:

- le fasi del processo di RM<sup>1</sup>;
- gli hardware;
- i software.



## 2.1 Le fasi del processo di Reverse Modeling

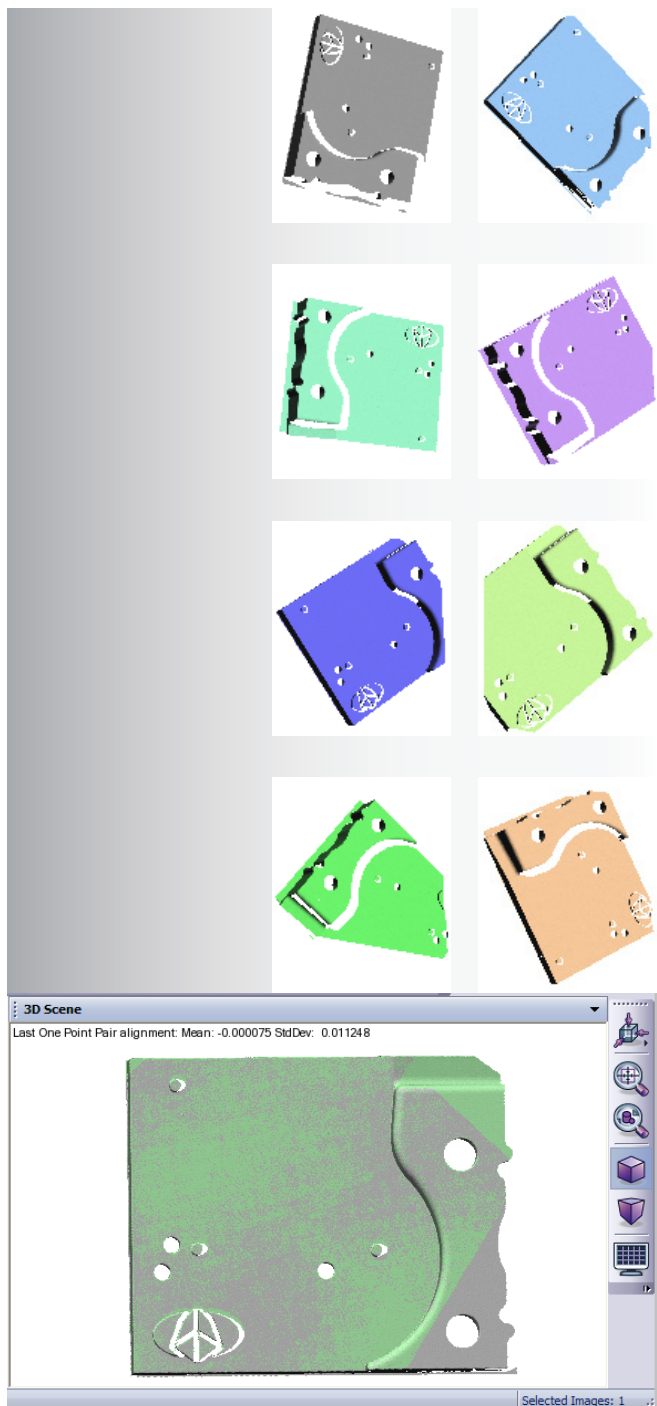
È importante descrivere quali sono le fasi da affrontare durante il processo di Reverse Modeling poiché ognuna di queste, necessita di conoscenze specifiche per la redazione del modello digitale finale. Quest'ultimo deve soddisfare il progettista secondo i criteri di continuità ed accuratezza delle parti. Le fasi operative principali sono tre: acquisizione tridimensionale, editing per le superfici poligonali, modellazione di superfici.

### Acquisizione tridimensionale.

L'acquisizione tridimensionale è il processo che permette di passare da un oggetto fisico alla sua rappresentazione digitale. Le tecnologie di rilievo impiegate, vanno dalla fotogrammetria digitale alla scansione laser e possono essere utilizzate singolarmente o in maniera integrata. In particolare con la scansione 3D, ogni ripresa (range map) può essere immaginata come una foto digitale in cui ad ogni pixel, corrispondono coordinate spaziali di punti dell'oggetto. Nel caso in cui ad ogni ripresa laser venisse affiancata una ripresa fotografica, ad ogni punto è possibile far corrispondere il suo valore RGB. Ovviamente ogni ripresa, nella maggior parte dei casi, non riesce a coprire l'intero oggetto tema dell'acquisizione, quindi sono necessarie più riprese. Nasce l'esigenza del progetto di rilievo per garantire la posizione della camera in maniera relativa, rispetto alle posizioni precedenti e alle successive. L'unione di più riprese singole e la loro fusione in un unico modello poligonale (mesh), permette di creare un modello digitale che, nell'ambito del valore di tolleranza scelto, risulterà fedele al manufatto fisico (fig. 2.01).

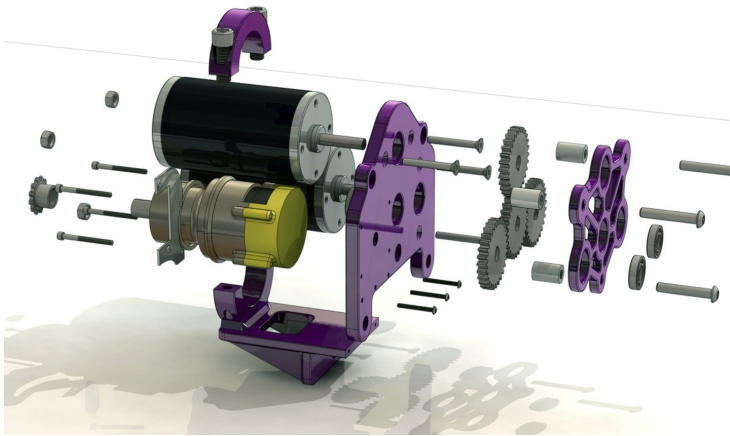
### Editing per le superfici poligonali.

La luce è l'elemento esplorante su cui si basano le tecniche di rilievo digitale più avanzate, ma non è detto che tutte le zone di un oggetto possano essere "viste" dal sensore. L'operazione di editing è necessaria in primo luogo per l'eliminazione dei possibili artefatti generati dai processi di acquisizione, allineamento e fusione, ma anche per l'interpretazione delle eventuali lacune, dovute alla presenza di zone non raggiungibili dalla luce. Al termine di queste procedure, dal modello digitale completo in ogni sua parte,

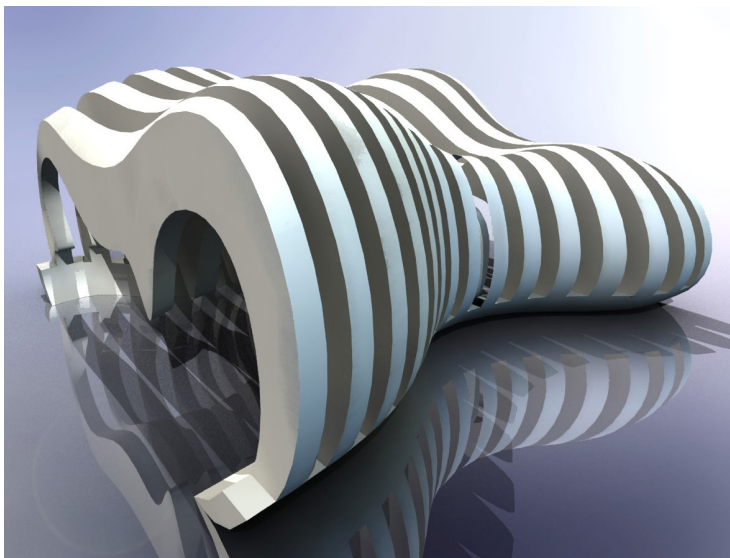


2.01\_ Ad una fase di acquisizione delle range map, segue il filtraggio e la registrazione del dato.

2.02\_ Modello matematico di un complesso meccanico in cui sono presenti chiare primitive 3D.



2.03\_ Modello matematico di una forma organica per la quale è difficile rilevare chiare primitive geometriche.



si possono estrarre semplici informazioni: misure lineari, spessori, diametri. Altri parametri formali più complessi, possono essere estrapolati dal modello digitale come sezioni e superfici di best-fitting. Entrambi questi parametri sono utili ad una ricostruzione matematica, le cui caratteristiche di continuità e misurabilità, costituiscono un ulteriore frutto del processo di Reverse Modeling.

#### *Modellazione di superfici.*

In relazione alle finalità richieste, il modello digitale ricostruito potrà essere rappresentato in maniera continua o discreta. Non solo le finalità, ma anche il modello da acquisire fornisce delle indicazioni sul tipo di rappresentazione che deve essere effettuata: un elemento che si compone di primitive e poliedri, rilevabile per mezzo di metodologie tradizionali, sarà sicuramente rappresentabile con una modellazione matematica. Gli strumenti tradizionali di rilievo, ci portano a conoscenza di quelle entità geometriche che definiscono il carattere dell'oggetto, in seguito facilmente rappresentabili in un sistema CAD. Una ricostruzione digitale di questo tipo, richiede una profonda conoscenza storica e tipologica dell'oggetto trattato, dando come risultato del Reverse Modeling, una interpretazione tridimensionale a partire dagli elementi rilevati. Il risultato della modellazione inversa è una serie di primitive grafiche tridimensionali da comporre insieme (fig. 2.02).

Esistono casi in cui il modello fisico, oggetto del Reverse Modeling è una forma più complessa, contraddistinta da fattezze morbide e priva di geometrie riconoscibili (fig. 2.03). Per il rilievo diretto di un oggetto di tale complessità, non è sufficiente l'utilizzo di opportuni target in grado di agevolare una forma di rilievo diretto. I target sarebbero nella maggior parte dei casi, insufficienti per la descrizione di una forma complessa e comunque difficilmente rilevabili e collocabili all'interno di un sistema di coordinate assoluto. Solo attraverso lo scanner laser 3D, si può ottenere un numero adeguato di punti per la descrizione dell'oggetto. Il dato risultante sarà una nuvola di punti, in grado di descrivere, in maniera discreta, l'andamento della superficie. Durante le operazioni di editing, non si terrà conto dei problemi di continuità tra le parti, poiché la forma è rappresentata da un'unica mesh in grado di rappre-

sentare numericamente l'intero andamento dell'oggetto. I due metodi, la rappresentazione numerica e la rappresentazione matematica, non sono antagonisti e in alcuni casi si incontrano in una metodologia integrata. Infatti la prima rappresentazione, descrive il modello acquisito, diventando successivamente, utile riferimento per una fase più avanzata di Reverse Modeling controllata dalla rappresentazione matematica.

Le moderne procedure partono dalla nuvola registrata ed editata, che sottoposta ad un algoritmo per la creazione di mesh, rappresenta il modello numerico di partenza. Questo è caratterizzato da una maglia poligonale di punti, dal quale si possono ricostruire le superfici matematiche seguendo differenti strade per la ricerca del migliore risultato. Le condizioni da imporre in partenza sono la qualità delle superfici prodotte e l'aderenza del modello matematico al modello poligonale di partenza.

La prima condizione consiste nel ricercare la massima continuità tra le superfici, evitando al contempo, la presenza di flessi indesiderati, non coerenti con l'osservazione della superficie fisica. La seconda condizione, riguarda la tolleranza di ricostruzione che deve essere coerente con le caratteristiche geometriche e formali del modello fisico reale<sup>2</sup>.

Detto questo è importante elencare alcuni metodi di ricostruzione della superficie matematica, mettendone in evidenza pregi e limiti.

Il primo metodo, l'autosurfacing, è totalmente gestito in modo automatico dal software di modellazione, e consente di definire il numero di "patch" che determinano la forma e l'aderenza al modello da ricostruire (fig. 2.04). L'applicazione di tale metodo può essere poco soddisfacente, poiché gli automatismi in gioco tendono a moltiplicare il numero di superfici necessarie a rappresentare la mesh. Gli aspetti positivi di tale tecnica sono il breve tempo di realizzazione e l'automatismo del processo.

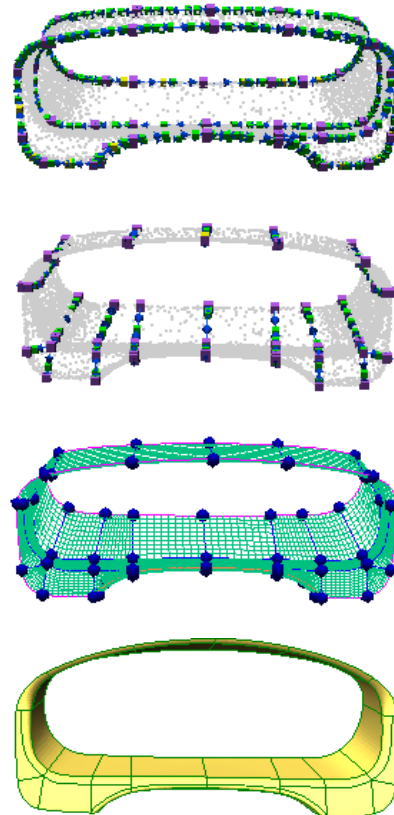
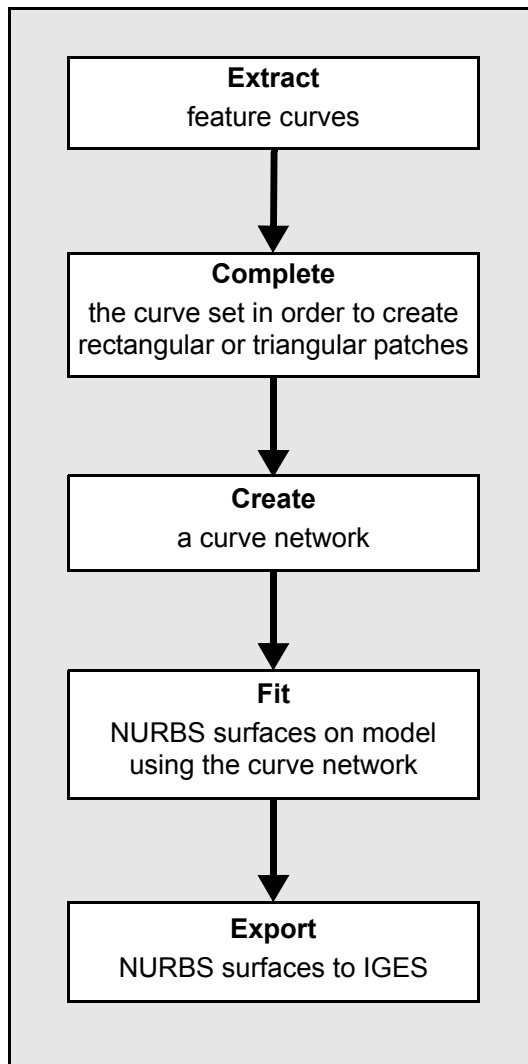
Il secondo metodo, il surface fitting, prevede una elaborazione semi-automatica. Tale metodologia, permette la ricostruzione delle entità attraverso un processo di approssimazione, ancorando sulla superficie poligonale, alcuni punti scelti che rappresentano i vertici delle superfici matematiche. Questa tecnica, difficilmente permette di copri-

2.04\_ Modelli ottenuti con il sistema dell'autosurfacing applicato su rappresentazioni poliedriche generiche.



re l'intera superficie poligonale, quindi è necessario ricostruire in maniera non automatica le parti mancanti. Gli aspetti positivi di tale applicazione, sono il tempo ridotto di realizzazione e la capacità di sfruttare tutte le informazioni geometriche a disposizione. La presenza di flessi all'interno delle superfici e la mancata aderenza di queste al modello poligonale, costituiscono gli aspetti negativi.

Il terzo metodo è la ricostruzione manuale, che permette di generare delle superfici free-form, caratterizzate da una forte flessibilità formale (fig. 2.05). Questo è un processo



due direzioni ortogonali. Più fitto è il passo tra le curve, minore è lo scostamento dal modello numerico acquisito. In fase finale la superficie matematica che rappresenterà il modello verrà fatta scorrere attraverso il network creato.

Ogni passaggio, implica un diverso grado di incertezza, a partire dall'effettiva capacità dell'operatore che deve essere in grado di individuare la giusta maglia di linee. Le curve che si usano, essendo curve polinomiali, fanno riferimento ad un grado, anch'esso incerto e da decidere in funzione di un'analisi critica del modello reale. Anche le superfici messe a disposizione dal software, devono essere gestite impostando la continuità geometrica esistente tra una superficie e l'altra.

Quello appena descritto è un approccio generico al problema che non entra nella specificità degli elementi trattati. In una fase successiva, per quanto riguarda gli oggetti di design, si passerà ad osserva-

2.05\_ A sinistra: scema dell'organizzazione manuale per il processo di Reverse Modeling. A destra: modello esemplificativo elaborato manualmente.

che dà molto spazio all'operatore, il quale deve essere un profondo conoscitore delle forme con le quali si vuole restituire il modello matematico. La conoscenza gli consente di estrapolare dal dato numerico, adoperando opportuni piani di sezione, quei punti in grado di costituire una spezzata, i cui vertici interpolati, danno vita alla curva NURBS, il più aderente possibile alla superficie poliedrica. Le sezioni vengono fatte ad una distanza ponderata e lungo

zioni più profonde che riguarderanno concetti computazionali e di geometria descrittiva.

I tre metodi si utilizzano singolarmente oppure interagiscono sinergicamente. Porzioni di mesh caratterizzate da una forma pressoché regolare, si prestano ad un rapido processo automatico, mentre superfici poliedriche dal contorno irregolare devono essere processate manualmente.

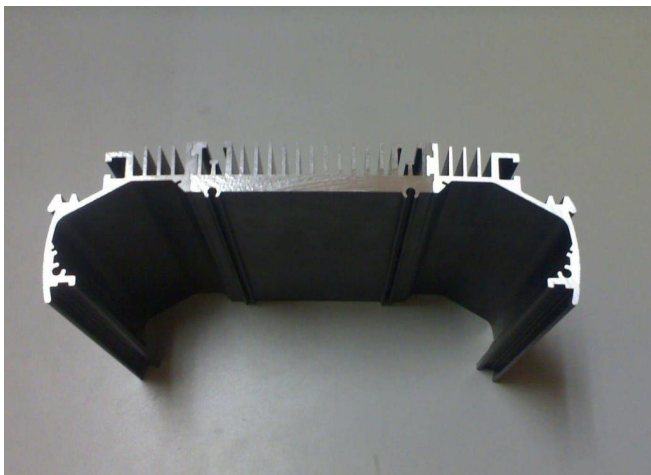


## 2.2 Gli hardware: sensori tridimensionali per il rilevamento

I sensori tridimensionali sono quegli strumenti che in generale consentono di generare un'immagine 3D della scena che inquadrano. Le tre classi tecniche si dividono principalmente in metodi di misura non distruttivi e metodi di misura distruttivi.

Tra i non distruttivi inseriamo i sensori che usano radiazioni luminose non ionizzanti per esplorare, senza alcun contatto fisico, la superficie visibile dell'oggetto. Nel caso in cui la radiazione luminosa rientri nell'ambito dell'infrarosso, si riusciranno ad esplorare anche parti non visibili. Sempre non distruttiva è la classe che usa radiazioni ionizzanti, come i raggi X che, avendo una potenza maggiore della luce visibile, penetrano alcuni materiali rilevandone i contenuti interni. Su questa tecnica si basa la Tomografia Assiale Computerizzata (TAC o CT).

Fanno parte di questa classe i metodi basati su energie radianti non elettromagnetiche come gli ultrasuoni, anch'essi in grado di penetrare all'interno dei materiali con bassa impedenza acustica. Il risultato dell'integrazione di più immagini a ultrasuoni, può condurre a immagini volumetriche analoghe a quelle prodotte dalla TAC. Il problema delle tecnologie basate sugli ultrasuoni, è la bassa risoluzione spaziale già a distanze inferiori al metro.



2.06\_ Prototipo sottoposto ad acquisizione digitale layer by layer attraverso un metodo distruttivo.

I metodi distruttivi prevedono un sezionamento fisico dell'oggetto con sezioni piane ravvicinate tra loro, e l'acquisizione di un'immagine per ogni sezione generata (fig. 2.06). Elaborando tali immagini vengono prodotti contorni di strutture interne ed esterne all'oggetto, dando luogo ad un modello tridimensionale.

I sensori che utilizzano radiazioni luminose non ionizzanti, possono essere ulteriormente suddivisi (fig. 2.07). Sono passivi quando la luce esplorante, è quella dovuta all'irraggiamento solare o all'azione di illuminatori generici posizionati in maniera qualsiasi rispetto al soggetto. Al contrario, se la luce è codificata, in maniera da svolgere un ruolo nel processo di misura, si parla di sensori attivi<sup>3</sup>.

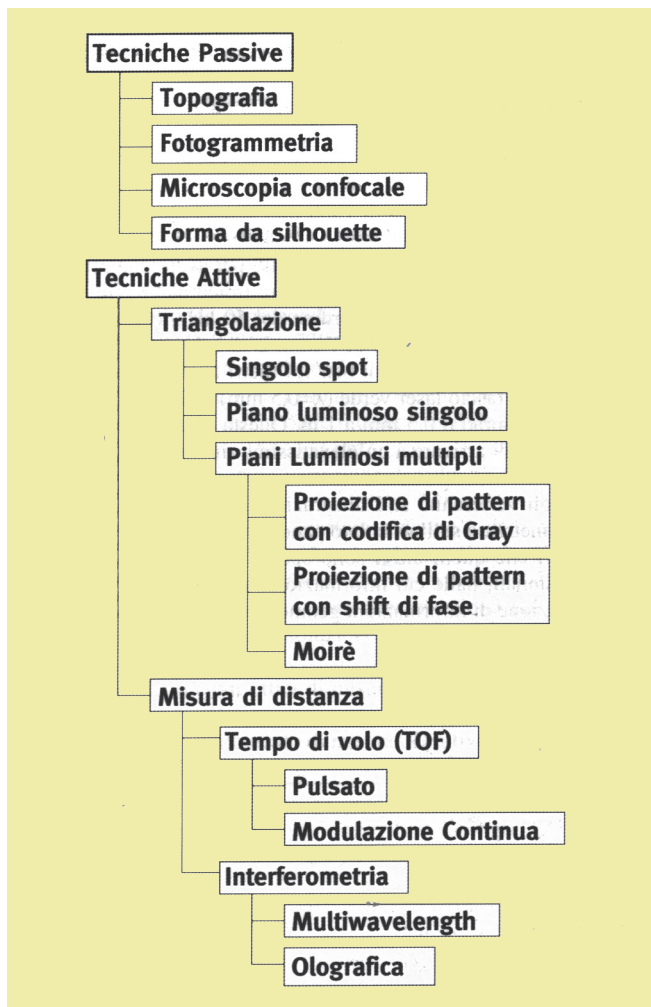
### Sensori 3D passivi.

Limitandoci a sistemi di rilievo legati alla scala architettonica e del design, si può menzionare tra i sistemi passivi la fotogrammetria. Lo strumento di misura è costituito da una macchina fotografica e le misure sono effettuate individuando elementi caratteristici su gruppi di due o più immagini dello stesso oggetto, ripreso da angolazioni diverse (fig. 2.08). La fotogrammetria è un metodo basato su misure angolari che a differenza di altri strumenti, come il teodolite, misura tutti i punti che compaiono sull'immagine catturata.

La fotogrammetria trova larga applicazione in numerosi campi che vanno dalla fotogrammetria aerea, fondamentale per la realizzazione di rilievi cartografici, alla fotogrammetria utilizzata per rilievi di edifici o per misure industriali, anche su oggetti di piccole dimensioni che vanno



da 1 a 10 m come dimensione media. Quest'ultima applicazione in particolare, rende la fotogrammetria utile anche nel campo del design. Infatti rappresenta una di quelle tecniche a basso costo, che potrebbe sostituire i dispendiosi strumenti di rilievo a luce strutturata, solo quando non si vuole produrre una accurata copia digitale dell'oggetto reale, ma si ha necessità di un modello da reinserire nel circuito ideativo.



2.07\_ Tassonomia dei metodi ottici per la misura tridimensionale (da "Acquisizione 3D e modellazione poligonale". G. Guidi, M. Russo, J.A. Beraldin)

2.08\_ (pagina precedente) Apparecchio fotografico digitale per il rilievo fotogrammetrico.

### Sensori 3D attivi.

Con l'avvento del computer e l'invenzione del laser, i sistemi di acquisizione ottica hanno acquisito importanza, arrivando alla creazione dei sistemi tridimensionali attivi (fig. 2.09). I sensori attivi incrementano le possibilità di acquisizione diretta della forma. La luce che investe l'oggetto da misurare non è più irradiata da fonti naturali o lampade artificiali, come nei metodi passivi, ma assume una struttura definita a priori e nota al sensore. Per questo la sorgente di luce è sincronizzata con il sensore ed integrata in un unico strumento, calcolando la misura principalmente in due modi. Il primo si ha con le range camera a triangolazione, basate su un sistema a lama di luce laser o proiezione di opportune sequenze di pattern di luce, appartenenti anche alla frequenza del bianco o non laser. Il secondo adopera scanner che misurano la distanza, stimando il tempo necessario a un impulso di luce dal momento in cui parte dal sensore, raggiunge il bersaglio e torna indietro.

Il vantaggio derivante da una sorgente di luce controllata, è la possibilità di automatizzare il processo di misura dei punti, che non devono essere tralasciati da un operatore umano, ma possono facilmente essere individuati dal sensore stesso. In questo modo si ha la possibilità di ripetere l'operazione di misura rapidamente e automaticamente, accumulando in pochi secondi migliaia di punti con poco dispendio di energie.



Infine l'uso della luce, che sia laser o meno, rende possibile una misura spaziale ad alta risoluzione, rispetto a tecniche basate sul contatto o sull'uso

2.09\_ Scanner laser 3D per l'acquisizione di punti nello spazio.

### 2.3 I formati di scambio

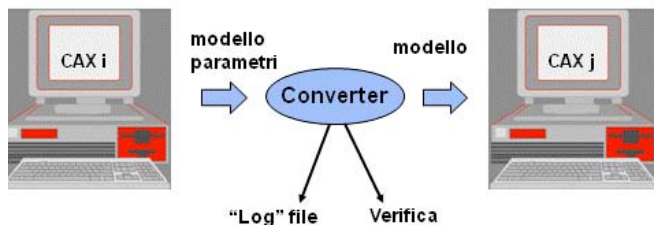
Il passaggio dal reale al digitale, all'interno del percorso progettuale è considerato sempre più indispensabile per sperimentare la validità di un prodotto. Questo passaggio permette alla materia di essere rappresentata numericamente o matematicamente, nelle modalità indicate nel paragrafo precedente.

L'acquisizione ed il passaggio di modelli 3D tra software di natura diversa, o della stessa natura porta all'adozione obbligatoria di formati di scambio standard riconosciuti a livello internazionale. Gli ambienti da far dialogare sono di natura CAD, CAM o CAE e lo scambio di informazioni può avvenire attraverso tre diverse scelte di interfaccia:

- interfacce dirette;
- interfacce basate su standard (STL, IGES, STEP);
- interfacce basate su standard industriali ( es. ACIS, PARASOLID, GRANITE).

La scelta va fatta in funzione del contenuto informativo che deve essere scambiato, dell'affidabilità del trasferimento e con un occhio rivolto alle strategie e all'evoluzione del mercato.

Volendo dare una breve definizione alle interfacce sopra elencate, possiamo dire che le *interfacce dirette* appartengono a tutti quei software in grado di salvare i propri modelli, nel file proprietario del software di destinazione (fig. 2.10). In questo modo all'operatore è richiesta pochissima interazione e alcuna conoscenza di particolari algoritmi da usare durante la fase di conversione che avviene in automatico. L'unica difficoltà è nella comprensione dei "log" file che registrano il processo e ne fanno una diagnostica.



2.10\_ Schema tipo di un formato di scambio per interfacce dirette.



2.11\_ Le interfacce standard permettono ad un maggior numero di sistemi di scambiare file (da it.123rf.com).

Gli aspetti negativi delle interfacce dirette, riguardano il poco controllo sulla qualità del modello esportato o importato che, non essendo direttamente manipolato in fase di conversione, può importare o esportare errori dovuti al file di origine. Ultima considerazione riguarda il fatto che questo tipo di approccio, richiede al software utilizzato, la disponibilità di un certo numero di formati appartenenti ad altri proprietari. La facilitazione data da una rapida conversione, può quindi diventare un limite, recludendo l'operatore progettista in una cerchia limitata di software.

Le *interfacce basate su standard*, nascono appunto per ovviare alla limitatezza di scambi, creando sempre più ponti digitali tra software diversamente specializzati, completando al massimo il lavoro e le competenze del progettista. Questi può avvalersi di una equipe digitale in grado di accompagnarlo e sostenerlo durante il percorso progettuale. Le grandi industrie aeronautiche ed automobilistiche sono state le prime ad abbracciare le interfacce standard poiché, durante lo scambio di modelli, spesso riscontravano ingenti perdite di dati quantificabili in forti passivi economici. Da qui il loro interesse e la partecipazione nell'ideazioni di standard Americani ed Internazionali (ANSI ed ISO). I formati standard sono dei veri e propri moduli digitali preimpostati che devono essere compilati dal software sorgente e letti dal software destinatario. Quindi almeno due convertitori sono coinvolti, ma possono essere molti di più

in funzione dei sistemi in grado di compilare e leggere il formato (fig. 2.11).

Il formato di scambio principe per le rappresentazioni numeriche è STL (Stereo Lithography interface format) che si può presentare in linguaggio binario (.stl), o in linguaggio ASCII (.stla), largamente più utilizzato ma ovviamente più pesante, pur contenendo le stesse informazioni. Pur nascendo specificatamente per la rappresentazione di solidi, quindi shell chiuse, la sua natura lo porta spesso a scambiare shell aperte. Il formato ASCII è strutturato come un file di testo decisamente semplice (fig. 2.12), come semplice è la natura di un modello poligonale composto da facce tutte triangolari. Leggendo l'esempio in figura è facile capire i dati che si possono scambiare con questo formato. A monte troviamo la dichiarazione del solido che si vuole descrivere, subito dopo comincia l'elenco di tutte le facce che compongono quel solido, per ogni faccia si dichiarano i tre vertici e le coordinate del vettore perpendicolare alla faccia. Quest'ultima informazione da valore alla volontà di scambiare solidi, in quanto, in un linguaggio così semplice, le normali, tutte concordi in un solido chiuso, differenziano ciò che è dentro da ciò che è fuori. Come si può osservare, la lista non porta informazioni di tolleranza, di topologia e colore. Per quanto riguarda quest'ultima qualità, alcuni software quali VisCAM, SolidView e Magics, aggiungono alcune righe per dare informazioni RGB. In linea più generale, proprio in questo periodo si sta implementando un nuovo formato (AMF, Additive Manufactu-

```
solid name

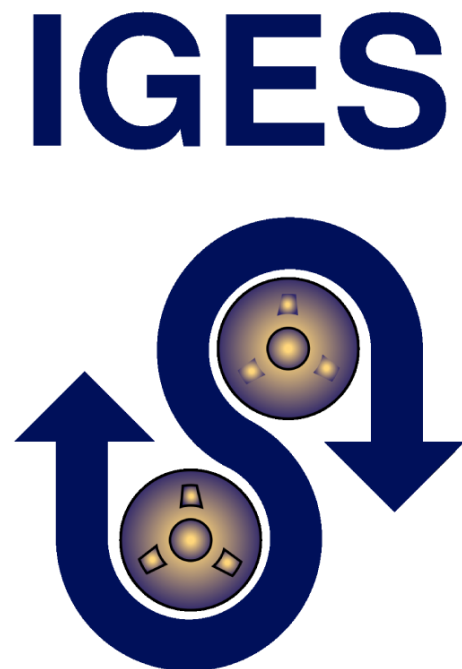
facet normal ni nj nk
outer loop
vertex v1x v1y v1z
vertex v2x v2y v2z
vertex v3x v3y v3z
endloop
endfacet

endsolid name
```

2.12\_ Listato tipo di un'interfaccia standard per lo scambio di modelli numerici.

ring File Format), in grado di contenere in maniera standard queste informazioni.

Per quanto riguarda la rappresentazione matematica, lo standard più diffuso è IGES (Initial Graphic Exchange Specification) (fig. 2.13). Anche questo nasce per esigenze commerciali nel 1979. Multinazionali come la Boeing, con necessità di razionalizzare i rapporti commerciali con fornitori e clienti, costringevano a scambiare dati CAD solo in questo formato allora agli esordi. La versione 1.0 supportava esclusivamente dati bidimensionali e visualizzazione in wireframe, fino ad arrivare all'odierna versione (5.3) nell'arco di pochi anni. Le esigenze delle diverse aziende di avere standard su misura, hanno portato ad una implementazione del formato di scambio in maniera rapida e non controllata, dando vita a diversi "dialetti", a volte non condivisi da alcuni software. Le varianti riguardano i vari tipi di rappresentazione, adottate per la descrizione di geometria 3D e il numero di entità scambiabili per mezzo di questo standard.



2.13\_ Logo del progetto IGES, interfaccia standard per lo scambio di modelli matematici.

Un formato IGES è descritto attraverso un file di testo ASCII la cui larghezza è fissata ad 80 colonne, scandite verticalmente in 5 sezioni che possono essere descritte brevemente per capire la qualità del dato scambiato (fig. 2.14). Nella Start section (S), vi sono commenti editabili riguardanti il nome del file, l'ente che l'ha generato, numeri di telefono ed altri dati che descrivono la fonte che ha generato il file.

Nella Global section (G), vengono date informazioni che riguardano l'intero modello: sistema CAD di provenienza,

versione di IGES, standard di disegno (ISO o ANSI) ma soprattutto viene dichiarata l'unità di misura e la tolleranza.

A queste due sezioni segue la Directory entry (D), la quale elenca in forma numerica le entità che concorrono alla formazione del modello vero e proprio: linee, cerchi, NURBS, quote, annotazioni, solidi B-Rep ecc. I valori numerici che definiscono le entità corrispondenti presenti nella sezione precedente si trovano in Parameter data (P).

Infine c'è la Terminal section (T), un'ultima riga che rias-

S	1										
1H, , 1H; , 4H SLOT, 37H\$1\$DUA2: [IGESLIB.BDRAFT.B2I] SLOT.IGS; ,									G	1	
17HBravo3 BravoDRAFT, 31HBravo3->IGES V3.002 (02-Oct-87), 32, 38, 6, 38, 15,									G	2	
4H SLOT, 1., 1, 4HINCH, 8, 0.08, 13H871006.192927, 1.E-06, 6.,									G	3	
31HD. A. Harrod, Tel. 313/995-6333, 24HAPPLICON - Ann Arbor, MI, 4, 0;									G	4	
116	1	0	1	0	0	0	0	0	1D	1	
116	1	5	1	0					0D	2	
116	2	0	1	0	0	0	0	0	1D	3	
116	1	5	1	0					0D	4	
100	3	0	1	0	0	0	0	0	1D	5	
100	1	2	1	0					0D	6	
100	4	0	1	0	0	0	0	0	1D	7	
100	1	2	1	0					0D	8	
110	5	0	1	0	0	0	0	0	1D	9	
110	1	3	1	0					0D	10	
110	6	0	1	0	0	0	0	0	1D	11	
110	1	3	1	0					0D	12	
116, 0., 0., 0., 0, 0, 0;									1P	1	
116, 5., 0., 0., 0, 0, 0;									3P	2	
100, 0., 0., 0., 0., 1., 0., -1., 0, 0;									5P	3	
100, 0., 5., 0., 5., -1., 5., 1., 0, 0;									7P	4	
110, 0., -1., 0., 5., -1., 0., 0, 0;									9P	5	
110, 0., 1., 0., 5., 1., 0., 0, 0;									11P	6	
S	1G	4D	12P	6					T	1	

2.14\_ Listato tipo di un'interfaccia standard IGES per lo scambio di modelli matematici.

sume l'intero contenuto del modulo IGES il cui scopo è quello del controllo.

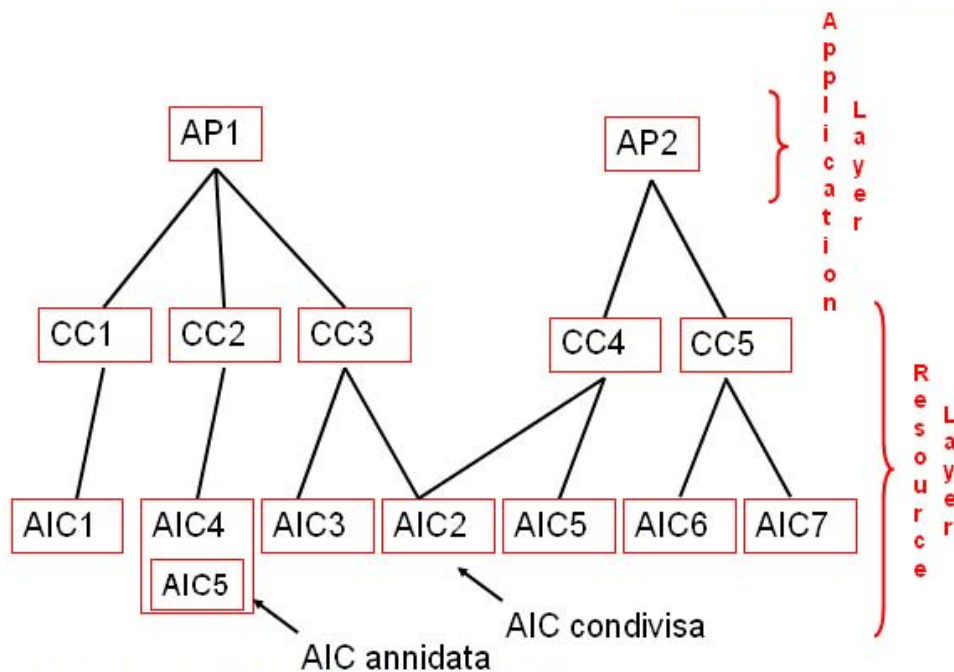
Come abbiamo visto, questo tipo di standard arrivato alla versione 5.3, si è formato nel tempo in maniera poco regolata, imbrigliata volta per volta nella normativa corrente. In futuro ci sarà un'ultima versione per poi essere completamente abbandonata per un formato di nuovo sviluppo: lo standard STEP.

L'ultima parola nell'unificazione delle interfaccia standard è stata detta con la ISO 10303, nome ufficiale STEP (Standard for Exchange of Product model data – “Norme per lo Scambio dei dati dei Prodotti”), con questo si vogliono sostituire tutti gli standard esistenti per i seguenti sistemi: CAD, CAM, CAE.

Nasce nel 1984, ma viene fortemente codificato dal 1994 al 1999. Vuole con il suo schema chiaro e strutturato, sostituire tutti gli standard esistenti per la rappresentazione di modelli durante tutto il “life cycle” del prodotto. Gli sviluppatori di questo standard, memori delle esperienze

passate e consapevoli della complessità del ciclo di vita di un prodotto, si sono resi conto dell'impossibilità di racchiudere tale varianza in un unico modello d'interfaccia, ecco perché si è pensato ad una struttura modulare e gerarchica (fig. 2.15). I diversi moduli sono ordinati in tre livelli a formare una struttura piramidale dove, si passa da una sezione più alta con contenuti generici riguardanti il modello, a quella più bassa in cui lo stesso viene descritto attraverso puntuali specifiche.

Il livello più alto è quello degli Application Protocols (AP), che danno informazioni sul settore industriale di riferimento del modello da scambiare: ad esempio abbiamo l'AP 203, Configuration Controlled Design (Progetto con configurazione controllata), oppure l'AP 214, Core Data for Automotive mechanical Design Process (Dati Principali per i Progetti di Meccanica Automobilistica) (fig. 2.16). Ciascun Application Protocols contiene una o più Conformance Classes (CC), che fanno riferimento ai tipi di oggetto appartenenti a quel settore industriale. Prendiamo ad esempio L'AP 203 CC 6, Shape Models in



2.15\_ Struttura piramidale dei moduli che contengono le informazioni contenute dalle interfacce STEP per lo scambio di modelli matematici.

Boundary Representation, oppure l'AP 214 CC 1 Component Design with 3D Shape Representation, in cui si esternalano i tipi di modellazione matematica che rappresentano il prodotto. Queste rappresentazioni avvengono per mezzo di geometrie dichiarate negli Application Interpreted Constructs (AIC), infatti in questo modulo si elencano con dei numeri le diverse geometrie strumentali per la creazione del modello digitale.

Le basi di una struttura così rigida spesso sono condivise da più Conformance Classes, in questo modo due AP diversi possono scambiare gli stessi dati. Oggi la maggior parte delle aziende produttrici di software per la modellazione, implementano principalmente AP203 CC 2, 4, 6, che riguardano geometria rappresentata attraverso modelli

wireframe, modelli di tipo surface manifold e Advanced B-Rep, che assieme ad AP 201 e AP 202 ricoprono tutte le funzionalità di IGES, con una buona percentuale di successo nello scambio della maggior parte dei dati.

Il futuro vede quindi la completa sostituzione del formato IGES, e per questo, è importante adottare programmi che contemplino tali innovazioni nel loro organico funzionale.

```
ISO-10303-21;
HEADER;
FILE_DESCRIPTION(
/* descrizione */ ('Un esempio semplice di AP214 con un solo componente'),
/* livello */ '2;1');
FILE_NAME(
/* nominare */ 'demo',
/* tempo_e_data */ '2006-08-11T11:57:53',
/* autore */ ('Alessandro Manzoni'),
/* organizzazione */ ('JFBA, Inc. '),
/* versione */ ' ',
/* sistema */ 'IDA-STEP',
/* autorizzazione */ ' ');
FILE_SCHEMA (('CONCEZIONE_AUTOMOBILISTICA { 1 0 10303 214 2 1 1}'))
ENDSEC;
DATA;
#10=ORGANIZZAZIONE('00001', 'JFBA S.A.', 'società');
#11=CONTESTO_DI_DEFINIZIONE_DI_PRODOTTO('DEFINIZIONE_DI_COMPONENTE', #12, 'fabbricazione')
#12=CONTESTO DELLA_DOMANDA('concezione_meccanica');
#13=DEFINIZIONE_DI_PROTOCOLLO(, 'concezione_automatica', 2006, #12);
#14=DEFINIZIONE_DI_PRODOTTO('0', $, #15, #11);
#15=FORMAZIONE_Di_DEFINIZIONE_DI_PRODOTTO('1', $, #16);
#16=PRODOTTO('A0001', 'componente sperimentale', ' ', (#18));
#17=CATEGORIA_RELATIVA_AL_PRODOTTO('Componente', $, (#16));
#18=CONTESTO_DEL_PRODOTTO(' ', #12, ' ');
#19=RICHIESTA_DELL'_ORGANIZZAZIONE(#10, #20, (#16));
#20=RUOLO_DELL'_ORGANIZZAZIONE('CODICI_DI_IDENTIFICAZIONE');
ENDSEC;
END-ISO-10303-21;
```

2.16\_ Listato tipo di un'interfaccia standard STEP per lo scambio di modelli matematici.

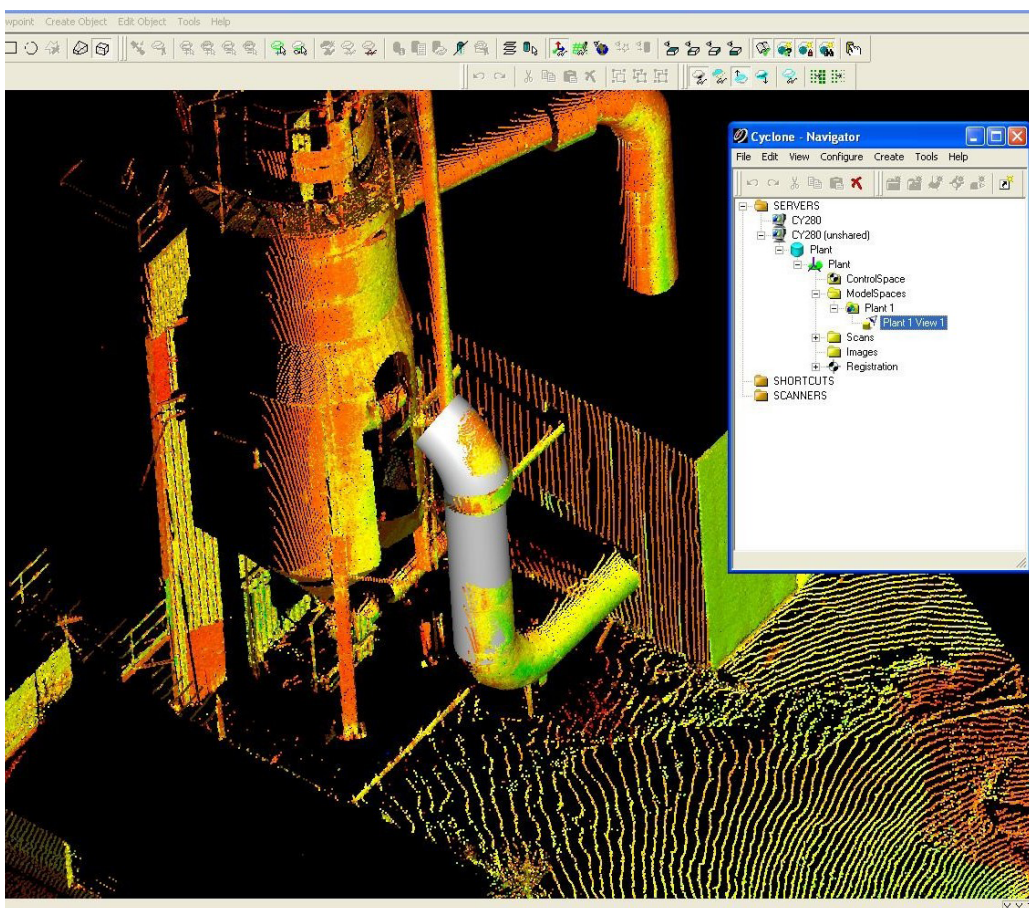
### 2.4 I software per l'acquisizione ed il Reverse Modeling

Il panorama illustrato nei paragrafi precedenti, rende evidente quanto sia importante l'ausilio di competenze che una sola persona non è in grado di possedere. Per esempio già la fase di acquisizione presenta un confronto tra operatore e macchine in continua evoluzione; confronto impari se non ci fossero dei software di interfaccia che supportino l'utente e lo guidino durante la fase di rilevamento. L'editing del dato grezzo, mette in gioco conoscenze matematico-computazionali degne delle migliori menti, ma anche in questo caso, i software interagiscono con i progettisti estrapolando dalla miriade di operazioni, solo quelle chia-

ve e ponendole in maniera chiara all'utente che è conoscitore della materia, ma non esperto nei meccanismi. La matematica è ancora padrona dell'ultima fase di rappresentazione delle forme nello spazio digitale. La letteratura presente al riguardo evidenzia come la geometria differenziale, l'analisi vettoriale, le operazioni booleane ed altri argomenti simili siano alla base delle operazioni di RM. Tutta quest'equipe di scienziati, può essere brillantemente sostituita da programmi che completano e sono d'ausilio al progettista durante il suo percorso ideativo.

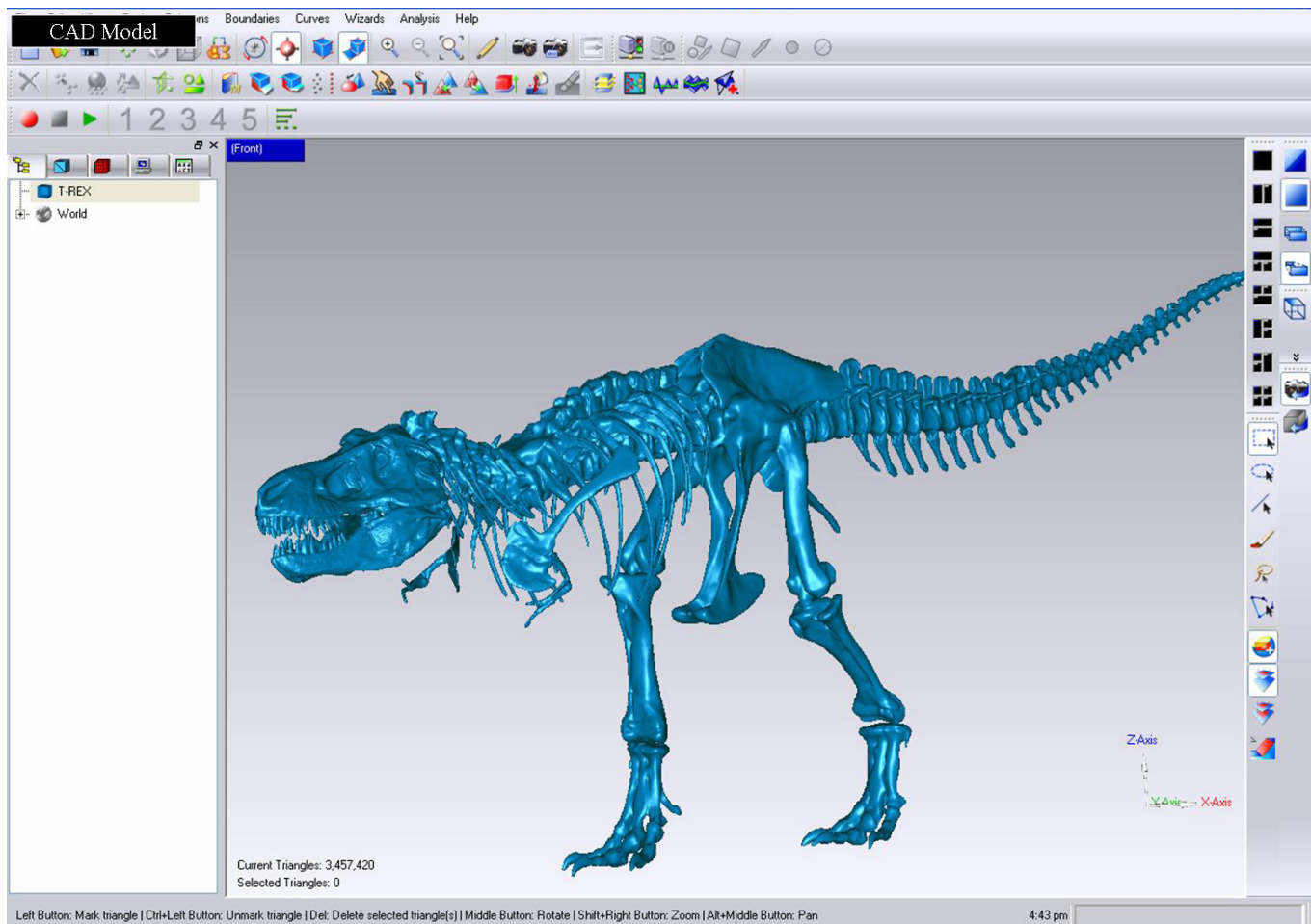
Quello di cui si vuole parlare, sono i software in grado di partecipare alle operazioni di Reverse Modeling, per cui una forte selezione avviene tra gli applicativi per la gestione di entità poliedriche. Infatti si escludono, tutti quegli strumenti che non sono in grado di manipolare il dato grezzo proveniente dal laser scanner (vedi software come Cinema 4D, 3Dstudio ecc.).

Tra quelli congeniali, si riconoscono due categorie di software: da una parte, i pacchetti legati ai macchinari per l'acquisizione (fig. 2.17), dall'altra, software generici che accolgono i dati digitalizzati, attraverso formati di scambio standard (Ricordiamo il formato STL per dati numerici) (fig. 2.18). I primi, generalmente sono provvisti di ottimi strumenti per la registrazione delle parti di nuvole acquisite esaltando spesso il dato, attraverso l'applicazione di informazioni RGB su ogni coordinata spaziale acquisita.



2.17\_ Screenshot di una nuvola di punti del software Cyclone della casa produttrice di strumenti di misurazione Leica.





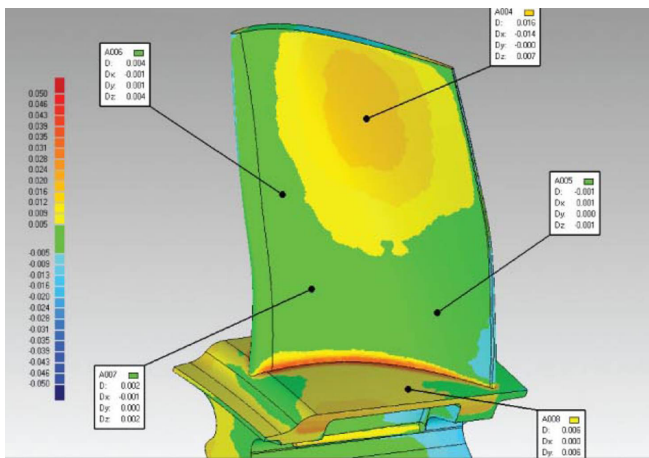
2.18\_ Screenshot di una mesh elaborata in Geomagic Studio, software generico in grado di gestire interfacce standard.

Più difficoltoso è l'editing sia della nuvola di punti che della mesh risultante. Per questa tipologia di software è molto difficile riconoscere forme in maniera automatica o semiautomatica, proponendo poche primitive grafiche per la rappresentazione matematica.

I software generici, al contrario, sono limitati nella fase di registrazione, ma decisamente migliori durante l'editing della nuvola di punti, la ricostruzione delle mesh, la riduzione del rumore e l'eliminazione di lacune dovute ad assenza di dato. Con questi è possibile perseguire uno degli obiettivi dichiarati del processo di Reverse Modeling, per cui il risultato è la copia formale del modello fisico

rappresentato numericamente. Con i software generici, si può approfondire il percorso di RM giungendo a superfici completamente parametriche. Per far ciò bisogna creare dei presupposti matematici, a partire dal modello numerico, innescando gli algoritmi in grado di estrapolare dal dato discreto, le superfici NURBS. Nei software generici il dato viene preparato in modo da poter perseguire i seguenti obiettivi: la segmentazione del poliedro mesh in regioni quadrilatere; la rappresentazione matematica delle superfici all'interno delle regioni individuate nel punto precedente; la ricostruzione delle relazioni tra le porzioni di superficie.

La superficie NURBS ottenuta a seguito del processo de-



2.19\_ *Rappresentazione cromatica della deviazione esistente tra modello matematico creato e modello numerico acquisito.*

vono rivelarsi il più aderenti possibile al modello discreto. Il programma si avvale di strumenti in grado di valutare la deviazione esistente tra le due rappresentazioni che, ad operazioni effettuate, convivono nello stesso spazio digitale (fig. 2.19). Per far questo si deve ricorrere ad una prima operazione di allineamento delle due rappresentazioni e poi al calcolo della distanza esistente tra i vertici della mesh e la loro proiezione sulla superficie NURBS. I dati risultanti mostreranno, oltre alla visualizzazione cromatica, il punto di deviazione massima, il punto di deviazione minima e la deviazione media. La visualizzazione si ottiene applicando un gradiente di colore variabile in relazione alla distanza rilevata.

Quelli su elencati sono gli strumenti minimi di cui un buon software per il Reverse Modeling deve disporre e attraverso la presenza o meno di questi, è possibile individuare alcuni tra i più potenti in commercio. I software leader nel campo del Reverse Engineering, supportati anche da importanti gruppi di ricerca, sono Geomagic, PolyWorks e RapidForm. Programmi accomunati da un'ottima gestione del dato numerico, a partire dal processo di acquisizione. Negli ultimi anni, inoltre, hanno integrato formati proprietari di scambio delle più grandi aziende produttrici di scanner 3D quali Leica e Konika Minolta. Attraverso i loro strumenti sono in grado di gestire tutto il flusso di lavoro:

dalla digitalizzazione del modello fisico alla costruzione delle patch matematiche. Software che diventano una cabina di regia da cui esportare formati specifici utili alla ricostruzione numerica, matematica e alle analisi formali e statiche. Infatti alcuni di loro forniscono tools per la creazione delle superfici NURBS per la rappresentazione continua del modello acquisito. Inoltre si potranno estrarre delle spline di bordo, delle curve longitudinali e trasversali e costruire una maglia guida per le pezze di NURBS che, poste nella giusta continuità, daranno forma al manufatto, obiettivo dell'intero processo di Reverse Modeling.

Per ulteriori processi di ingegnerizzazione quali adozione di spessore, posizionamento di flange di irrigidimento, fori, filettature, smussi e raccordi, si utilizzano programmi come Catia e SolidWorks (Desault), Alias (Autodesk), Rhinoceros (McNeel), che esprimono il loro potenziale su curve e superfici parametriche. I formati ponte tra i software di editing matematico, sono IGES e STEP. Essendo questi rivolti alla modellazione di entità continue, per poter importare all'interno di essi modelli mesh, gli sviluppatori hanno implementato appositi moduli aggiuntivi quali Reverse Engineering 2 (RE2) per CATIA, che offre un potente sistema, adatto a lavorare con mesh composte da un enorme numero di punti. Complementare a RE2 è Quick Surface Reconstruction 2 (QSR2), che fornisce al software della Desault, strumenti utili per una ricostruzione rapida e facile delle superfici partendo dalla nuvola di punti. Inoltre offre diversi approcci a seconda del tipo di oggetto analizzato: comandi di free form fitting, per oggetti morbidi, identificazioni automatica di forme primarie (piani, cilindri, sfere, con) comuni negli oggetti meccanici e la possibilità di estendere le superfici primarie. La casa Revware, già Design Automation, ha sviluppato Rev Works, modulo integrativo offerto al partner CAD SolidWorks. Questo prodotto è essenzialmente una funzionale barra degli strumenti, nella quale sono collezionate le operazioni di calibrazione di base per una buona ingegnerizzazione. Infine, un altro strumento specialistico è CopyCAD, della Società Delcam, volto a produrre superfici CAD morbide a partire da dati digitalizzati. E' quindi l'ideale per la generazione di superfici con un alto grado di curvatura.

## 2.5 Le aree disciplinari d'interesse

Il Reverse Engineering (RE), è una disciplina in rapida evoluzione che oggi si inserisce in un ampio numero di attività. Le aree d'interesse spaziano dalla metrologia, il controllo qualità, il design, la realtà virtuale, le applicazioni medicali o chirurgiche e la ricostruzione di artefatti nel settore della conservazione dei beni culturali.

Attualmente, i sistemi di acquisizione di forme fisiche ed i software di gestione dei dati acquisiti, hanno raggiunto uno sviluppo tale da essere in grado di riprodurre e manipolare geometrie di oggetti complessi, con elevata precisione e ripetibilità delle operazioni svolte. Ogni disciplina possiede una diversa metodologia di approccio alle problematiche, che sono tra loro diverse.

In questa parte del testo verranno prese in esame ed analizzate alcune aree disciplinari, in cui l'attività di Modellazione Inversa sta aprendo grandi scenari per la ricerca, già oggi foriera di importanti valori aggiunti.

### Settore medicale

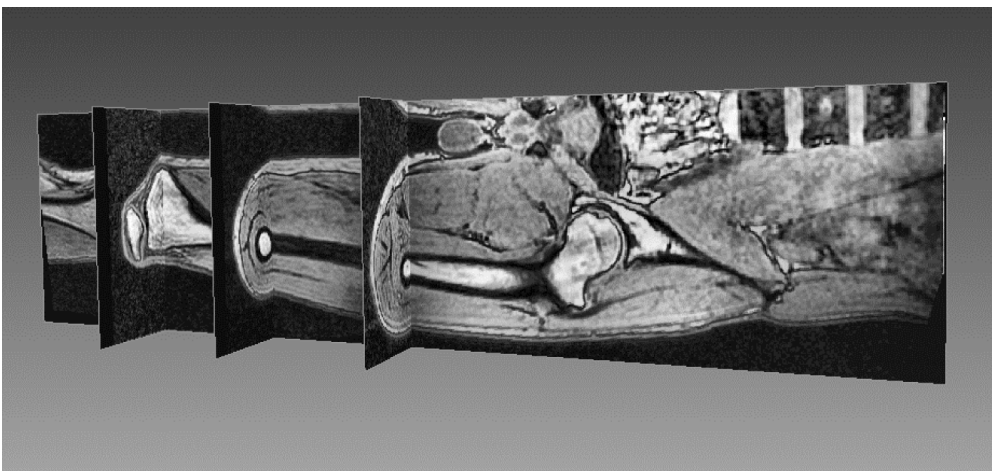
Nel campo medico il processo di RE diventa utilissimo, in quanto consente la ricostruzione di alcune particolari strutture anatomiche e biologiche: strutture ossee, muscolari, articolari ed altre parti del corpo, fino ad arrivare alla

ricostruzione, nello spazio 3D digitale, del volto dei pazienti. Come è stato già detto in precedenza, le strumentazioni utilizzate per l'acquisizione formale dei modelli fisici, possono essere di diversa natura. Dovendo in ambito medicale, acquisire anche parti interne al corpo umano, è necessario utilizzare strumenti capaci di vedere queste parti. Ecco il perché dell'utilizzo di bio-immagini frutto di Termografie Assiali Computerizzate (TAC) e Risonanze Magnetiche Nucleari (RMN); che consentono l'acquisizione, in maniera non invasiva, di strutture e tessuti umani (fig.2.20).

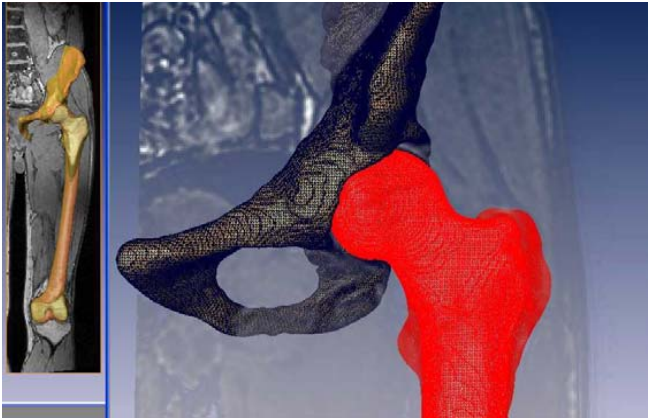
La ricostruzione di strutture anatomiche o ossee, a partire da immagini di questo tipo, è possibile grazie all'utilizzo di appositi software in grado di interpolare le informazioni provenienti da TAC o RMN.

Per capire qual è il dato di partenza, è necessario intuire quali sono i principi che permettono di vedere all'interno del corpo umano grazie a questi strumenti. Mentre per quanto riguarda i laser scanner utilizzati in architettura e design, i dati di rilievo sono frutto della riflessione del materiale, nell'ambito medicale si valuta l'assorbimento delle parti in oggetto. Per questo motivo emettitore e ricevitore sono posizionati l'uno di fronte all'altro. Una sola ripresa non basta ad ottenere una quantità utile di informazioni, di conseguenza, ruotando attorno l'asse, si accumuleranno

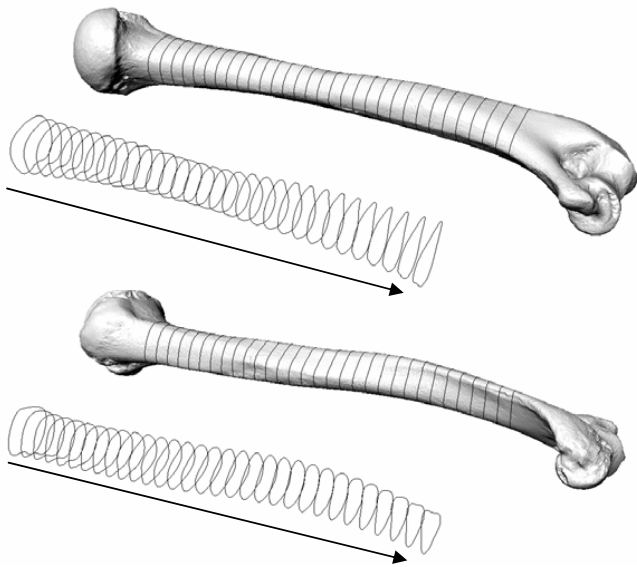
i dati strettamente necessari, per costruire l'immagine dello strato trasversale studiato. Un apposito elaboratore memorizzerà i valori corrispondenti alle singole misurazioni, relative a tutto lo strato esplorato e risolvendo in tempo brevissimo equazioni matematiche assai complesse. Lo stesso software specialistico, è in grado di suddividere idealmente lo strato in numerosi prismi verticali, a sezione quadrata, la cui altezza corrisponde allo spessore dello strato e il cui lato minore, è tanto più pic-



2.20\_ Composizione di bioimmagini rilevate con la tecnica della Risonanza Magnetica Nucleare (da "Applicazioni di Reverse Engineering in campo medico per la ricostruzione di strutture ossee in chirurgia ortopedica.", C.Bandera, S.Filipi, B.Motyl, C.Frigo, E.Pavan, E.De Momi.



2.21\_ Rappresentazione numerico del modello di femore e bacino. (da "Applicazioni di Reverse Engineering in campo medico per la ricostruzione di strutture ossee in chirurgia ortopedica.", C.Bandera, S.Filipi, B.Motyl, C.Frigo, E.Pavan, E.De Momi).



2.22\_ Estrapolazioni delle sezioni ossee sui modelli digitali dell'omero destro e sinistro (da "Strumenti e metodi applicati alla conservazione e valorizzazione dei beni culturali", M. Fantini).

colo quanto maggiore è stato il numero delle misurazioni effettuate. Questo microvolume ideale corrisponde alla frazione elementare dell'immagine che viene definita "voxel". Per ciascuno dei microvolumi elementari, l'elaboratore elettronico è in grado di quantificare il coefficiente

di attenuazione e quindi di determinare un valore numerico di radiopacità o radiotrasparenza. Sul monitor viene quindi rappresentata un'immagine costituita da altrettanto numerosi quadratini (pixel), ciascuno dei quali presenta un tono grigio corrispondente al valore di densità assegnato al rispettivo voxel. Nella pratica per ottenere immagini ben definite, è indispensabile che i singoli microvolumi siano assai piccoli; pertanto è necessario che lo strato trasversale prescelto venga esaminato secondo numerosissime incidenze e quindi con altrettanto numerose misurazioni. L'operazione appena spiegata può essere ripetuta per più strati perpendicolari all'asse, per una distanza che va da 1mm a 10 mm, con spessore che varia in funzione del numero di rilevamenti effettuati sul corpo del paziente. Più saranno i rilevamenti, migliore sarà la risoluzione delle "slice", che trasversalmente descriveranno il corpo.

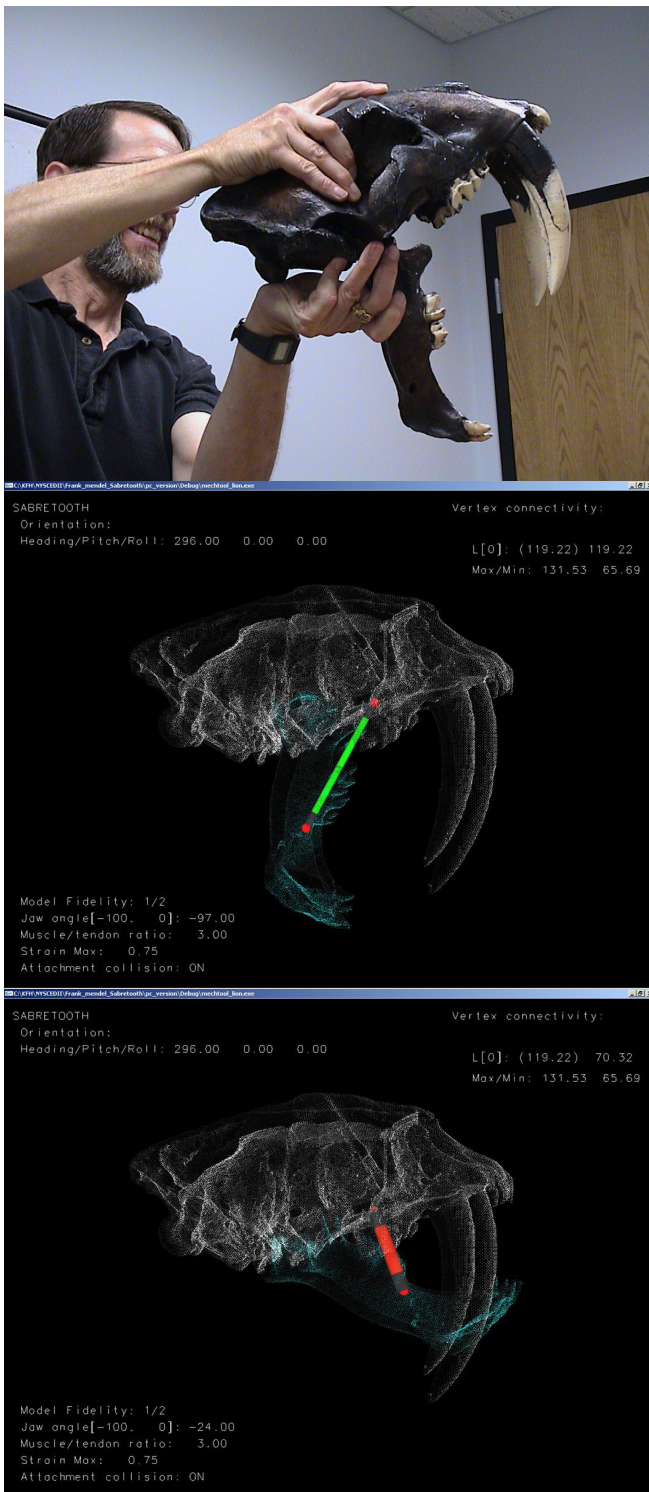
Attraverso appropriati software sarà possibile selezionare in maniera ordinata le bio-immagini generate, ripulirle da oggetti estranei, isolando e contrastando le aree che descrivono la struttura o il tessuto interessato.

Il modello 3D mesh si realizzerà attraverso appositi algoritmi (fig. 2.21). Questo, una volta salvato in un formato di scambio STL può essere esportato in software per le simulazioni chirurgiche o per la prototipazione rapida di impianti e protesi (fig. 2.22).

Una condizione di questo tipo, consente ai medici di poter effettuare valutazioni direttamente di fronte ai dati del problema, infatti i modelli virtuali e fisici verranno utilizzati per attività di simulazione, di pianificazione chirurgica e per interventi di chirurgia ortopedica per l'inserimento di protesi<sup>4</sup>.

Altro ancora si sta facendo in ambito di protesi facciali, in questo caso attraverso l'utilizzo di laser scanner 3D, è possibile acquisire il volto del paziente per simulare sulla rappresentazione digitale gli esiti degli interventi. Ma ancora, sfruttando la simmetria del viso, si può acquisire la zona sana, specchiarla, apportare le dovute modifiche, e quindi attraverso apposite stampanti 3D, creare il prototipo o la protesi da innestare.

In altre aree, gruppi di ricerca si stanno cimentando nella ricostruzione digitale di fossili. O meglio lo studio del comportamento di vertebrati estinti, partendo dal Reverse Modeling delle sue componenti ossee (fig. 2.23). In am-



biente CAE, poi vengono applicati i vincoli dovuti alla presenza dell'apparato muscolare, in modo da simulare i movimenti dell'intero apparato locomotore. L'animazione di modelli scheletrici permetterà di capire meglio il rapporto tra forma, funzione e comportamento degli esseri viventi passati e presenti, avendo questa ricerca, importanti ricadute in ambiente medico e dentistico<sup>5</sup>.

### Settore dentale

L'odontoiatria è un ambito in cui il processo di Reverse Engineering è molto utilizzato. Esistono alcuni software dedicati alla scansione odontoiatrica per la produzione di stampi. Gli hardware per queste applicazioni devono soddisfare dei severi requisiti, come ad esempio una risoluzione spaziale molto alta, ciò richiede un laser con un'ottima messa a fuoco a distanze ravvicinate.

Il processo parte da una serie di scansioni raccolte sul calco dentale fatto sul paziente (fig. 2.24). I dati provenienti dalle scansioni, vengono inviati ad un tecnico esperto nella modellazione inversa per creare il modello digitale per la prototipazione. Questo sarà utilizzato per simulare gli in-



2.23\_ Applicazione del Vertebrate Analyzer (VA) sul teschio di un vertebrato estinto (da "Development of a computational toolkit for biomechanical analysis and simulation: the vertebrate analyzer", K.F. Hulme, F.C. Mendel, K.P. Chugh).

2.24\_ Modello numerico frutto di acquisizione di un calco dentale per la produzione di un modello fisico.

terventi che realmente verranno effettuati sul paziente. Tra i software utilizzati per questo scopo, è molto utilizzata la piattaforma Geomagic, con cui si manipolano i dati del modello 3D da inviare ad una macchina per stereolitografie, che produce tutte le parti necessarie per il set dentario completo. Con questa serie di dati elaborati, vengono prodotte delle conchiglie termoformate da spedire al dentista locale. Questi potrà vedere e simulare gli interventi che in alcuni casi sono progressivi, quindi è necessario avere il prototipo con il quale valutare le giuste soluzioni terapeutiche nel tempo.

La tecnologia di Reverse Engineering appena accennata, consente di produrre modelli per allineatori in diverse fasi del trattamento, rendendo possibile la simulazione per gli interventi di correzione ortodontica, utilizzando i dati appartenenti ai pazienti. Il Reverse Engineering, in questo ambito porta benefici economici e risparmio di tempo dovuto ad una massa di produzione delle protesi provenienti da file di un singolo individuo<sup>6</sup>.

#### *Produzione e controllo dei prodotti*

In molti settori, come quello aerospaziale e automobilistico, la capacità di fornire servizi di alta qualità e produrre parti complesse che soddisfino rigorosi criteri di qualità, è un fattore chiave del business. Il controllo del prodotto costruito, attraverso il confronto con i modelli solidi 3D progettati, comprensivi di precise caratteristiche tecniche, è diventato sempre più importante. Quanto detto avviene per mezzo della lettura del dato di deviazione tra modello 3D progettato e le superfici dell'oggetto costruito acquisite al laser scanner. Inoltre si ha la necessità di impostare delle tolleranze di deviazione tra prototipo del prodotto e modello digitale, considerato che il processo di prototipazione, non sempre replica con precisione il modello al computer. In alcune situazioni, i dati di scansione 3D delle parti da produrre, sono paragonabili, sotto l'aspetto dimensionale, al modello progettato al CAD, fermo restando le tolleranze critiche e gli standard di qualità imposti nel confronto.

Paraform Inspection è un prodotto progettato per questa esigenza di mercato: facile da usare, oltre che veloce e preciso. Tradizionalmente, è possibile solo il controllo CMM, con cui si valutano soltanto i punti critici dei dati, ma il processo è lento e non dà il quadro completo. Tuttavia, con

l'avvento di strumenti di scansione ad alta velocità e controllo, i dati delle nuvole di punti possono essere comparate ai dati di progetto. Dal dato di progetto, è possibile visualizzare la deviazione, in modo da poter adottare misure correttive. Howmet, una divisione di Alcoa che produce motori a compressione per aerei e pale delle turbine, ha implementato un primo articolo che combina uno scanner a luce bianca, con un software per l'ispezione (computer-aided-inspection software) della Raindrop Geomagic. Lo scanner digitalizza l'elemento proiettando pattern di luce bianca sulla superficie dell'oggetto, la conformazione che assume il pattern viene acquisita con immagini stereo fotogrammetriche, con cui si possono calcolare precise coordinate spaziali di milioni di punti in pochi secondi.

La nuvola di punti della lama acquisita viene salvata nel formato STL e portata in Geomagic Qualify, nel cui spazio digitale, il modello acquisito ed il modello di progetto, si confrontano manifestando in maniera visiva le soglie di criticità.

#### *Beni Culturali*

Virtual heritage (patrimonio virtuale) è il termine scelto per descrivere le operazioni di acquisizione di artefatti per scopi storici o archeologici. Questi, essendo beni materiali, tendono a deteriorarsi con il passare del tempo, soprattutto se maneggiati spesso, se situati in ambiente inquinato, se esposti alla luce o soggetti agli abusi. Un artefatto specifico può rappresentare l'ultimo del suo genere e la storia ha dimostrato che pezzi unici e autentici, non sempre sono stati preservati ad esperienza delle future generazioni. Il Reverse Engineering può essere facilmente utilizzato per conservare gli oggetti inanimati di importanza antropologica o culturale come replica virtuale. Un archivio digitale tridimensionale, è durevole e inalterabile, quindi può essere utilizzato come riferimento per il monitoraggio del degrado o per lavori di restauro.

Alcune delle motivazioni principali per applicare il Reverse Engineering ad oggetti o siti di interesse storico e culturale sono:

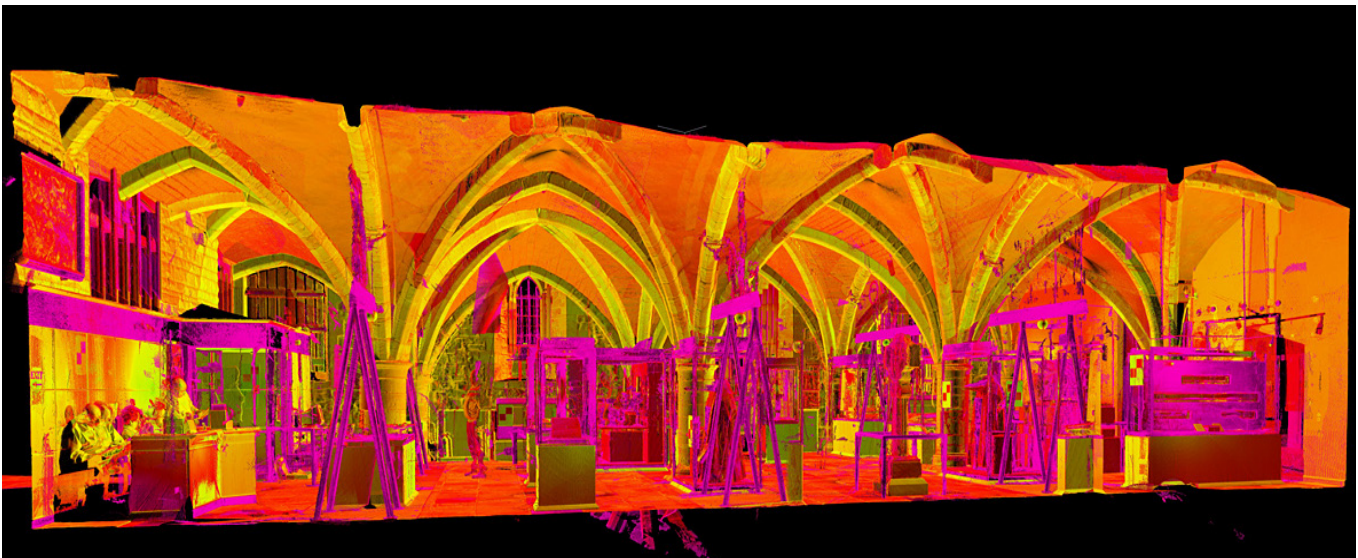
- lavori di Restauro;
- conservazione di sculture;
- mostre virtuali e istruzione;

- archivio digitale di artefatti;
- monitoraggio per la conservazione;
- ricostruzione storica;
- ricostruzione digitale;
- repliche in scala.

Dal momento che i beni materiali in oggetto non richiedono analisi tecniche o produzione di modelli con strette tolleranze, il Reverse Engineering presenta una certa flessibilità nel modo in cui viene applicato. Diversi gruppi di ricerca hanno indagato affidabili metodologie di scansione che possono essere implementate in un ambiente restrittivo di un museo o di un sito culturale (fig. 2.25). Gli strumenti utilizzati sono di natura diversa da quelli utilizzati per il design, dovendo acquisire range map più grandi e lavorando a distanze maggiori. Si usa per questo tipo di applicazioni la tecnologia detta a “tempo di volo” (TOF, time of flight).

Il laser scanner a tempo di volo, è un dispositivo di scansione attivo che usa la luce laser per misurare le distanze e rilevare morfologie tridimensionali di superfici riflettenti al laser. Il sensore laser calcola la distanza tra lo strumen-

to e una superficie cronometrando con grandissima precisione il tempo di andata e ritorno di un impulso di luce. Un diodo laser emette un impulso di luce e lo strumento rileva il tempo intercorrente tra l’emissione dell’impulso e il ritorno sul rilevatore all’interno dello strumento, in questo modo valuta la distanza tra superficie e strumento. Il sensore del laser scanner rileva la distanza della prima superficie riflettente incontrata dal raggio emesso, in una specifica direzione. Quindi, il laser scanner esplora l’intero campo di visibilità un punto alla volta, cambiando la direzione di osservazione per esplorare punti differenti. La direzione del raggio emesso dal laser scanner può essere cambiata ruotando il diodo emettitore, o usando un sistema di specchi di rotazione. Quest’ultimo è usato comunemente perché gli specchi sono molto più leggeri e possono essere ruotati più velocemente, con più grande precisione e riducendo le vibrazioni indotte all’intero dispositivo. I laser scanner 3D a tempo di volo possono misurare 10 000~100 000 punti ogni secondo, con precisione variabile da alcuni millimetri ad alcuni centimetri e con distanze dal centro dello strumento di alcune centinaia di metri<sup>7</sup>.



2.25\_ Esempio di nuvola di punti acquisita con scanner laser 3D a tempo di volo (ToF). Rappresentazione in falsi colori del dato numerico.

## Note:

1. G. Guidi «L'acquisizione 3D e il processo di reverse modeling» in “Metodi e tecniche integrate di rilevamento per la realizzazione di modelli virtuali dell'architettura della città” a cura di Mario Docci, Roma, Gangemi Editore, 2002.
2. R. Haslauer «CATIA v5 - Design Process in Pratisse», Monaco (Germania), Hanser, 2005.
3. G. Guidi, M. Russo, J. -A. Beraldin «Acquisizione 3D e modellazione poligonale», Milano, McGraw-Hill, 2010.
4. C. Bandera, S. Filippi, B. Motyil, C. Frigo, E. Pavan, E. De Momi, «Applicazioni di Reverse Engineering in campo medico per la ricostruzione di strutture ossee in chirurgia ortopedica».
5. K.F. Hulme, F.C. Mendel, K.P. Chugh «Development of a computational toolkit for Biomechanical analysis and simulation: the vertebrate analyzer», Buffalo (USA).
6. A. Andrisano, E. Bassoli, A. Gatto, F. Leali, M. Pellicciari « Metodologie di reverse engineering applicate allo sviluppo di modelli complessi in ambito medico», Convegno Nazionale XIV ADM - XXXIII AIAS Innovazione nella Progettazione Industriale Bari, 31 Agosto - 2 Settembre 2004.
7. M. Docci, D. Maestri «Manuale di rilevamento architettonico e urbano», Roma-Bari, Laterza, 2009.





### 3 Analisi e rappresentazione matematica degli oggetti di design

#### 3.1 L'albero del design: caratteristiche dei modelli reali

Il mondo del design, vede nella complessità degli oggetti che lo caratterizzano, la possibilità di dividerlo in due grandi insiemi. Il primo gruppo è contraddistinto da forme che permettono di riscontrare, attraverso una loro attenta osservazione, un chiaro equilibrio delle parti che si distribuiscono in relazione ad assi e piani di simmetria: elementi che dividono la figura piana o l'oggetto tridimensionale in due parti congruenti e speculari.

Volendo denominare questa tipologia di modelli con un nome caratterizzante, la si potrebbe chiamare "oggetti bilanciati" (fig. 3.01).



3.01\_ Esempio di un "oggetto bilanciato", quindi provvisto di piano di simmetria.

L'altro grande insieme, invece, raccoglie tutti quelli esclusi dal precedente e vede nel gesto espressivo del designer, l'elemento generativo della forma (fig. 3.02). La loro essenza generativa, rende questa categoria lontana dalla nostra ricerca, in quanto oggetti che vengono progettati in assenza di geometrie palesi. Eventuali operazioni di rilievo finalizzate al restyling o alla modifica della forma, non potranno appoggiarsi alle caratteristiche intrinseche dell'oggetto. Il manufatto che si trova a far parte di questa categoria di oggetti, presenta un forte rapporto con la sensibilità del designer e per questo possiamo chiamarli "oggetti espressivi"<sup>1</sup>. Ora è possibile delineare "l'albero del design" (fig. 3.03);



3.02\_ Esempio di un "oggetto espressivo", quindi senza geometrie speculari globali.

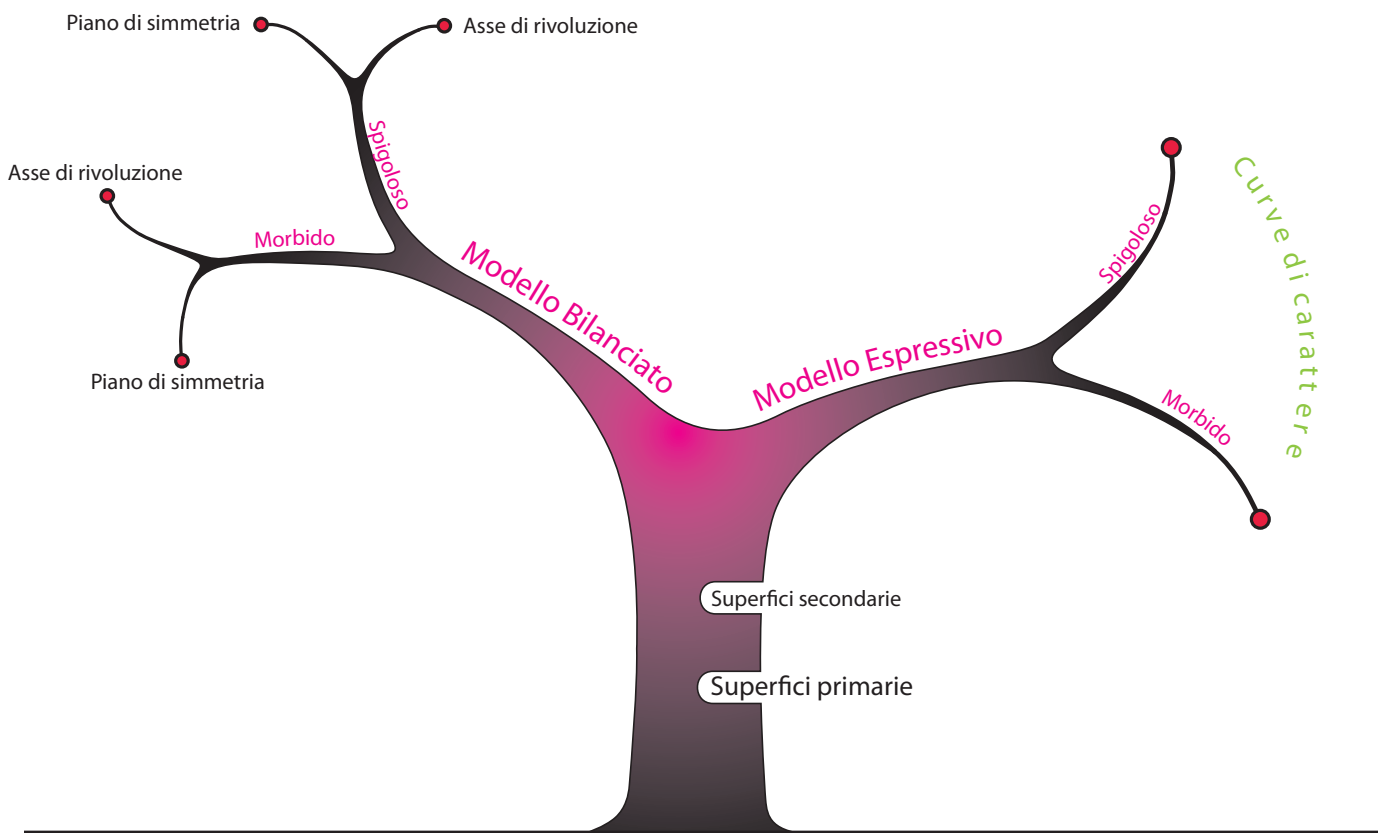
ci rendiamo conto che le due categorie precedentemente illustrate si articolano ulteriormente. Per esempio sia gli oggetti bilanciati che quelli espressivi, si dividono in funzione della morbidezza delle loro fattezze. Per capire il concetto di morbidezza, osserviamo l'oggetto bilanciato in figura 3.04, in cui non è possibile identificare con chiarezza dove l'intera forma trova soluzione di continuità. Infatti non vi sono spigoli chiari in cui le superfici diversamente orientate si incontrano, contribuendo a disegnare il carattere della forma. Questa circostanza può essere più o meno accentuata, ma in ogni caso è la caratteristica della forma morbida.

Negli oggetti di design non si può parlare di spigolo, entità che noi utilizziamo nelle rappresentazioni, per sintetizzare l'incontro tra due piani che disegnano superfici reali. Per i

modelli morbidi, il passaggio da una superficie ad un'altra attraverso un arco di curvatura più o meno accentuato, va quantificato per essere correttamente descritto nella modellazione matematica.

In questa fase della ricerca, è importante approfondire alcuni concetti che regolano la modellazione matematica, essendo l'obiettivo del Reverse Modeling.

Nello spazio reale, le superfici che delimitano gli oggetti complessi "si fondono l'una nell'altra diventando l'una e l'altra"<sup>2</sup>, manifestando una certa continuità di superficie. Nello spazio matematico digitale, ciò non avviene e si è costretti a parcellizzare le superfici, in funzione degli strumenti di costruzione che il software mette a disposizione. Osservando i manufatti che popolano i nostri spazi, li percepiamo risolti nei loro involucri formali, anche in

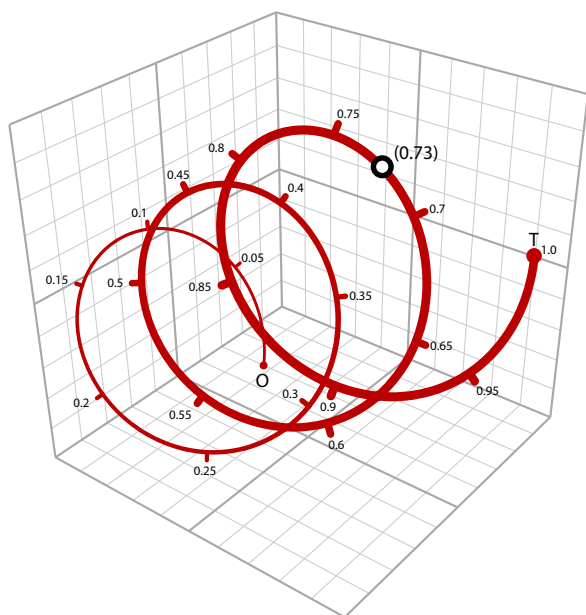


3.03\_ Approccio metodologico alla rappresentazione matematica degli oggetti di design.



3.04\_ Poltrona serie Up, Gaetano Pesce.

condizioni di estrema complessità; i software matematici hanno necessità di razionalizzare e parcellizzare la complessità, dividendola in un elenco di superfici primarie e secondarie.

3.05\_ Rappresentazione schematica di uno spazio parametrico monodimensionale  $R^1$ .

### 3.2 Gli spazi $R$ e le entità che partecipano alla rappresentazione matematica

Per cominciare a parlare dello spazio della rappresentazione matematica, prendiamo ad esempio l'entità minima presente nello spazio, il punto. Questo non è altro che un elenco di valori chiamati coordinate, il numero dei valori che identificano l'entità, corrisponde al numero di dimensioni dello spazio in cui si trova. Quando parliamo di spazio, generalmente intendiamo lo spazio coordinato assoluto, ma in realtà la rappresentazione matematica propone altri tipi di spazi legati alle entità rappresentate, comunque provvisti di più dimensioni<sup>3</sup>. Prendiamo ad esempio una generica superficie  $S$ ; questa per il CAD è un'entità quadrilatera finita e deformabile, descritta da una singola equazione matematica:

$$S = f(u,v)$$

Tutti i punti della superficie sono riconducibili ai valori parametrici  $u$  e  $v$  (es.  $x = R\cos(u)$ ;  $y = R\sin(u)$ ;  $z = Lv$ ). I punti sulla superficie appartengono quindi ad uno *spazio parametrico* bidimensionale.

In questo paragrafo, indicheremo in generale lo spazio, sia assoluto che parametrico, con una  $R$  ed un valore all'apice, indicante il numero di dimensioni che lo caratterizza.

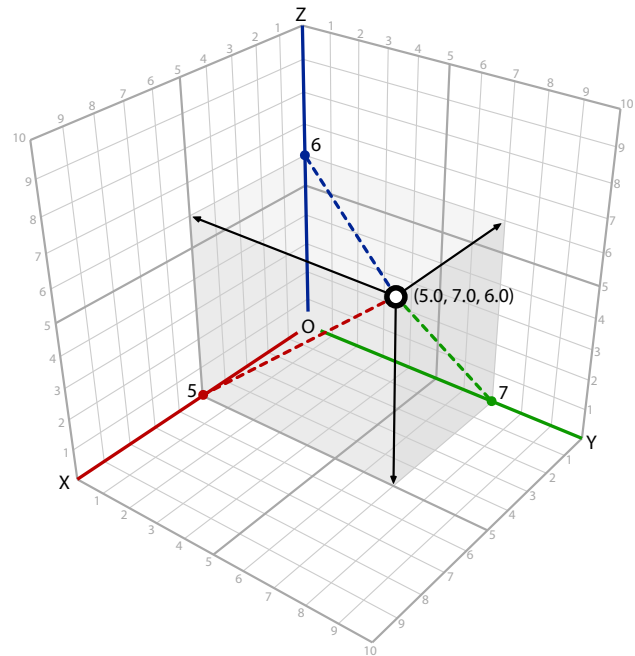
I punti nello spazio tridimensionale assoluto  $R^3$ , hanno quindi tre coordinate ( $x, y, z$ ). I punti nello spazio bidimensionale  $R^2$ , possiedono solo due coordinate,  $x$  e  $y$  se parliamo di spazio assoluto,  $u$  e  $v$  se parliamo di spazio parametrico. I punti nello spazio parametrico monodimensionale  $R^1$ , sono quelli indicati con un unico valore e si individuano lungo una curva attraverso il parametro  $t$  o  $p$  (fig. 3.05). Anche se risulta difficile pensare ad uno spazio monodimensionale, per questo valgono le stesse regole matematiche di un generico spazio parametrico.

L'immagine 3.06 mostra lo spazio assoluto  $R^3$ , continuo e infinito. La coordinata  $x$  di un punto in questo spazio è la proiezione (la linea rossa tratteggiata) di quel punto sull'asse  $x$  (linea rossa continua) e lo stesso vale per le altre due coordinate. Tutto ciò facendo sempre riferimento

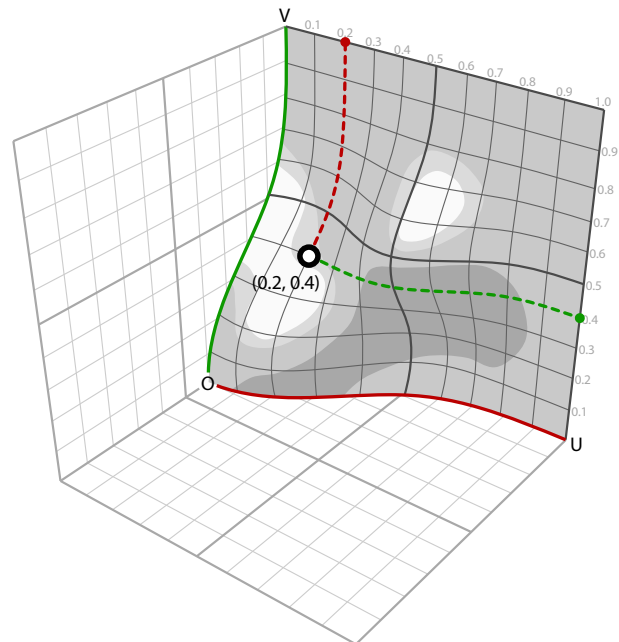
ad una terna triortogonale, disposta nello spazio in modo da misurarlo ed orientarlo. Lo spazio assoluto  $\mathbf{R}^2$ , sempre continuo ed infinito, preserva le caratteristiche dello spazio assoluto  $\mathbf{R}^3$ , la differenza è nell'assenza della componente  $z$ . Come abbiamo detto, la superficie nei software di rappresentazione matematica, si esprime attraverso due parametri,  $u$  e  $v$ , che possono essere immaginati anche come le coordinate di punti che si muovono all'interno di uno spazio bidimensionale finito, il cui andamento è ordinato da una qualunque forma di superficie matematica. Questa condizione s'identifica come spazio parametrico  $\mathbf{R}^2$  (fig 3.07). Pur essendo uno spazio limitato, è ancora continuo ed ipoteticamente infinito, in quanto composto da una quantità infinita di punti sulla superficie, pur differenziandosi dallo spazio assoluto per la presenza di un limite di distanza tra i punti più lontani. Di conseguenza le coordinate parametriche  $\mathbf{R}^2$  esistono all'interno di un certo range numerico (dominio), che nel disegno in figura 3.07 è stato fissato tra 0,0 e 1,0 per le due direzioni parametriche  $u$  e  $v$ ; si precisa che il range prefissato può rispondere ad un diverso intervallo numerico. Nello spazio parametrico preso in esame, il punto di coordinate (1.5, 0.6) cade al di fuori della superficie, di conseguenza non appartenendo al dominio, non esiste.

Poiché la superficie che definisce lo spazio parametrico  $\mathbf{R}^2$  risiede nello spazio assoluto  $\mathbf{R}^3$ , si possono sempre tradurre le coordinate parametriche nelle coordinate assolute. Ad esempio, il punto di parametri  $u$  e  $v$  pari a [0.2, 0.4] sulla superficie, è lo stesso punto di coordinate assolute (1.8, 2.0, 4.1). Se trasformiamo o deformiamo la superficie, il punto di coordinate parametriche [0.2, 0.4] non avrà la stessa corrispondenza precedente con le coordinate assolute. Ogni punto nello spazio parametrico  $\mathbf{R}^2$ , trova un corrispondente nello spazio assoluto  $\mathbf{R}^3$ , tuttavia non è vero il contrario, in quanto molti punti dello spazio assoluto, non appartengono alla superficie parametrica.

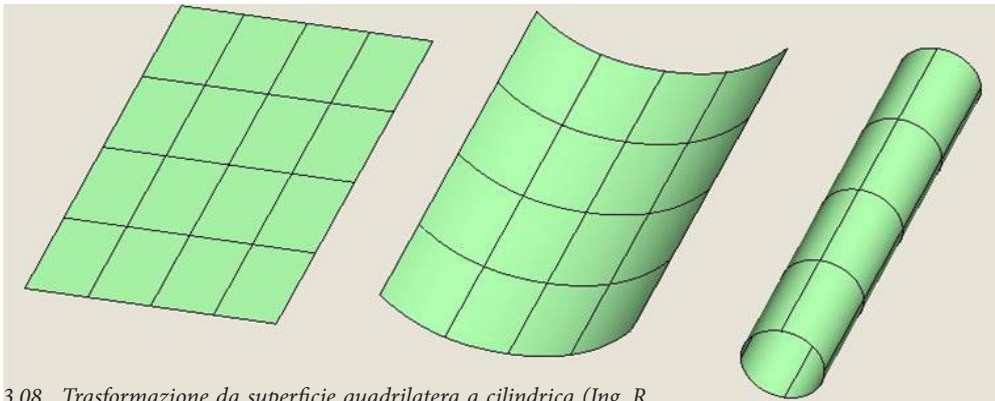
Come già detto la superficie per il CAD, è sempre un'entità quadrilatera continua e deformabile. Attraverso la giustapposizione di diverse pezze quadrilatere, riusciamo a rappresentare matematicamente tutti gli oggetti di design. Per capire quest'affermazione è necessario analizzare alcu-



3.06\_ Rappresentazione schematica di uno spazio assoluto tridimensionale  $\mathbf{R}^3$ .

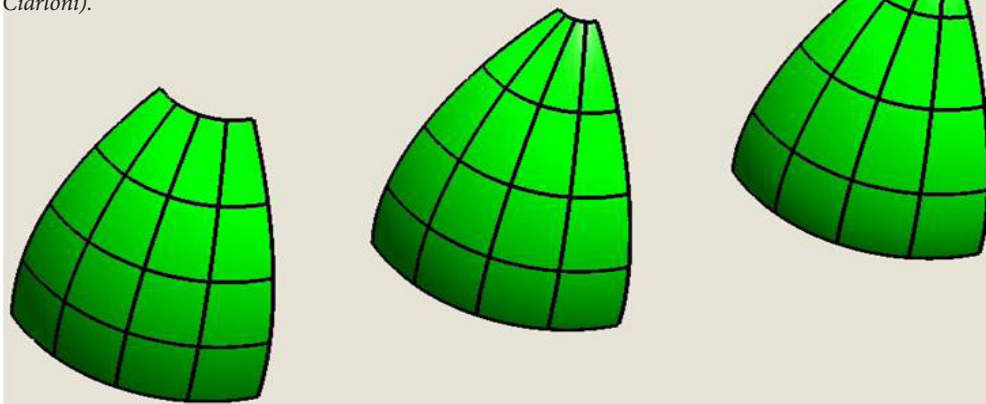


3.07\_ Rappresentazione schematica di uno spazio parametrico bidimensionale  $\mathbf{R}^2$ .



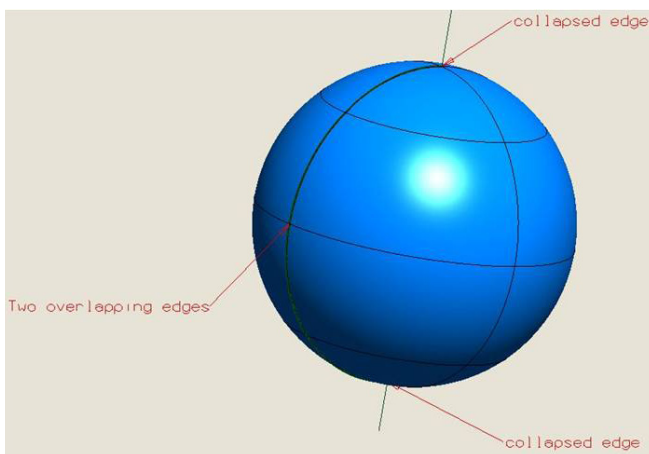
3.08\_ Trasformazione da superficie quadrilatera a cilindrica (Ing. R. Ciarloni).

3.09\_ Trasformazione da superficie quadrilatera a trilatera (Ing. R. Ciarloni).

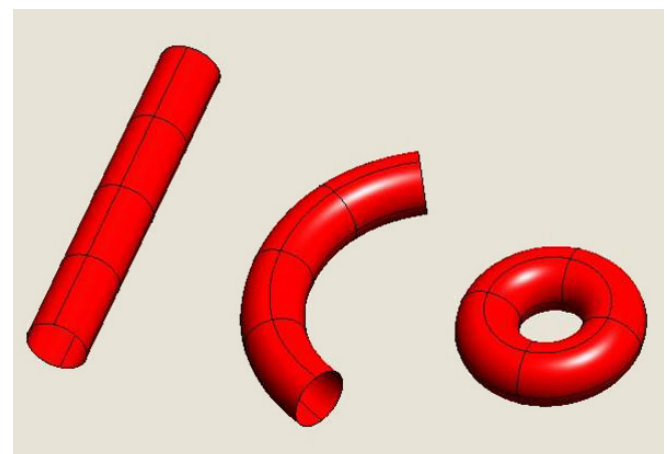


ne primitive geometriche a superficie unica.

In figura 3.08, vi è la sequenza che permette di capire come, attraverso un'unica superficie, si genera il cilindro. Notiamo come il punto di partenza è la superficie quadrilatera che si piega su se stessa, in modo da costringere due bordi opposti su un'unica linea chiamata "seam" (cucitura). Questo è in generale, l'aspetto assunto da buona parte delle superfici di rivoluzione. A questo punto prendiamo una superficie quadrilatera ed accorciamo un bordo sino a farlo degenerare in un punto. Abbiamo costruito una superficie triangolare coerente con i presupposti scritti sino ad ora. Allo stesso modo è possibile creare una forma a vela (fig. 3.09) oppure, partendo



3.10\_ Le condizioni matematiche di una sfera sono riscontrabili in una qualunque superficie matematica continua (Ing. R. Ciarloni).



3.11\_ Il toro nasce dalla deformazione di un cilindro, sovrapponendo i due bordi liberi (Ing. R. Ciarloni).

dal cilindro di prima, un cono. Continuando con le deformazioni, se degeneriamo i due bordi curvati del cilindro in un punto e gonfiamo la forma risultante in modo adeguato, otteniamo la sfera di fig. 3.10. Quest'ultima è caratterizzata dalla presenza di una cucitura e due lati degenerati in punti posti agli estremi della superficie sferica<sup>4</sup>.

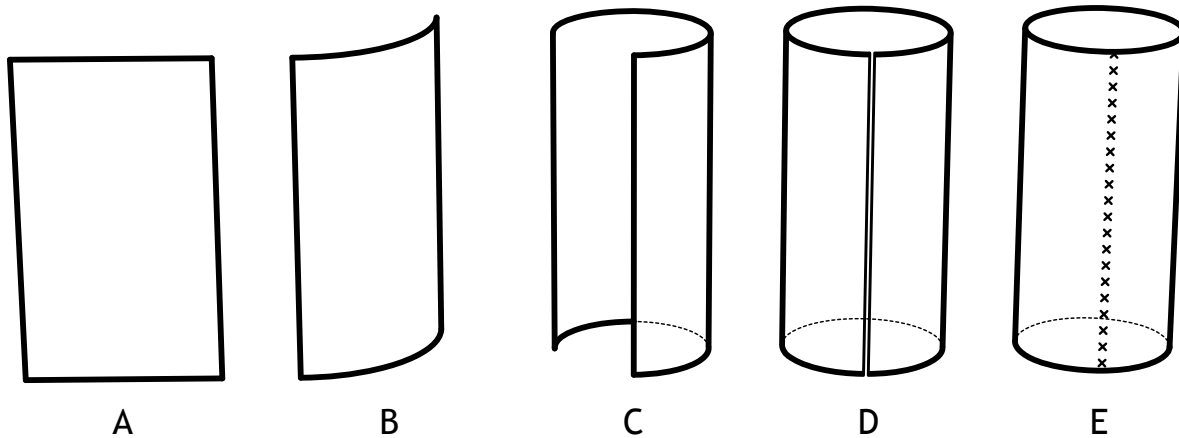
Nella rappresentazione matematica, ci rendiamo conto che un'entità generalmente non provvista di direzione come la sfera, per necessita costruttive è invece caratterizzata da un sopra, un sotto e un sistema di paralleli e meridiani identificati dalle linee isoparametriche lungo la direzione **u** e **v**. Possiamo evidenziare anche un asse per il quale i piani radiali passanti per esso, intercettano la superficie in curve concordi ad una delle due direzioni parametriche. Inoltre piani perpendicolari ad esso, sezionano la sfera in curve concordi all'altra direzione parametrica.

Un ultimo caso decisamente interessante, è rappresentato dal toro che si genera sovrapponendo i bordi aperti di un cilindro (fig. 3.11).

Alcuni oggetti di design sono generabili deformando un'unica superficie, applicando trasformazioni che non alterano la topologia della forma. Per topologia si intende lo studio matematico delle proprietà che si conservano attraverso deformazioni, torsioni, e allungamenti degli

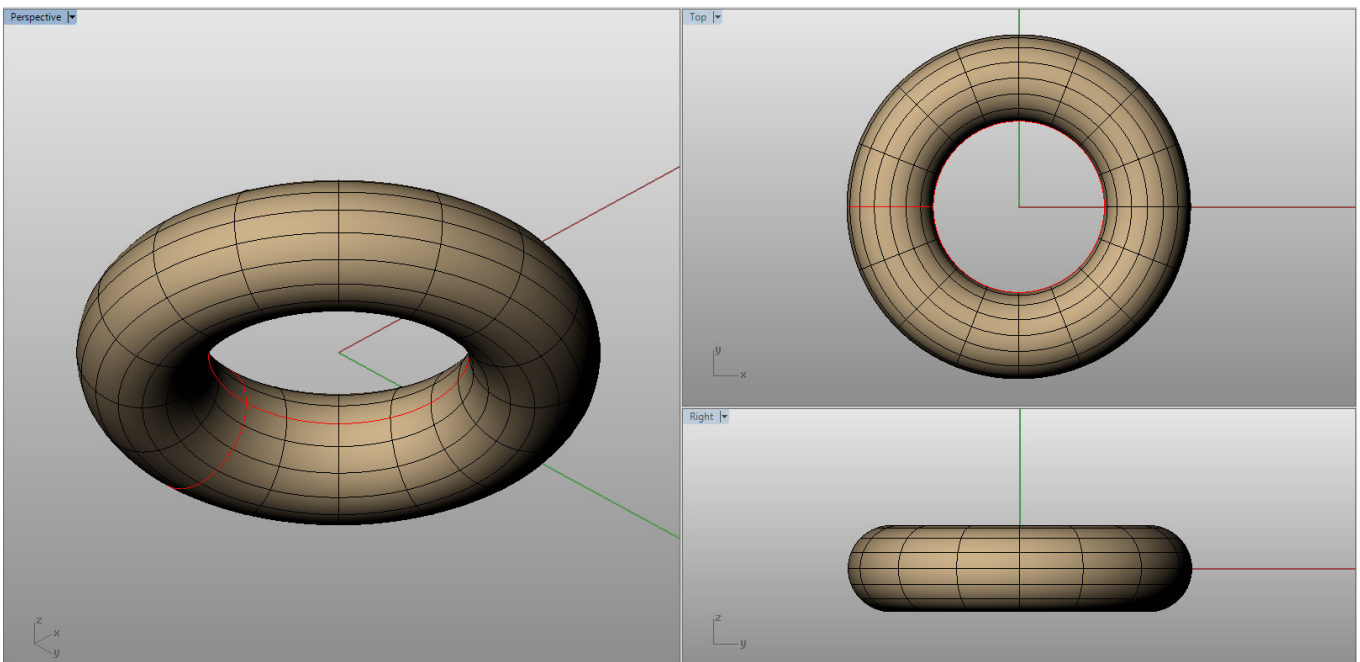
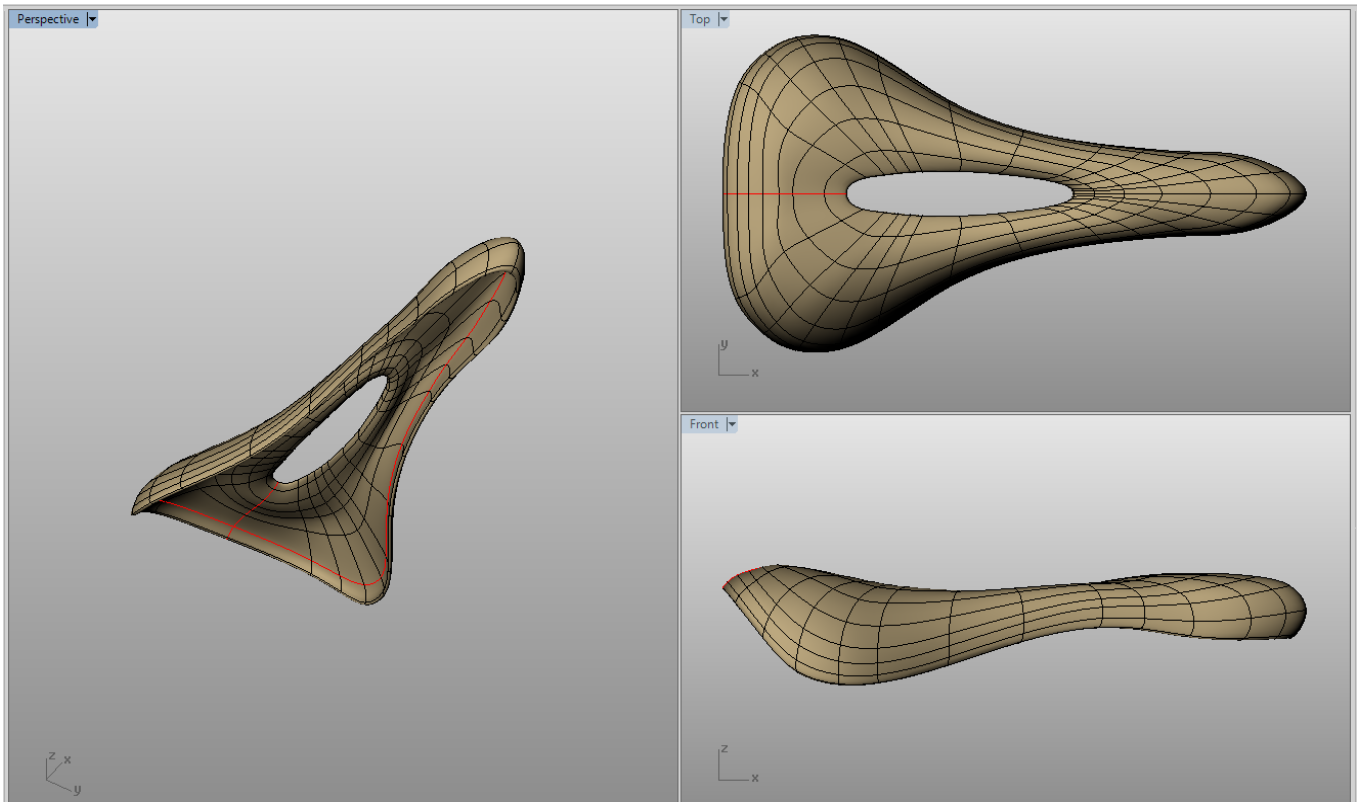
oggetti. La topologia non si occupa delle caratteristiche dimensionali e di forma infatti, l'aspetto topologico di un oggetto, muta al variare del numero di strappi presenti sulla superficie, del numero dei bordi aperti e della continuità esistente tra i punti appartenenti ad essa (fig. 3.12). Alcune trasformazioni possono quindi avvenire senza mutare le prerogative topologiche di una forma, generando degli oggetti che si avvicinano anche nell'essenza formale, alla continuità che caratterizza la pelle degli oggetti reali<sup>5</sup>.

Prendiamo ad esempio il modello del sellino in figura 3.13, dove è rappresentato il caso della forma disegnata con un'unica superficie. Sotto l'aspetto topologico non vi è alcuna differenza tra questo modello ed il modello matematico di un toro, il passaggio dall'uno all'altro avviene senza alcuno strappo alla continuità, e mantenendo la stessa conformazione a bordi chiusi. Infatti, ambedue le forme sono caratterizzate dalla presenza della seam lungo la direzione **u** e lungo la direzione **v**. Le uniche differenze tra la forma del sellino ed il toro, riguarderanno il grado delle isocurve, il numero dei punti di controllo ed il loro posizionamento nello spazio, che indurranno la forma del toro a trasformarsi nel sellino. In altri casi, quando la complessità del modello reale non permette la rappresentazione trasformando un'unica superficie, questo comporta una parcelliz-

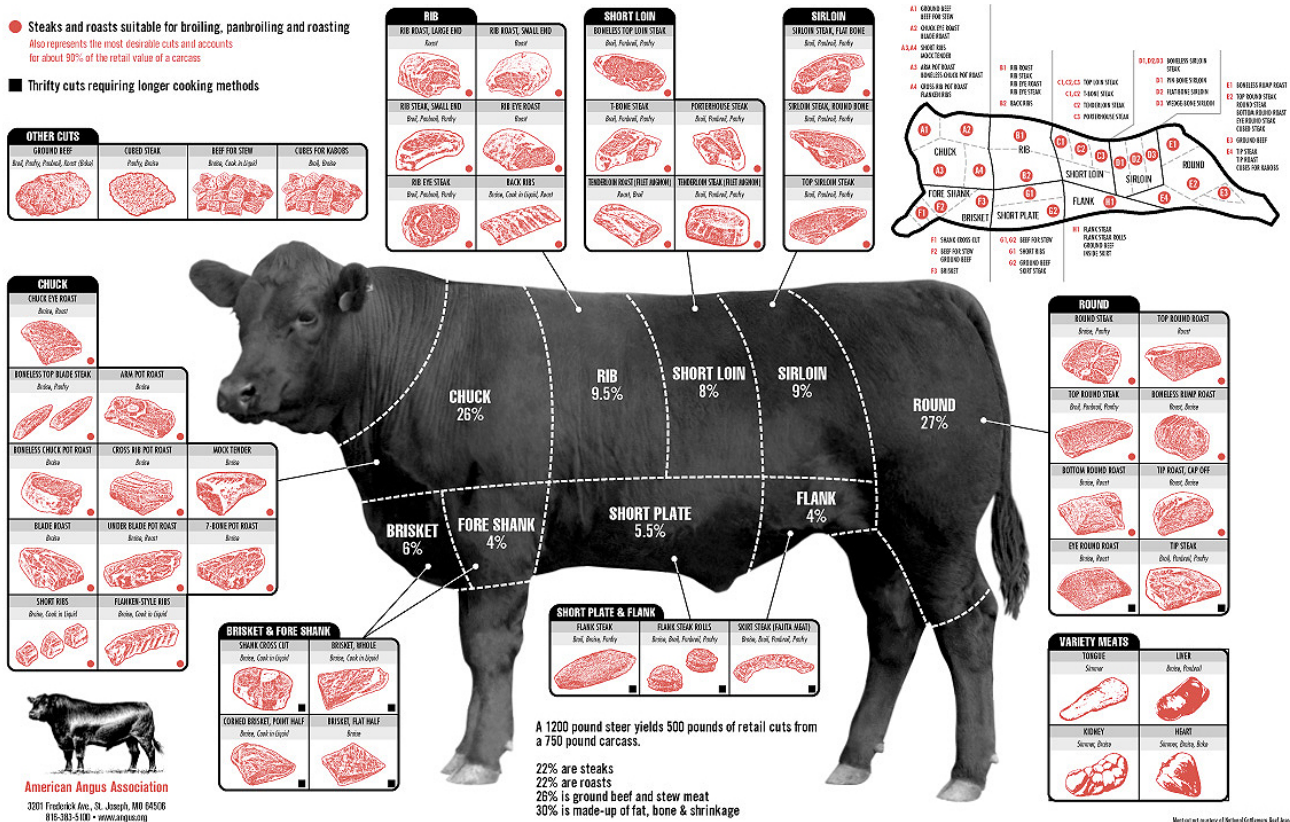


3.12\_ Il passaggio dalla superficie A alla D avviene senza mutare le prerogative topologiche dell'entità. In E, eliminando la seam, mutano i rapporti topologici.

3.13\_ (a destra) Trasformando il toro senza mutarne la topologia, è possibile giungere alla forma del sellino utilizzando un'unica superficie.







3.14\_ La maggior parte degli oggetti di design, per essere rappresentati matematicamente, devono essere parcellizzati in pezzi quadrilateri.

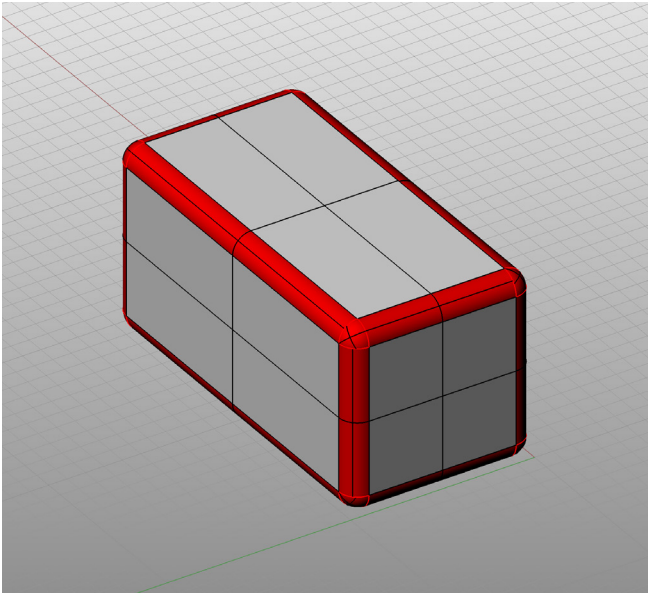
zazione della superficie in porzioni quadrilatere accostate e poste in continuità (fig. 3.14).

Nella figura 3.15 è rappresentato un modello formalmente complesso, in quanto composto da una serie di superfici primarie e secondarie. Le prime, colorate in grigio nella figura, rappresentano la quasi totalità della forma e permettono all'osservatore di comporre, nella sua mente, il modello mentale dell'oggetto ideato. Le seconde, colorate di rosso, raggruppano quelle entità utili alla transizione da una superficie principale all'altra attraverso smussi, raccordi, congiunzioni, le cui aree occupano una percentuale minore rispetto all'intera superficie del modello.

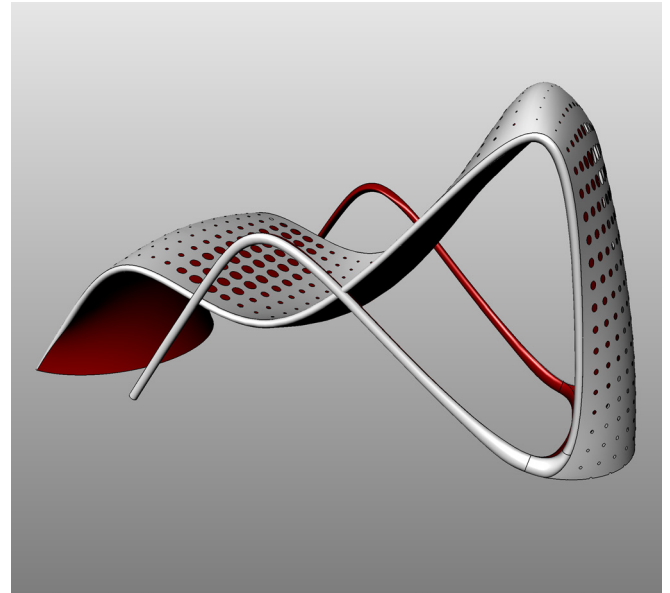
La minore presenza di superfici secondarie, rende evidenti le relazioni tra le primitive geometriche tridimensionali che giocano nella composizione, caratteristica che con-

traddistingue gli "oggetti spigolosi" (fig. 3.16). Per questa tipologia di prodotti, in cui vertici e spigoli sono maggiormente in evidenza, il processo di Reverse Modeling può essere effettuato semplicemente attraverso il rilievo diretto delle parti, visibili in maniera evidente. La rappresentazione matematica avverrà utilizzando superfici primarie e secondarie semplici; le isoparametriche lungo le direzioni  $u$  e  $v$  sono generalmente di primo grado, e la continuità tra superfici adiacenti è di posizione ( $G_0$ ).

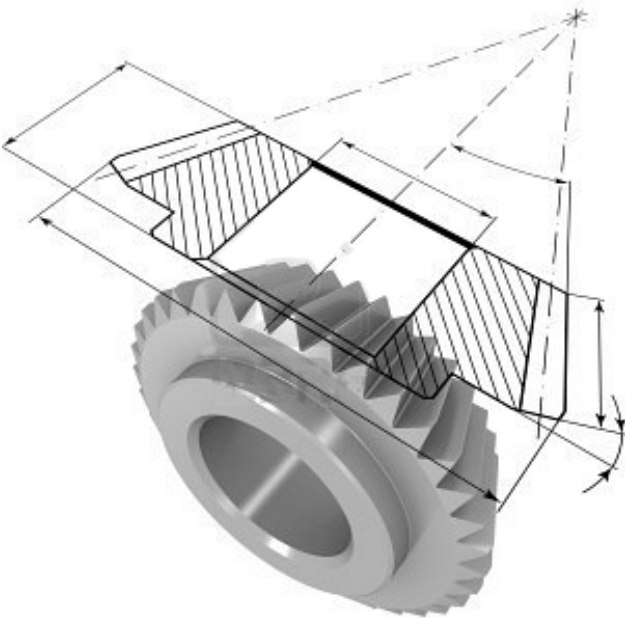
Altri oggetti potrebbero risultare molto meno spigolosi e più aderenti ad un linguaggio organico (fig. 3.17): nella rappresentazione matematica il modello sarà composto da superfici principali, la cui transizione da una all'altra avviene attraverso superfici secondarie complesse le cui curve lungo le direzioni isoparametriche, sono generalmente di grado superiore al primo. La connessione tra superfici li-



3.15\_ Entità formalmente complessa in quanto composta dall'accostamento di superfici primarie e secondarie.



3.17\_ Polisuperficie caratterizzata da molte superfici secondarie, articolate e in continuità di curvatura (modello morbido).



3.16\_ Polisuperficie caratterizzata da poche e semplici superfici secondarie (modello spigoloso da it.123rf.com).

mitofe avverrà attraverso la continuità di tangenza (G1) e di curvatura (G2); quelle descritte sono tutte indicazioni utili al disegno tridimensionale di "modelli morbidi". Affacciandoci al mondo reale, i prodotti caratterizzati da questo tipo di complessità, potranno essere modellati matematicamente solo attraverso gli strumenti appena illustrati. L'acquisizione del dato per il passaggio al digitale, non può avvenire unicamente attraverso il rilievo diretto, a causa dell'assenza di soluzione di continuità tra superfici primarie. E' necessario l'utilizzo di sensori attivi per l'acquisizione o la fotomodellazione digitale. Il frutto dell'acquisizione è un unico poliedro, aperto o chiuso, per il quale non esiste distinzione tra superficie primaria e secondaria. Il modello matematico derivante dall'operazione di Reverse Modeling potrà comunque essere composto dalle due tipologie di superfici, oppure da pezze di superfici primarie in continuità di curvatura o tangenza. In seguito si illustreranno i metodi ed i criteri di individuazione delle varie primitive mono dimensionali strutturanti o di stile, che intervengono a supporto dell'operazione di Reverse Modeling.

### 3.3 La forma del design: gli attributi di stile e le geometrie strutturanti

Gli oggetti bilanciati, morbidi o spigolosi che siano, possono essere ulteriormente divisi attraverso l'individuazione di alcune caratteristiche distinguibili in due categorie: una riguardante gli attributi di stile, l'altra inerente alle geometrie strutturanti intrinseche alla forma.

Il primo gruppo mette insieme quegli elementi che danno un'espressione alla forma: parliamo delle curve notevoli che la disegnano, da individuare nelle zone in cui vi è una repentina variazione di curvatura e nel contorno apparente degli oggetti secondo almeno due viste ortogonali.

Del secondo gruppo fanno parte le geometrie strutturanti intrinseche alla forma, quali assi e piani di simmetria, riscontrabili in maniera singola o composta nella maggior parte degli oggetti in uso. Queste ultime hanno un forte legame con l'aspetto compositivo del prodotto, il designer ne fa uso per dare dei riferimenti all'oggetto rispetto ai quali ci si porrà in termini di dinamismo, equilibrio disequilibrio ecc.

La dicotomia dei contenuti geometrici del prodotto di de-

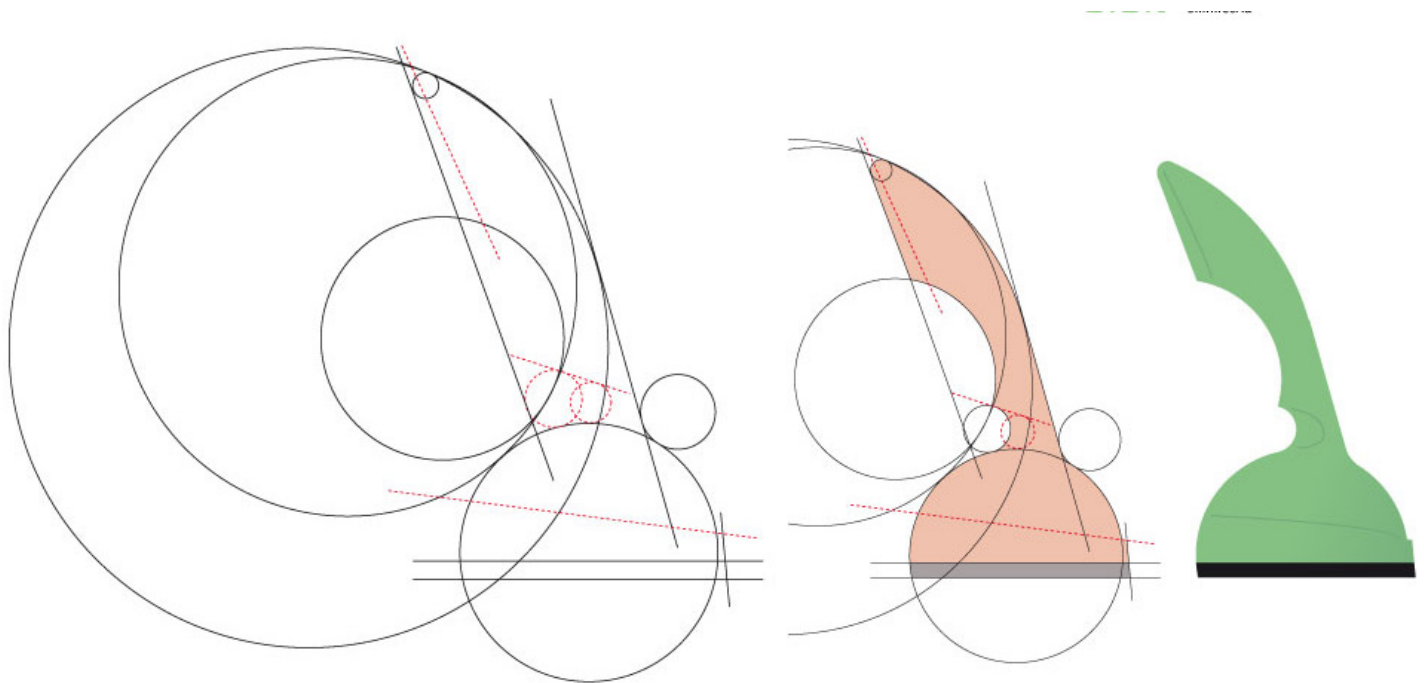
sign, può essere spiegata attraverso un esempio preso tra le esercitazioni svolte nel corso di Modellazione Digitale del corso di laurea in Disegno Industriale dell'Università Sapienza.

L'esercitazione ha avuto come tema l'apparecchio telefonico Ericofon, creato dalla svedese Ericsson nel 1954 per mano del designer Gosta Thames (fig. 3.18). Questo telefono è considerato uno dei più grandi passi in avanti nel design di telefoni e piccoli elettrodomestici in genere. Grazie alle scoperte tecnologiche effettuate durante la seconda guerra mondiale, plastica e materiali ferromagnetici, nei primi anni 50 fu possibile pensare e progettare un prodotto innovativo, comodo e soprattutto esteticamente rivoluzionario per l'epoca. Originariamente pensato per il mercato professionale, l'Ericofon deve la sua forma e struttura compatta e

senza separazione tra corpo e cornetta, al suo originario target di riferimento: gli ospedali. Utilizzare un telefono da tavolo dal letto di un ospedale, poteva diventare un incubo con cornetta e corpo separati; da qui l'idea di incorporare i due elementi in un'unica forma compatta e di facile utilizzo. Tutto il telefono è strettamente elettromeccanico, tranne per la suoneria che in alcuni modelli è elettronica e che rappresenta il primo esempio di elettronica applicata alla telefonia domestica.

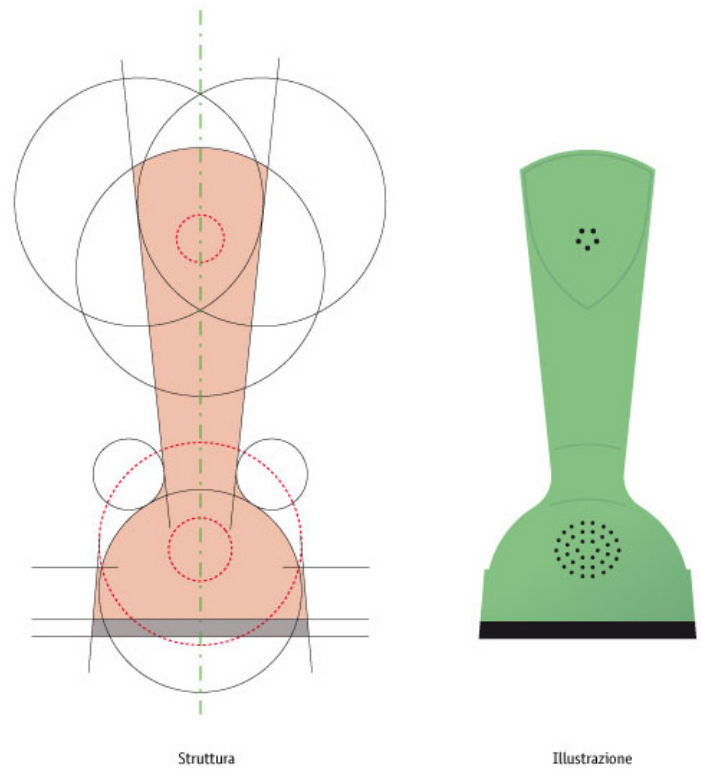


3.18\_ Ericofon, apparecchio telefonico prodotto dalla Ericsson, designer Gosta Thames.



Analisi geometrica

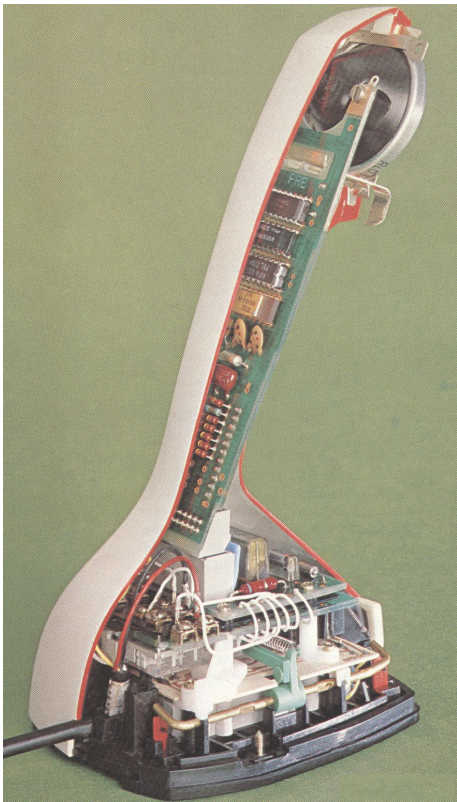
Ritornando all'esercitazione si vuole, con quest'esempio, far capire come la corretta rappresentazione matematica di un modello reale, parte dal rilevamento degli attributi di stile e delle geometrie strutturanti. Anche nel caso preso in esame, la forma rappresenta la sintesi di scelte estetiche, funzionali e tecniche che determinano lo stile e il carattere. Qualità che sono riassunte nelle curve ottenute analizzando le viste ortogonali del telefono. Le viste scelte consentono di osservare il contorno apparente del prodotto, estraendo le geometrie primitive utilizzate dal designer per la costruzione della forma (fig. 3.19). Partendo dalla vista laterale, è facile rendersi conto che la base e la cornetta sono frutto della composizione di linee rette e porzioni di circonferenza. Anche l'ergonomia dell'impugnatura si distingue per lo stesso tipo di geometrie; il prospetto frontale rende evidente la presenza di elementi speculari, che trovano ulteriore conferma nell'osservazione della pianta. Le ombre ed il chiaro scuro evidenziano i repentini cambiamenti di curvatura, anche questi da rilevare, in quanto segnali dell'andamento della superficie all'interno del dominio visibile. In fine vi sono le linee che distinguono gli accoppiamenti tra le parti, le quali delimitano gli oggetti, consentendo di svolgere il problema della modellazione



Struttura

Illustrazione

3.19\_ Analisi geometrica dell'Ericofon: Individuazione delle geometrie che sottendono le scelte progettuali.



3.20\_ Lo spaccato dell'Ericofon, esalta il perfetto connubio che esiste tra forma e tecnica nel design.

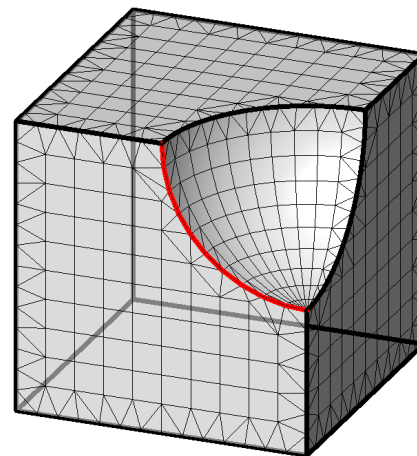
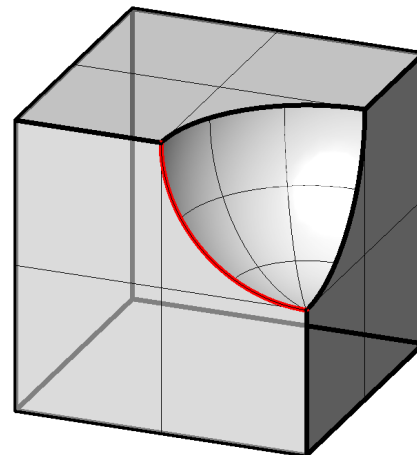
matematica in più tempi, relativi al numero degli elementi che compongono il prodotto. Attraverso l'osservazione delle primitive speculari, ci rendiamo conto che le loro intersezioni identificano punti allineati su un asse, rappresentato in figura con la linea tratto punto. Asse, che nel caso studiato è presente nel prospetto frontale e nella pianta, a denunciare l'esistenza di un piano di simmetria, caratteristica appartenente alle forme bilanciate.

Gli elementi discussi, sono quindi utili alla ricostruzione matematica dell'oggetto nello spazio digitale e per questo vanno ricercati attraverso originali metodologie all'interno del dato numerico, risultato dell'acquisizioni tridimensionale dell'oggetto reale.

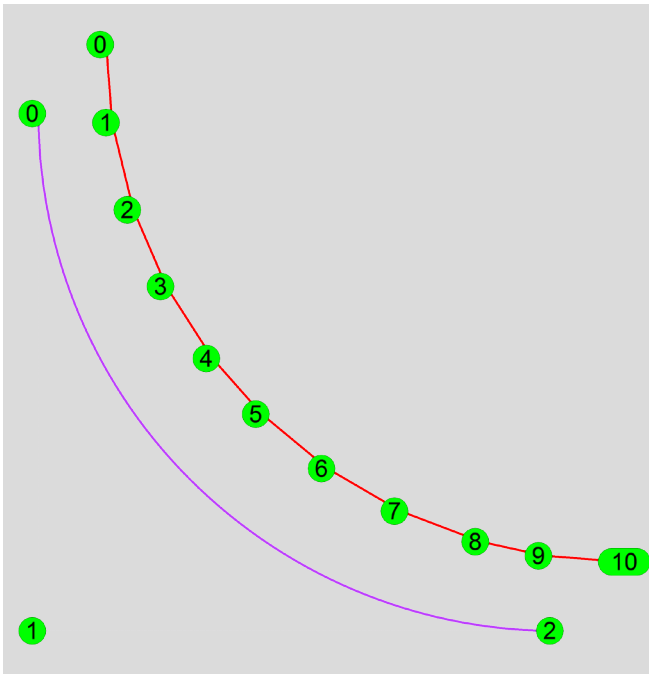
### 3.4 Modello matematico e modello numerico

Nell'introduzione di questa ricerca si è discusso del confronto tra modello matematico e modello numerico, per la necessità di inserire all'interno del ciclo progettuale, il prototipo di design. Il confronto avviene nella maniera ottimale, se riusciamo a sovrapporre le due rappresentazioni appoggiandoci alle features appena dichiarate.

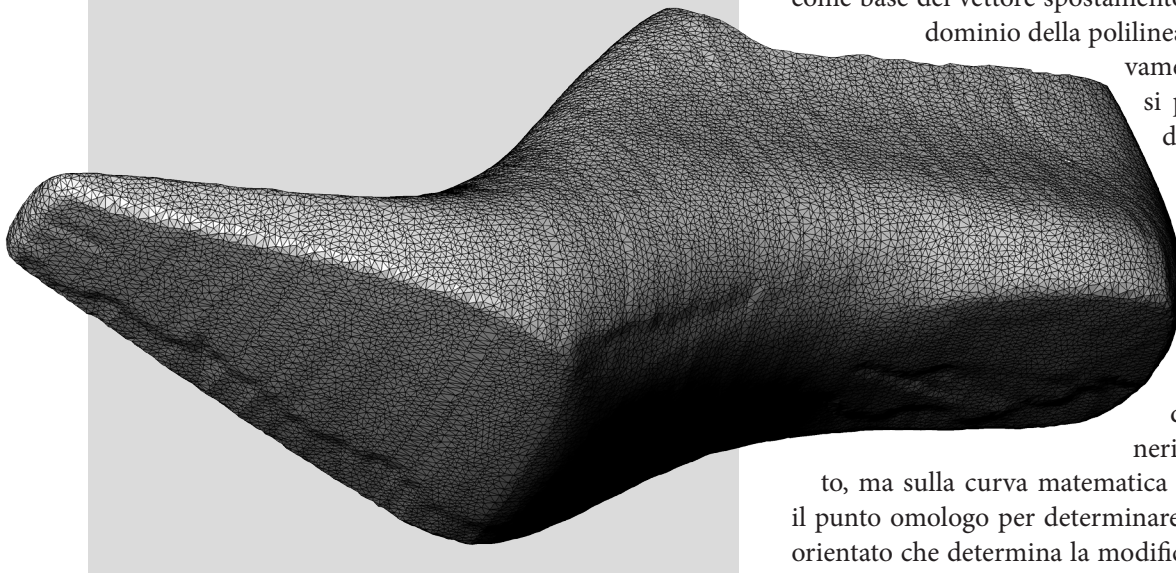
La soluzione più immediata al problema della sovrapposizione delle due diverse rappresentazioni, sta nel rilevare almeno tre punti omologhi, in modo da allineare un modello sull'altro attraverso una trasformazione composta da



3.21\_ Spigolo ottenuto dalla differenza booleana tra un cubo ed una sfera, rappresentato matematicamente e numericamente.



3.22\_ Sotto lo spigolo matematico, sopra lo spigolo numerico; nell'immagine notiamo la diversa natura delle due linee.



3.23\_ Rappresentazione numerica di un modello definito da un'unica mesh.

rotazione e traslazione. I tre o più punti potrebbero essere dei target applicati direttamente sull'oggetto, o individuati in punti particolarmente riconoscibili sulle features di stile. Adottando questa ultima soluzione, però, diventa evidente la natura assolutamente diversa dei modelli presi in esame.

Si riparte nuovamente dal problema dello spigolo, che nella realtà è quella parte chiaroscurale, sfumata e indistinta tra le due superfici che lo prevedono come loro intersezione. Lo spazio digitale propone almeno due rappresentazioni dello spigolo. Osserviamo l'esempio in figura 3.21 dove è contemplato il caso di uno spigolo, frutto di differenza booleana tra cubo e sfera rappresentato matematicamente e numericamente. Estraiamo in ambedue i modelli una delle tre curve che delimitano la sottrazione booleana e sovrapponiamole l'un l'altra. Sappiamo bene che il risultato della differenza booleana in ambito matematico, genererà curve di bordo continue, definite da un'equazione parametrica. In ambito numerico, l'incontro tra superfici poliedriche si risolve attraverso polilinee. Quest'ultime sono in grado di mediare la diversa tassellazione di porzioni piane e porzioni sferiche del poliedro chiuso preso in esame. Nel sovrapporre le due curve estratte, andremo ad escludere come base del vettore spostamento, tutti i punti interni al dominio della polilinea, considerando esclusivamente gli estremi. Come

si può notare nell'ingrandimento in figura 3.22, i vertici della spezzata, non trovano immediata relazione con la curva NURBS. Le discontinuità della linea spezzata, si prestano sicuramente a diventare base di un generico vettore spostamento, ma sulla curva matematica diventa difficile trovare il punto omologo per determinare la punta del segmento orientato che determina la modifica in grado di attuare la sovrapposizione.

Il ragionamento portato ad esempio è stato fatto su costruzioni effettuate nelle due diverse rappresentazioni; in realtà

Michele Calvano

il caso che ci troviamo ad affrontare nel nostro studio, mette a confronto il modello matematico ed il modello mesh frutto di acquisizione al laser scanner. In questo caso non è possibile individuare una polilinea, luogo di incontro delle facce poliedriche che compongono il volume, essendo l'oggetto, definito da un'unica mesh (fig 3.23). Inoltre non bisogna dimenticare che gli oggetti di design, sono spesso caratterizzati da curve più complesse di quella nell'esempio e oltretutto senza soluzione di continuità, quindi non sarà facile trovare quei punti omologhi sulle due rappresentazioni.



Diventa molto più semplice acquisire un oggetto costellato di target opportunamente progettati e realizzati sul prototipo. La loro individuazione sarà immediata, dando luogo ad un allineamento, caratterizzato ovviamente da un forte scarto derivante da almeno due ordini di errore: quello intrinseco alla macchina prototipatrice che co-

struirà il modello fisico contemplando una certa tolleranza e quello dovuto al processo di acquisizione, la cui mesh risultante non riuscirà a rappresentare con esattezza i target realizzati. D'altra parte questo significherebbe impostare l'allineamento su caratteristiche legate alla pelle dell'oggetto preso in esame, mentre l'obiettivo è di osservare il prodotto ed estrapolare in maniera analitica le geometrie intrinseche strutturanti, le quali dovranno essere evidenziate anche nel modello mesh, frutto del dato di rilievo. In questo modo l'operazione di Reverse Modeling, avverrà a partire da quegli elementi che sin dall'inizio hanno caratterizzato la composizione e quindi la natura dell'oggetto che si vuole aggiornare o ricostruire. Si instaurerà uno stretto rapporto tra progetto e prototipo; a quest'ultimo viene restituito il ruolo di strumento per il progetto, avendo eliminato l'interruzione presente nella dialettica tra i vari modelli, che contribuisce alla realizzazione del modello mentale.

Non è auspicabile trovare punti omologhi sulla pelle della forma acquisita, ecco perché diventa necessario appoggiarsi alle "geometrie strutturanti del modello", geometrie che caratterizzano innanzi tutto l'oggetto di design e sono in grado di distinguerlo in tipologie morfologiche. Infatti l'operazione di Reverse Modeling deve partire da una iniziale osservazione critica da parte dell'operatore, il quale, attraverso una prima analisi geometrica può catalogare il prodotto in funzione della presenza di piani e assi di simmetria. Elementi che si possono presentare nel prodotto in maniera singola, ma anche in maniera composita, individuando tre tipologie morfologiche: gli oggetti ad asse di rivoluzione (fig. 3.24), gli oggetti a piani di simmetria (fig. 3.25), gli oggetti compositi.



3.24\_ Oggetto ad asse di rivoluzione: Flos Chasen S2, Patricia Urquiola;

3.25\_ Oggetto a piano di simmetria: Pantom Chair, Verner Panton;

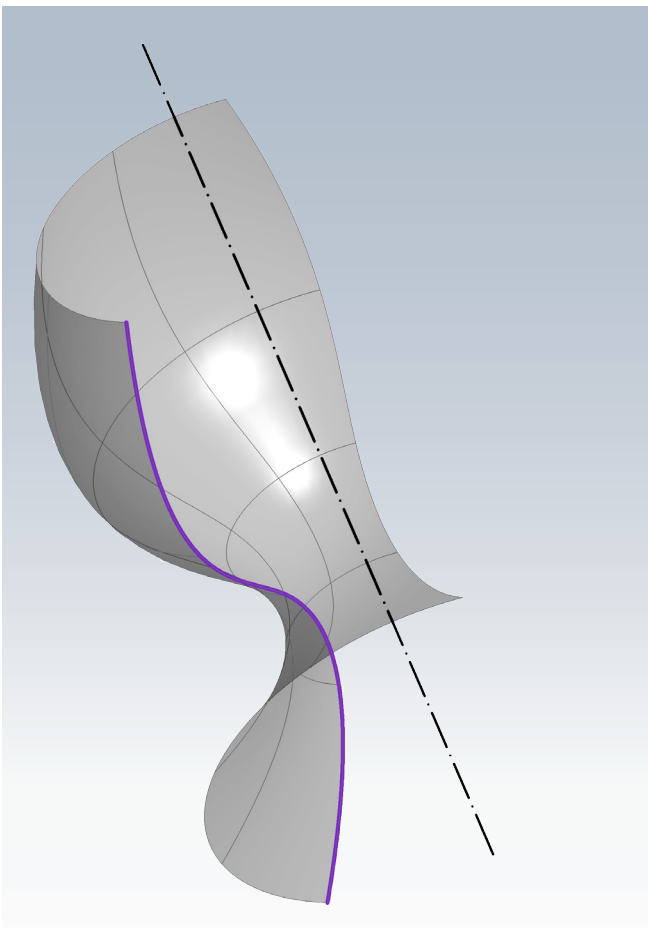
### 3.5 Oggetti ad asse di rivoluzione

“In geometria una superficie di rivoluzione, è generata dal moto di rivoluzione intorno ad un asse di una curva, detta generatrice. Nel ruotare intorno all’asse di rivoluzione, ruoterà anche intorno a se stessa in maniera sincrona, in modo da generare la superficie (fig. 3.26)”<sup>6</sup>.

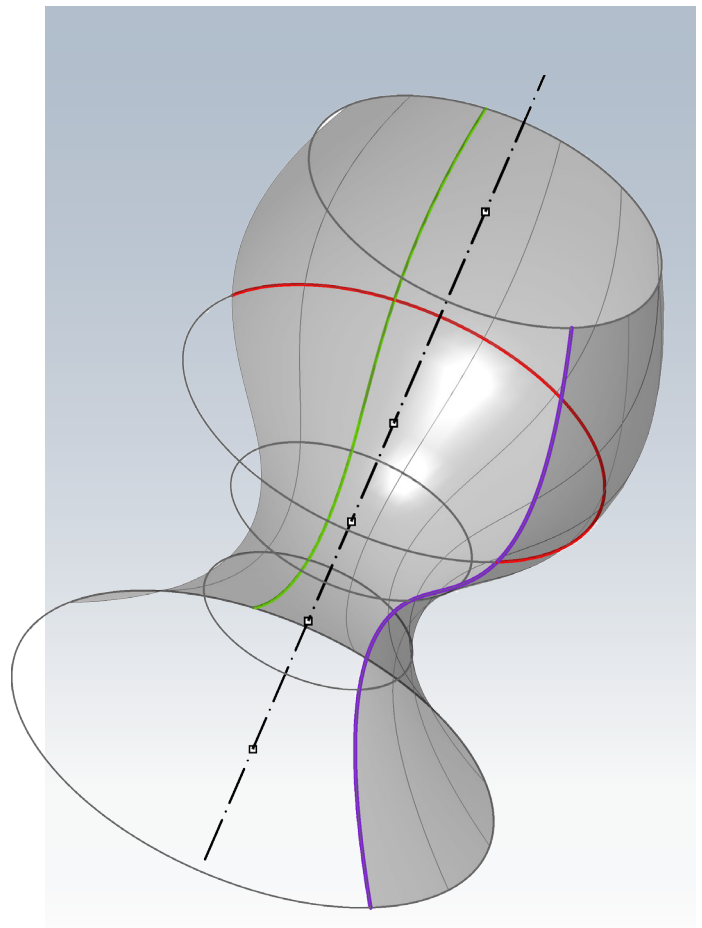
Sono moltissimi i prodotti ad asse di rivoluzione, presenti nel mondo reale che spesso diventano tema del progetto di design. Questi si possono ritrovare in forma singola o composta, basti pensare ad oggetti di uso comune, come matite, bicchieri, portaoggetti, bottiglie, prodotti farmaceutici

e di bellezza, ma anche gambe di tavoli e sedie, sostegni di attrezzature di vario genere, frullatori e molto altro ancora. Le necessità tattili e formali, li portano ad essere progettati attraverso superfici di una certa complessità.

Nella rappresentazione matematica, questo tipo di superficie è, come tutte le superfici rappresentate dal modellatore, a quattro bordi, associabili ad un dominio bidirezionale che descrive un campo continuo attraverso i parametri  $u$  e  $v$ . I quattro bordi, due a due, definiscono l’andamento interno delle isoparametriche. Quello delle superfici di rivoluzione, è un caso specifico per le quali uno dei due parametri sarà sicuramente di grado due e l’altro di grado  $n$ , derivante dalla costruzione della curva generatrice.

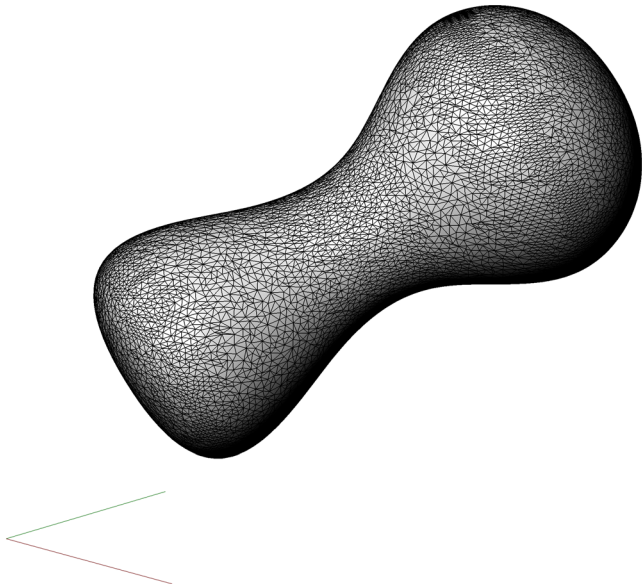


3.26\_ Rappresentazione di una superficie di rivoluzione generata da un moto attorno ad un asse di una curva generatrice.



3.27\_ Rappresentazione di un campo continuo attraverso i parametri  $u$  in rosso e i parametri  $v$  in verde.



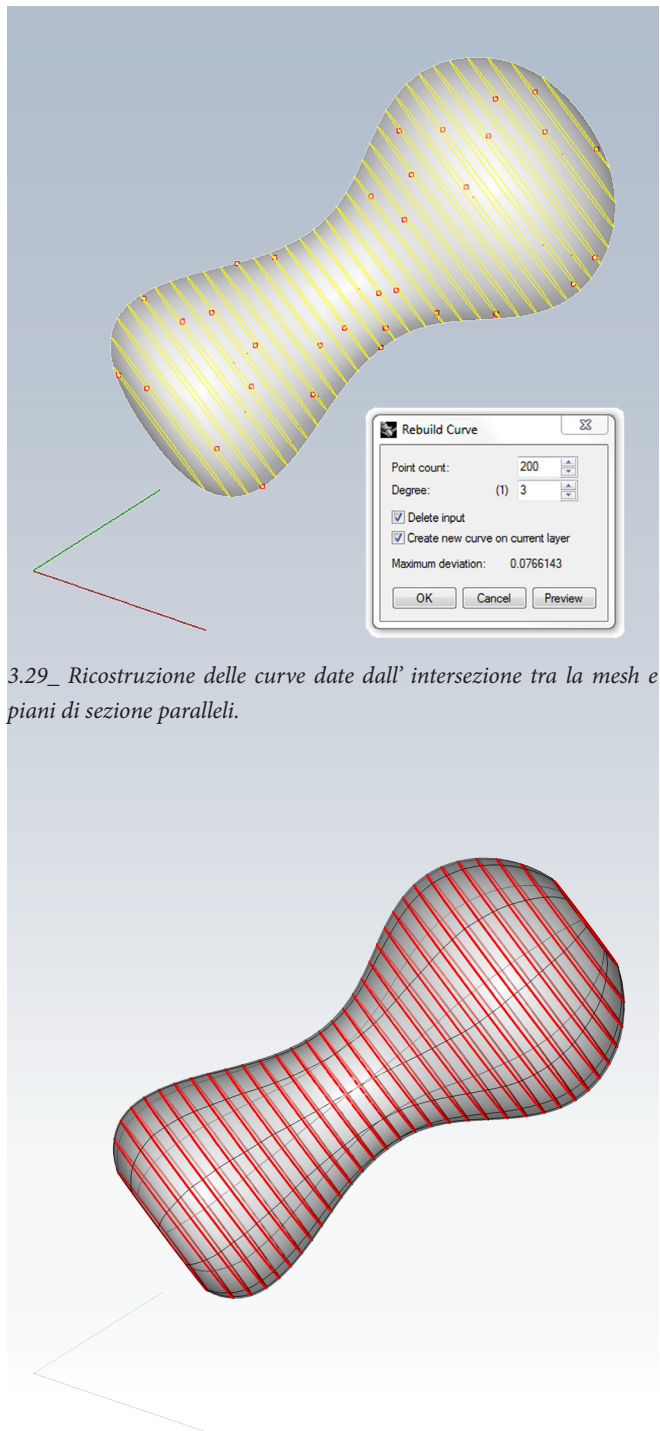


3.28\_ Modello numerico rappresentato da una mesh di triangoli non strutturata.

Nell'atto pratico le superfici di rivoluzione, vengono trattate dai software di modellazione matematica, attraverso lo scorrimento di una curva di grado  $n$  lungo una curva generalmente di secondo grado. Durante lo scorrimento, la curva di grado  $n$  manterrà una direzione sempre tangente alla curva di secondo grado. In questo modo, pur differenziandosi nella teoria, l'essenza della citazione geometrica posta all'inizio del paragrafo sussiste, soprattutto perchè la curva di secondo grado sarà un arco di cerchio o un cerchio, quindi una "curva precisa", contraddistinta da un particolare rapporto con i punti di controllo, la cui forza attrattiva verso le spans sarà differente dallo standard pari ad uno. Il rapporto che il cerchio ha con i punti di controllo sarà lo stesso rapporto che si otterrà tra vertici di controllo e superficie di rivoluzione generata.

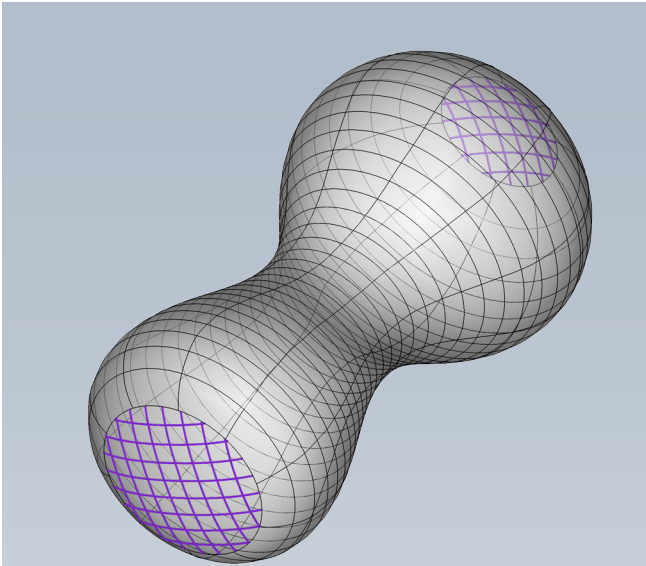
Osservando l'entità in figura 3.27, possiamo notare una superficie unica dove la  $u$ , rappresentata in rosso, è di grado due e la  $v$ , rappresentata in verde, è di grado tre. Tutte le isoparametriche in  $u$  si chiudono in cerchi i cui centri sono allineati sull'asse di rivoluzione.

Si è quindi fatta una lettura analitica di quello che sarà il



3.29\_ Ricostruzione delle curve date dall' intersezione tra la mesh e piani di sezione paralleli.

3.30\_ Vestizione delle curve attraverso la superficie loft.



3.31\_ Chiusura delle aperture per mezzo di una superficie pach.



3.32\_ L'analisi delle curve isofote mette in evidenza i problemi determinati dalla metodologia adottata

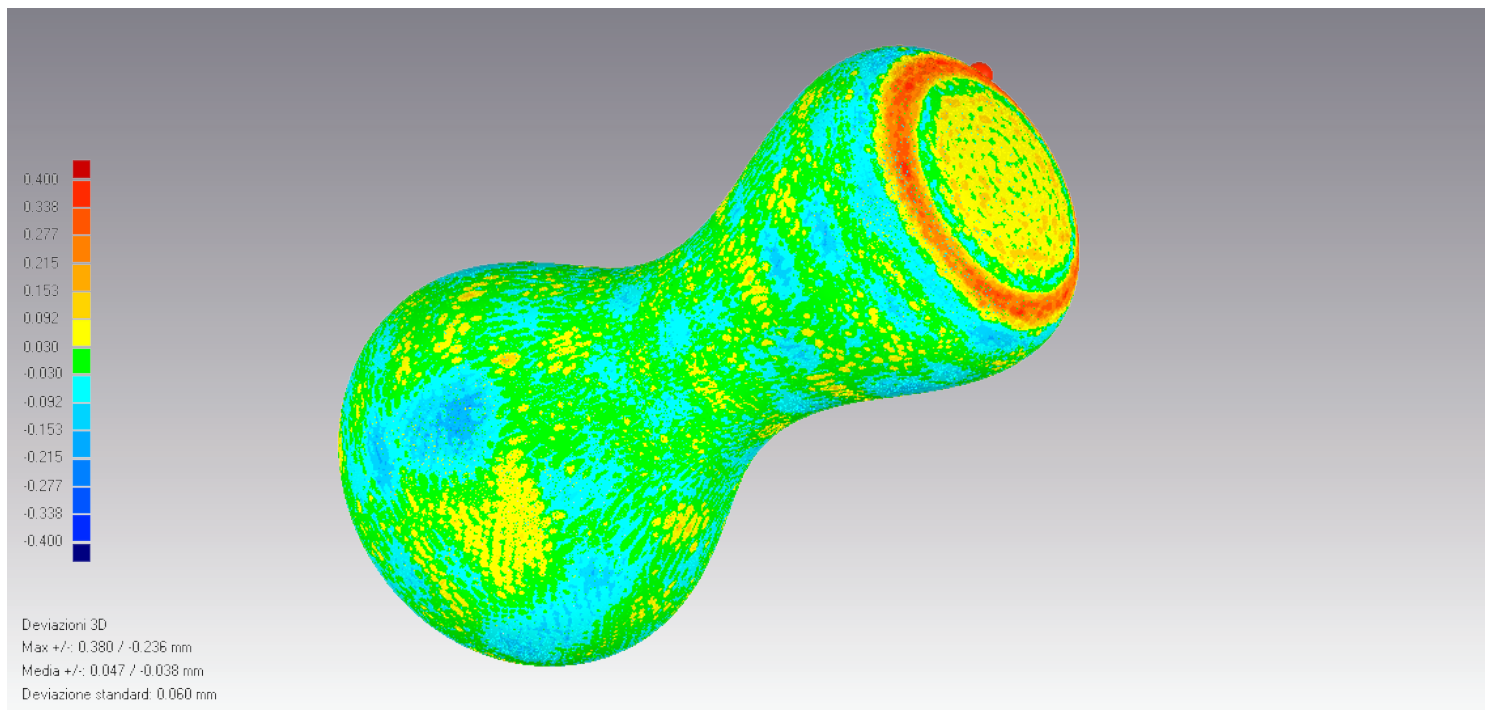
risultato del Reverse Modeling effettuato per una mesh rappresentante un oggetto di rivoluzione. E' prioritaria l'individuazione, nel modello numerico, dell'asse di rivoluzione e della curva generatrice. Quest'ultima è subordinata all'individuazione dell'asse in quanto, solo una volta individuata la retta, questa diventa cerniera di una stella di piani che intersecando la superficie poliedrica, individua le polilinee, che diventeranno le generatrici della superficie Nurbs che si andrà a rappresentare.

A monte della nostra azione vi è la mesh, superficie rappresentata numericamente attraverso una maglia di triangoli non allineati, che costruiscono nel caso teorico di figura 3.28, un poliedro chiuso in grado di individuare uno spazio interno ed uno esterno.

Un primo metodo per il passaggio da modello numerico a modello matematico può avvenire attraverso l'operazione di lofting. Termine che nella cantieristica navale, identifica la vestizione delle carene delle barche a partire dalla ricostruzione 1:1 delle linee d'acqua determinanti il carattere estetico e le prestazioni dell'imbarcazione. Analogamente, per la costruzione di superfici Nurbs, è necessario vestire con una superficie loft, la superficie mesh. Per questo è necessario estrarre uno scheletro di curve attraverso sezioni ponderate della superficie numerica. La procedura è la seguente:

- a) orientamento della vista in modo tale da effettuare tracce di piani di sezione pressochè ortogonali all'ipotetico asse di rivoluzione;
- b) ricostruzione delle polilinee, frutto di intersezione tra la mesh e i piani, in modo da ottenere una curva il più possibile aderente al dato acquisito (fig.3.29);
- c) vestizione delle curve con la superficie loft (fig.3.30);
- d) chiusura delle aperture, poste per costruzione ai poli opposti della forma, per mezzo di una superficie pach (fig.3.31);

Le problematiche riscontrate in questa procedura sono molteplici. Innanzitutto procedere per sezioni finalizzate alla costruzione della loft è estremamente approssimativo; le sezioni che creiamo appartengono a piani che non hanno alcun rapporto con l'asse di rivoluzione, non essendo stato fino ad ora rilevato. Come mostrato in figura si gene-

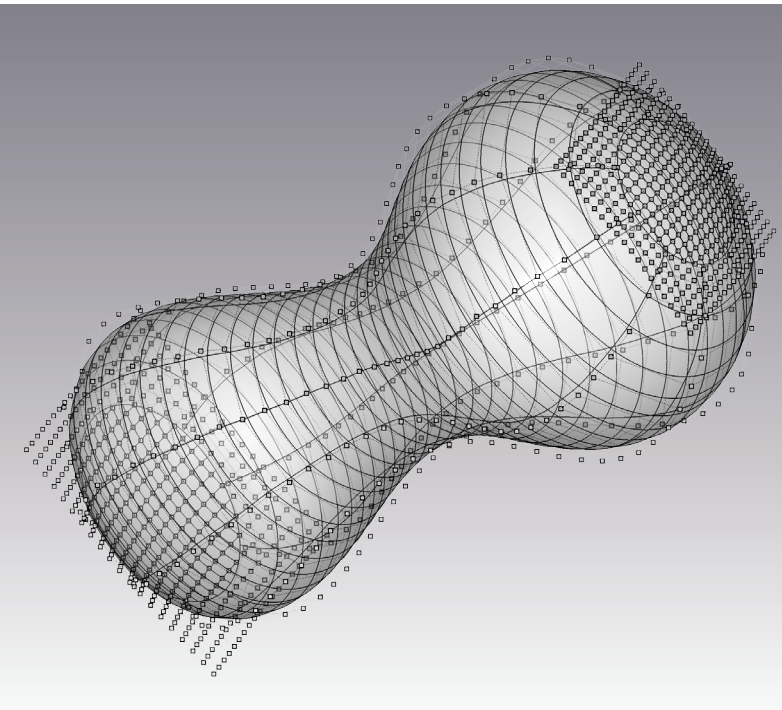


### 3.33\_ Eterogeneità nella distribuzione della deviazione esistente tra il modello matematico e il modello numerico.

rano curve intersezione che approssimano il cerchio, ma in effetti non lo sono. Inoltre, il passo dei piani scelti per intercettare il modello numerico, sarà tanto fitto quanto più complesso è l'oggetto, ma in ogni caso i poli dell'oggetto non vengono descritti.

Per ovviare al problema, si crea una superficie tagliata con i vertici della porzione di mesh non descritta, che ha come limite di taglio i bordi della loft precedentemente costruita. La superficie tagliata è generata dallo strumento patch, il quale contempla al massimo la continuità di tangenza sui bordi tagliati, per cui il migliore risultato ottenibile sarà quello illustrato in figura 3.32 attraverso la visualizzazione delle curve isofote, determinando una rappresentazione matematica del modello, con una polisuperficie di classe non eccellente. Un altro punto debole del processo illustrato, riguarda la matematica che si nasconde dietro al modello digitale ottenuto, che è più complessa di quanto dovrebbe, contemplando la presenza di “untrimmed surfaces” e “trimmed surfaces”, con punti di controllo orientati in

relazione ai piani di taglio utilizzati precedentemente per sezionare la mesh. Questo prodotto, pur essendo rappresentabile attraverso una sola superficie di rivoluzione, nel caso illustrato è costituito da più pezzi, per le quali, all'operatore/progettista è richiesto di specificare il tipo di continuità da costituire ai bordi a contatto tra le superfici. Lo strumento patch, utilizzato per tappare i fori posti ai poli dell'oggetto digitale, non consente di andare oltre la continuità di tangenza con la superficie loft precedentemente creata. Nel caso esemplificativo la non possibilità di andare oltre alla continuità G1 tra superficie patch e superficie loft determina quella corona rossa nel modello cromatico, indicativa di un forte scollamento del modello matematico dal modello numerico visibile in fig. 3.33. Quest'ultima mostra la deviazione esistente tra modello mesh e modello Nurbs appena creato; il range cromatico visualizza in verde le parti pressochè in aderenza, per arrivare al colore giallo e quindi rosso, che evidenziano deviazioni rilevanti. Siamo di fronte ad un modello continuo la cui accuratezza rien-



3.34\_ Vertici di controllo della superficie risultante dalla somma della loft e delle superfici non tagliate

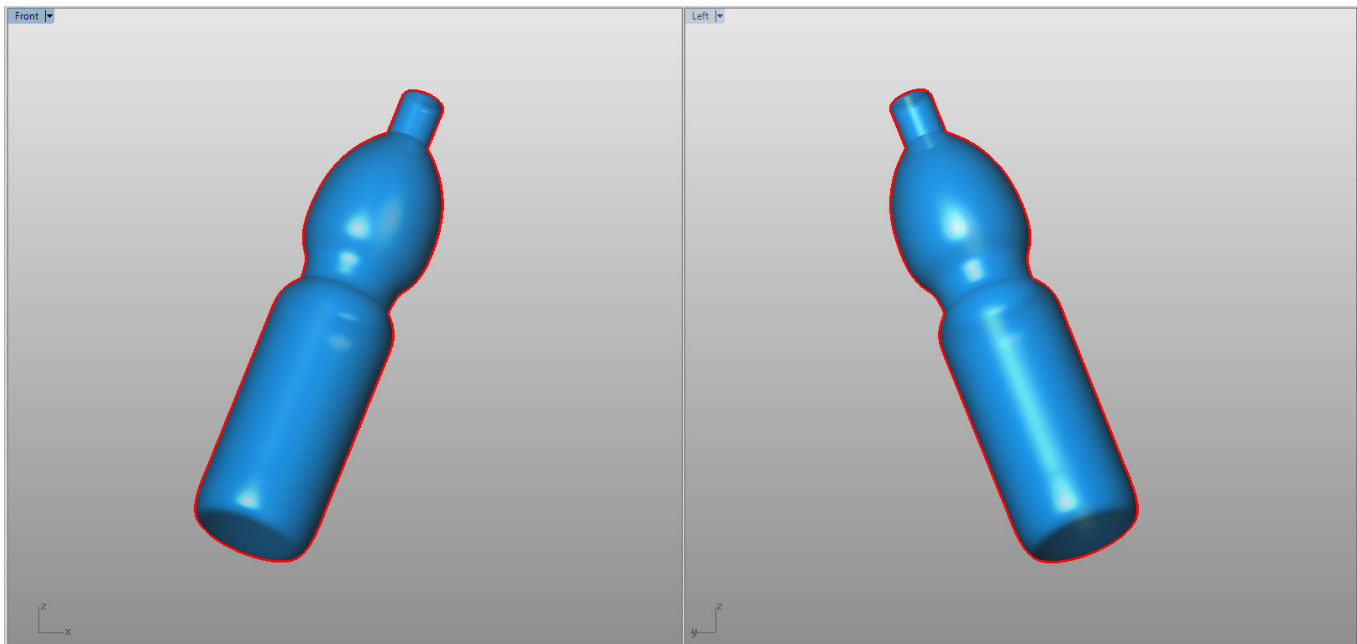


3.35\_ Rappresentazione numerica di un oggetto caratterizzato dall'asse di rivoluzione.

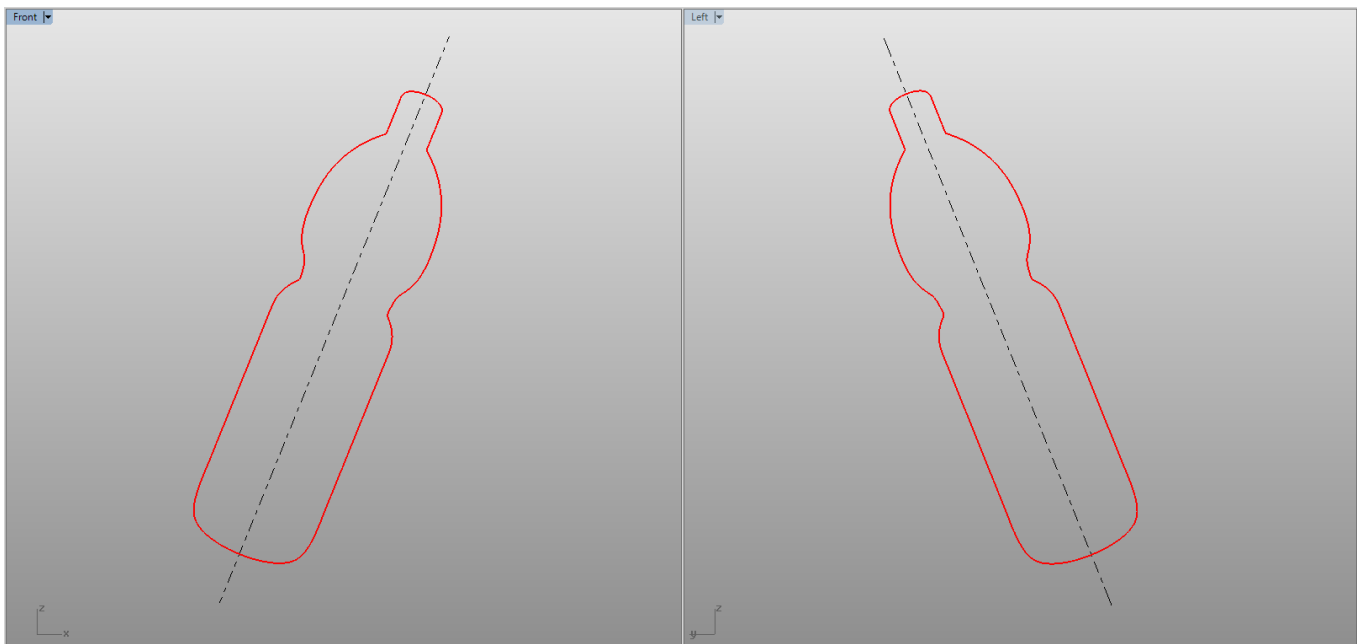
tra negli ambiti di tolleranza contemplati dal designer, ma comunque non è completamente adatto alle sue finalità. Fin qui nessuna traccia dell'asse di simmetria e di profili in grado di generare la superficie. La presenza di superfici patch e l'impossibilità di poter fare una vera e propria rivoluzione, crea un prodotto eccessivamente complesso e si allontana da quelle che sono le prerogative descritte all'inizio di questo paragrafo. Osservando la figura 3.34, notiamo che la superficie ricostruita non si distribuisce in maniera equilibrata intorno ad una entità geometrica strutturante. Ricordiamo che il processo di Reverse Modeling effettuato dal designer, non è finalizzato al rilievo; il progettista, infatti, ha necessità di modificare l'oggetto acquisito, per cui il modello matematico, deve possedere come qualità principali, le caratteristiche tipiche di una superficie di rivoluzione per averne il controllo completo.

La ricostruzione matematica di una buona superficie di rivoluzione, eviterà nelle future fasi di trasformazione, laboriose ricostruzioni delle superfici che parteciperanno alla rappresentazione. In sintesi il designer ha necessità di un modello che garantisca la presenza delle geometrie strutturanti, utili a supportare le ulteriori azioni progettuali.

In figura 3.35 è rappresentato il modello numerico di una bottiglia, casualmente disposta nello spazio, quindi privo di riferimenti utili alla determinazione del suo asse di rivoluzione, punto di partenza per un adeguato processo di Reverse Modeling. I più moderni software utilizzati per la modellazione inversa sono dotati di potenti strumenti computazionali per l'individuazione dell'asse in maniera indiretta, ma ci renderemo conto, andando avanti nella trattazione, che il problema si risolve anche con programmi di uso comune, attraverso l'utilizzo di semplici regole di geometria descrittiva applicate nello spazio digitale. Il risultato è la comprensione totale della forma analizzata, conoscenza non perseguibile premendo semplicemente un tasto. Una volta trovato l'asse della bottiglia, abbiamo quella geometria strutturante da cui si diparte la stella di piani con la quale sezionare la mesh ottenendo il profilo: il contorno apparente da porre in rivoluzione. Il risultato è la corretta rappresentazione matematica della mesh acquisita, controllabile matematicamente e facile da modificare in funzione degli obiettivi progettuali del designer.

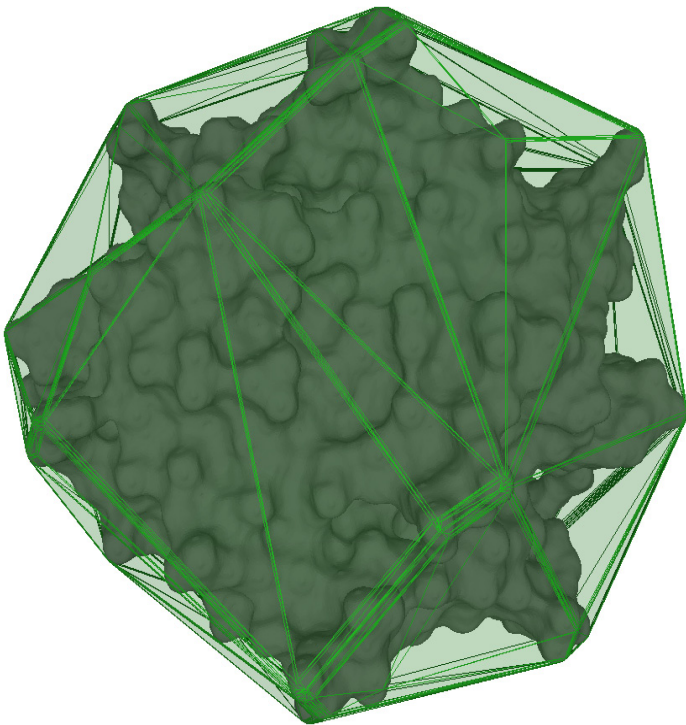


3.36\_ Vista frontale e vista laterale del modello numerico rappresentante la superficie di rivoluzione: individuazione del contorno apparente.



3.37\_ Le proiezioni ortogonali dell'asse di rivoluzione della bottiglia disposta nello spazio, sono gli assi di simmetria delle proiezioni ortogonali dell'oggetto stesso.

Comè noto, il contorno apparente di un oggetto di rivoluzione visto da un punto improprio, determina una immagine dell'oggetto in cui è palese la presenza dell'asse di simmetria della figura (fig. 3.36). E' chiaro che l'individuazione dell'asse di simmetria del contorno apparente, risulta essere un metodo indiretto per ricavare l'immagine dell'asse di rivoluzione posto nello spazio. La costruzione di due contorni apparenti visti da due direzioni non coincidenti, determinano due assi di simmetria, giacenti in piani perpendicolari alla direzione di vista e sufficienti alla ricostruzione dell'asse di rivoluzione posto nello spazio digitale (fig. 3.37). L'individuazione dell'asse di un modello mesh, posto casualmente nello spazio, è un problema estremamente complesso, per cui va ridotto alla sua risoluzione piana.



3.38\_ Costruzione della Convex Hull attorno ad una nuvola tridimensionale.

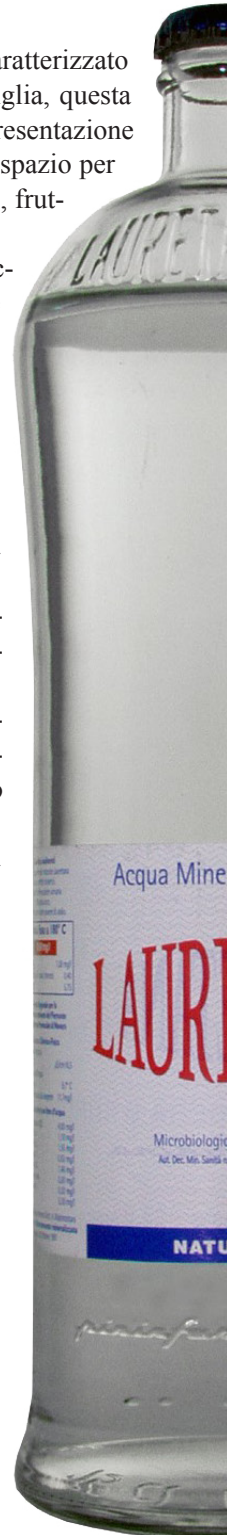
L'esempio classico di un oggetto caratterizzato da superficie di rivoluzione è la bottiglia, questa è stata disegnata attraverso una rappresentazione mesh, ed orientata casualmente nello spazio per simulare una generica nuvola di punti, frutto di acquisizione 3D (fig.3.35).

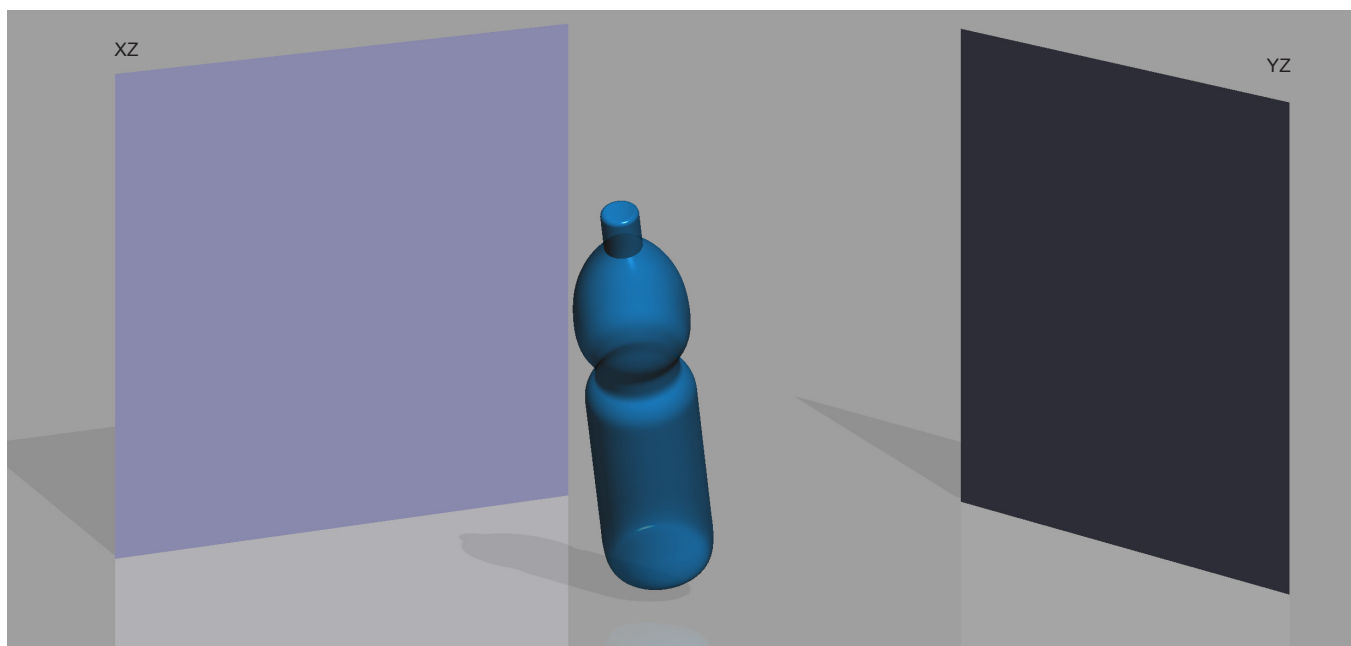
Il primo passo da effettuare, è rintracciare nel dato numerico, le geometrie utili alla costruzione della superficie di rivoluzione, con le quali creare la rappresentazione matematica della bottiglia.

Introduciamo all'interno dello spazio digitale, la coppia di piani coordinati  $XZ$  ed  $YZ$  per costituire la quinta della rappresentazione numerica 3D, disposta in maniera non orientata rispetto allo spazio coordinato del software (fig 3.39).

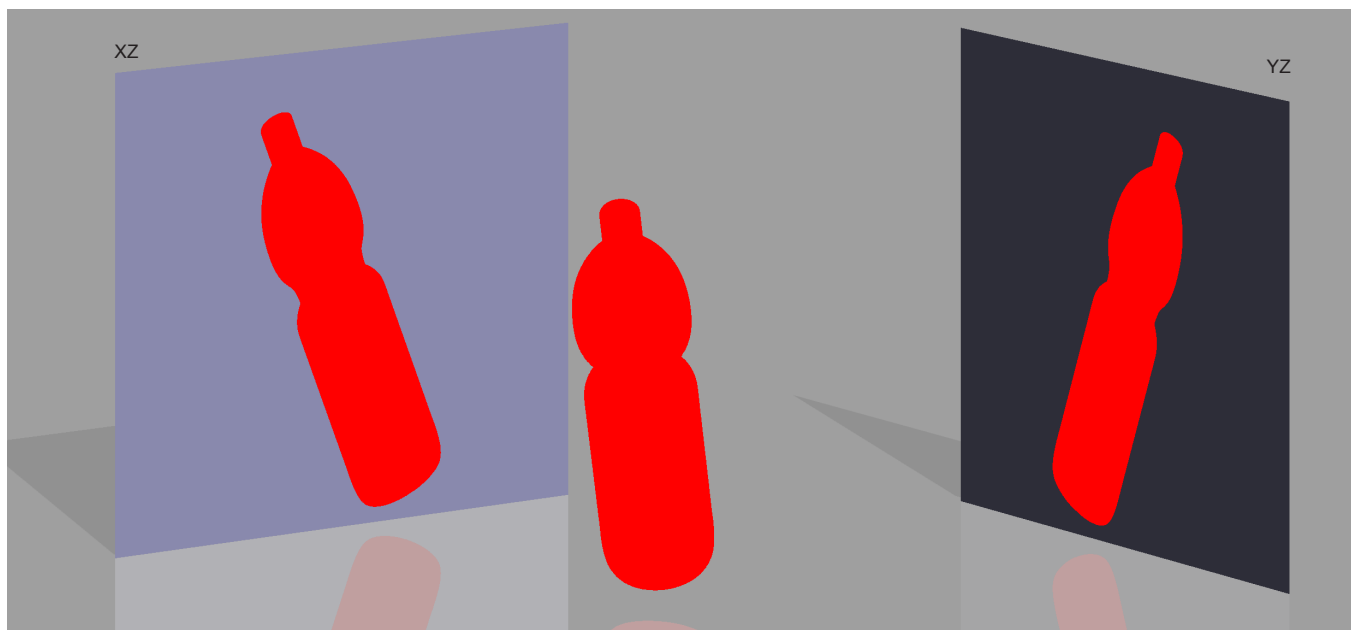
L'idea è quella di ottenere due proiezioni dei punti appartenenti alla nuvola. La proiezione di questi sul piano coordinato  $XZ$ , è uno stesso numero di punti la cui coordinata  $y$  è pari a zero; allo stesso modo la proiezione del dato numerico sul piano coordinato  $YZ$ , sarà un pari numero di punti per i quali la coordinata  $x$  è zero. Il risultato è lo sdoppiamento della nuvola in due nuvole bidimensionali immagine, sui piani coordinati, del dato numerico acquisito (fig. 3.40).

Se prendiamo in considerazione una sola nuvola bidimensionale ed andiamo ad unire i punti più esterni con una spezzata, questa si chiude dando vita ad una polilinea la cui forma rappresentata possiede asse di simmetria. La Convex Hull (fig. 3.38), è l'algoritmo che risolve il problema planare della determinazione di quel poligono convesso, in grado di avvolgere un insieme finito di punti.





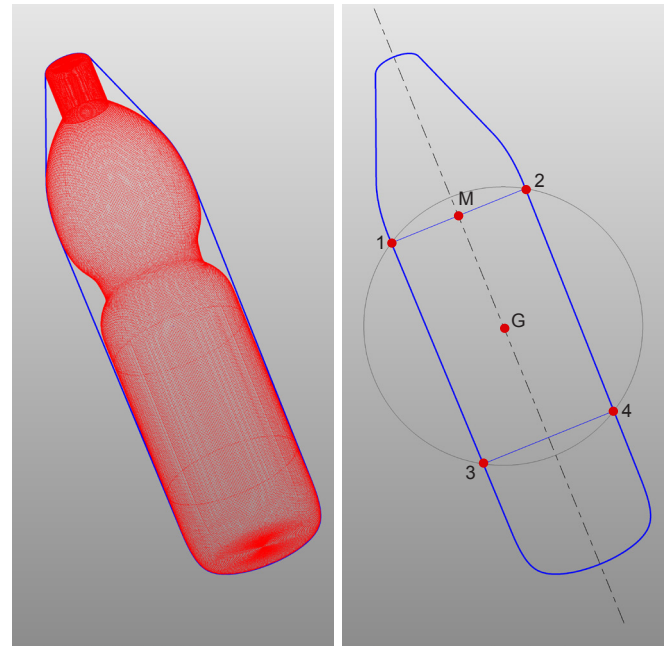
3.39\_ Introduzione di una coppia di piani coordinati XZ ed YZ per costruire la quinta della rappresentazione numerica 3D.



3.40\_ Proiezione del dato numerico acquisito sui due piani coordinati XZ ed YZ.

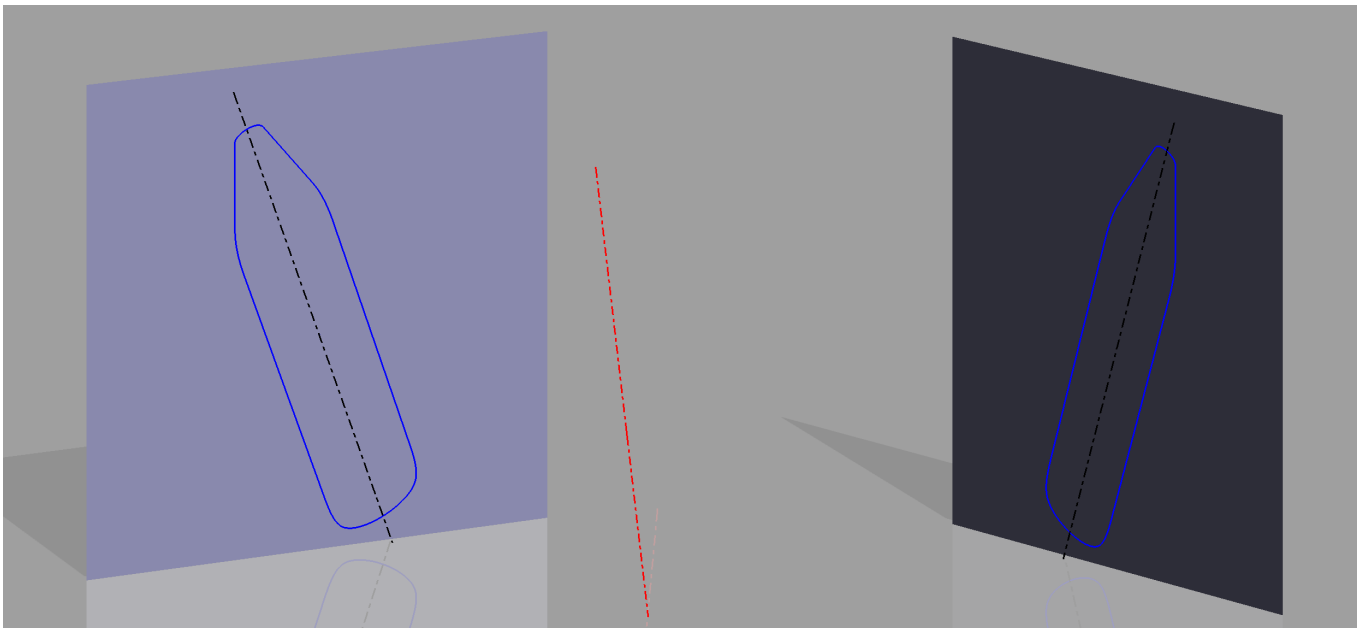
Immaginiamo, per capire il concetto, un elastico tenuto teso su un piano che circonda elementi puntiformi anch'essi poggiati sul piano. Quando l'elastico viene rilasciato, va a formare un poligono convesso che avrà come vertici gli elementi più estremi dell'insieme. Nel caso preso in esame, il risultato sarà un poligono dotato di simmetria e baricentro, quest'ultimo è facilmente determinabile dal software attraverso un semplice comando nel menù di analisi (fig. 3.41).

Costruiamo una circonferenza appartenente al piano della nuvola bidimensionale proiettata su  $XZ$ , il cui centro sia proprio il baricentro  $G$  della Convex Hull e con un raggio tale da poter permettere alla circonferenza di intersecare il poligono nei punti **1-2-3-4**. L'obiettivo è definire l'asse di simmetria del poligono convesso attraverso due punti che gli appartengono: uno è sicuramente il baricentro  $G$  del poligono, un altro può essere il punto medio  $M$  del segmento costruito tra i punti di intersezione **1-2** opposti. Il punto medio  $M$  ed il baricentro  $G$  definiscono l'asse di simmetria (fig. 3.42).



3.41\_ Costruzione della Convex Hull attorno alla nuvola 2D.

3.42\_ Costruzione per la determinazione dell' asse di simmetria.

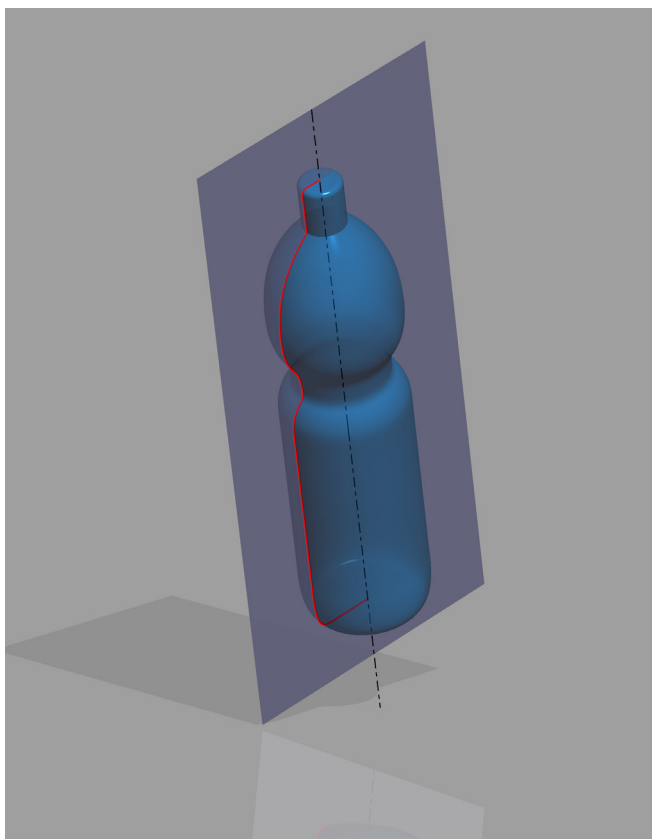


3.43\_ Individuazione dell' asse di simmetria sui due piani coordinati ed il relativo asse di rivoluzione nello spazio.



Come abbiamo detto prima, consideriamo questa geometria creata sul piano  $XZ$ , come immagine dell'asse di rivoluzione posto nello spazio digitale. Con due immagini piane è possibile descrivere un oggetto nello spazio. Proponendo la stessa costruzione per la nuvola bidimensionale sul piano  $YZ$ , ecco che otteniamo una seconda immagine dell'asse di rivoluzione utile allo scopo prefissato in questa trattazione (fig. 3.43).

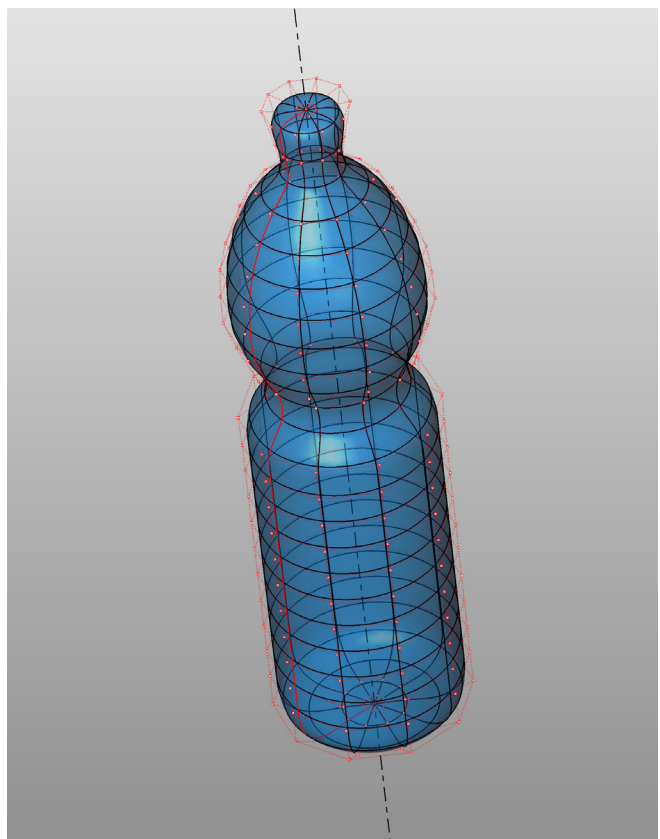
L'asse nello spazio, è anche cerniera di una stella di piani che sezionano la superficie poliedrica in polilinee chiuse, di questi ne scegliamo uno che intercetta la mesh in una spezzata (fig. 3.44). L'asse individuato, appartiene per costruzione al piano del poligono, determinando in modo pressochè esatto le due parti simmetriche. Trattando dati discreti la simmetria non è assoluta e per questo diventa



3.44\_ Piano passante per l'asse di rivoluzione che seziona il modello numerico in una polilinea.

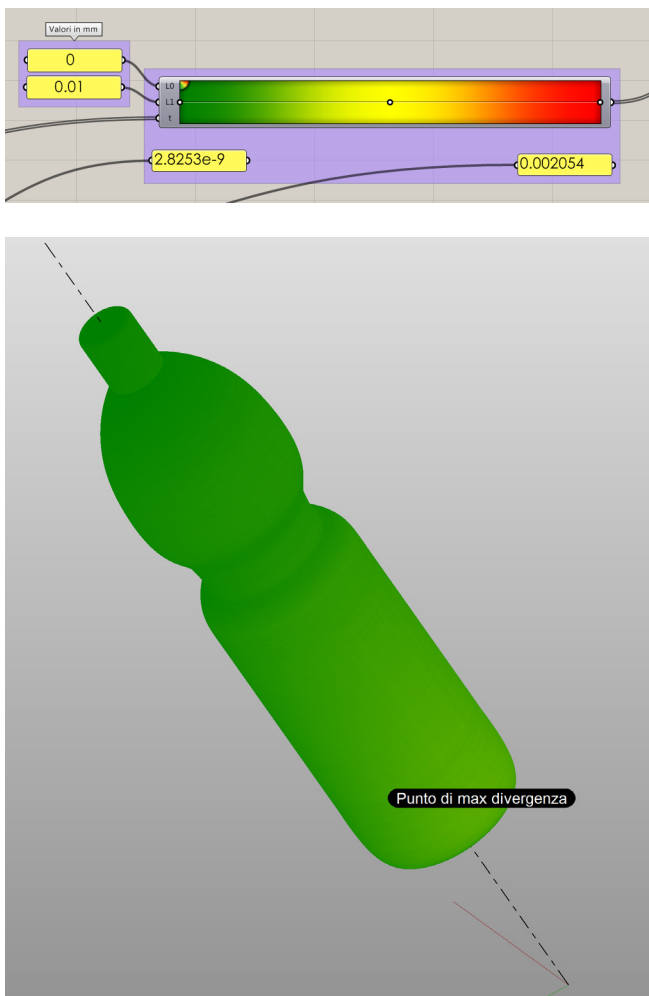
importante porre in rivoluzione metà del profilo, compiendo una rotazione di un intero angolo giro intorno all'asse. Il semiprofilo, opportunamente ricostruito, è la generatrice della superficie Nurbs che si va a creare: interpolando i vertici della generatrice con una spline di terzo grado, otteniamo una buona approssimazione dell'entità grafica che verrà utilizzata come curva generatrice.

L'operazione di Reverse Modeling espressa in questo modo, consente di ottenere una superficie che veste l'oggetto rilevato non solo formalmente, ma anche strutturalmente, partendo da quelle che sono le caratteristiche dell'oggetto acquisito, che è un oggetto di rivoluzione. Si sono quindi create delle forti relazioni tra modello fisico e modello matematico (fig. 3.45).



3.45\_ Operazione di Reverse Modeling sull'oggetto di rivoluzione.

Il controllo della bontà dell'operazione effettuata, si ha proiettando i vertici della mesh acquisita sulla superficie NURBS appena generata, valutandone la distanza punto per punto. Si affida ad ogni distanza un gradiente cromatico all'interno di un range relativo alla tolleranza accettata. Nel caso presentato si è creato un range cromatico che va dal verde, dove la deviazione tra le due superfici è pari a 0; al rosso, in cui è pari al centesimo di millimetro. Inoltre si è messo in evidenza il punto in cui esiste la massima distanza dalla superficie NURBS, distanza pari a circa  $2\mu\text{m}$  (fig. 3.46).



3.46\_ Analisi della deviazione tra modello numerico e modello matematico rappresentata attraverso un range cromatico.

### 3.6 Oggetti a piano di simmetria

Il piano di simmetria, rappresenta quella specifica superficie piana che taglia un elemento tridimensionale, creando due parti congruenti e speculari.

Questo piano particolare, nella maggior parte dei prodotti di design in commercio è unico. Per definire un piano, sono sufficienti tre punti tra gli infiniti appartenenti ad esso. Per ogni punto, vi sarà una direzione in grado di intercettare l'oggetto in punti opposti equidistanti al piano, tale direzione è perpendicolare al piano di simmetria.

Di conseguenza, il piano di simmetria divide la superficie che si sta valutando in due porzioni, ugualmente distribuite rispetto al piano speculare.

Ricordando la definizione di baricentro, ci rendiamo immediatamente conto che le proprietà sopra descritte, gli appartengono nel caso in cui il manufatto faccia parte di quei prodotti definiti "oggetti bilanciati".

Il problema dell'individuazione del piano di simmetria sarebbe risolto se ogni modello numerico, rappresentante l'oggetto da studiare, fosse provvisto di tre baricentri.



3.47\_ Caffettiera modello Bialetti, Alfonso Bialetti.

Il mondo reale ovviamente non fornisce queste condizioni, ogni oggetto è provvisto di un solo baricentro, ma nello spazio digitale possiamo creare delle condizioni specifiche che permettono di individuare tre baricentri relativi, legati a porzioni di forma estratte dall'oggetto totale. In termini pratici tripartiamo l'oggetto ottenendo tre diversi baricentri, utili alla costruzione del piano. Ciò sarà vero solamente se i tagli effettuati suddivideranno l'oggetto in tre parti, a loro volta ancora bilanciate.

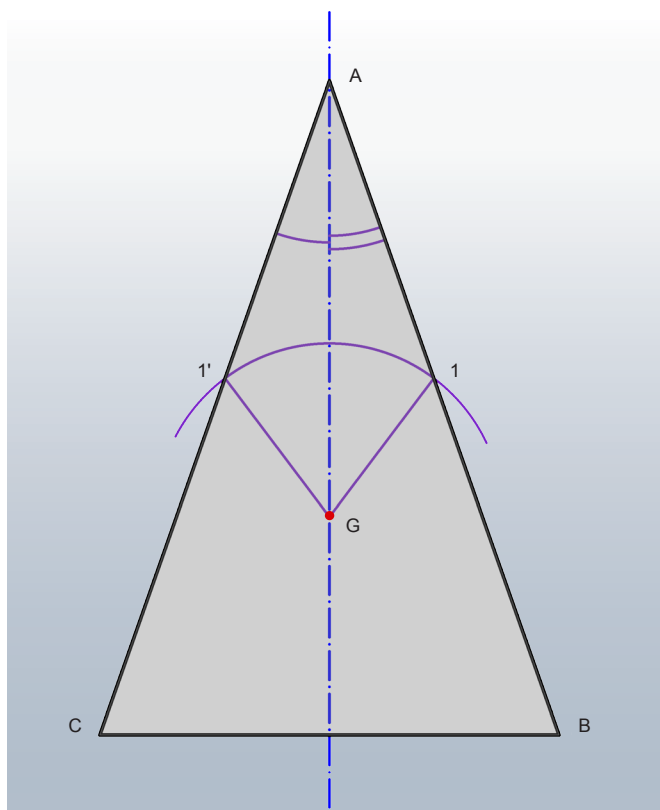
Partiamo dal problema nel piano e facciamo delle semplici osservazioni, per arrivare alla procedura in grado di troncare il prodotto in parti che soddisfino le nostre esigenze. Nella figura 3.48 è disegnato un triangolo isoscele, poligono evidentemente provvisto di un unico asse di simmetria, bilanciato e quindi con un baricentro **G** appar-

tenente all'asse. Facendo centro in **G**, costruiamo un arco di ampiezza non superiore alla distanza **GA**. Con questo intercettiamo il lato **AB** e **AC** rispettivamente nei punti **1** e **1'**, tra loro speculari rispetto all'asse (fig. 3.49).

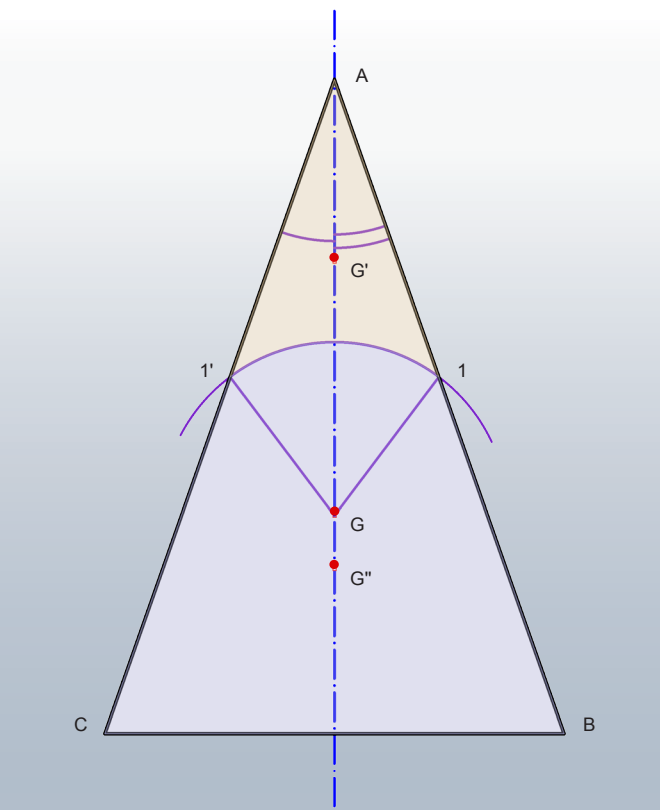
L'arco inoltre, spezza la superficie in due figure, quella rosa e quella celeste ancora bilanciate. Naturalmente le due figure ormai distinte hanno due baricentri, **G'** e **G''** e ancora due assi di simmetria allineati sulla stessa retta e coincidenti all'asse di simmetria della figura intera.

Solo due tipologie di taglio permettono di ottenere come risultato la frammentazione del totale in parziali equilibrati, il primo è quello appena descritto, il secondo è quello fatto con segmenti taglianti perpendicolari all'asse di simmetria.

Le riflessioni proposte sino ad ora, risultano banali per una forma così immediata quale il triangolo, per il quale

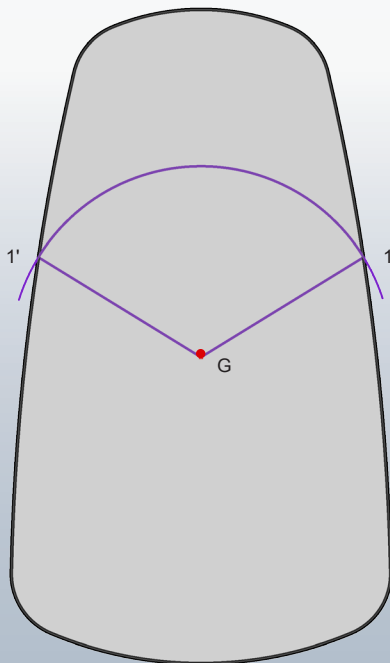


3.48\_ In una figura bilanciata il baricentro cade sull'asse di simmetria.



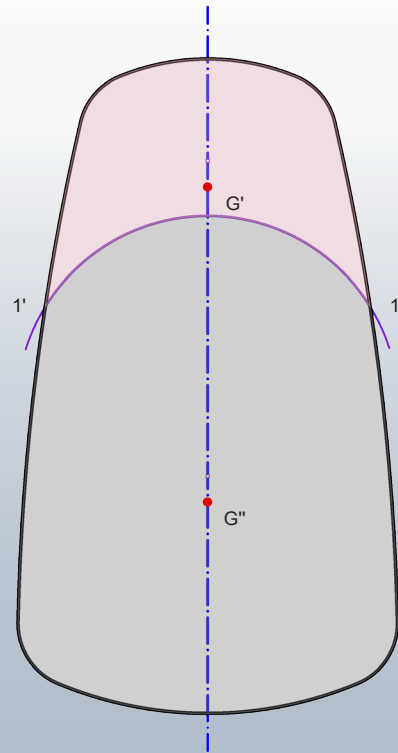
3.49\_ Costruzione dell'arco che suddivide il poligono in due figure ugualmente bilanciate.

le geometrie strutturanti sono lampanti ed individuabili attraverso altri strumenti più usuali; la sua utilità si dispiega soprattutto nei casi riguardanti figure morbide (fig. 3.50). Non tutte le figure bilanciate esprimono con chiarezza la presenza di un asse di simmetria, per cui la sua individuazione sarà possibile mettendo in pratica le considerazioni fatte. Analizzando la figura sotto, avvalendosi della conoscenza delle forme e dell'intuizione, immediatamente cataloghiamo l'immagine in figura come forma bilanciata, da cui poter ricavare l'asse di simmetria. L'assenza di soluzione di continuità lungo la curva che delimita il perimetro della figura, non consente di appoggiarsi a riferimenti speculari esatti, per la determinazione dell'asse di simmetria. Pertanto non si è in grado di tracciare alcun segmento in grado di rompere la forma piana di riferimento in due entità bilanciate.

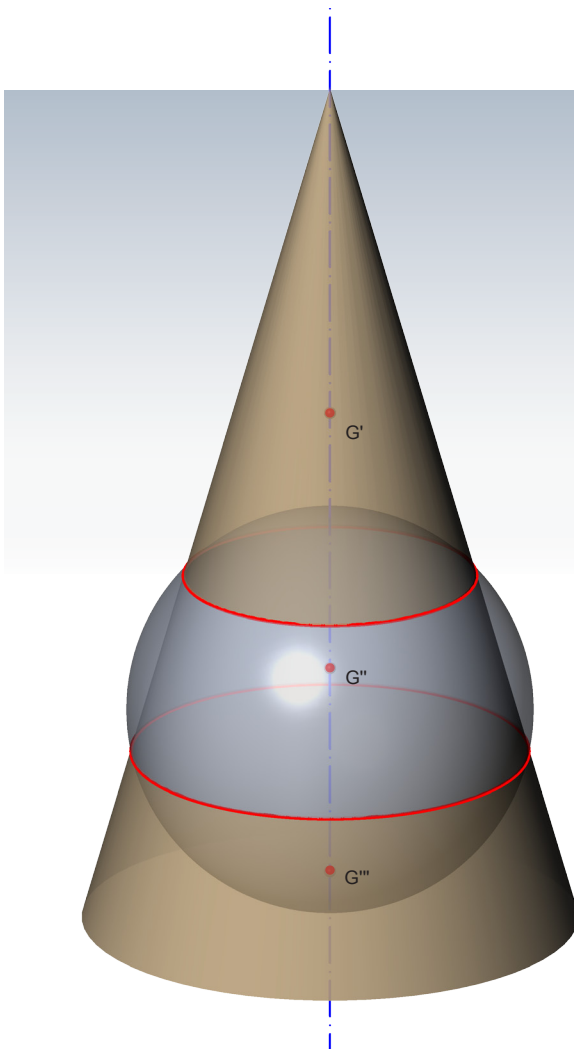


3.50\_ Individuazione del baricentro della forma morbida per la costruzione del taglio bilanciato.

Con un click imponiamo al software di mettere in evidenza il baricentro  $G$ , da utilizzare come centro di un arco in grado di tagliare la figura in due parti (fig. 3.51). L'arco interseca il perimetro nei punti  $1$  e  $1'$ , speculari; la parte di perimetro superiore che unisce i due punti di intersezione e l'arco, racchiudono la superficie equilibrata rosa di centro  $G'$ ; l'altra parte, di colore celeste, è sempre equilibrata e ha baricentro in  $G''$ . Possiamo affermare che i baricentri  $G'$  e  $G''$  appartengono sicuramente ai propri assi di simmetria e contemporaneamente sono allineati lungo l'asse di simmetria della figura generale. In sintesi, una volta trovati i due baricentri, la retta che li unisce è l'asse di simmetria della figura. Cerchiamo adesso di sfruttare i ragionamenti effettuati nel piano, per la determinazione del piano di simmetria di un oggetto disposto nello spazio.

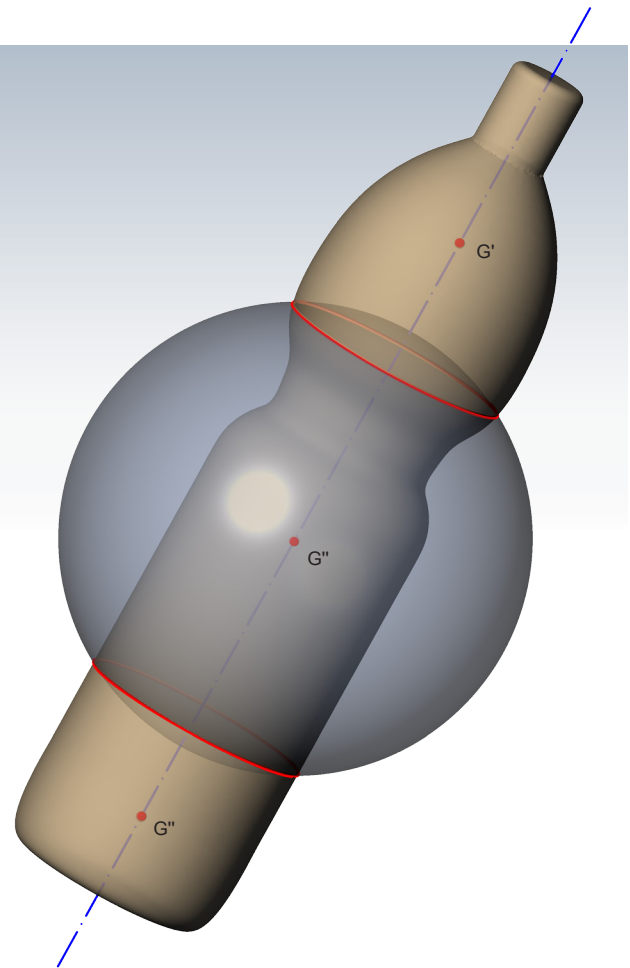


3.51\_ Costruzioni geometriche per determinare l'asse di simmetria in una forma bilanciata morbida.



3.52\_ Rappresentazione di una primitiva geometrica creata per mezzo della rivoluzione di una retta generatrice attorno ad un asse.

Passiamo dal piano allo spazio utilizzando come ponte una primitiva semplice. Prendiamo in considerazione un cono retto a base circolare e facciamo alcune valutazioni sul rapporto esistente tra superficie e geometrie che la caratterizzano (fig. 3.52). La primitiva in oggetto, è un'entità creata mediante la rivoluzione di una retta generatrice intorno ad un asse; generatrice ed asse si intersecano in un punto, vertice del cono. L'asse, quindi, passa per il vertice del cono ed il centro del cerchio di base. Il cono è una superficie bilanciata e per cui il baricentro  $G$  è sull'asse. Costruiamo una sfera con centro in  $G$  e dimensioni tali che permettano l'intersezione tra questa ed il cono in due



3.53\_ Costruzione dell'asse di rivoluzione direttamente nello spazio digitale attraverso l'utilizzo della sfera.

curve, che tripartiscono la superficie di rivoluzione. I nuovi oggetti generati, sono ancora bilanciati e provvisti di asse di rivoluzione passante per i rispettivi baricentri ed allineati sull'asse della forma generatrice. Anche in questo caso sono due i tagli che permettono di giungere alla soluzione, quello appena spiegato e quello effettuato con piani perpendicolari all'asse di rivoluzione.

Le nuove nozioni acquisite permettono di integrare il paragrafo precedente riguardante l'individuazione dell'asse di rivoluzione di una mesh. A differenza del metodo precedente, adesso è possibile risolvere il problema direttamen-

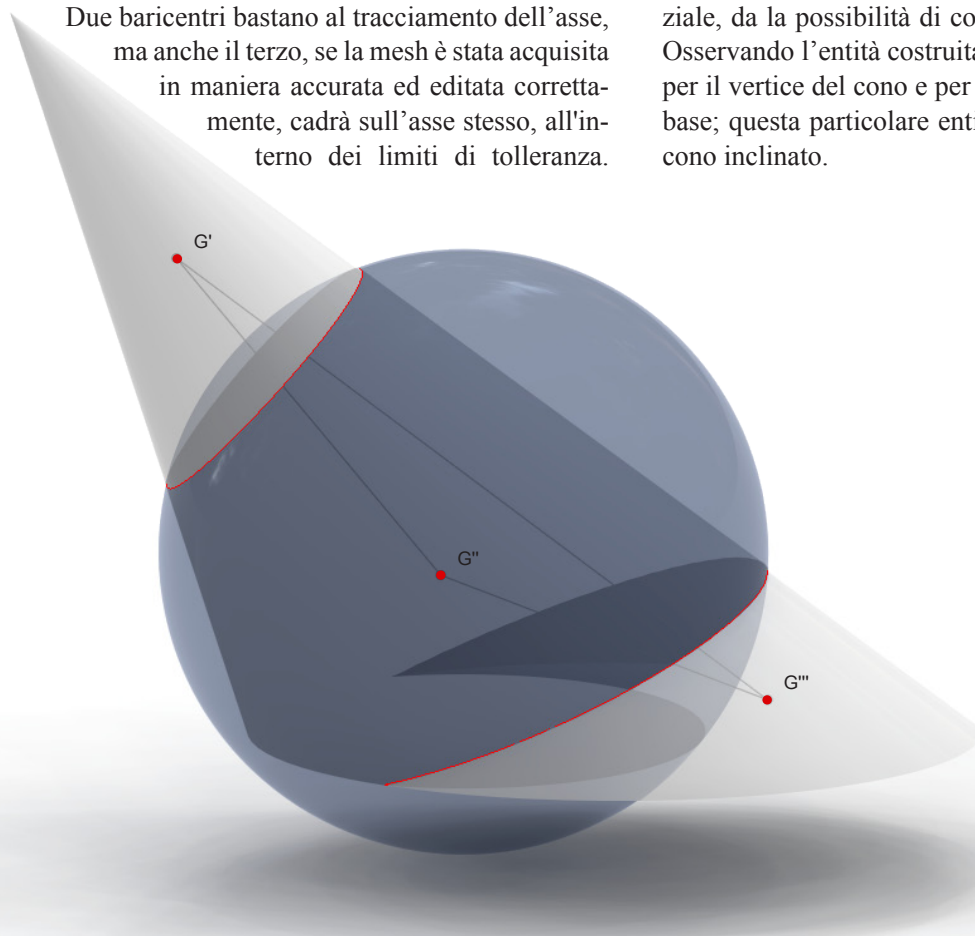
te nello spazio. Riprendiamo la rappresentazione numerica della bottiglia, mesh unica con assenza di spigoli; per essa non esistono le evidenze del cono utili al tracciamento dell'asse, ma grazie alle osservazioni fatte sulla primitiva di rivoluzione, è possibile adottare il seguente metodo.

Attraverso il supporto del software individuamo il baricentro della superficie poliedrica (fig. 3.53), questo diventa il centro di una sfera il cui raggio deve permettere di tripartire la bottiglia in tre tronchi bilanciati. Le tre mesh generate sono aperte e posseggono baricentri che, come è stato osservato, si allineano sull'asse di rivoluzione.

Due baricentri bastano al tracciamento dell'asse, ma anche il terzo, se la mesh è stata acquisita in maniera accurata ed editata correttamente, cadrà sull'asse stesso, all'interno dei limiti di tolleranza.

Non dimentichiamo che la forma genitrice, l'intera bottiglia, possedeva un suo baricentro, anch'esso intercettato dall'asse di rivoluzione trovato.

Consideriamo ora un cono circolare inclinato rispetto al piano orizzontale d'appoggio (fig. 3.54) e ripetiamo la stessa procedura. La sfera con centro in  $G$ , baricentro del cono inclinato, tripartisce la figura in porzioni di superfici bilanciate con propri baricentri, ma a differenza del cono retto, i baricentri delle superfici derivanti dal taglio non si allineano su una retta e questa loro conformazione spaziale, da la possibilità di costruire un piano per tre punti. Osservando l'entità costruita, ci rendiamo conto che passa per il vertice del cono e per l'asse maggiore dell'ellisse di base; questa particolare entità è il piano di simmetria del cono inclinato.



3.54\_ Costruzione del piano di simmetria di un cono circolare inclinato attraverso l'utilizzo del metodo della sfera.

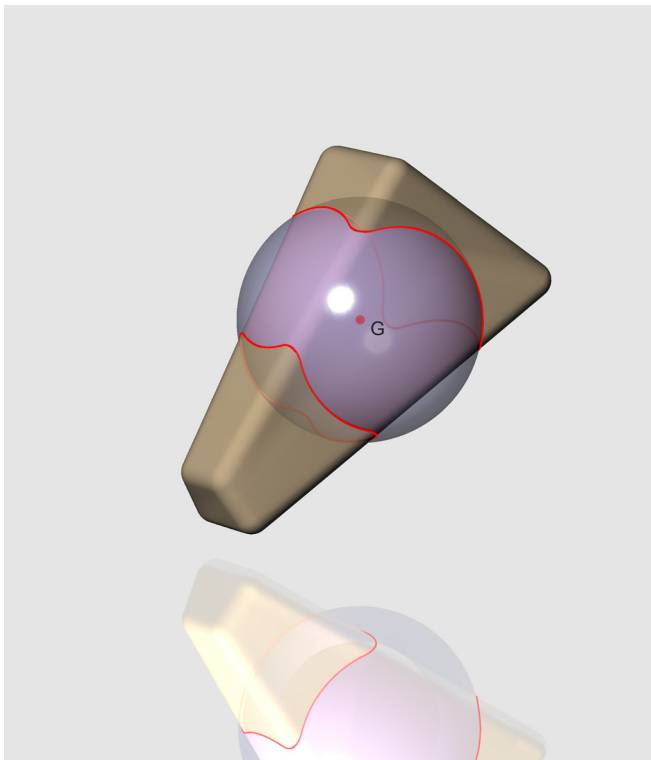
Ad ulteriore conferma, possiamo osservare che il piano di simmetria passa anche per il baricentro della primitiva genitrice. Le evidenze riscontrate su una primitiva chiara quale è il cono, mettono in luce il potenziale del metodo per la ricerca del piano di simmetria degli oggetti bilanciati. Confrontiamoci adesso con un caso generico: il modello mesh di un oggetto cuneiforme, posto casualmente nello spazio digitale (fig. 3.55).

La prima cosa che si deve fare di fronte ad una rappresentazione del tipo mostrata in figura, è capire se stiamo trattando un oggetto bilanciato; nel caso risulti evidente che l'oggetto in esame faccia parte di tale insieme, allora sarà possibile procedere con il metodo della sfera il cui centro sarà il baricentro  $G$  dell'oggetto.

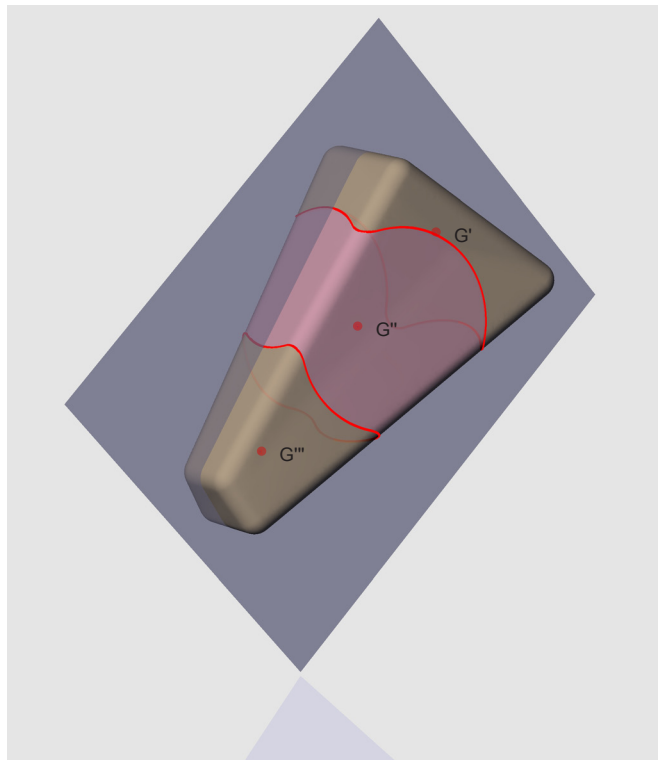
E' importante precisare che il centro di superficie ed il centro di volume non sono coincidenti, ma soddisfano ambedue la condizione che vede ognuno di essi attraversato da

almeno una retta, in grado di intersecare la mesh in due punti equidistanti dal centro di volume o di superficie. La retta che possiede questa proprietà è una retta perpendicolare al piano di simmetria. Ogni punto appartenente al piano di simmetria, vede la retta passante per esso e perpendicolare al piano, godere di questa proprietà. Precisiamo che il metodo adottato non esige in maniera specifica il punto baricentrico, ma basterebbe uno degli infiniti punti appartenenti al piano di simmetria. A priori non conosciamo la posizione del piano di simmetria ma solo di alcuni punti specifici appartenenti ad esso: il centro di volume ed il centro di superficie (fig. 3.56). Uno di questi, è il centro della sfera che con la sua superficie, tripartisce la mesh campione in poliedri aperti, per i quali è coerente individuare il centro di superficie.

I tre nuovi baricentri, distinti dal baricentro della forma genitrice, sono collocati nello spazio in maniera da rendere

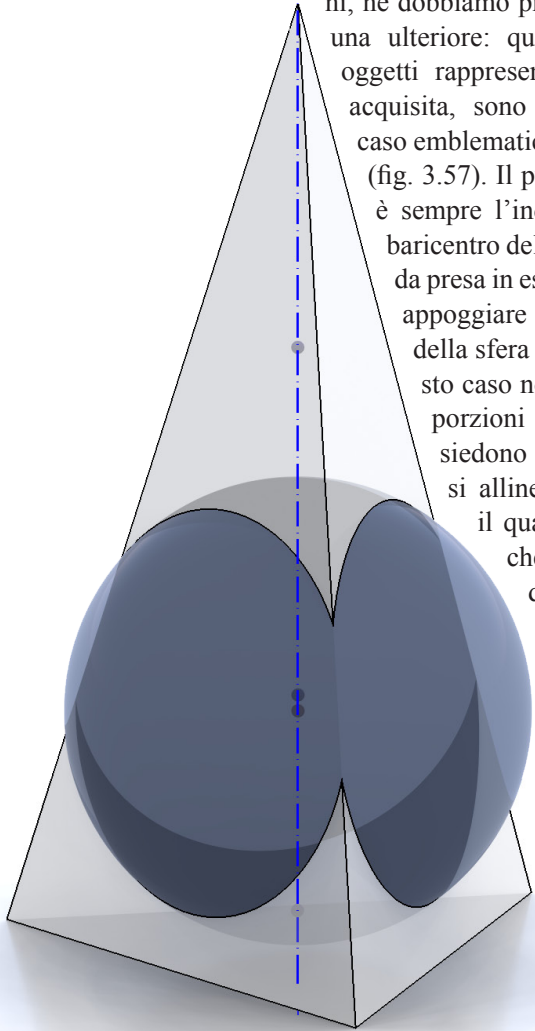


3.55\_ Disegno della sfera con centro nel baricentro di un modello numerico cuneiforme posto casualmente nello spazio digitale.



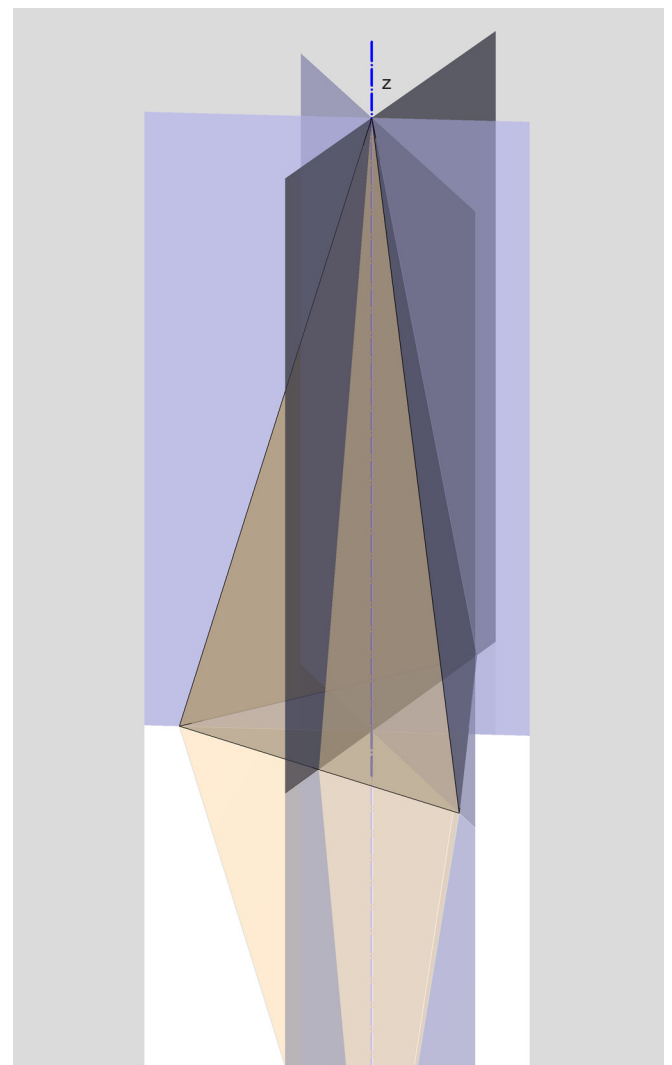
3.56\_ Costruzione del piano di simmetria di un modello numerico cuneiforme posto casualmente nello spazio digitale.

re possibile la costruzione del piano che, come dimostra l'esperienza del cono inclinato, è il piano di simmetria. In questa rassegna di condizioni, ne dobbiamo prendere in esame una ulteriore: quella per cui gli oggetti rappresentati dalla mesh acquisita, sono riconducibili al caso emblematico della piramide (fig. 3.57). Il punto di partenza, è sempre l'individuazione del baricentro della primitiva solida presa in esame, in modo da appoggiare ad esso il centro della sfera di taglio. In questo caso notiamo che le tre porzioni di piramide possiedono i baricentri che si allineano su un asse, il quale intercetta anche il baricentro della piramide di partenza. La retta individuata,



3.57\_ Individuazione delle geometrie strutturanti di una piramide retta a base triangolare.

evidentemente non è un asse di rivoluzione della superficie, essendo questo un poliedro, ma rappresenta la retta intersezione dei diversi piani di simmetria che caratterizzano la forma. La piramide che ha per base un triangolo equilatero propone tre piani di simmetria, individuati ognuno da due rette incidenti: la retta  $z$  e lo spigolo (fig. 3.58). Applichiamo le osservazioni sopra esposte ad una rappresentazione mesh disposta casualmente nello spazio digita-

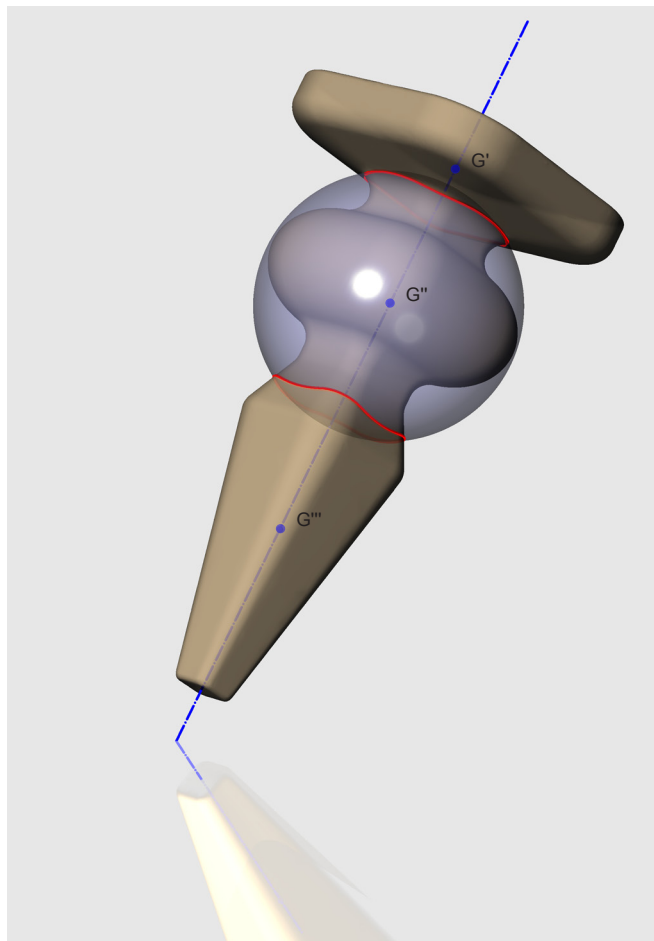


3.58\_ Rappresentazione dei tre piani di simmetria che caratterizzano la piramide retta a base triangolare.



le. L'immagine di riferimento è quella riportata in figura 3.59, in cui è rappresentata la gamba di un tavolo disposta casualmente nello spazio. Procediamo con il metodo della sfera: identifichiamo il baricentro  $G$ , costruiamo la sfera di raggio adeguato, spezziamo la mesh genitrice, identifichiamo i tre nuovi baricentri.

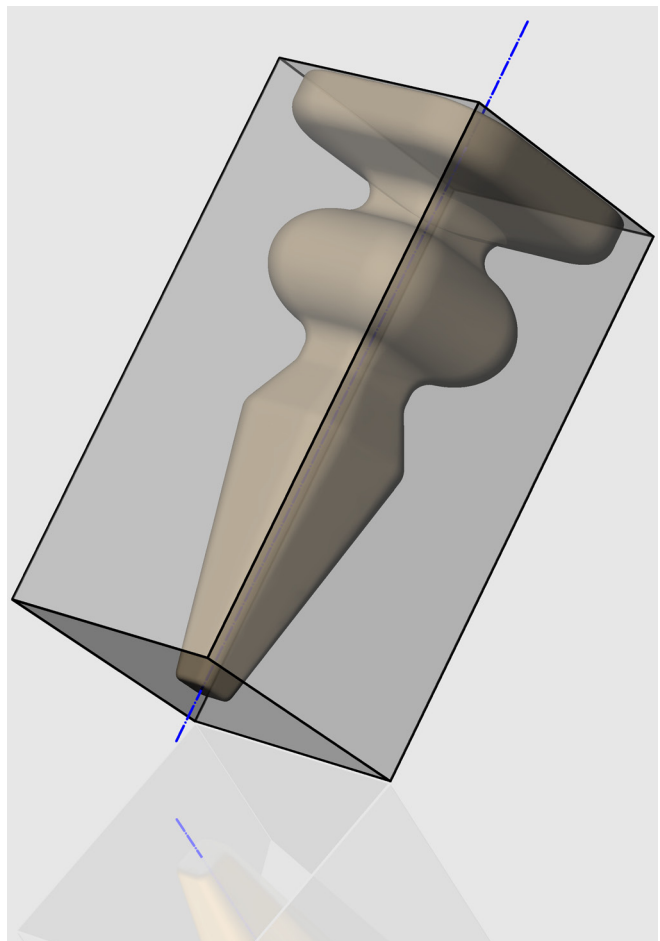
Come nel caso della piramide, ci rendiamo conto che anche questo modello presenta i tre centri allineati su una retta che non sarà l'asse di rivoluzione, ma l'intersezione dei diversi piani di simmetria che il modello possiede. Nel caso precedente la costruzione dei piani di simmetria era immediata: bastava appoggiarsi agli spigoli del poliedro e



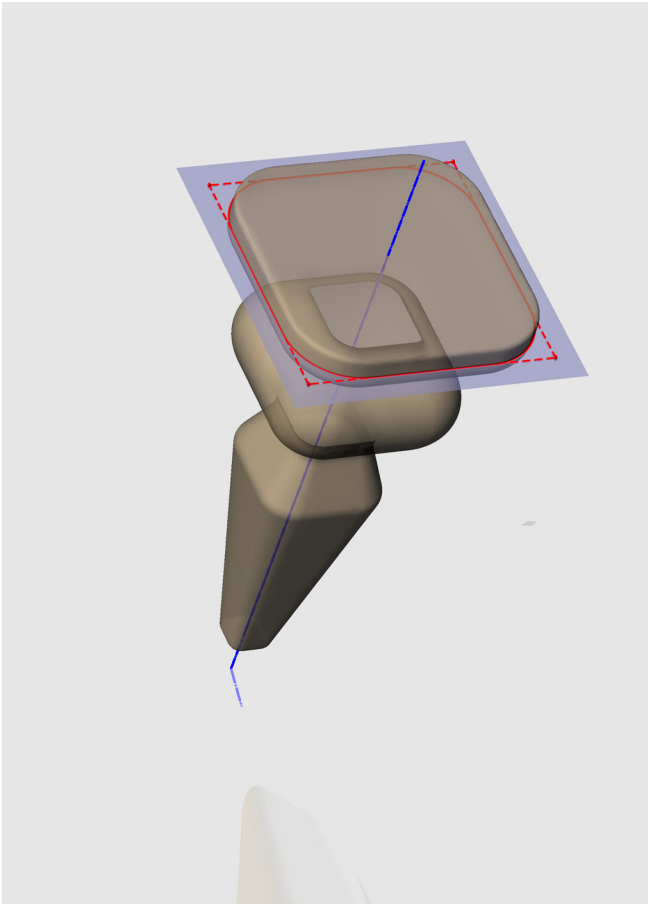
3.59\_ Costruzione dell'asse mediante il metodo della sfera, applicato alla gamba del tavolo.

all'asse  $z$  per ottenere tutti i piani di simmetria ammessi dalla primitiva.

In questo caso le azioni da eseguire mirano alla semplificazione del problema, riducendo il modello complesso ad un poliedro che lo rappresenti attraverso le sole geometrie strutturanti. L'idea è quella di contenere la mesh all'interno di una scatola che veste il dato acquisito ponendo l'attenzione dell'operatore alle sole dimensioni principali e all'orientamento. Per questo la scatola deve posizionarsi in modo tale che i piani di simmetria coincidano con quelli della mesh. In figura 3.60 vediamo il poliedro che sintetizza la forma esaminata: gli spigoli del box ausiliario, seguono

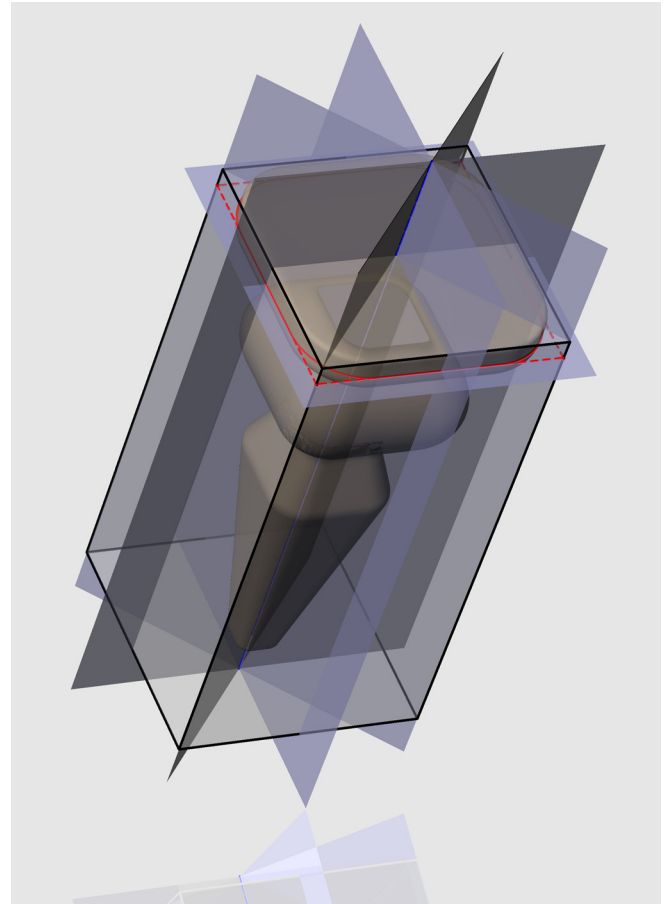


3.60\_ Rappresentazione del parallelepipedo ausiliario contenente il modello numerico dell'oggetto.



3.61\_ Introduzione di un piano perpendicolare all'asse dell'oggetto sezionante la rappresentazione poliedrica.

no l'orientamento degli spigoli della forma base, creando un parallelepipedo la cui faccia quadrata possiede dimensioni tali da contenere l'ingombro massimo della gamba. E' evidente che le dimensioni della faccia del solido grigio si basano sulle dimensioni della porzione di mesh maggiormente aggettante. Per rilevare queste, facciamo una sezione con un piano perpendicolare all'asse dell'oggetto, avendo cura di intercettare la superficie poliedrica nella zona ad oggetto massimo, si otterrà una polilinea chiusa rappresentante un poligono smussato (fig. 3.61). Ricostruendo i vertici del poligono, otterremo la posizione di segmenti paralleli all'asse dell'oggetto che costituiranno gli spigoli longitudinali del volume limite. Questi si in-



3.62\_ Rappresentazione del parallelepipedo limite per la corretta collocazione dei piani di simmetria.

seriranno tra le due facce minori che a loro volta saranno parallele al piano di sezione, perpendicolare all'asse blu del modello, e con centri posizionati nei punti in cui l'asse interseca la mesh della gamba. In figura 3.62 possiamo apprezzare il parallelepipedo limite, che rende facile la collocazione dei piani di simmetria che appartengono a lui ma anche alla mesh rappresentante l'oggetto analizzato. Infatti gli spigoli longitudinali e l'asse consentono di rappresentare due piani di simmetria posseduti dall'oggetto; altri due saranno individuati dal suo asse ed i punti medi degli spigoli minori. Ci rendiamo conto che l'operazione di Reverse Modeling può avvenire su un solo quarto di oggetto, successivamente copiato in maniera polare.

Note:

1. A. Branzi, a cura di «Capire il design», Firenze, Giunti Editore s.p.a., 2010.
2. A. Casale «Logica fuzzy e rappresentazione» in Disegnare n.16 a cura del Dipartimento di Rappresentazione e Rilievo, Roma, Gangemi Editore, 1998.
3. A. Payne, R. Issa, «The Grasshoper Primer, Second edition», Robert McNeel and Associates, 2009.
4. R. Migliari «Geometria descrittiva» Vol. II, Trofarello (TO), Città Studi edizioni, 2010.
5. G. M. Valenti «De.form.are», Roma, Designpress, 2010.





## 4 Fase sperimentale

### 4.1 La scelta della tecnica

Prima di cominciare a raccontare il percorso di rilievo effettuato sugli oggetti, è necessario chiarire come si è arrivati alla scelta della tecnica. La mia sperimentazione, è finalizzata alla conversione della rappresentazione numerica nella rappresentazione matematica e per questo si è deciso di partire da un ottimo dato di acquisizione. Ecco perchè, tra i diversi strumenti e tecniche di rilievo disponibili, la scelta è ricaduta sui moderni sistemi di rilievo ottico. Su di essi è disponibile una cospicua letteratura, in parte descritta nei capitoli precedenti,

utile a risolvere tutti i problemi pratici legati al rilievo del prodotto, adottando soluzioni ampiamente sperimentate. Il percorso di rilievo sarà quindi risolto nelle righe seguenti, attraverso l'elenco delle azioni svolte ed i materiali utilizzati, avendo cura di porre l'accento su quelle fasi che discostano dal percorso usuale, per ottenere il risultato più adeguato ai fini della ricerca.

Il rilievo dell'oggetto di design si differenzia dal rilievo architettonico, per le dimensioni degli oggetti presi in esame, e quindi per l'accuratezza richiesta allo strumento di rilievo. Un'architettura comporta l'utilizzo di macchinari di rilievo ottico diversi da quelli che si adopererebbero per il rilievo di una poltrona, di un meccanismo, di una scultura o di un gioiello e per ognuno di questi temi è necessario scegliere lo strumento più adatto in grado di porre in gioco tolleranze accettabili (fig. 4.01). Se nel caso del rilievo di architettura, la tolleranza pari al centimetro può essere contemplata, per la rappresentazione numerica di oggetti più piccoli, caratterizzati da una ricchezza di particolari, è richiesto l'utilizzo di strumenti in grado di apprezzare anche il micron<sup>1</sup>. Questa osservazione porta immediatamente a scartare i sensori a tempo di volo (TOF), che calcolano la misura della distanza in funzione del tempo che intercorre dall'invio dell'impulso luminoso, sino al suo ritorno allo strumento di misura e per loro natura non adatti a misure di estrema precisione. Per una maggiore aderenza alla qualità del dato e alle dimensioni contemplate, sarà possibile rivolgersi ad altre due tecniche, tra le più avanzate in questo momento: la fotogrammetria digitale e i sistemi attivi a triangolazione. Mentre per il primo si sta ancora sperimentando l'efficienza del metodo, il secondo è



4.01\_ Ogni oggetto rappresentato in figura, richiede un adeguato strumento per il rilievo della sua forma.

sicuramente maturo, in grado di fornire un dato affidabile, esente da problematiche che potrebbero dirottare o rallentare la ricerca. All'interno di questa categoria si è scelto di utilizzare lo scanner della Konica Minolta serie Range 7, all'avanguardia tra gli strumenti a triangolazione ottica<sup>2</sup>. L'utilizzo dello scanner appena menzionato è avvenuto successivamente ad alcune prove effettuate con altri scanner sempre della stessa azienda, ma della serie Vivid: Vi900 e Vi9i, quest'ultimo utilizzato solo per alcuni test di confronto. Per documentare la bontà dei dati acquisiti, in figura sono riportate le schede tecniche dei tre strumenti di misurazione (fig. 4.02, fig. 4.03, fig. 4.04).

### Specifications of VI-9i

<b>Type</b>	Non-contact 3D digitizer
<b>Measuring Method</b>	Triangulation light block method
<b>Light-Receiving Lenses (Interchangeable)</b>	<b>TELE</b> Focal distance f=25 mm <b>MIDDLE</b> Focal distance f=14 mm <b>WIDE</b> Focal distance f=8 mm
<b>Scan Range</b>	0.6 to 1.0 m (In Standard mode) 0.5 to 2.5 m (In Extended mode)
<b>Laser Scan Method</b>	Galvanometer-driven rotating mirror
<b>Laser Class</b>	Class 2 (IEC60825-1), Class 1 (FDA)
<b>X Direction Input Range(In Extended mode)</b>	<b>TELE</b> 93 to 463 mm <b>MIDDLE</b> 165 to 823 mm <b>WIDE</b> 299 to 1495 mm
<b>Y Direction Input Range(In Extended mode)</b>	<b>TELE</b> 69 to 347 mm <b>MIDDLE</b> 124 to 618 mm <b>WIDE</b> 224 to 1121 mm
<b>Z Direction Input Range(In Extended mode)</b>	<b>TELE</b> 26 to 680 mm <b>MIDDLE</b> 42 to 1100 mm <b>WIDE</b> 66 to 1750 mm
<b>Accuracy (X, Y, Z)</b>	±0.05 mm (Using TELE lens at distance of 0.6 m, with Field Calibration Software)
<b>Precision (Z, σ)</b>	0.008 mm (Using TELE lens at distance of 0.6 m, Konica Minolta's standard)
<b>Input Time (per scan)</b>	2.5 sec
<b>Transfer Time to Host Computer</b>	Approx. 1.5 sec
<b>Ambient Lighting Condition</b>	Office environment, 500 lx or less
<b>Imaging Element</b>	3D data: 1/3-inch frame transfer CCD (340,000 pixels) Color data: Common with 3D data (color separation by rotary filter)
<b>Number of Output Pixels</b>	3D data: 640 x 480 (640 x 460 in the HIGH QUALITY mode) Color data: 640 x 480
<b>Output Format</b>	3D data: Konica Minolta format, & (STL, DXF, OBJ, ASCII points, VRML) (Converted to 3D data by the Polygon Editing Software/ standard accessory) Color data: RGB 24-bit raster scan data
<b>Data File Size</b>	Total 3D and color data capacity: 3.6MB per data
<b>Viewfinder</b>	5.7-inch LCD (320 x 240 pixels)*1
<b>Output Interface</b>	SCSI II (DMA synchronous transfer)
<b>Power</b>	Commercial AC power, 100 to 240 V (50/60Hz), rated current 0.6A (when 100V ac is input)
<b>Dimensions</b>	221 (W) x 412 (H) x 282 (D) mm
<b>Weight</b>	Approx. 15 kg (with lens attached)
<b>Operating temperature/humidity range*2</b>	10°C to 40°C, relative humidity 65% or less with no cor
<b>Storage temperature/humidity range</b>	0°C to 40°C, relative humidity 85% or less (at 35°C) with
<b>Regulatory approvals</b>	UL 61010A-1, CSA-C22.2 No.1010-1, etc.

4.02\_ Scheda tecnica dello scanner serie Vi9i, Azienda Konica Minolta.

### Specifications

Type	Non-contact 3D digitizer VI-900
Measuring method	Triangulation light block method
AF	Image surface AF (contrast method), active AF
Light-Receiving Lens (Exchangeable)	TELE: Focal distance f=25mm MIDDLE: Focal distance f=14mm WIDE: Focal distance f=8mm
Image Input Range	0.6 to 2.5m (2m for WIDE)
Measurement Input Range	0.6 to 1.2m
Laser Output	"Eye safe", Class 1 (FDA), Class 2 (IEC), Maximum 30mW 690nm
Laser Scan Method	Galvano mirror
Input Time	0.3 sec (FAST mode), 2.5 sec (FINE mode), 0.5 sec (COLOR)
Transfer Time to Host Computer	Approx. 1 sec (FAST mode), 1.5 sec (FINE mode)
Ambient Lighting Condition	Office Environment, 500 lx or less
Imaging Element	3-D data: 1/3-inch frame transfer CCD (340,000 pixels) Color data: 3-D data is shared (color separation by rotary filter).
Number of Output Pixels	3-D data : 640 x 480 (for FINE mode), 320 x 240 (for FAST mode) Color data : 640 x 480
Output Format	3-D data : Minolta format, & (STL, DXF, OBJ, ASCII points, VRML) (Converted to 3-D data by the Polygon Editing Software/ standard accessory) Color data: RGB 24-bit raster scan data
Recording Medium	Compact Flash memory card (128MB)
Data File Size	Total 3-D and color data capacity: 1.6MB per data (for FAST mode), 3.6MB per data (for FINE mode)
Viewfinder	5.7-inch LCD (320 x 240 pixels)
Output Interface	SCSI II (DMA synchronous transfer)
Power	Commercial AC power 100 to 240V (50 to 60Hz), rated current 0.6A (when 100V ac is input)
Dimensions (WxHxD)	213 x 413 x 271 mm (8 3/8 x 16 1/4 x 10-11/16 in.)
Weight	Approx. 11kg
Operating environment	temperature: 10 to 40°C (50 to 104°F) ; relative humidity: 65% or less (at 35°C) ; Pollution: Class 1
Storage temperature range	-10 to 40°C (14 to 104°F)



4.03\_ Scheda tecnica dello scanner serie Vi900, Azienda Konica Minolta.

### Specifications of KONICA MINOLTA RANGE7

<b>Measuring method</b>	Triangulation by light sectioning method				
<b>Light source</b>	Semiconductor laser, Wavelength: 660 nm				
<b>Laser class</b>	Class 2 (IEC 60825-1 Edition 2)				
<b>Number of pixels taken</b>	1.31 megapixels (1280 x 1024)				
<b>Measurement distance</b>	450 to 800 mm				
<b>Receiving lens (Interchangeable)</b>	TELE, WIDE				
<b>Measurement range (mm)</b>	<b>Distance</b>	TELE	TELE	WIDE	WIDE
	<b>Direction</b>	450 mm	800 mm	450 mm	800 mm
	<b>X x Y</b>	79x99	141x176	150x188	267x334
	<b>Z</b>	54	97	109	194
<b>XY direction measurement interval</b>		0.08	0.14	0.16	0.28
<b>Accuracy (Distance between balls)<sup>*1</sup></b>		±40µm			
<b>Precision (Z, σ)<sup>*2</sup></b>		4µm			
<b>Auto-focus</b>	Provided				
<b>Auto-exposure</b>	Provided				
<b>Scan time</b>	Approx. 2 sec. or more (1 scan)				
<b>Preview function</b>	Approx. 0.4 sec./scan				
<b>Scanning ambient lighting condition</b>	500 lx or less				
<b>Output interface</b>	USB 2.0 High Speed				
<b>Power</b>	Included AC Adapter Input voltage: 100 to 240 VAC (50/60 Hz), Rating: 1.4 A (at 100 VAC Input)				
<b>Dimensions</b>	295 (W) x 190 (H) x 200 (D) mm (Excluding grips and lens)				
<b>Weight</b>	Approx. 6.7 kg				
<b>Operating temperature/humidity range</b>	10 to 40°C; Relative humidity 65% or less (no condensation)				
<b>Storage temperature/humidity range</b>	-10 to 50°C; Relative humidity 85% or less (at 35°C, no condensation)				

#### 4.04\_ Scheda tecnica dello scanner serie Range 7, Azienda Konica Minolta.

Una breve riflessione va fatta sulle superfici fisiche caratterizzanti i prodotti di design, la cui lavorazione porta sempre ad avere un coefficiente di rugosità estremamente basso, ottenendo spesso delle superfici specchianti, causa del cosiddetto “rumore” del dato numerico acquisito. Le superfici specchianti, al contrario delle superfici opache, sono estremamente sensibili alla luce presente nell’ambiente, di conseguenza la riflessione della luce strutturata proveniente dallo strumento di misurazione, sarà tale da produrre un dato di rilievo non coerente con le caratteristiche della superficie che si sta rilevando. I punti che dovrebbero descrivere la superficie risultano mossi rispetto

alla quota che ci aspettiamo, proponendo una mesh ricca di punte abbastanza evidenti, rappresentando in maniera errata l’oggetto. Lo scanner Range 7 della Konica Minolta (fig. 4.05), ha quasi totalmente risolto questo problema attraverso una modalità di lavoro che permette di acquisire dati di oggetti molto riflettenti. In questo modo è stato possibile evitare l’acquisizione in ambienti ad illuminazione controllata, comportando uno snellimento organizzativo e rapidità di esecuzione.

Sciolto il nodo della certezza del dato, si è passati alla scelta dei prodotti da rilevare. A questo punto, diventa importante ricordare nuovamente quali sono le finalità della ricerca, ampiamente dibattute nella prima parte di questo scritto: l’idea è quella di ridare al prototipo il suo valore progettuale, elevandolo al pari degli altri modelli che, una volta innescato il processo progettuale, dialogano con l’idea del progettista. E’ oramai chiaro che il modello fisico non è in grado di dialogare rapidamente con il modello mentale, rapporto reso farraginoso e spesso interrotto dalle problematiche esistenti, quindi rendere attive le modifiche fatte artigianalmente sul prototipo. Ricordiamo che il modello fisico è frutto di stampa 3D, Rapid Prototyping o altre tecniche di modellazione fisica; tutte queste possiedo-



4.05\_ Scanner laser 3D, serie Range 7 della Konica Minolta, strumento a triangolazione ottica.



no a monte un modello matematico progettato e curato in funzione del tipo di scala ed elaborazione verso cui si sta puntando. Il prototipo viene testato, provato, toccato ed in fine modificato. Il modello modificato viene acquisito attraverso strumenti di rilevamento che producono sempre un dato discreto: una nuvola di punti il cui orientamento rispetto allo spazio digitale, si discosta dal modello matematico di progetto. Ma ancor di più, il dato rilevato è di un modello la cui forma, presenta delle differenze rispetto al disegno CAD di partenza. Infatti, tra il modello matematico ed il modello numerico acquisito, è intervenuto l'uomo, il quale ha apportato sul prototipo delle modifiche funzionali al perseguimento della sua idea.

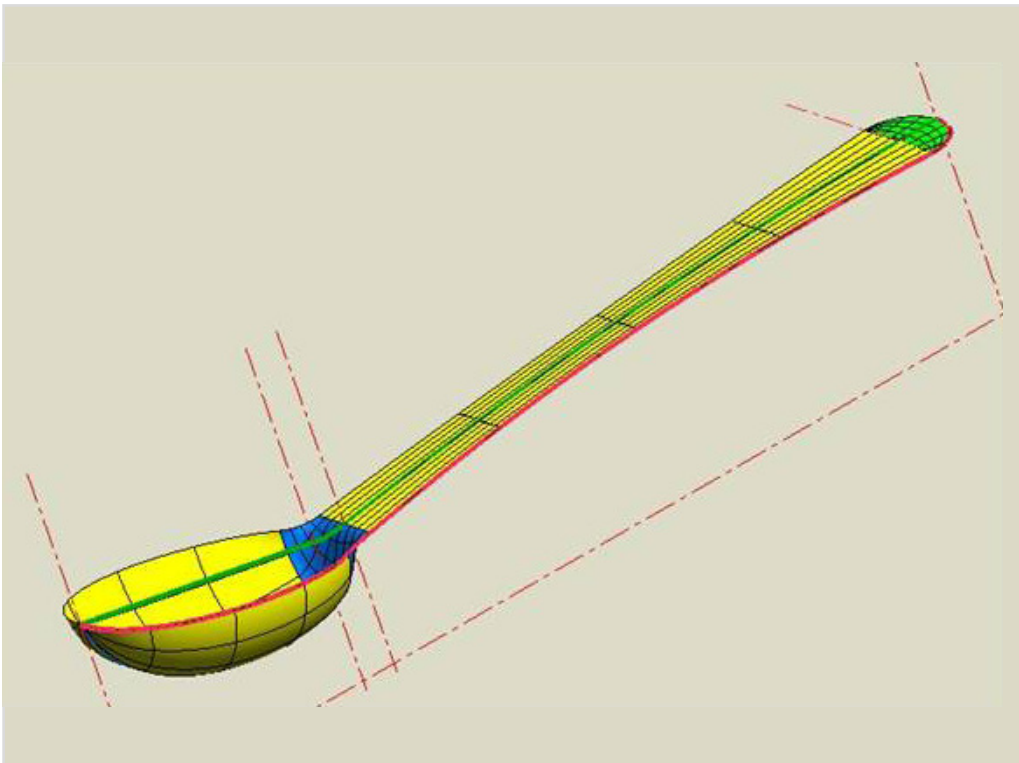
Cosa fare allora? Effettuare il Reverse Modeling sull'intera rappresentazione numerica, oppure rappresentare matematicamente solo l'area modificata? Nel primo caso nasce

il problema delle differenze esistenti tra i due modelli; differenze riguardanti non solo la variazione di misura, ma anche la variazione della struttura proposta da un modello mesh, rispetto a quella proposta da un modello CAD.

È facile rendersi conto che la complessità del modello matematico progettato, è il risultato di azioni programmate che mano a mano formano il modello matematico (fig. 4.06); il risultato dell'acquisizione è un prodotto del tutto diverso che tende a replicare la forma e non la struttura del modello acquisito. In qualche modo si appiattisce la storia del modello, cancellando le tracce del percorso di modellazione effettuato per il progetto, lasciando spazio ad una rappresentazione "muta". Più semplicemente siamo di fronte a due rappresentazioni digitali, intrinsecamente differenti, quindi difficili da confrontare.

L'altra operazione suggerita, è quella di aggiornare il modello matematico progettato inserendo solamente le modifi-

che effettuate sul modello fisico. Il punto di incontro tra il totale e la parte sarà rappresentato da elementi comunemente presenti: le geometrie strutturanti, di cui a questo punto della trattazione, conosciamo il significato.



4.06\_ Modello matematico complesso, per il quale l'osservazione delle superfici racconta la storia della costruzione del modello, evidenziando l'importanza delle geometrie strutturanti (Ing. R. Ciarloni).

#### 4.2 Presentazione dei casi studio: SIT Siemens S62

L'atto primo di tutte le operazioni rimane il rilievo da effettuare sul prototipo. I casi studio presentati di seguito non saranno scansioni di prototipi del progetto, ma bensì di oggetti esistenti. La scelta di rilevare un oggetto esistente, apparentemente può risultare in dissonanza con la tesi sino ad ora portata avanti, in realtà rappresenta la possibilità di testare più casi in maniera rapida, saltando il processo progettuale, per andare ad agire direttamente sul processo di Reverse Modeling. Attraverso il rilievo, si ottiene il dato numerico da cui estrapolare le geometrie strutturanti, utili per la sovrapposizione ed il confronto con la rappresentazione matematica dell'oggetto e, nel caso specifico, alla sua conversione in rappresentazione continua. Il metodo abbraccia anche processi differenti da quelli progettuali, dando un contributo alle operazioni di restyling e redesign dei prodotti esistenti.

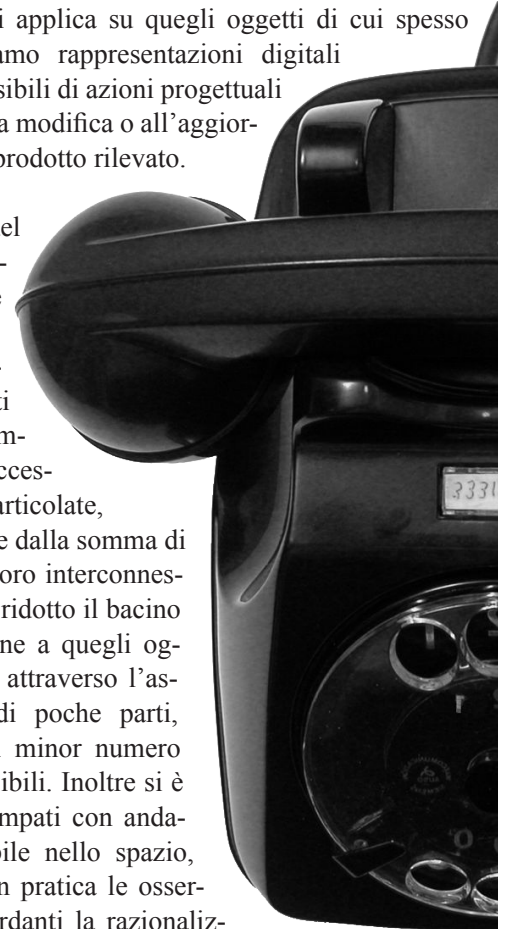


4.07\_ Apparecchio telefonico modello S62, designer Lino Saltini.

Il restyling si applica su quegli oggetti di cui spesso non possediamo rappresentazioni digitali continue, passibili di azioni progettuali finalizzate alla modifica o all'aggiornamento del prodotto rilevato.

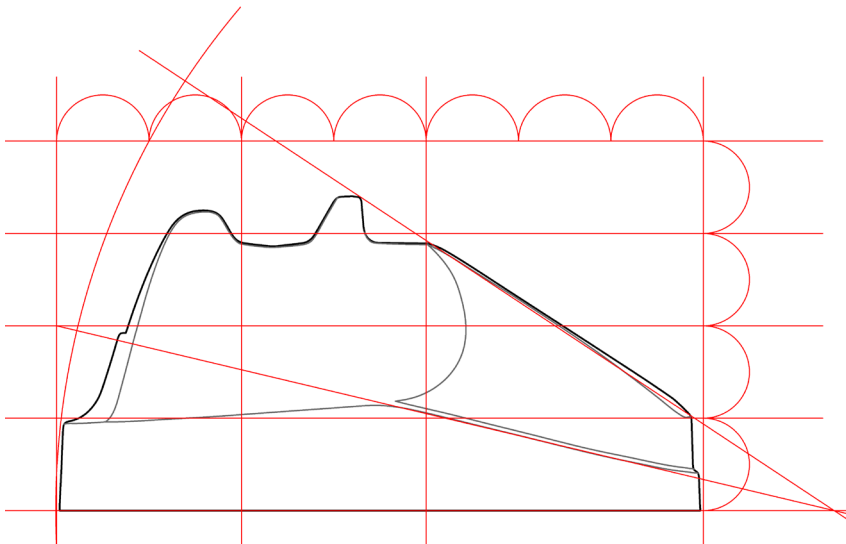
La ricerca del prodotto emblematico, è stata effettuata tra gli oggetti costituiti da forme complesse non eccessivamente articolate, cioè composte dalla somma di elementi tra loro interconnessi. Questo ha ridotto il bacino di osservazione a quegli oggetti prodotti attraverso l'assemblaggio di poche parti, quindi con il minor numero di giunti possibili. Inoltre si è puntato a stampati con andamento variabile nello spazio, per mettere in pratica le osservazioni riguardanti la razionalizzazione delle superfici reali, attraverso gli strumenti messi a disposizione dai software.

La scelta è ricaduta sul vecchio apparecchio telefonico S62, del designer Lino Saltini (fig.4.07); quest'oggetto inizialmente fu prodotto dalla SIT Siemens nel 1962 e poi dall'Italtel. Il modello base della serie da tavolo è costituito da una monoscocca in plastica stampata che racchiude la suoneria e i meccanismi del combinatore. Nella parte anteriore della scocca è presente un foro in cui alloggia il disco combinatore in plastica trasparente a dieci cifre. La cornetta, sempre in plastica, poggia direttamente in due vani ricavati nella parte superiore della scocca. La cornetta racchiude, in un unico elemento stampato, il trasmettitore (microfono a carbone) e il ricevitore (a bobina e calamita), uniti da una parte centrale che ha la funzione di impugnatura.

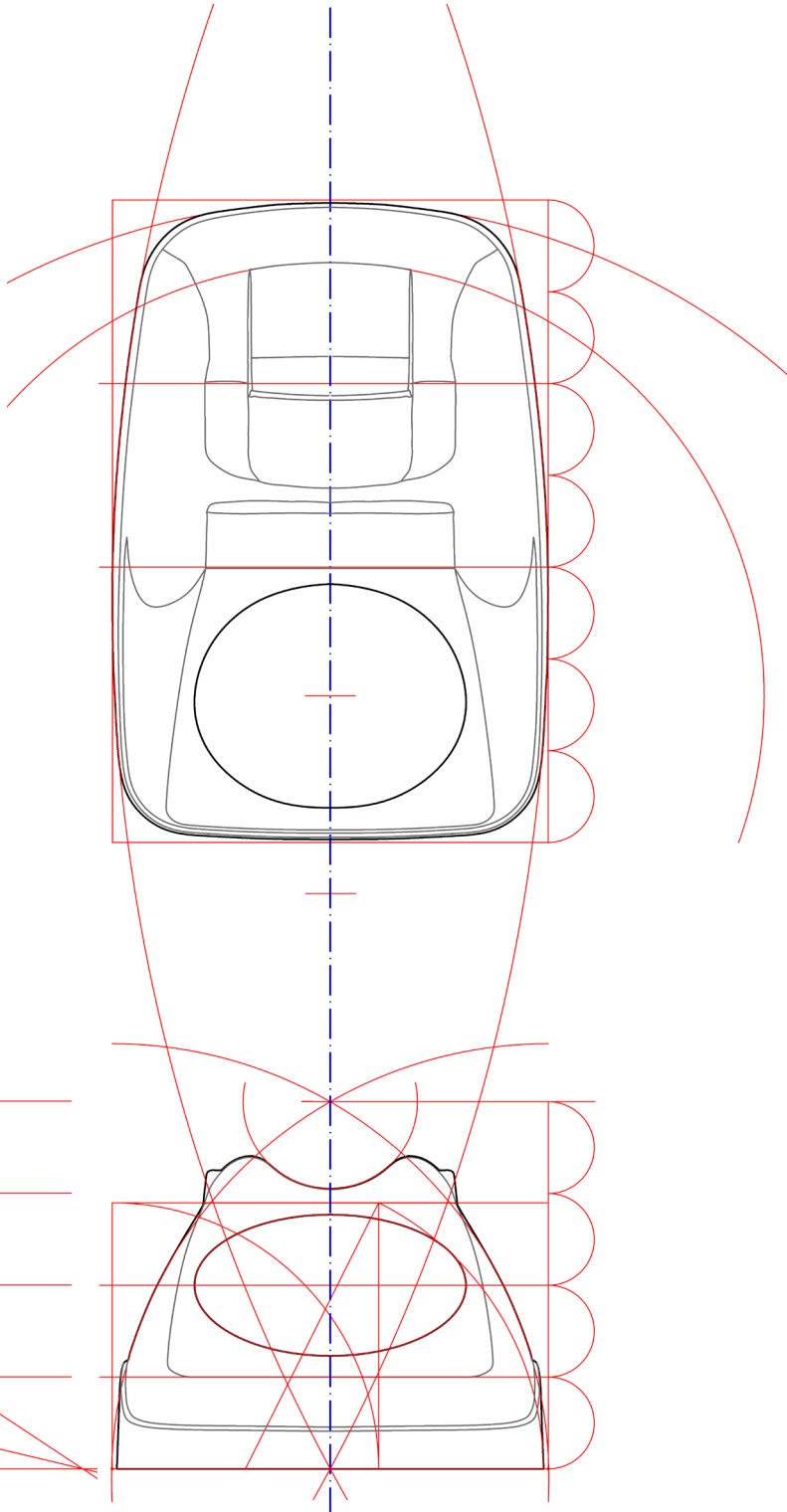


**4.3 Primo caso studio: oggetto con piano di simmetria**

Partiamo dalla scocca principale del telefono S62 palesemente provvista di un piano di simmetria. Guardando gli elaborati riportati in figura 4.08, in cui sono illustrati una pianta e due prospetti della sola scocca dell'apparecchio, è possibile notare l'assenza di chiare primitive geometriche solide che disegnano le superfici. L'ideazione del progetto va ricondotta alla fine degli anni '50, epoca in cui ancora non vi era il disegno assistito e il controllo della forma veniva affidato alla geometria e ad azioni di carattere artigianale sul prototipo fisico. In alzato possiamo notare come archi di circonferenza e raccordi tra questi, definiscano il contorno apparente, determinando anche l'altezza dell'apparecchio. Gli archi trovati, giustificano ulteriormente la loro presenza avendo i centri posti agli spigoli bassi del rettangolo che circoscrive parte dell'ingombro del prospetto frontale. L'intersezione tra gli archi principali permette di individuare l'asse di simmetria sul prospetto. Sempre analizzando il prospetto frontale, notiamo che il punto di intersezione superiore, è anche centro di una circonferenza in grado di disegnare il supporto della



4.08\_ Analisi geometrica della scocca del telefono S62, prospetto laterale.



4.09\_ Analisi geometrica della scocca del telefono S62, pianta e prospetto frontale.

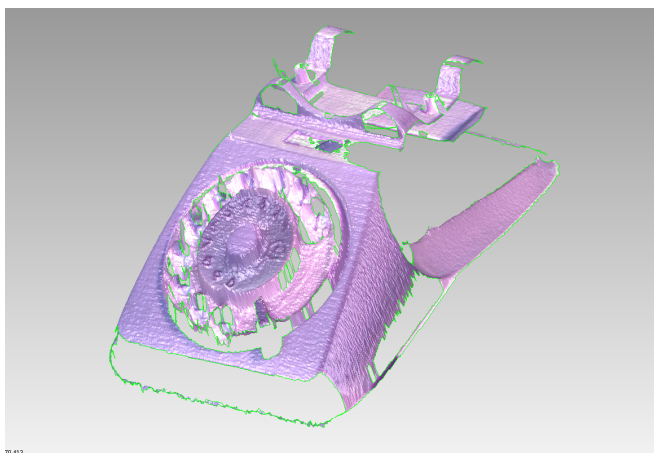
cornetta. Il prospetto frontale, inoltre, appoggia le curve di stile a quattro moduli da 30 mm circa. Questi scandiscono la misura partendo dall'intersezione superiore degli archi sino ad arrivare alla linea di terra, individuando l'altezza del basamento, la posizione del selezionatore numerico e la quota d'appoggio della cornetta. Lo stesso modulo, in pianta, definisce la pertinenza del selezionatore nella parte anteriore, quella della cornetta nella parte centrale e della zona posteriore. Anche in questo elaborato, archi di circonferenza delimitano le linee longitudinali della base d'appoggio orizzontale, intersecandosi in due punti per i quali passerà l'asse di simmetria. L'assenza di chiare primitive geometriche nelle tre viste, evidenzia un atteggiamento diverso da quello utilizzato, ad esempio, per la famosa caffettiera della Bialetti (fig. 3.46), nella quale la presenza di primitive geometriche tridimensionali, segna fortemente il disegno delle proiezioni ortogonali. L'analisi geometrica della scocca dell'S62, suggerisce un atteggiamento progettuale da parte del designer, meno costruttivo e più plastico, per il quale ad un iniziale proporzionamento geometrico, ha seguito un grande lavoro artigianale di ar-

monizzazione sul prototipo. L'oggetto non mostra spigoli pronunciati, quindi le linee che segnano il contorno apparente, non indicano luoghi di continuità di posizione tra le superfici che compongono la forma, ma picchi di curvatura. Queste linee indicano come parzializzare la superficie nella successiva fase di rappresentazione matematica.

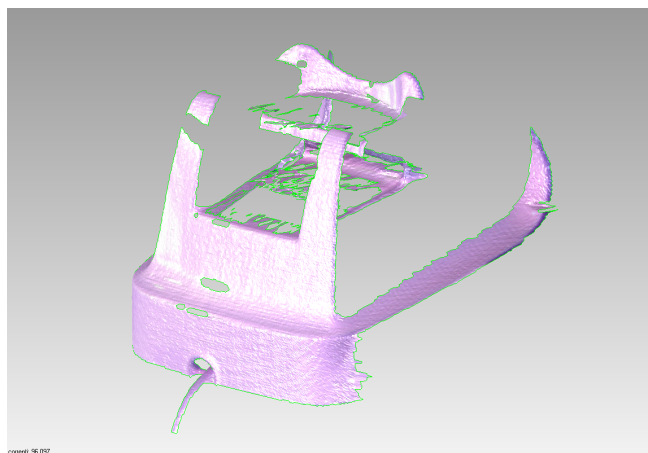
Dopo lo studio delle geometrie, si è passati al rilievo con gli strumenti sopra descritti. Un primo tentativo di acquisizione è stato effettuato a Roma, al Museo Technotown di Villa Torlonia, che per scopi didattici, possiede un Vi900 della Konica Minolta. Non potendolo rilevare interamente, l'oggetto è stato posizionato su una piattaforma girevole distante circa 800 mm dal sensore 3D. La descrizione totale è avvenuta attraverso diverse range map utili a coprire l'intera superficie, evitando il più possibile lacune del dato. Lo scanner adoperato in questa prima operazione di rilievo è risultato adeguato, ma l'eccessiva sensibilità alla finitura superficiale della scocca, lavorata a lucido, ha imposto l'utilizzo di uno spray opacizzante. In figura 4.09 viene mostrato come lo spray risolve il problema delle superfici estremamente riflettenti.



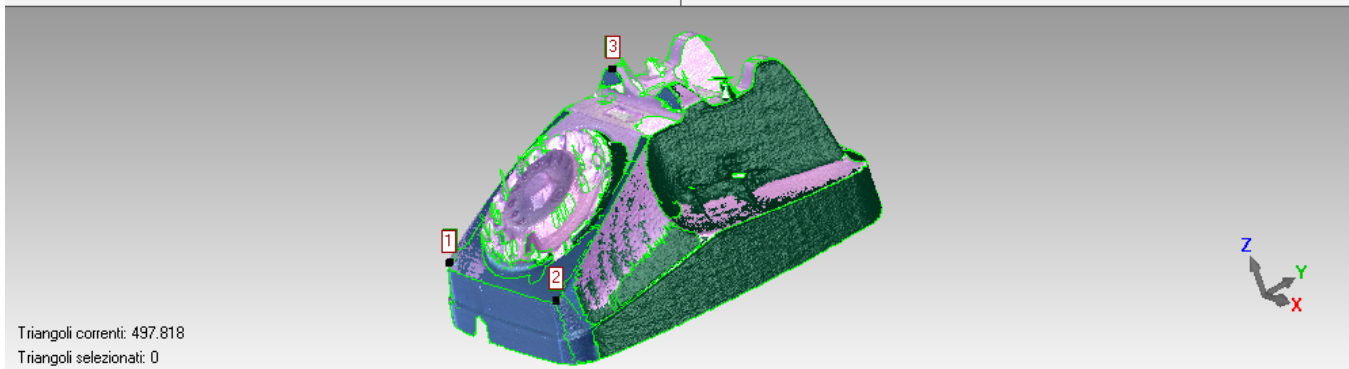
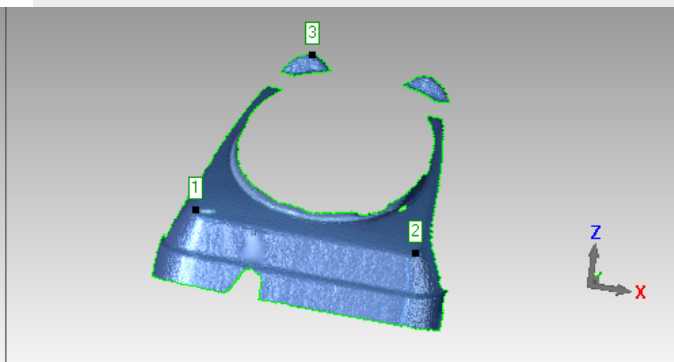
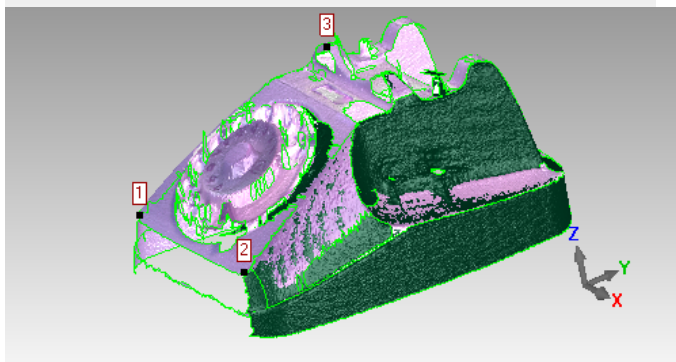
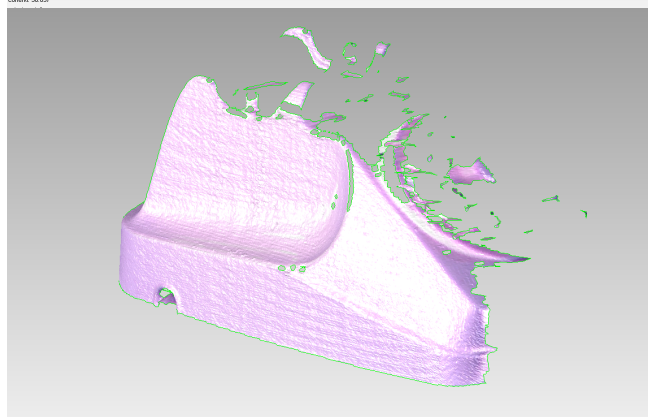
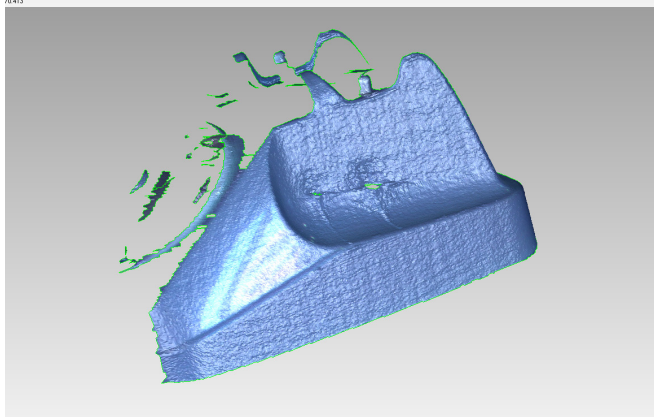
4.09\_ (A sinistra) Foto della scocca dell'S62 prima dell'utilizzo dello spray opacizzante. (A destra) Foto dell'oggetto dopo il trattamento effettuato con lo spray opacizzante. Vediamo come il trattamento rende le superfici meno sensibili all'illuminazione contestuale.



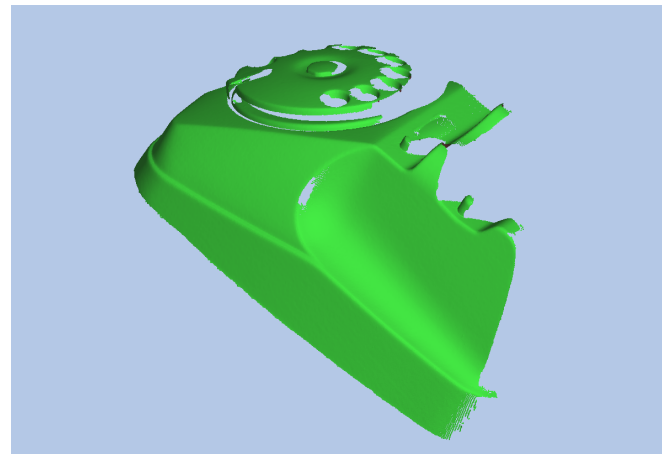
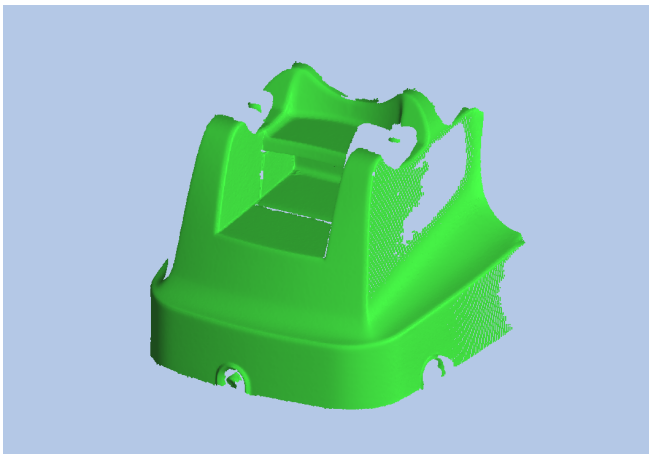
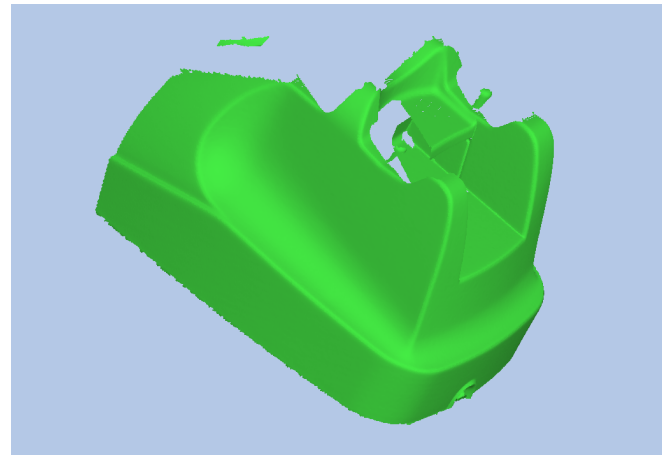
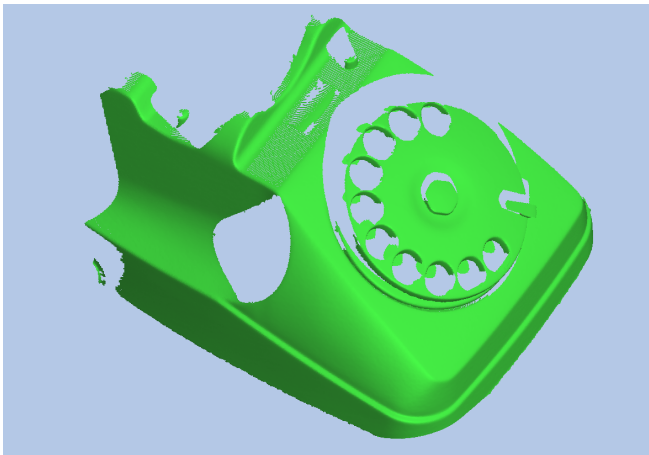
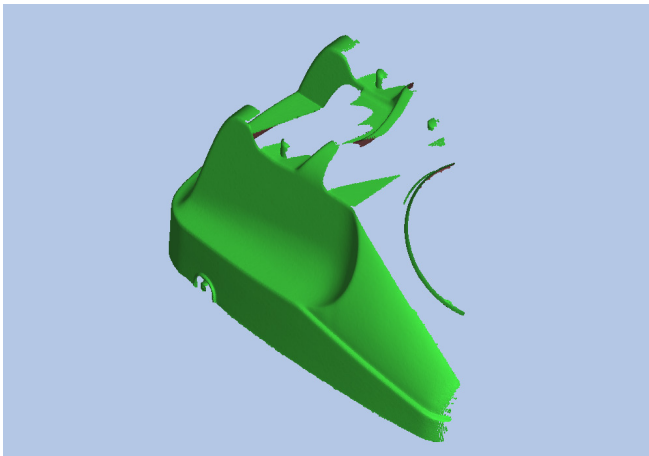
76.413



correnti: 96,057



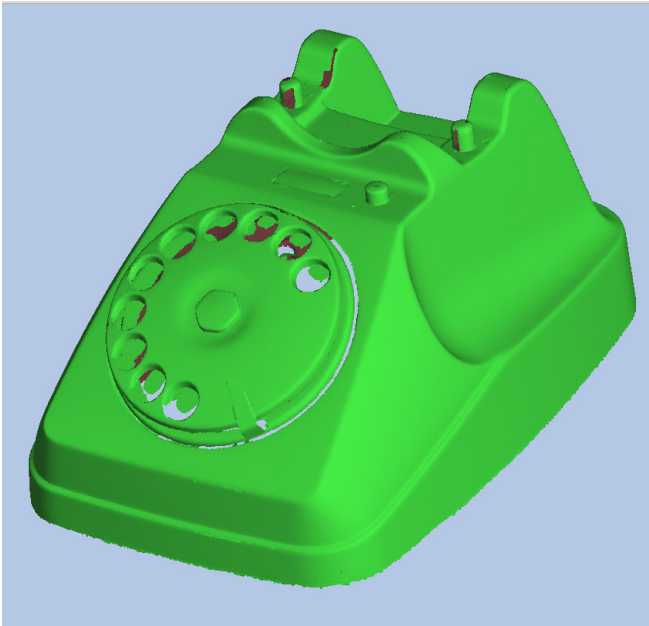
Triangoli correnti: 497.818  
Triangoli selezionati: 0



4.10\_ (A sinistra) Range map collezionate dopo il primo tentativo di acquisizione dell' oggetto con il Vi900 della Konica Minolta.

4.11\_ (Sopra) Range map acquisite con il Range 7. Dato utilizzato per le successive operazioni di filtraggio, registrazione ed editing.

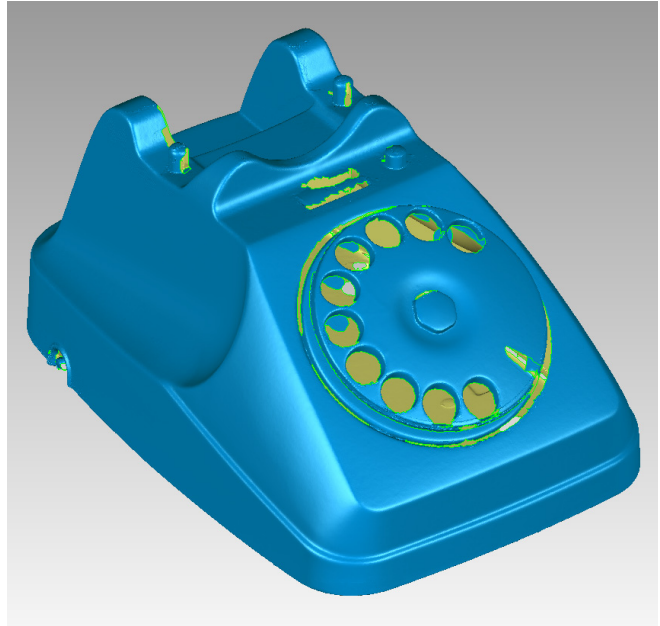
4.12\_ Rappresentazione della nuvola di punti dopo la registrazione delle range map effettuate con lo scanner Range 7.



La semplice osservazione del dato ottenuto con la prima prova romana illustrata nella pagina precedente (fig. 4.10), spiega il perché della trasferta milanese nella sede italiana della Konica Minolta dove, attraverso il rapido sistema di ripresa e registrazione dello scanner Range 7, è stato possibile ottenere un ottimo dato numerico. Il minor tempo di acquisizione e la snellezza della strumentazione ha permesso l'acquisizione di un maggior numero di range map (fig. 4.11), selezionando le migliori per la successiva fase di registrazione (fig. 4.12). Ovviamente le operazioni di editing sono state effettuate sul dato dello scanner Range7.

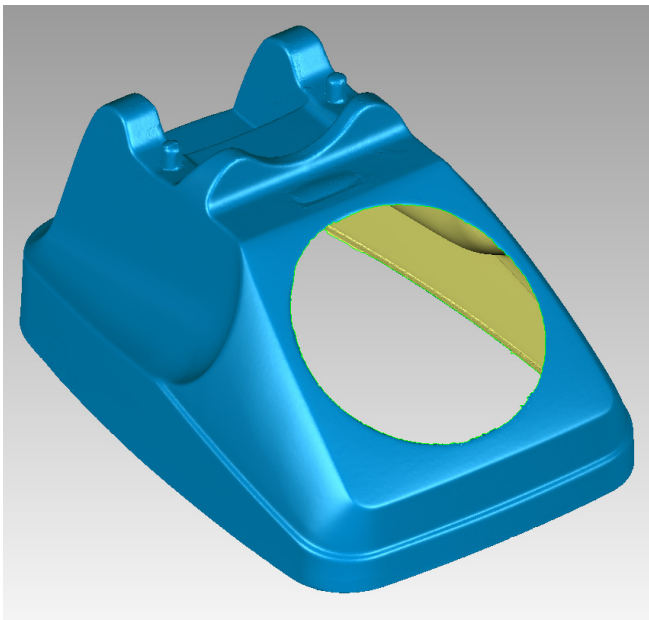
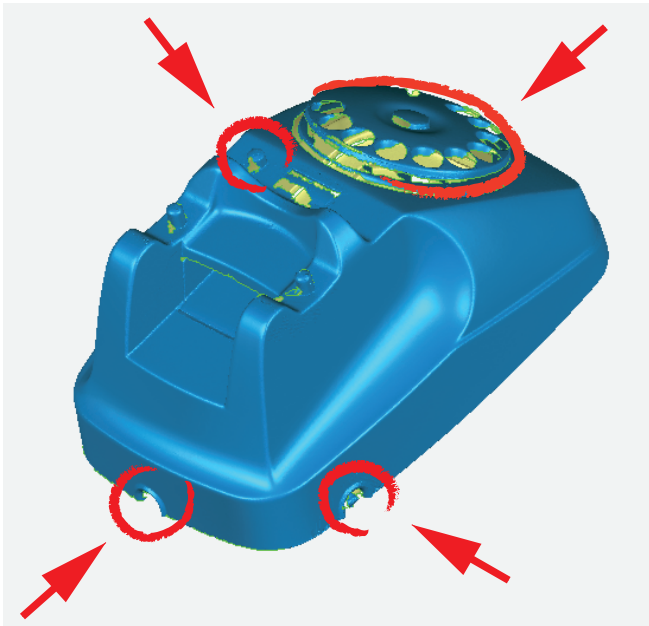
Fin qui il percorso è quello classico risultato dalla normale metodologia di rilievo effettuata con sensori attivi 3D. Il dato viene filtrato estrapolando la parte che descrive geometrie utili alla rappresentazione della forma, da quello frutto di rumore o di fattori esterni che possono inficiare le future azioni. Il dato numerico viene poi interpolato grazie ad algoritmi di tassellazione che legano i punti con segmenti, per costruire una rete di facce triangolari che costituiscono la mesh. Le diverse range map sottoposte

4.13\_ Rappresentazione numerica del modello della scocca, risultato delle operazioni di meshing.



a meshing, devono essere successivamente allineate l'un l'altra, per poi fondersi in un'unica mesh che rappresenta l'intero oggetto. Quest'ultima fase è abbastanza delicata, in quanto è necessario evitare errori topologici. Il software da me utilizzato per seguire il processo che si sta descrivendo è Geomagic Studio, della statunitense Geomagic: software all'avanguardia per la gestione del dato numerico. La scelta è ricaduta su questa applicazione, perché possiede i requisiti descritti nel capitolo 2 ed è in grado di gestire diversi formati di scambio come stl, vrmf e obj per quanto riguarda il dato numerico, iges e step per lo scambio di geometrie rappresentate matematicamente. Condizioni importanti per garantire il dialogo con una vasta gamma di software tra cui Rhinoceros, ampiamente utilizzato in questa ricerca nella fase di Reverse Modeling. Inoltre, grazie agli stretti rapporti commerciali tra Konica Minolta e Geomagic, il software è in grado di leggere direttamente i formati "proprietary" degli scanner 3D utilizzati. Con Geomagic Studio sono stati corretti gli errori topologici e ricostruite le lacune. L'ottimizzazione finale per mezzo di operazioni di decimazione delle mesh nelle

4.14\_ Individuazione delle parti non simmetriche esistenti tra l'area di sinistra e l'area di destra della scocca del telefono.



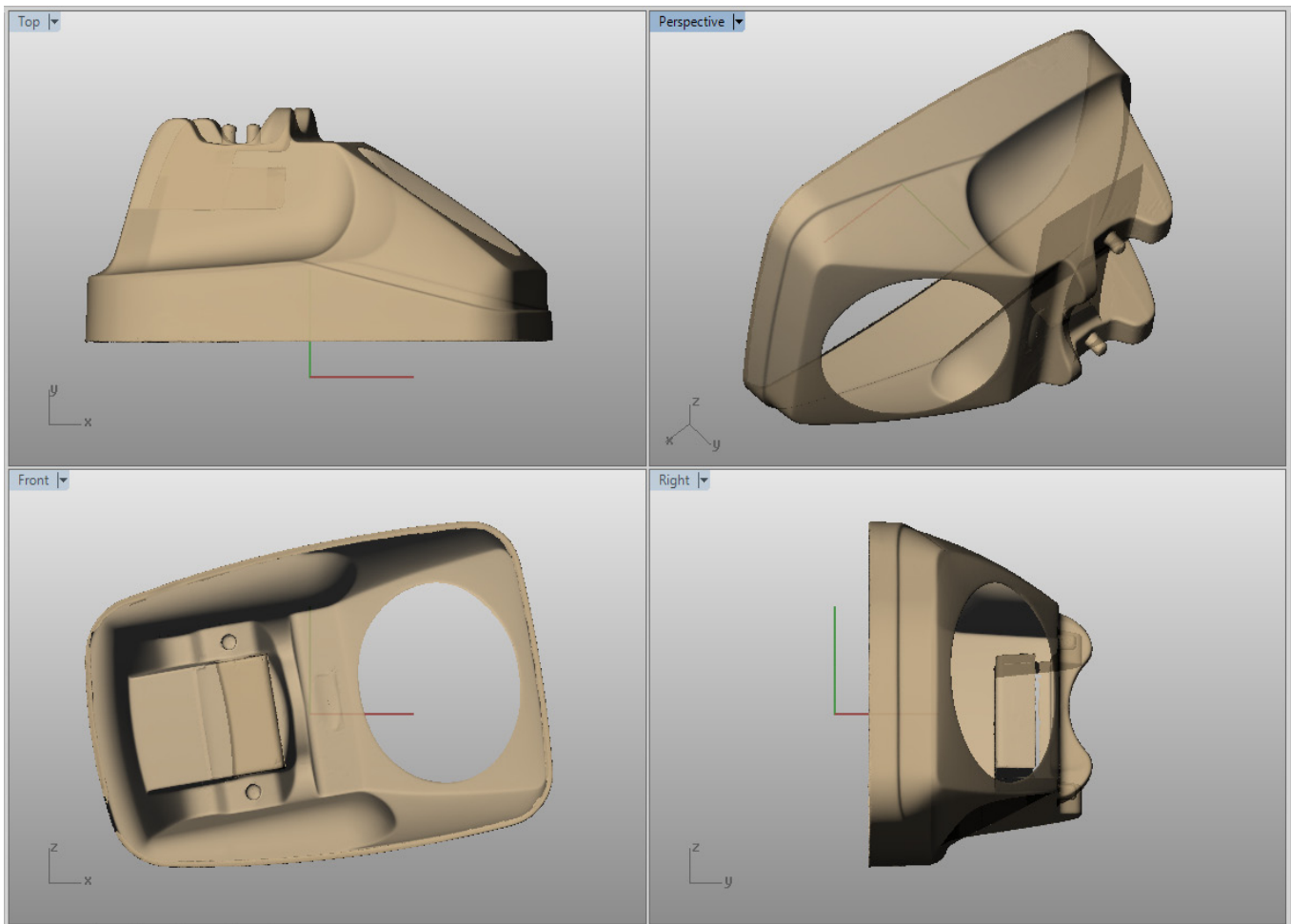
4.15\_ Modello numerico bilanciato a seguito di ulteriori operazioni di editing finalizzate alle eliminazioni delle parti non simmetriche.

zone piane e suddivisione nelle parti di maggiore curvatura, ha portato ad una rappresentazione numerica adeguata della scocca (fig. 4.13).

A questo punto è chiaro che tra i primi obiettivi della ricerca vi è l'individuazione delle geometrie strutturanti, operazione che si può effettuare solo su oggetti bilanciati. Quindi è necessario attuare un'ulteriore fase di editing che porti alla costruzione di un modello verosimile alla rappresentazione numerica originale, ma equilibrato nel suo aspetto generale. Nell'osservare attentamente il dato acquisito, ci rendiamo conto che alcune caratteristiche della superficie poligonale devono essere editate per renderla il più possibile un'entità bilanciata. L'osservazione critica e l'analisi geometrica fatta precedentemente, aiuta a individuare nella nostra mente, la posizione del piano di simmetria, identificando una parte destra ed una parte sinistra della rappresentazione tridimensionale. In questo modo è possibile individuare le differenze esistenti tra l'una e l'altra parte.

Nel caso della scocca del telefono, le differenze tra le due aree, si rendono manifeste attraverso la presenza del tasto ripetitore del numero, del foro per il passaggio del cavo che connette il corpo del telefono con la cornetta e la presenza di un foro simile al precedente, per il cavo che collega l'apparecchio alla presa a muro utile alla connessione con la rete nazionale (fig.4.14). Il disco per la composizione del numero, è un evidente elemento di disturbo all'equilibrio del modello per cui va completamente eliminato. Si ottiene la mesh della figura 4.15 che sarà un modello temporaneo per la costruzione del piano di simmetria, ma sicuramente equilibrato, quindi adatto per l'applicazione del metodo della sfera, affrontato in termini teorici nel capitolo precedente. Il modello in figura 4.15 è una sorta di controfigura del modello originale, da inserire nella serie di costruzioni che vanno fatte per la determinazione del piano di simmetria. Il modello fittizio elude tutti i problemi derivanti da una mesh aperta e sbilanciata, sicuramente provvista di un baricentro che, dovendo rappresentare la distribuzione dell'intera superficie, andrebbe a cadere in un punto non adatto alla determinazione del piano di simmetria. Assolto questo compito, la mesh provvisoria deve essere sostituita con la mesh originale.





4.16\_1 Il modello della scocca una volta registrato, si posiziona in maniera casuale nello spazio digitale.

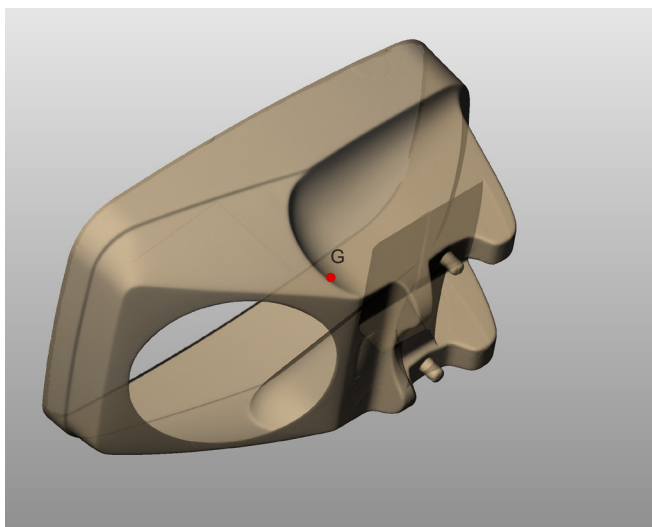
La scocca del telefono si pone all'interno dello spazio digitale, in maniera casuale (fig. 4.16). La casualità è frutto delle diverse riprese fatte in fase di acquisizione e successiva registrazione, avvenute in maniera relativa l'una rispetto all'altra. La loro consecutiva fusione, si risolve in una superficie poliedrica, priva di riferimenti con i piani coordinati assoluti dello spazio digitale.

L'operazione di bilanciamento si può facilmente mettere in atto in una qualunque condizione spaziale della mesh, di conseguenza il modello, una volta bilanciato, è ancora in aderenza con la superficie originale: il piano di simme-

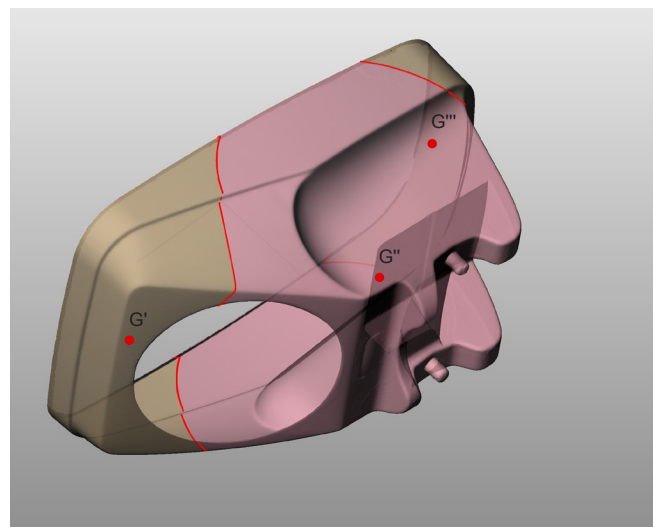
tria del modello bilanciato, sarà quindi anche il piano del modello numerico originale.

La mesh bilanciata rappresentante il telaio, ha il baricentro inequivocabilmente appartenente al piano di simmetria; una volta individuato  $G$  (fig.4.17), lo rendiamo centro di una sfera in grado di tripartire la superficie in superfici ugualmente bilanciate (fig.4.18, fig. 4.19), simmetriche e con propri baricentri. Per questi passa il piano di simmetria delle tre superfici generate dal taglio che coincide con il piano di simmetria della scocca dell'S62 (fig. 4.20).

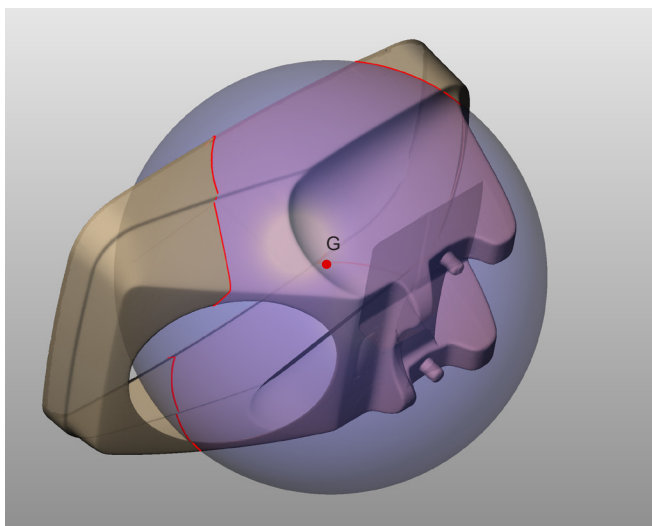
Ad ulteriore conferma della simmetria delle parti ricavate a seguito della operazione appena effettuata, possiamo



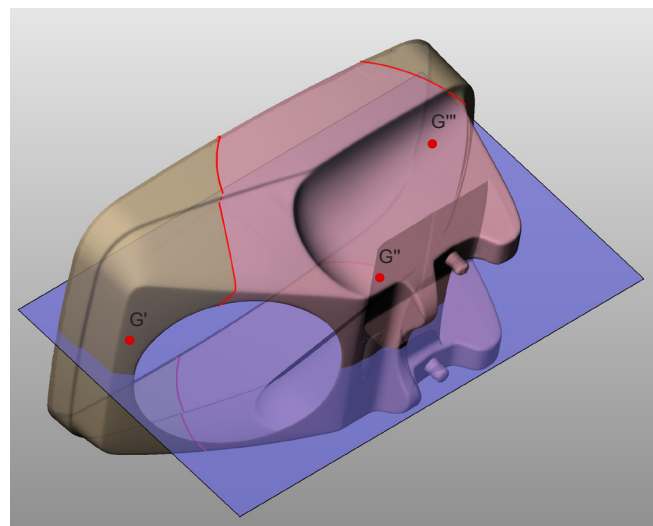
4.17\_Modello numerico della scocca casualmente disposto nello spazio digitale



4.19\_Individuazione dei baricentri appartenenti alle superfici individuate.



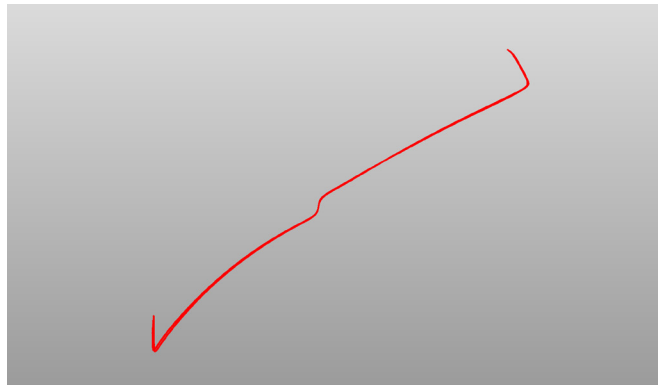
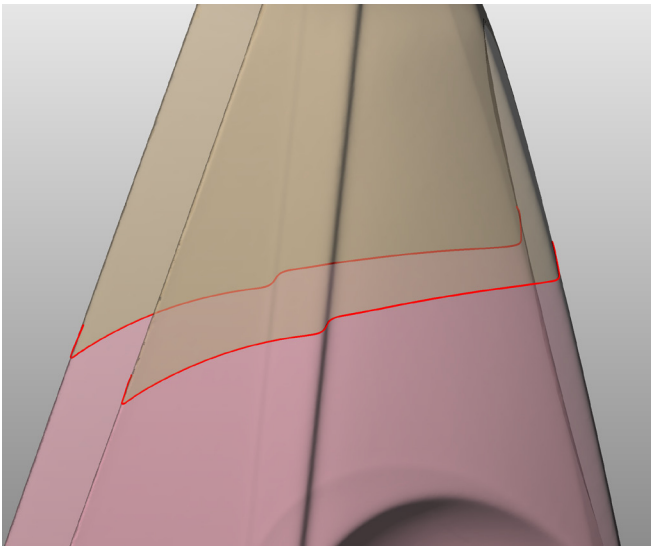
4.18\_Tripartizione della mesh bilanciata in superfici poliedriche attraverso il metodo della sfera.



4.20\_Piano di simmetria passante per i tre baricentri individuati.

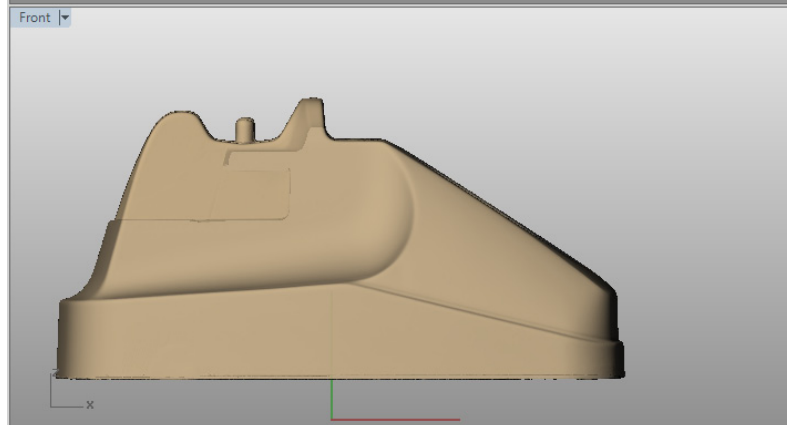
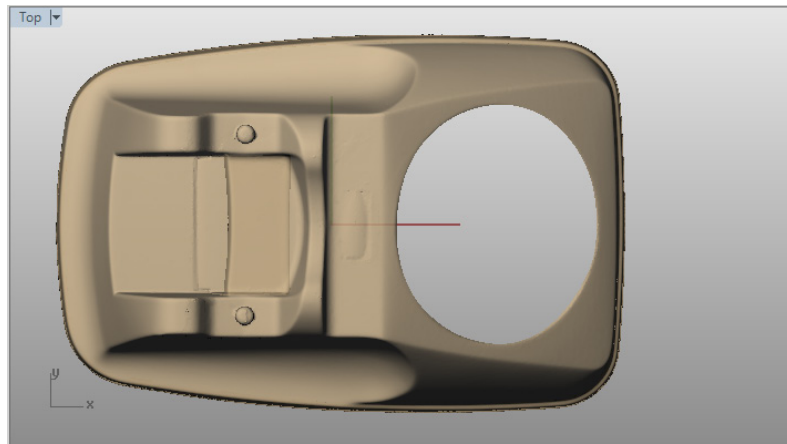
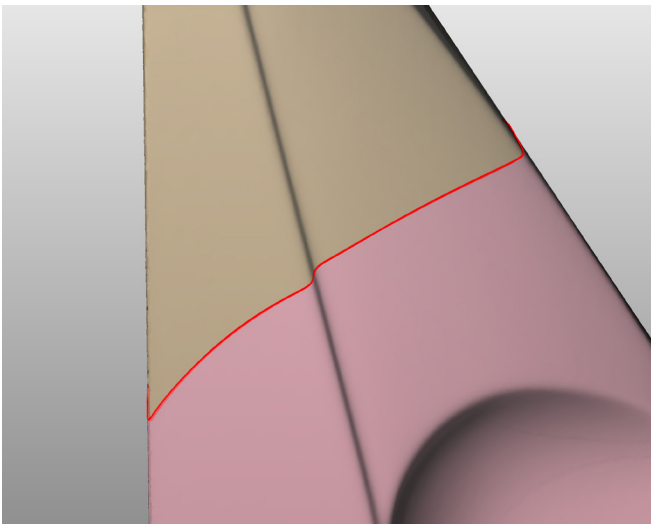
osservare i bordi di taglio nati dall'intersezione tra sfera e poliedro bilanciato. Facendo uno zoom su uno di questi (fig.4.21, fig. 4.22), notiamo che il risultato dell'intersezione tra sfera mesh e superficie poliedrica, sono due polilinee i cui vertici sono distanti dal baricentro  $G$  di una

quantità pari al raggio della sfera. Da una vista ortogonale qualunque, è possibile orbitare intorno alle due curve, fino ad individuare una posizione impropria dalla quale le due entità risultano sovrapposte (fig. 4.23). Ancora non siamo certi di essere di fronte a elementi specchiati, perché le due



4.23\_ I due bordi opposti appartengono allo stesso cilindro proiettivo ed hanno i vertici ugualmente lontani dal baricentro.

4.24\_ Rappresentazione numerica della scocca orientata in maniera coordinata rispetto alla terna triortogonale assoluta.



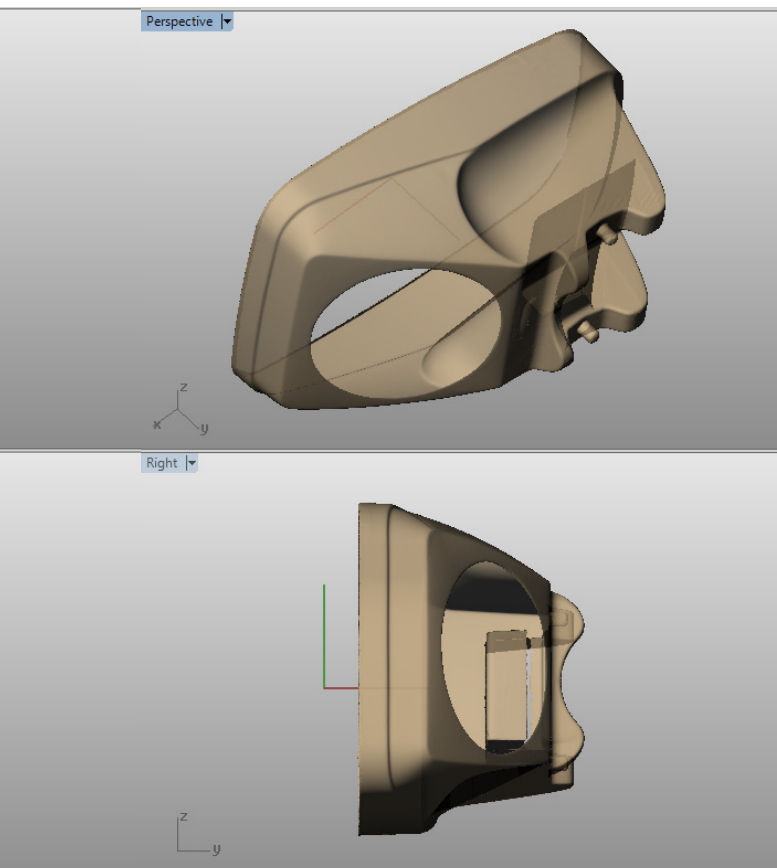
4.21, 4.22\_ Analisi delle polilinee risultanti dall' intersezione tra il modello numerico della scocca e la sfera.

curve, pur appartenendo ad uno stesso cilindro proiettivo, potrebbero essere differenti, poichè sono infinite le forme che una curva può assumere pur avendo sempre la stessa proiezione. Tuttavia possedere i vertici equidistanti da un punto in comune, il baricentro, ne garantisce la specularità. Oltre al metodo della sfera che definiremo "diretto", vi

sono altri metodi che, per distinguerli dai precedenti, chiameremo indiretti. Quest'ultimi fanno capo a quei processi computazionali presenti in alcuni software dedicati al Reverse Engineering, come Geomagic, Rapidform, PolyWorks ecc.<sup>3</sup>

In questo caso bisogna agevolare il software indicando tre punti sulla mesh che identificano la posizione del presunto piano di simmetria. Dopo un processo i cui tempi di attuazione sono legati alla complessità del modello, si arriva ad un risultato che non discosta da quello della sfera, pur eludendo tutte quelle domande che interessano a chi si occupa di forma e tende a capirne, attraverso un processo analitico diretto, l'essenza<sup>4</sup>.

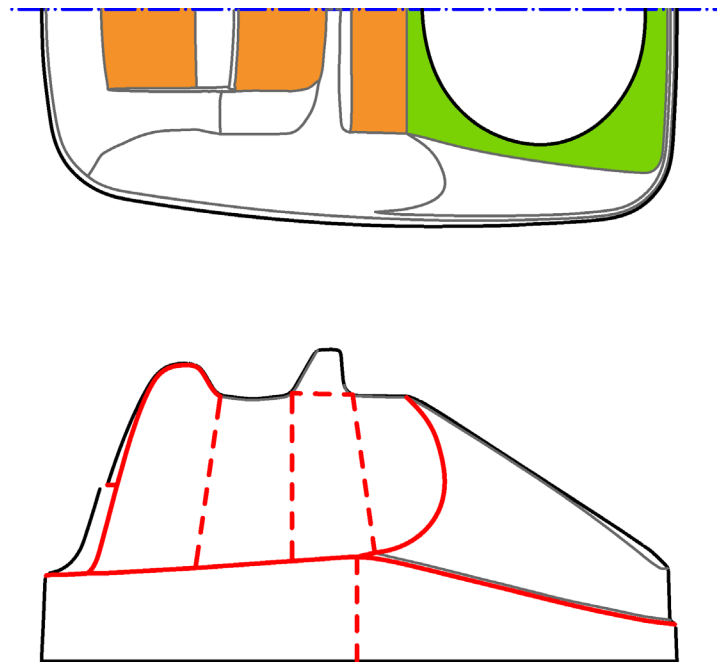
Adesso il telefono può essere orientato, ribaltandolo in una posizione per la quale il piano di simmetria è parallelo al piano **XZ** (fig.4.24).



#### 4.4 Primo caso studio: operazioni di Reverse Modeling

Una volta trovato il piano di simmetria, oltre alla possibilità di orientare la scocca in relazione alla terna triortogonale assoluta, possiamo spezzare la forma in due parti e focalizzare l'operazione di Reverse Modeling solo su una metà dell'oggetto. Successivamente si penserà ad un aggiornamento delle zone differenti.

Prima di cominciare l'operazione di rappresentazione Nurbs, si deve procedere con la parcellizzazione della superficie poliedrica per la costruzione delle pezze Nurbs. L'operazione viene inizialmente programmata sugli elaborati bidimensionali, partendo da una prima suddivisione che rileva le curve di stile nelle zone di massima curvatura. Il risultato cercato è l'individuazione delle superfici primarie che comporranno l'oggetto. In figura 4.25 sono rac-



4.25\_ Individuazione delle superfici primarie utili alla costruzione delle pezze Nurbs per l'operazione di Reverse Modeling.

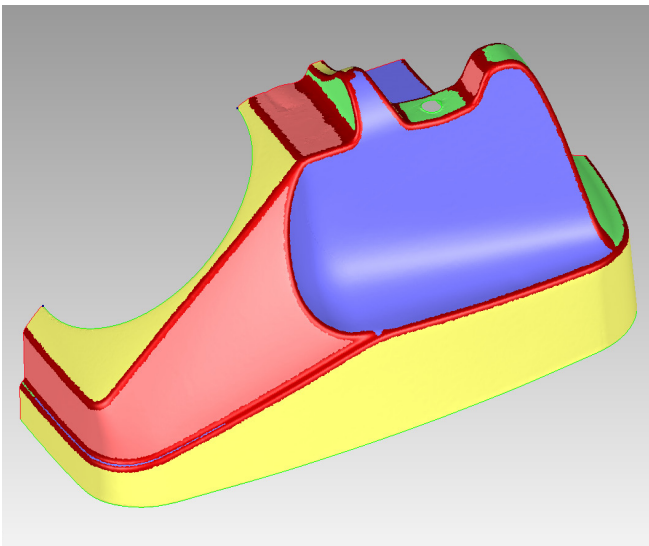
colte in forma grafica, le prime osservazioni risultanti dal progetto di partizione. L'oggetto è principalmente composto da superfici libere non tagliate, ad eccezione dell'entità evidenziata in verde che, essendo circonscritta da cinque curve di bordo propone due scelte: spezzare l'entità in due superfici non tagliate, oppure ricostruire questa porzione di mesh con una superficie tagliata. La parte della scocca che stiamo considerando, in effetti presenta un foro in cui alloggia il meccanismo circolare per la composizione dei numeri; la porzione di superficie che circonda il foro, non presenta discontinuità o strane variazioni di curvatura. Queste due semplici osservazioni inducono a pensare che la superficie tagliata è quella più coerente per rappresentare l'area verde. In fine, con la campitura arancione sono indicate le regioni rappresentabili attraverso entità piane.

Una volta identificate le curve di carattere, notiamo che i percorsi si intersecano in una rete di curve delimitanti delle regioni, che come abbiamo visto, non sono tutte rappresentabili da superfici non tagliate. In presenza di regioni con più di quattro curve di bordo si può procedere in due direzioni, o attraverso l'utilizzo di superfici tagliate, o parcellizzando ulteriormente questa porzione. L'ultima ipotesi, è quella applicata sulla superficie appartenente al pro-

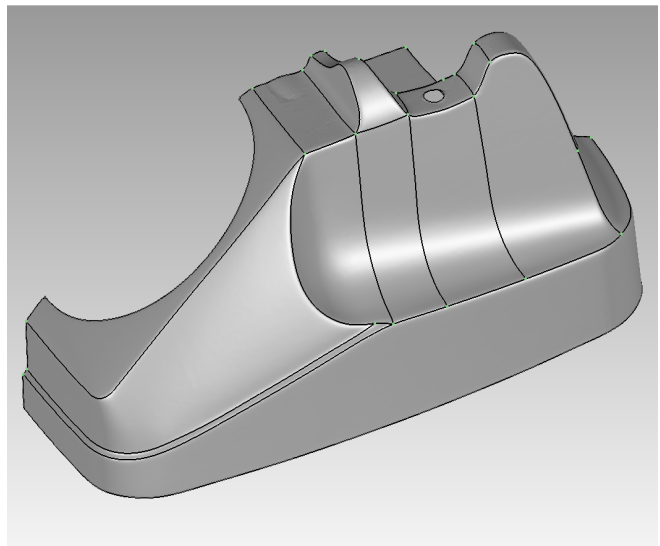
spetto laterale, sempre visibile nella precedente figura: le linee tratteggiate illustrano un'ipotesi di come suddividere l'entità. Il risultato potrebbe essere un modello composto da un sistema misto di superfici tagliate e non tagliate, giustapposte in continuità di curvatura. Cerchiamo adesso di illustrare le operazioni che si effettuano per il passaggio dal modello numerico della scocca, al modello matematico della stessa.

In figura 4.26 con il colore rosso, sono evidenziati i luoghi della mesh caratterizzati dalla massima curvatura locale; grazie al software, è possibile rilevare il dato per disegnare le curve di bordo delle future superfici matematiche.

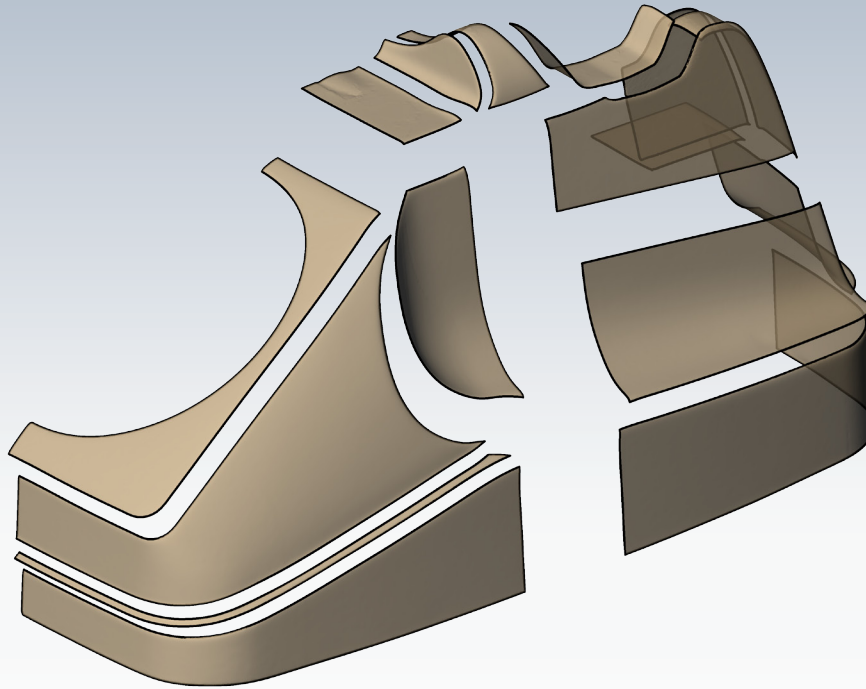
I cordoni rossi separano la scocca del telefono in zone cromatiche di diverso colore, ciascuno di questi rappresenta una regione che diventerà superficie primaria per la rappresentazione matematica. Le zone rosse di separazione, vengono utilizzate come guida per le curve di carattere che sono riviste e corrette dall'operatore, per poi essere utilizzate come entità taglianti la mesh. In figura 4.27 sono evidenti le curve nere per la costruzione dei bordi di taglio, conseguenza della procedura appena effettuata; inoltre si notano ulteriori partizioni, ipotizzate per evitare la costruzioni di superfici tagliate. Una volta estrapolate le curve di



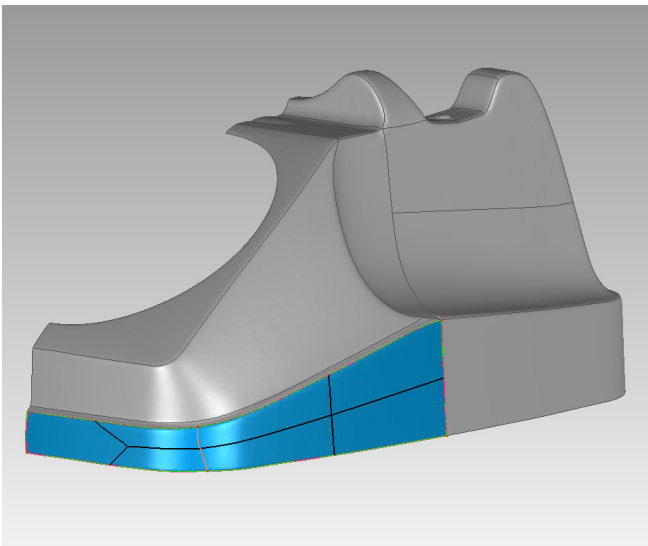
4.26\_ In rosso sono evidenziate le aree a forte curvatura che mettono in evidenza quelle che saranno le superfici primarie.



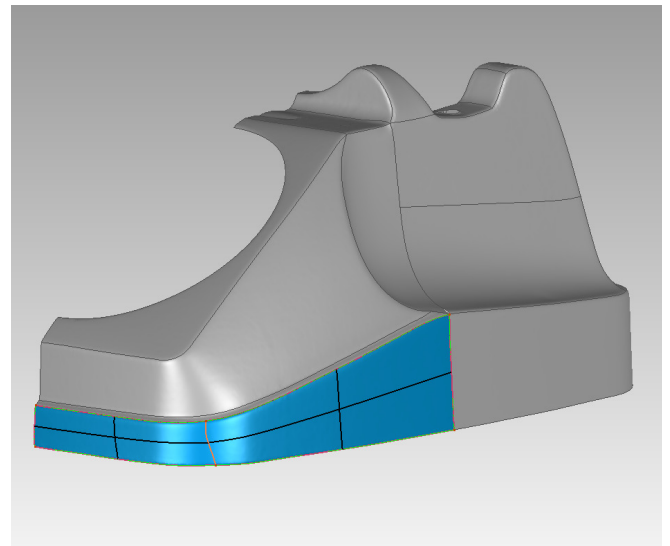
4.27\_ Individuazione dei bordi di taglio con i quali spezzare la mesh. Le entità risultanti saranno ricostruite matematicamente.



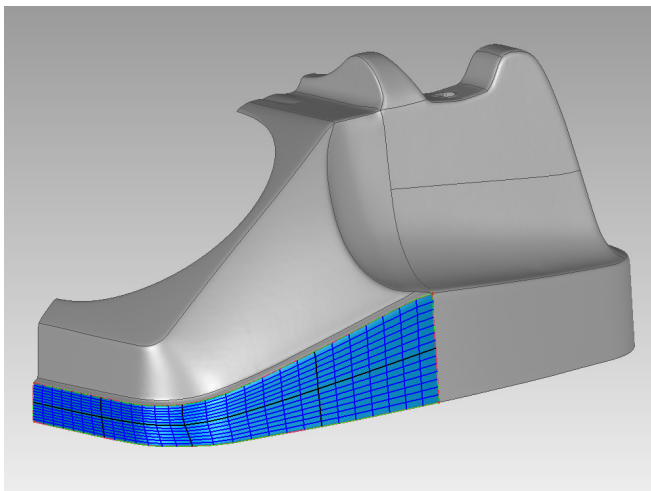
4.28\_ Esploso che rappresenta le porzioni di mesh da rappresentare matematicamente in maniera singola. In una fase successiva si penserà alla costruzione della continuità ai bordi.



4.29\_ Costruzione delle superfici parametriche. Condizione errata.



4.30\_ Costruzione delle superfici parametriche. Condizione corretta.



4.31\_ In blu la superficie continua che si genera a seguito della fusione di patch correttamente costruite.

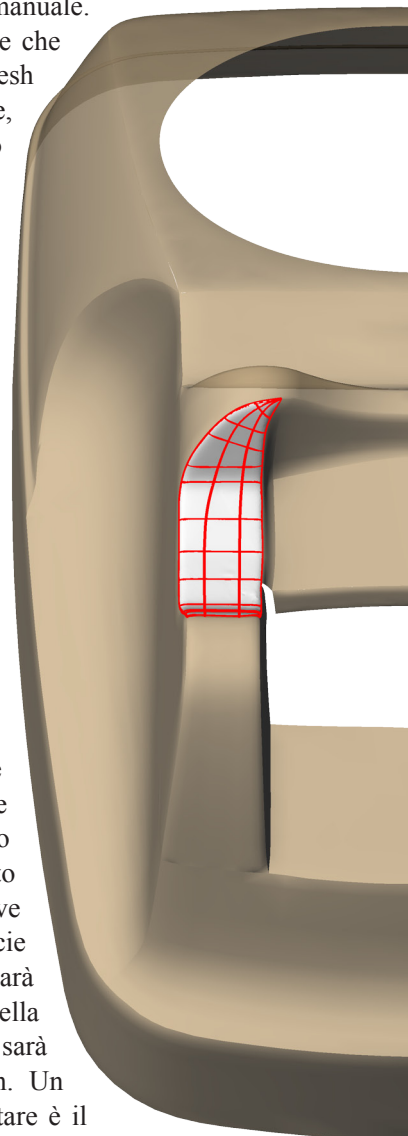
stile e le curve ausiliari, le entità saranno utilizzate come limiti di taglio della mesh (fig. 4.28). Questa operazione genera porzioni di mesh da ricostruire una alla volta, lavorando in maniera più agevole e coerente per ottenere, attraverso ulteriori procedure, un'unica superficie.

La costruzione di un'unica superficie, non è un passaggio immediato. In prima istanza, si effettua l'auto surfacing interno alla partizione, operazione che in alcuni casi porta ad un numero di pezzi dispari (fig. 4.29), condizione inappropriata che non consente la fusione delle patch in un'unica entità Nurbs: la fusione ha lo scopo di creare un'unica superficie matematica per descrivere la porzione di mesh che si sta esaminando. Alcune variazioni sui parametri di autosurfacing, consentono di cambiare il numero delle parti, in modo da ottenere un quantità pari di suddivisioni (fig. 4.30); inoltre vi è la possibilità di disegnare manualmente la rete per la partizione. La condizione descritta è necessaria per un editing in grado di ottenere patch accostate, concordi nelle direzioni e nel numero delle isoparametriche. Grazie a questa serie di accorgimenti, non ci sarà alcun problema nel fondere le superfici interne all'isola che sono in continuità di curvatura per costruzione. L'obiettivo è che ogni regione sia costituita da un'unica Nurbs, con le isoparametriche orientate seguendo le direzioni principali

dei bordi della pezza quadrilatera (fig.4.31).

In alcuni casi la forma della porzione di mesh, richiede l'utilizzo di superfici Nurbs per le quali un lato è costretto a degenerare in un punto, proponendo pezzi a tre bordi. Nella porzione di mesh evidenziata in bianco nella figura 4.32, è evidente che l'autosurfacing non sarà in grado di produrre il risultato sperato, quindi il problema va risolto in maniera del tutto manuale.

Vediamo chiaramente che i bordi in cui la mesh è confinata sono tre, quindi è necessario ricorrere ad una entità matematica per la quale un lato collassa in un punto. La sua costruzione, può avvenire agevolando il percorso delle isocurve attraverso il disegno delle linee rappresentate in rosso che, in una direzione convergono verso il lato degenerare, quindi un punto; nell'altra si posizionano in maniera trasversale alle precedenti. La rete generata raccoglie l'andamento interno della mesh in oggetto ed orienta le isocurve della nuova superficie continua. Minore sarà il passo delle curve della rete rossa, maggiore sarà l'aderenza alla mesh. Un altro fattore da valutare è il



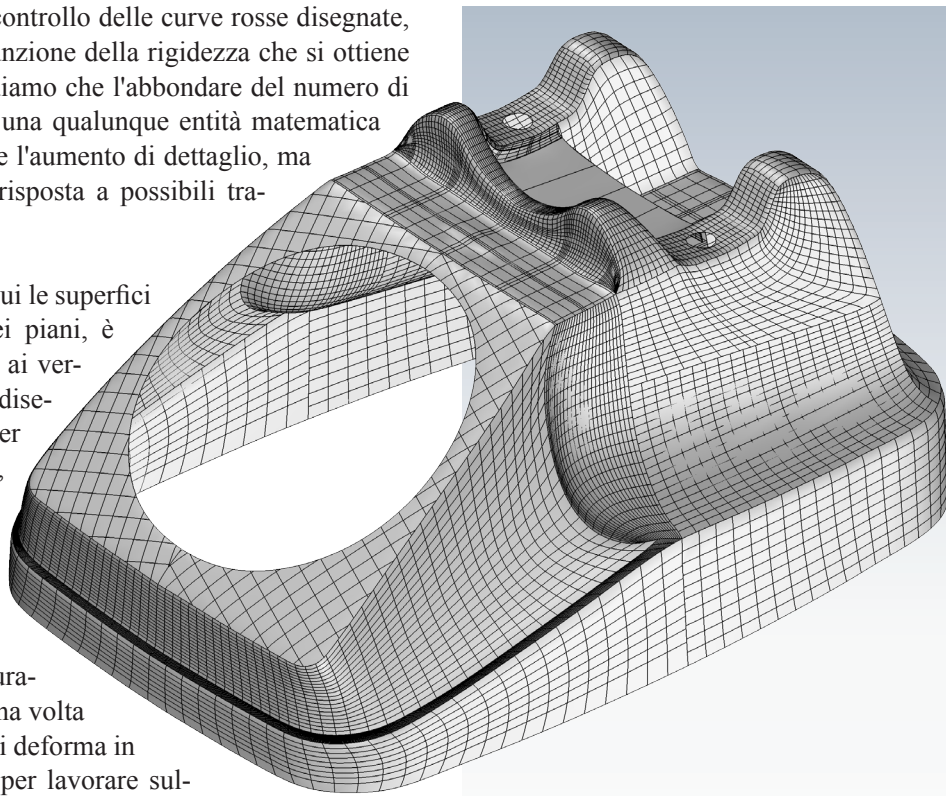
4.32\_ La porzione di mesh evidenziata, essendo a tre curve di bordo, deve essere rappresentata da una Nurbs con lato degenerare.

numero dei punti di controllo delle curve rosse disegnate, che è ponderato in funzione della rigidità che si ottiene aumentandolo: ricordiamo che l'abbondare del numero di punti di controllo di una qualunque entità matematica comporta sicuramente l'aumento di dettaglio, ma anche una peggiore risposta a possibili trasformazioni future.

In altre situazioni in cui le superfici sono palesemente dei piani, è possibile appoggiarsi ai vertici del poliedro che disegna la mesh piana, per costruire un fit plane, cioè quel piano la cui equazione soddisfi il maggior numero di vertici, all'interno di una deviazione determinata dall'accuratezza del software. Una volta creata l'entità piana, si deforma in prossimità dei bordi per lavorare sulle continuità con le entità limitrofe. Il piano è una primitiva grafica molto rigida, avendo ambedue le direzioni isoparametriche di primo grado. Ricostruendo l'entità e portandola al grado tre, abbiamo la possibilità di deformare la superficie lungo i bordi, ponendola in continuità di curvatura con le altre superfici.

Al termine del percorso, la scocca dell' S62 è rappresentata da un elenco di superfici accostate, selezionabili ancora singolarmente. Il Reverse Modeling del prodotto, si conclude con la creazione della polisuperficie (fig. 4.33), che permette di sottoporre il modello a procedure booleane necessarie per la costruzione di fori, asole, irrigidimenti, smussi su spigoli vivi ed altro ancora. Inoltre, la superficie matematica disegnata, consente di trasformare l'oggetto nella sua totalità, per un aggiornamento dello stile verso canoni estetici diversi da quelli utilizzati nel momento del progetto.

Per questo la scocca, rappresentata come collezione di superfici indipendenti, non è soddisfacente; si deve mirare



4.33\_ Risultato finale dell' operazioni di Reverse Modeling: insieme di superfici poste in continuità ed unite in un'unica superficie.

alla costruzione di una polisuperficie che rappresenti il solido su cui effettuare le operazioni elencate. Nell'unire le parti, si evidenzia l'importante ruolo della tolleranza: le pezze sono accostate, ma durante i diversi processi di editing, si creano distacchi tra le superfici composte, da eliminare attraverso ricuciture locali dei bordi. Solo alla fine del procedimento l'entità diventa la polisuperficie desiderata, portando a compimento l'intero processo di Reverse Modeling.



#### 4.5 Secondo caso studio: oggetto composto da più geometrie strutturanti

Un altro caso studio, riguarda gli oggetti composti da più geometrie strutturanti, che mette a sistema la condizione spiegata nel paragrafo precedente per la determinazione del piano di simmetria e l'individuazione dell'asse di rivoluzione. Questi oggetti, sono caratterizzati dalla presenza dell'asse di rivoluzione e dal piano di simmetria, geometrie strutturanti presenti in buona parte dei prodotti presenti nel mercato.

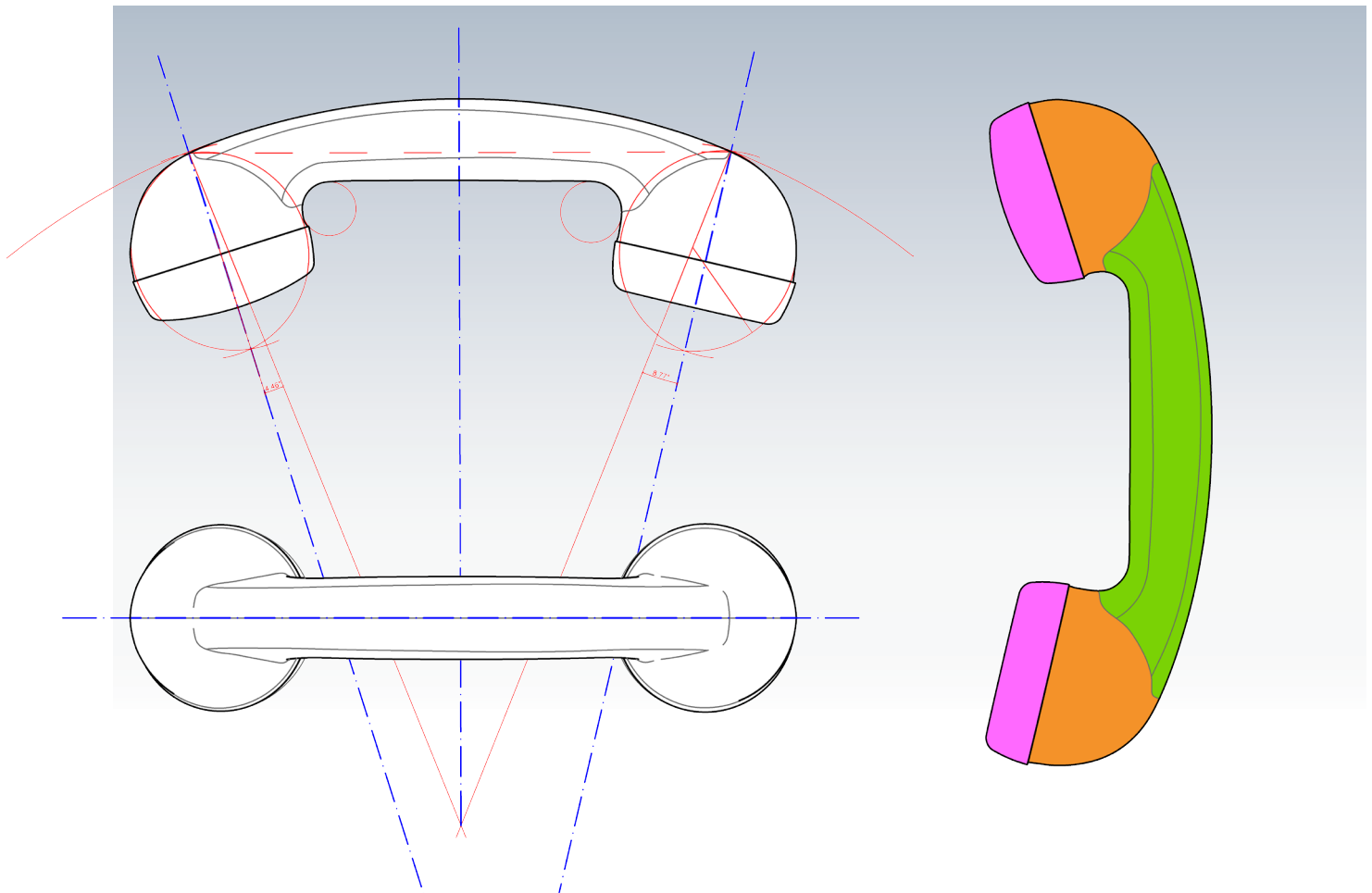
L'S62 rimane un buon test di prova, spostando l'attenzione dalla scocca alla cornetta. Infatti, se nel suo complesso propone la presenza di un piano di simmetria, ci rendiamo conto facilmente che le parti estreme, avvitate al supporto del trasmettitore e del ricevitore, sono superfici di rivoluzione. Il primo approccio all'oggetto è di carattere visivo: l'impugnatura, che collega in un unico telaio il ricevitore e il trasmettitore, costruisce una forma bilanciata, provvista di piano di simmetria; alla scocca sono avvitate due cover, rimovibili attraverso la rotazione su una parte filettata, per la sostituzione dei meccanismi interni (fig.4.33). L'aspetto funzionale condiziona la forma, imponendo la presenza di geometrie circolari per le cover e per i luoghi di giuntura con gli alloggi dei meccanismi, parti del prodotto in cui è evidente la presenza dell'asse di rivoluzione.

Attraverso lo studio degli elaborati grafici bidimensionali (fig. 4.34), vediamo che la curva superiore del contorno apparente dell'impugnatura, segue l'andamento di un arco di circonferenza interrotto da due assi (nella figura rappresentati con un tratto punto blu), rispettivamente l'asse di rivoluzione del ricevitore e del trasmettitore. Dai punti in cui l'arco si interrompe, partono archi di dimensioni più piccole e con centri che cadono sul raggio rosso della curva caratterizzante l'impugnatura; in questo modo il progettista ha garantito la continuità di tangenza tra arco grande e archi piccoli.

Immaginando di richiudere gli archi piccoli su loro stessi, notiamo che i cerchi generati, non disegnano perfettamente il contorno apparente delle forme che racchiudono il ricevitore o il trasmettitore, quindi non sono delle primitive sferiche, ma porzioni di arco in rivoluzione o al limite superfici libere. La regolarità certa delle cover rimovibili permette, partendo dal prospetto laterale, di tracciare in blu le immagini dei due assi, notando che non si incontrano nel centro della circonferenza sottesa all'impugnatura. Inoltre vediamo che gli assi blu, assieme ai raggi rossi della circonferenza grande, spazzano una coppia di angoli diversi; questo dimostra che la vista laterale è caratterizzata esclusivamente da una simmetria parziale, legata alla sola superficie dell'impugnatura.



4.33\_ hi-Ring, cornetta vintage della serie hi-Fun per prodotti Apple ispirata alla cornetta dell'S62.



4.34\_ Elaborati grafici bidimensionali per l'analisi geometrica della cornetta dell'S62.

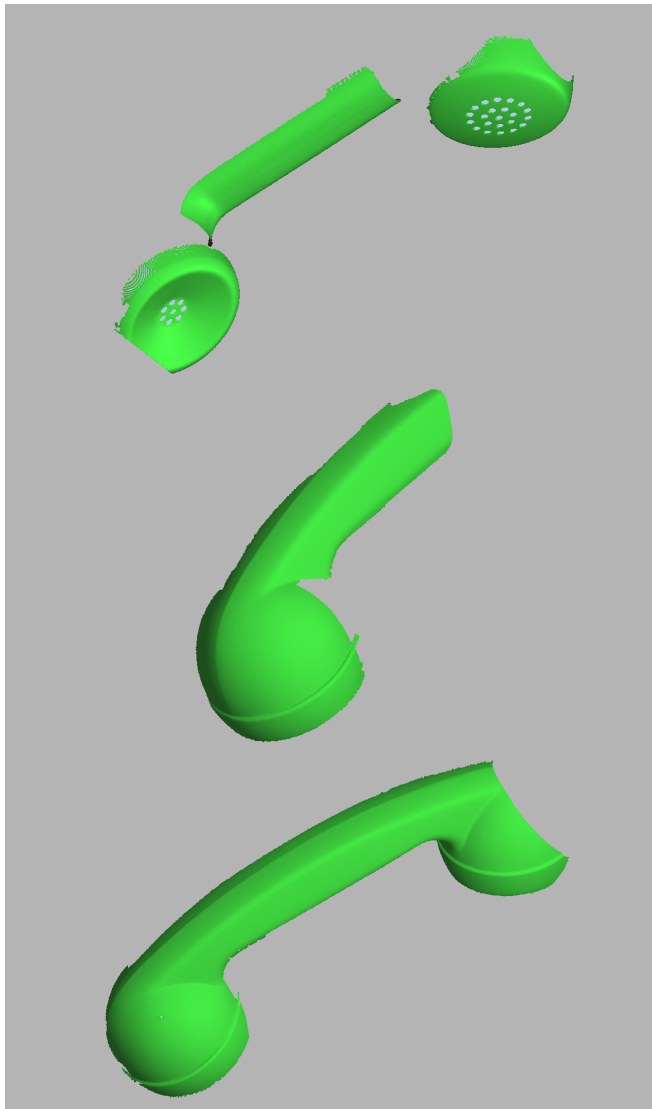
In base all'osservazione e all'analisi geometrica della cornetta, è chiaro che ad un iniziale impostazione geometrica della forma, è seguita una razionalizzazione funzionale ed ergonomica della stessa, tralasciando i riferimenti a chiare primitive geometriche ed inserendolo nell'insieme dei "prodotti morbidi". Inoltre è evidente che l'oggetto, sarà rappresentato in forma matematica con cinque superfici (fig. 4.35): la superficie libera rappresentante l'impugnatura (verde), le due free-form per i modelli delle calotte (arancione) ed infine le due superfici di rivoluzione per disegnare le cover (viola).

4.35\_ Individuazione delle patch che rappresentano l'intera cornetta dell'S62.

Chiarite le evidenze geometriche ed individuate le patch, il modello numerico acquisito viene gestito in funzione delle osservazioni fatte, iniziando dall'individuazione del piano di simmetria generale e degli assi di rivoluzione delle cover.

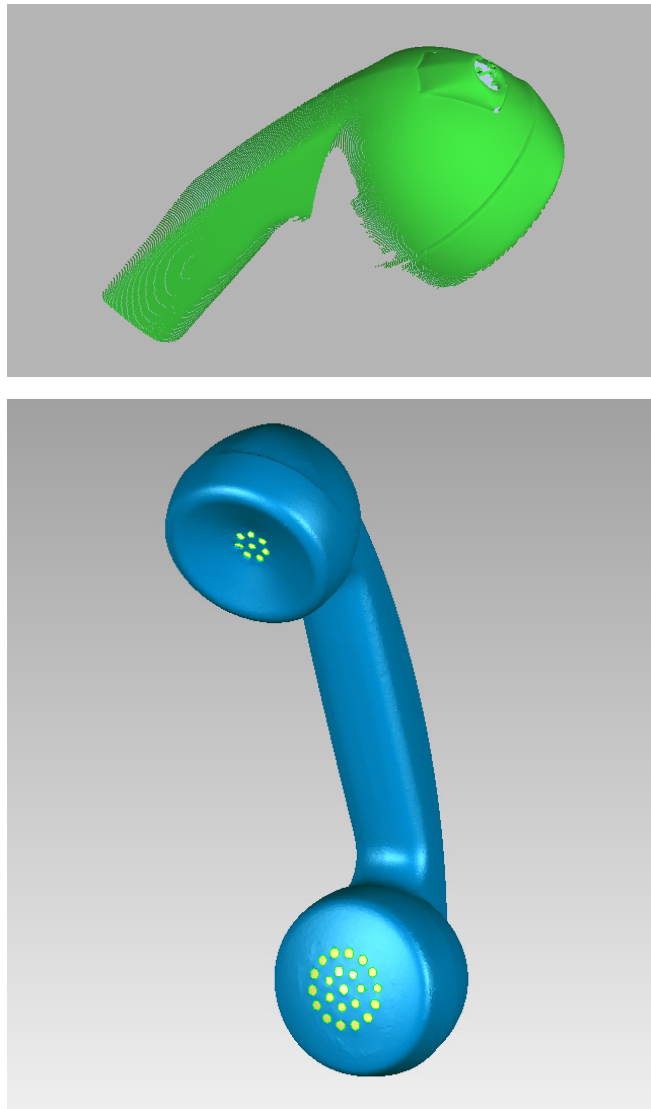
Dopo lo studio delle geometrie si è passati al rilievo effettuato con lo scanner laser 3D Range 7 della Konica Minolta. Non potendolo rilevare interamente, l'oggetto è stato posizionato su una piattaforma girevole distante circa 600 mm dal sensore 3D dello strumento. Con poche range map

4.36\_ Range map eseguite con lo scanner laser 3D della Konica Minolta, serie range 7.

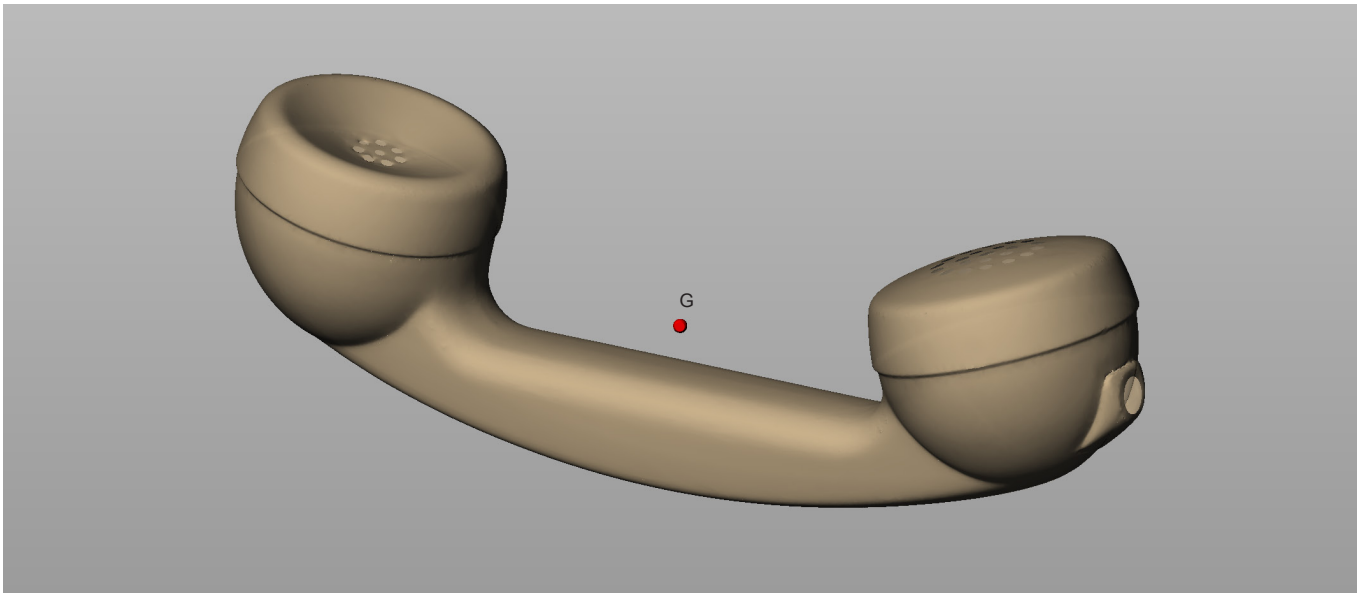


è stata garantita la copertura dell'intera superficie, evitando lacune (fig. 4.36). Il dato è stato filtrato separando la parte che descrive geometrie utili alla rappresentazione della forma, da quello frutto di rumore. L'interpolazione dei punti rilevati ha permesso, grazie alla costruzione della mesh, la rappresentazione numerica delle nuvole acquisite, ancora non referenziate l'un l'altra. Per questo motivo, le diverse range map sottoposte a meshing, sono state suc-

4.37\_ (in basso) Rappresentazione numerica della cornetta a seguito dell'operazione di meshing e registrazione.



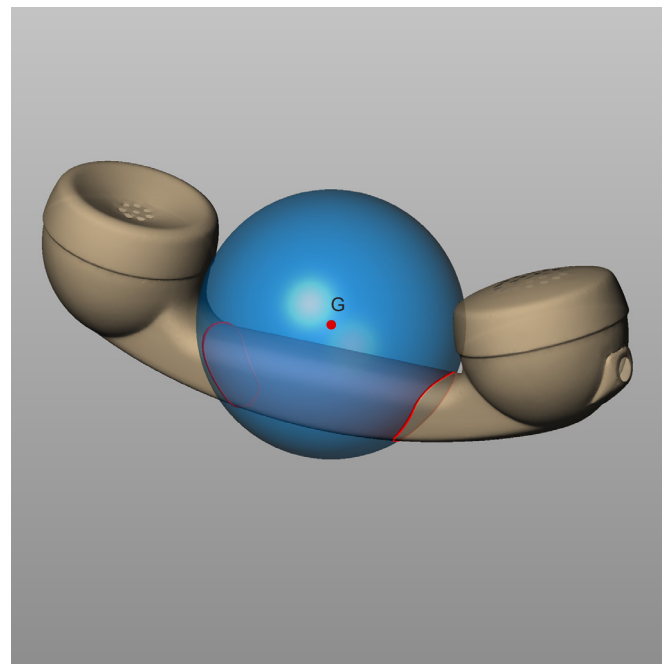
cessivamente allineate e fuse in un'unica mesh rappresentante l'intero oggetto (fig. 4.37). A seguito della serie di operazioni standard, questa volta non si è dovuto procedere ad ulteriori azioni di editing per il bilanciamento delle parti speculari, notando che il prodotto ottenuto era già adeguato per l'individuazione delle geometrie strutturanti: gli assi di rivoluzione delle cover e il piano di simmetria dell'intera cornetta.



4.38\_ Individuazione del baricentro dell'intera mesh che rappresenta la cornetta.

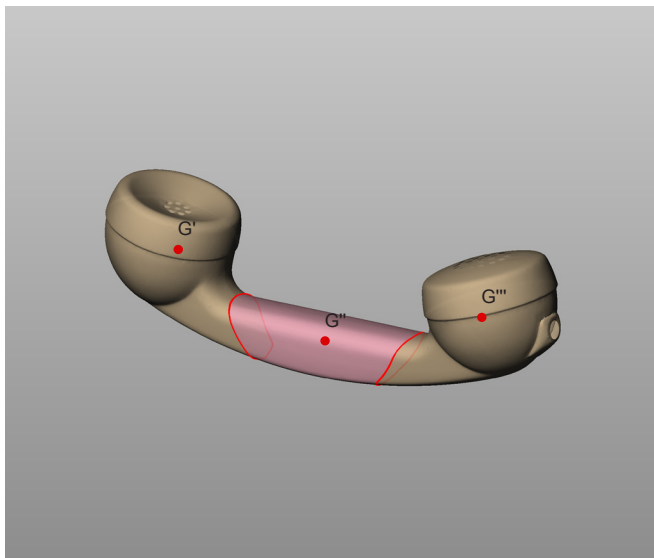
Una riflessione iniziale mette in luce due possibili approcci al problema. Da una parte si potrebbe partire dalla ricerca dei due assi di rivoluzione che, in questo oggetto, appartengono al piano di simmetria che stiamo cercando; dall'altra, operare in maniera più generale attraverso un metodo utile sia per questo caso, ma anche per casi analoghi attraverso l'iniziale determinazione del piano di simmetria.

Partiamo dalla determinazione del piano di simmetria rilevando, con l'aiuto del software, il baricentro della mesh complessiva, che risulta essere coerentemente all'esterno del poliedro (fig. 4.38). Una sfera mesh di raggio adeguato andrà ad includere parte dell'impugnatura della cornetta, intercettando la superficie in due curve aventi le caratteristiche di congruenza già spiegate nel caso della scocca dell'apparecchio telefonico (fig. 4.39). Attraverso quest'operazione, la rappresentazione poliedrica si interrompe in due curve intersezione ottenendo tre poliedri aperti e bilanciati. La forma ancora speculare delle superfici risultanti, consente ai rispettivi baricentri di posizionarsi

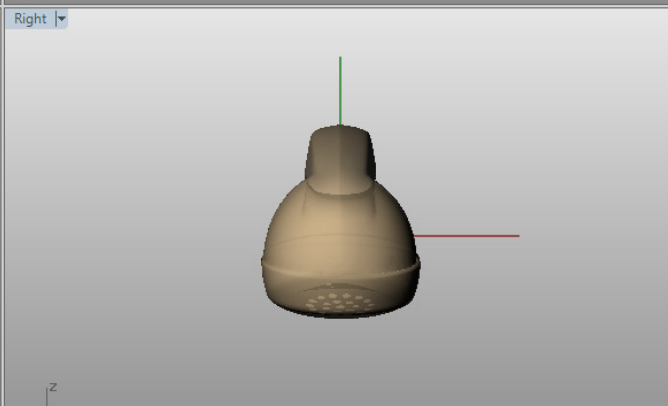
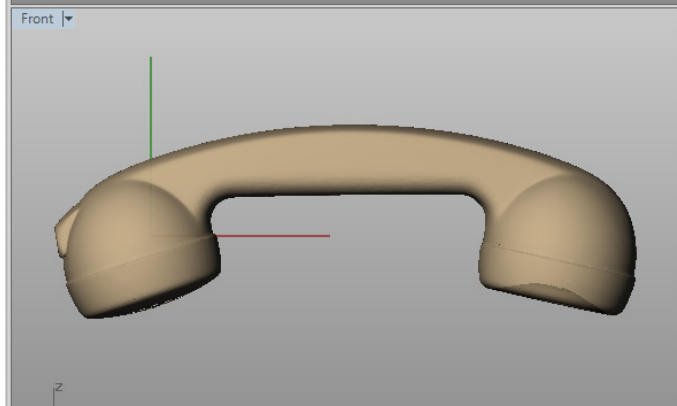
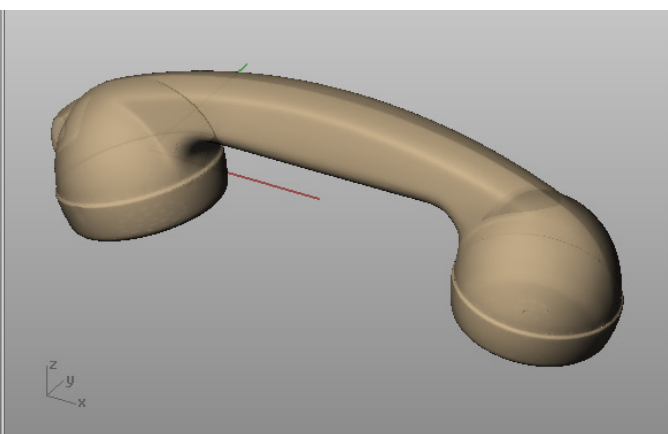
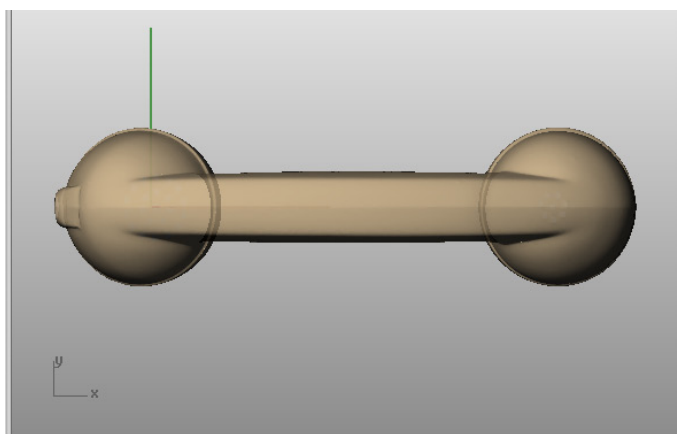
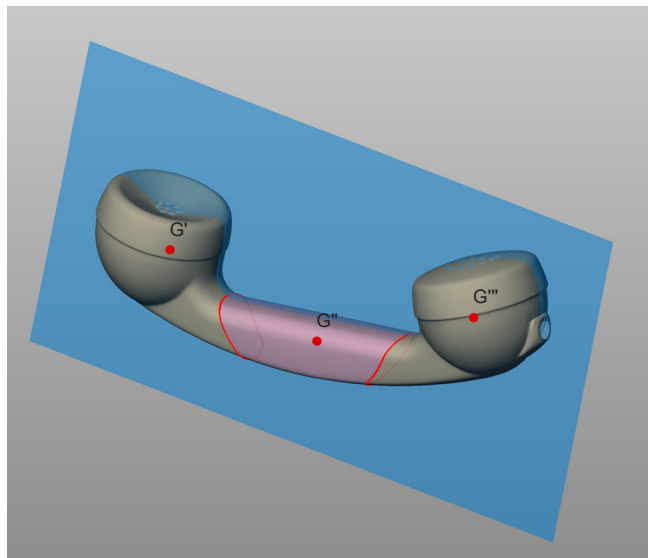


4.39\_ Tripartizione del modello numerico della cornetta per la ricerca del piano di simmetria attraverso il metodo della sfera.

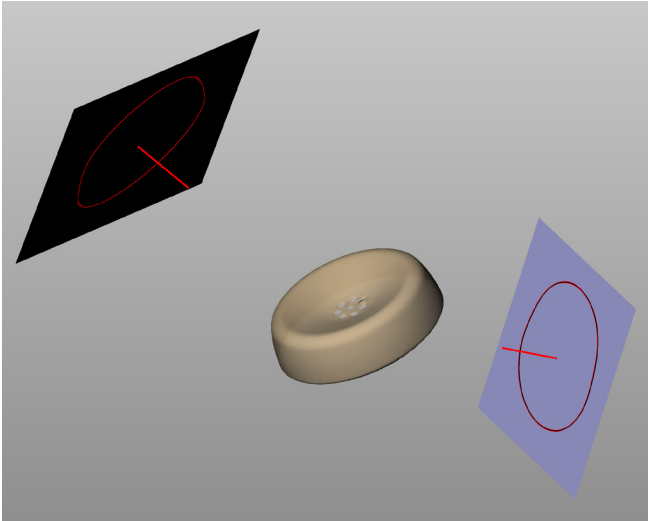
4.40\_ (figure in alto) Individuazione dei baricentri relativi alle tre porzioni di mesh, costruzione del piano di simmetria.



4.41\_ (figura in basso) Il piano di simmetria consente di orientare la cornetta in relazione alla terna triortogonale.



4.42\_ Doppia proiezione ortogonale del modello mesh casualmente disposto nello spazio.



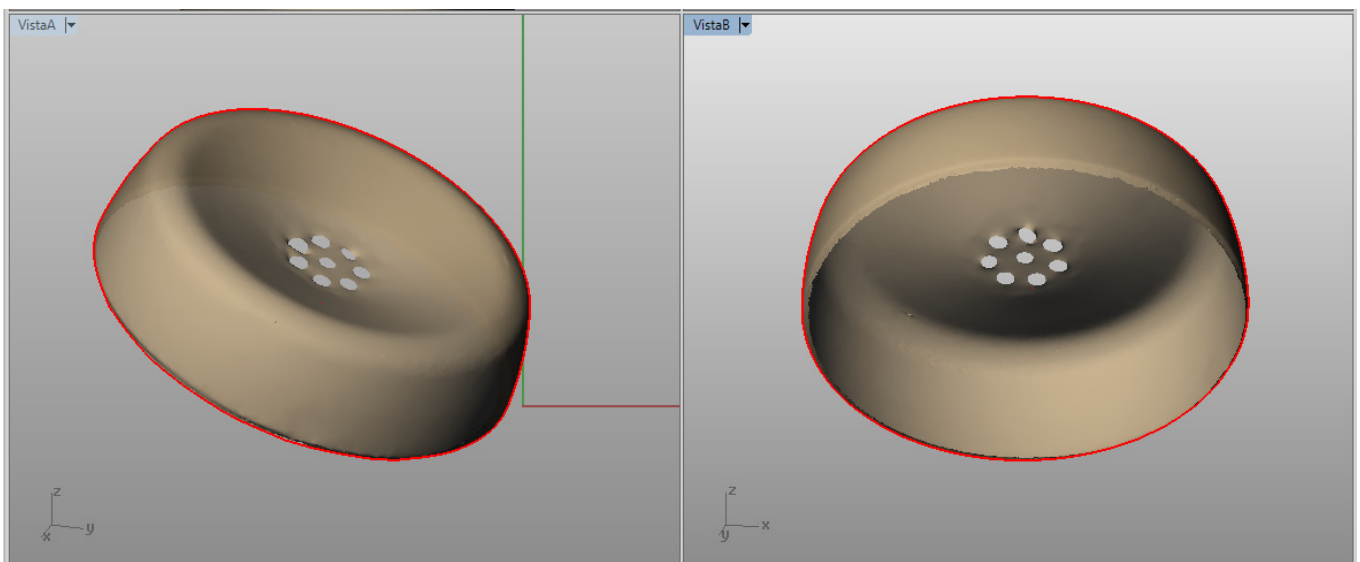
sul piano di simmetria della mesh genitrice (fig. 4.40). Ancora una volta il baricentro della forma genitrice, appartiene al piano individuato, a conferma della bontà dell'operazione. Adesso, attraverso un'operazione di ribaltamento, è possibile orientare il dato discreto ponendolo in una posizione comoda rispetto alla terna triortogonale (fig. 4.41), quindi coincidente al piano **XZ**. La presenza del piano di simmetria consentirà il Reverse Modeling della cornetta a

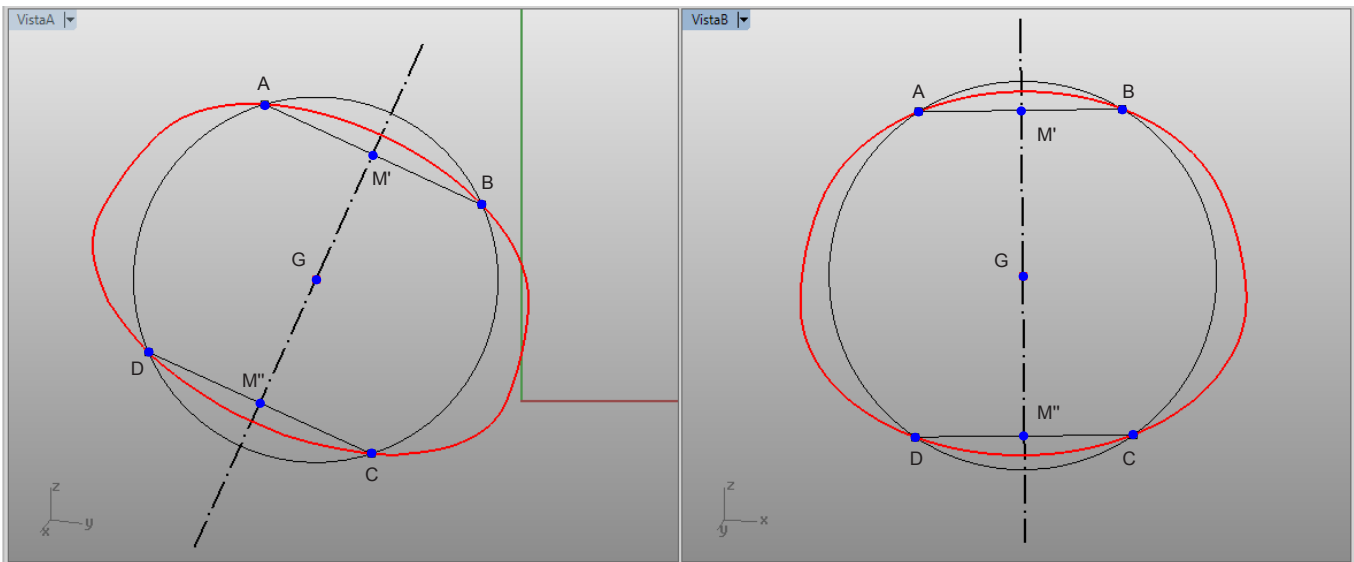
partire da metà della superficie acquisita.

Per poter meglio svolgere le operazioni di Reverse Modeling, diventa necessario trovare gli assi di rivoluzione delle cover, che sono rappresentabili con superfici di rivoluzione. Per questo motivo si suddivide l'intera mesh della cornetta lungo i luoghi di congiunzione con le cover isolandole; così facendo si possono adottare i metodi utili alla ricerca dei rispettivi assi di rivoluzione e delle curve generatrici. Nell'isolare le parti attraverso l'eliminazione delle facce della mesh lungo i luoghi di giuntura, si generano dei bordi seghettati che potrebbero inficiare sulla bontà delle operazioni successive, per questo si dovranno ricostruire i bordi in maniera netta, attraverso operazioni di allentamento della mesh e rifinitura dei bordi.

Si isolano le parti per procedere su di esse con il metodo della doppia proiezione, approfondito nel terzo capitolo. In fig. 4.42 notiamo che i piani su cui proiettare ortogonalmente la nuvola sono collocati in posizioni reciproche casuali, e non in maniera perpendicolare. La scelta è legata all'opportunità di avere direzioni di proiezioni orientate in maniera da non permettere la visione di parti problematiche della mesh (fig. 4.43).

4.43\_ Le due viste, scelte da chi opera, pongono la mesh in modo da poter disegnare il miglior contorno apparente possibile.



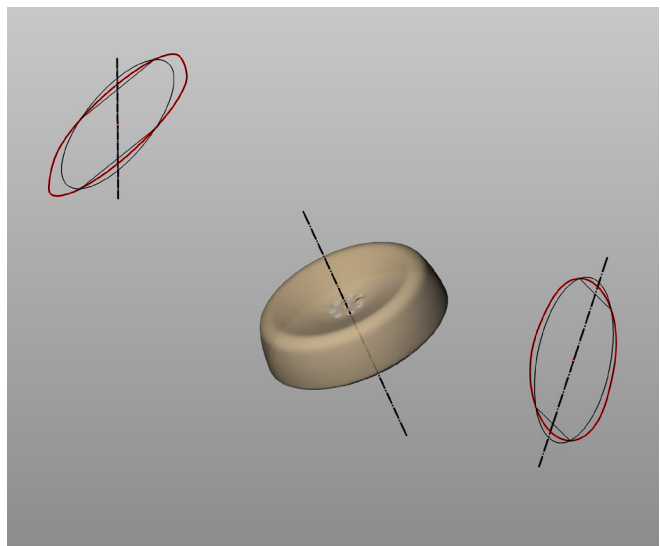


4.44\_ Costruzione degli assi di simmetria delle due proiezioni della cover disposta nello spazio.

In figura 4.44 vediamo in rosso i due contorni apparenti della cover, prendiamo in considerazione il profilo di destra. Una volta individuato il baricentro **G** della proiezione, costruiamo il cerchio il cui diametro intercetta il profilo in **A**, **B**, **C**, **D**. Costruiamo i due segmenti **AB** e **DC** evidenziando i punti medi **M'** ed **M''**. E' evidente che l'asse passante per i due punti medi è l'asse di simmetria della figura che rappresenta il contorno apparente della cover. Ad ulteriore conferma notiamo che l'asse intercetta il baricentro **G**. Ripetiamo la stessa procedura anche per l'altro contorno apparente, ottenendo il suo asse di simmetria.

Abbiamo trovato, in maniera indiretta, le proiezioni dell'asse di rivoluzione disposto nello spazio digitale. In maniera inversa sarà quindi possibile disegnarlo nello spazio (fig. 4.45). La costruzione illustrata è valida sia per la cover del ricevitore che per quella del trasmettitore. Adesso abbiamo tutte le geometrie strutturanti utili all'orientamento ed il supporto delle rappresentazioni, ma soprattutto elementi validi per la procedura di Reverse Modeling. Con queste geometrie si procederà alla rappresentazione matematica dell'intera cornetta.

4.45\_ Gli assi di simmetria costruiti sulle figure piane consentono di determinare l'asse di rivoluzione della cover.



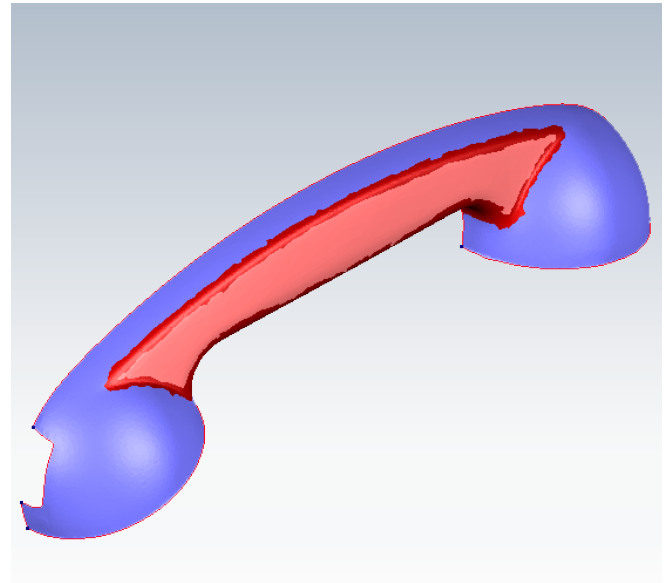
#### 4.6 Secondo caso studio: operazioni di Reverse Modeling

La rappresentazione matematica della cornetta è avvenuta in tre fasi, in relazione alle diverse parti da rappresentare. La distinzione delle parti si effettua attraverso il riconoscimento delle linee di carattere in grado di segnare il confine tra una superficie primaria e un'altra limitrofa.

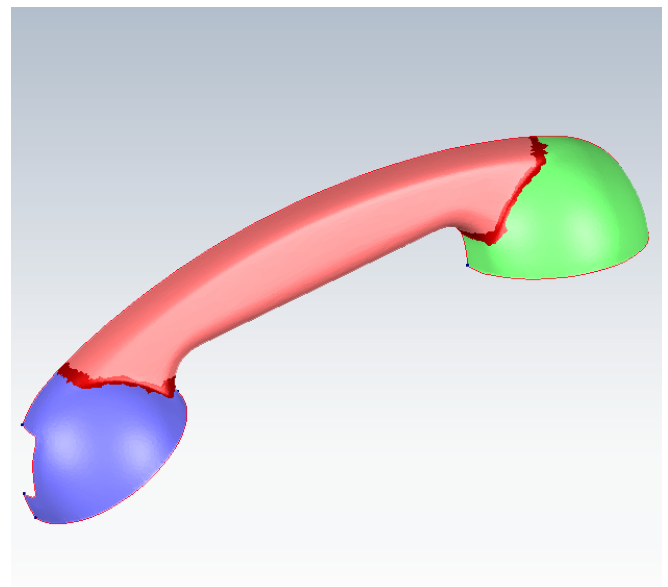
Il software Geomagic Studio supporta l'operatore nell'individuazione delle aree a forte curvatura che caratterizzano la presenza delle curve di carattere. L'automatizzazione del processo ha portato a situazioni non adeguate all'obiettivo preposto, cioè di rappresentare l'intera impugnatura con una sola superficie quadrilatera. Infatti in fig. 4.46 si nota la presenza di più isole ed una non chiara distinzione del confine che si vuole interporre tra impugnatura e calotte. Si passa quindi, attraverso operazioni manuali, alla correzione dei confini delle isole al fine di tripartire la semiscocca della cornetta. Solo adesso è possibile isolare l'impugnatura per un processo di costruzione delle pezze ordinate (fig. 4.47).

Si nota che la mesh dell'impugnatura è costituita da quattro bordi, per cui matematicamente rappresentabile attraverso un'unica superficie Nurbs. L'applicazione diretta dell'autosurfacing non consente di ottenere la giusta qualità della superficie continua, provvisto di un valido numero di punti di controllo. Quindi la superficie viene frazionata in più patch, forti di un adeguato numero di isoparametriche.

Il numero di patch deve essere, come specificato nella precedente esperienza, pari e disposto su una griglia ordinata ricavata dalla mesh (fig. 4.48). La serie di accorgimenti adottati consente di creare superfici in continuità di curvatura all'interno della regione indicante la superficie primaria; questo permette di fondere le parti in un'unica superficie rappresentante tutta l'impugnatura (fig. 4.49). La fusione ha come conseguenza la cattiva distribuzione delle curve isoparametriche in prossimità di quelli che erano i bordi delle superfici parziali, di conseguenza per ottenere un poliedro di controllo ordinato e non eccessivamente ricco di punti, è necessario ricostruire la superficie con software predisposti alla modellazione matematica (fig. 4.50). In questa ricerca, le incombenze matematiche sono state

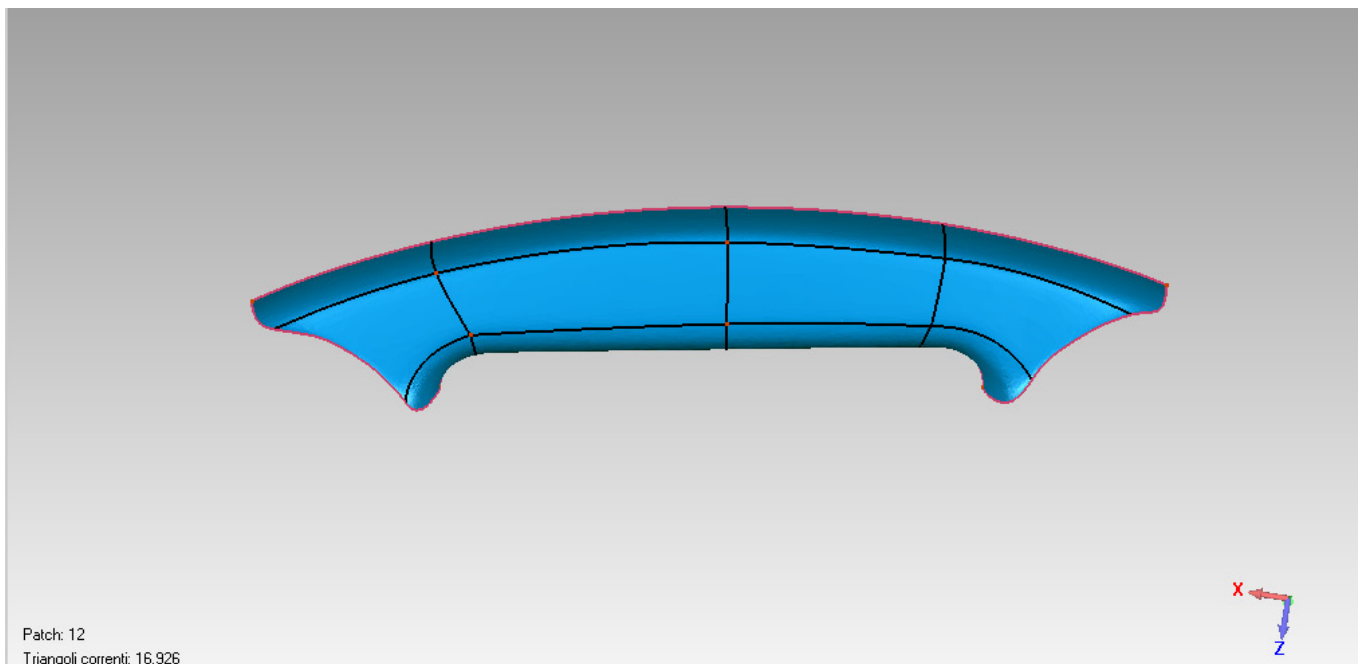


4.46\_ Individuazione automatica della curvatura per la costruzione delle curve di taglio (soluzione errata).

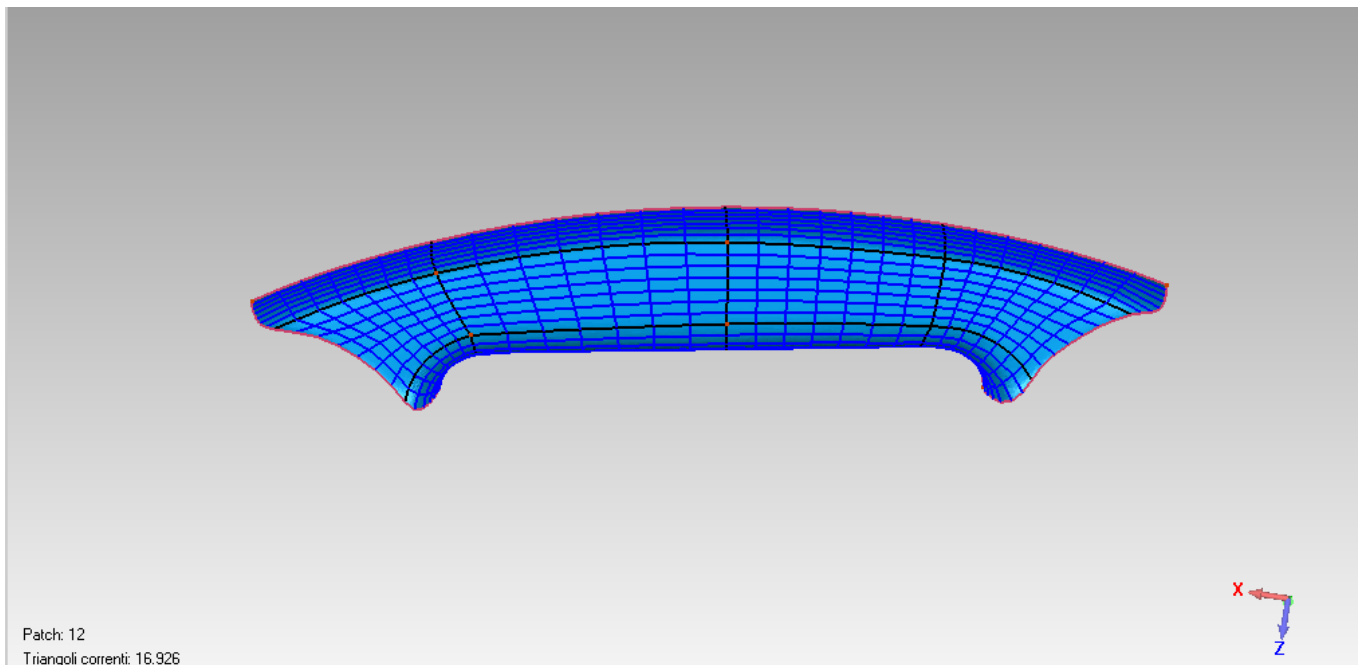


4.47\_ Individuazione manuale della curvatura per la costruzione delle curve di taglio (soluzione corretta).

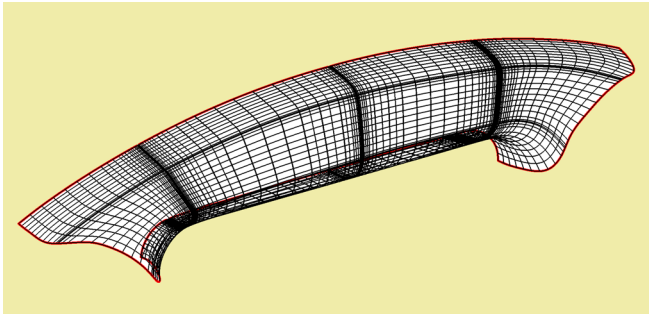




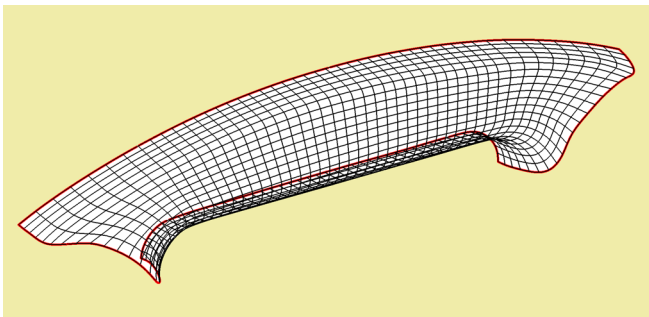
4.48\_ Disegno dei bordi delle patch sulla mesh dell'impugnatura. La griglia costituita dai bordi determina un pari numero di regioni.



4.49\_ Le isoparametriche devono essere disposte in maniera ordinata ed in continuità con quelle delle patch limitrofe per poterle fondere.



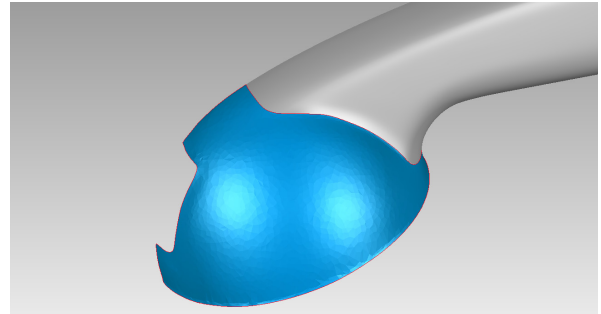
4.50\_ Risposta delle isoparametriche all'operazione di fusione.



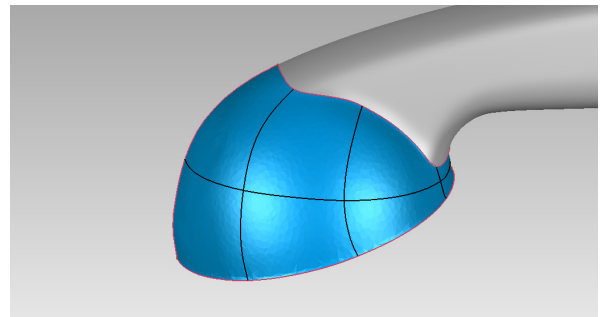
4.51\_ Disegno delle isoparametriche a seguito della ricostruzione.

gestite principalmente con il software Rhinoceros, della McNeel & Associates, gruppo di Seattle (U.S.A.). Ricostruire una superficie significa operare sul grado delle isoparametriche e sul numero di punti di controllo (fig. 4.51). Il grado è funzionale alla qualità di superficie che si vuole creare, mentre il numero di punti di controllo è legato al bilanciamento tra possibilità di trasformazione e aderenza alla mesh iniziale. Essendo questa operazione di Reverse Modeling, legata alla reintroduzione del modello nel ciclo progettuale, siamo autorizzati ad essere meno accurati verso la superficie poliedrica e più accorti nella ricostruzione delle superfici matematiche create, per renderle adeguate a future modifiche.

Le calotte contenenti ricevitore e trasmettitore, esigono una maggiore attenzione nella loro conversione matematica; parleremo solo della calotta del ricevitore che racchiude un maggior numero di problematiche. Notiamo infatti che la superficie è rotta dall'innesto di un elemento



4.52\_ Mesh isolata da elementi di ambiguità per il RM



4.53\_ Disegno della rete di curve di appoggio alla ricostruzione.

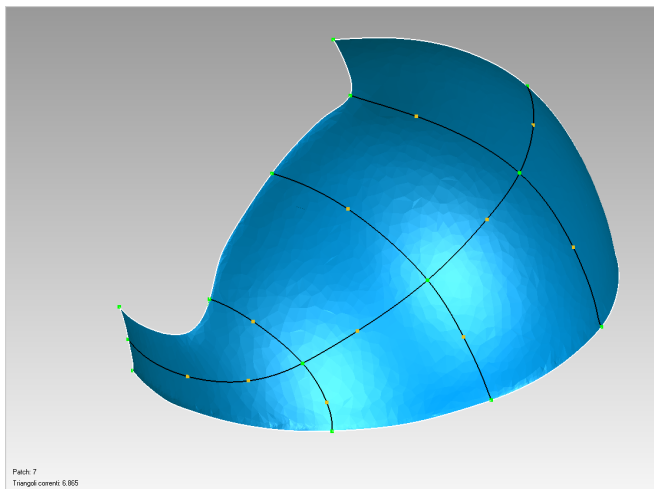
incastrato alla superficie in oggetto la cui funzione è agevolare l'uscita del cavo che connette la cornetta al corpo principale dell'S62.

La superficie poliedrica non trova soluzione di continuità, rappresentando i due elementi con un'unica mesh. Ovviamente l'innesto deve essere isolato dalla semi calotta, poichè propone un certo grado di complessità per la rappresentazione matematica; la semi calotta presenta quindi due tagli: quello proposto dall'isolamento dell'innesto e il taglio frutto della separazione con l'impugnatura precedentemente trattata (fig. 4.52).

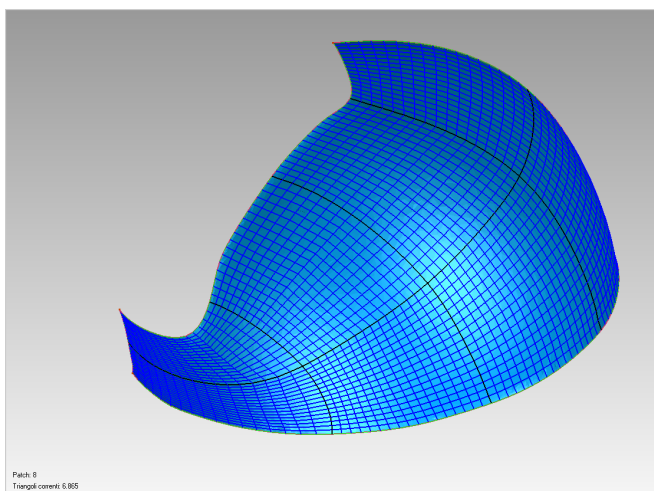
L'obiettivo è quello di parcellizzare il poliedro in porzioni quadrilatera e ciò avviene solo in seguito ad alcune riflessioni: osservando la cornetta reale, vediamo come l'innesto va ad interrompere la superficie della calotta operando un vero e proprio segno di discontinuità, un taglio sull'involucro del ricevitore. Pensando a questa come una superficie tagliata, è lecito riempire la parte di poliedro evirata dell'innesto (fig. 4.53). Così facendo, si agevola

la costruzione delle patch quadrilatere operando in seguito, sulla superficie matematica, il taglio in cui alloggiare l'innesto del cavo, in coerenza con la superficie reale. I software di gestione delle mesh, consentono di chiudere fori inserendo nuove parti in continuità con il poliedro che circonda il bordo del foro.

In figura 4.54 vediamo come si disegna la griglia di pez-



4.54\_ Disegno corretto delle curve che ripartiscono la mesh in porzioni quadrilatere di numero pari.

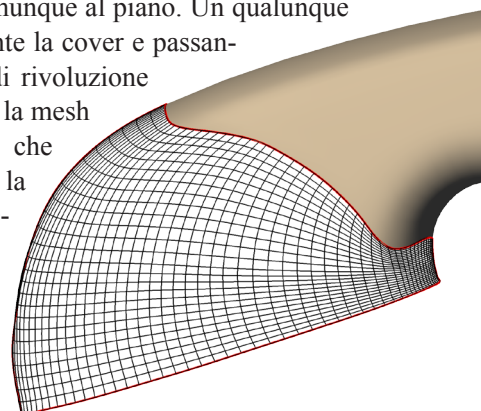


4.55\_ Costruzione delle isoparametriche del modello Nurbs per la porzione di calotta da rappresentare matematicamente.

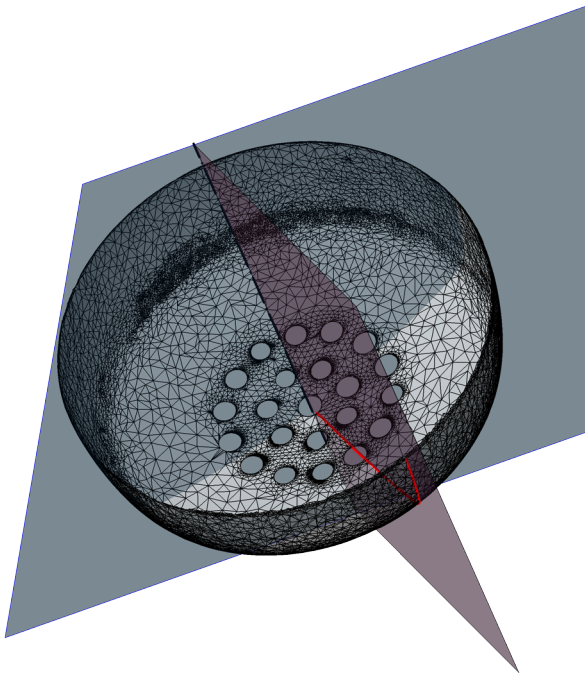
ze quadrilatere per ottenere una buona disposizione delle isoparametriche ed agevolare la successiva operazione di fusione, mirata a creare un'unica superficie Nurbs per la semi calotta del ricevitore (fig. 4.55, fig. 4.56). In maniera analoga, ma senza problemi di tagli, si procede per la rappresentazione dell'altra semi calotta, involucro del trasmettitore.

La rappresentazione delle cover è frutto di rigorose considerazioni, riguardo la possibilità di rimozione attraverso un sistema filettato. Quindi l'esigenza è strutturare il modello matematico rispettando i canoni che regolano una superficie di rivoluzione, diversamente da quanto si è fatto per le altre porzioni di cornetta. La superficie continua proporrà una delle due direzioni parametriche pari a 2, con una variazione dei pesi dei punti di controllo utili a creare, lungo questa direzione parametrica, delle sezioni circolari Nurbs. L'altra direzione parametrica sarà di grado 3, funzionale alla complessità della generatrice ricavata dalla mesh della cover. In base a questa breve spiegazione sono due gli elementi utili per la rappresentazione matematica dei modelli poliedrici in esame: l'asse di rivoluzione e la curva generatrice referenziata rispetto all'asse. Con il metodo della doppia proiezione sono stati già ricavati i due assi di rivoluzione relativi alle due cover e questi appartengono anche al piano di simmetria.

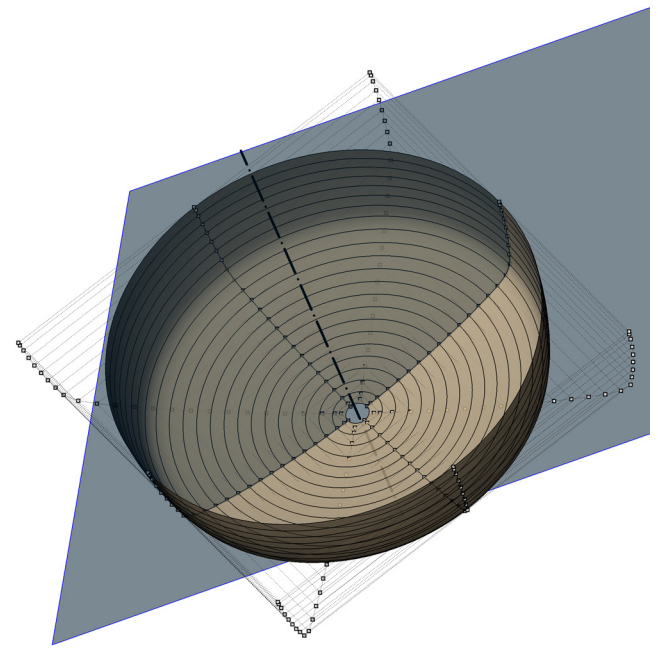
Adesso osserviamo la fig. 4.57. In essa possiamo vedere l'oggetto da rappresentare matematicamente, il piano di simmetria dell'intera cornetta e l'asse di rivoluzione appartenente comunque al piano. Un qualunque piano sezionante la cover e passante per l'asse di rivoluzione costruisce con la mesh una polilinea che discretizza la curva generatrice; della stella di piani, per comodità prendiamo quello per-



4.56\_ Rappresentazione matematica frutto delle operazioni di fusione e ricostruzione della pezza Nurbs.



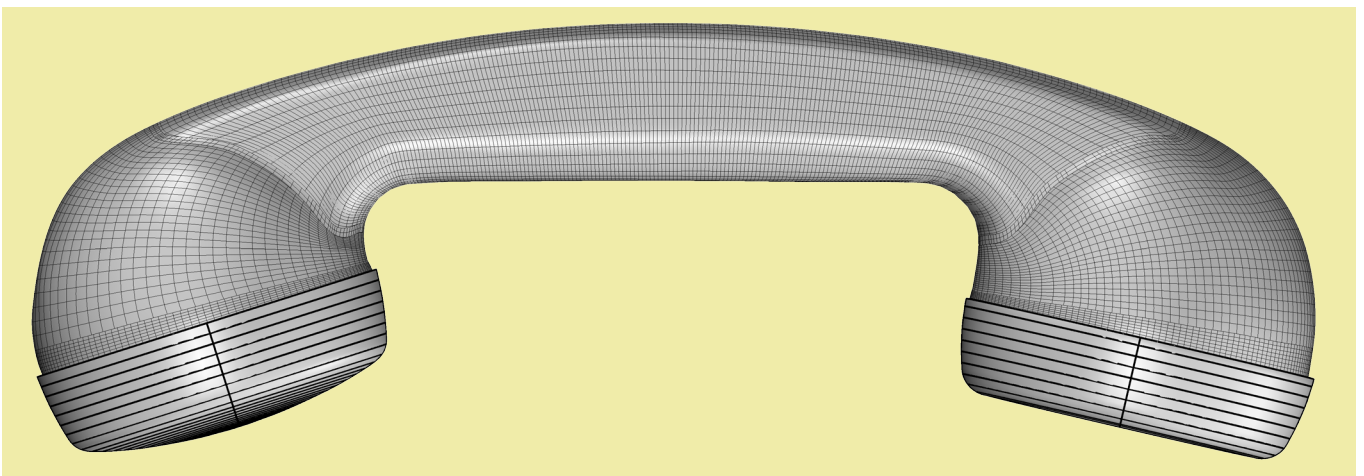
4.57\_ Il piano radiale, passante per l'asse, consente la determinazione del profilo da porre in rivoluzione.



4.58\_ Ricostruita la curva generatrice e posta in rivoluzione intorno l'asse di simmetria, otteniamo la superficie matematica della cover.

pendicolare al piano di simmetria. Volendo creare una superficie di rivoluzione a 360°, trinchiamo la polilinea in intersezione sull'asse di rivoluzione. La polilinea composta da porzioni di curva di grado uno, deve essere interamente ricostruita in un grado adeguato alla complessità della curva e agli obiettivi per cui il Reverse Modeling è effettuato. In questo caso è sufficiente una curva unica di terzo

grado, da porre in rivoluzione intorno all'asse (fig. 4.58). Abbiamo terminato con la cover le operazioni principali di Reverse Modeling riguardanti la cornetta. Questo modello è passibile di confronto e trasformazioni, quindi utile anche alla riprogettazione del pezzo (4.59).



4.59\_ Modello matematico della cornetta frutto delle operazioni di Reverse Modeling.

Note:

1. G. Guidi, M. Russo, J. -A. Beraldin «Acquisizione 3D e modellazione poligonale», Milano, McGraw-Hill, 2010.
2. Sito ufficiale Konica Minolta, scanner 3D serie Range 7:  
<http://sensing.konicaminolta.us/products/range-7-3d-laser-scanner/>.
3. N. J. Mitra, L. J. Guibas, M. Pauly, «Partial and Approximate Symmetry Detection for 3D Geometry», in 33rd International Conference and Exhibition on Computer Graphics and Interactive Techniques SIGGRAPH2006, Boston, 2006.





## 5. Conclusioni: dal modello fisico al modello matematico

### 5.1 Le ragioni del prototipo per il designer

Le procedure di Reverse Modeling, come è stato dichiarato in apertura del precedente capitolo, sono state effettuate su oggetti esistenti, ponendo la ricerca nella posizione di dover produrre elaborati digitali di modelli reali esistenti. Atteggiamento generalmente messo in atto quando si vuole rinnovare un prodotto esistente, di cui non si possiedono elaborati di progetto su cui lavorare.

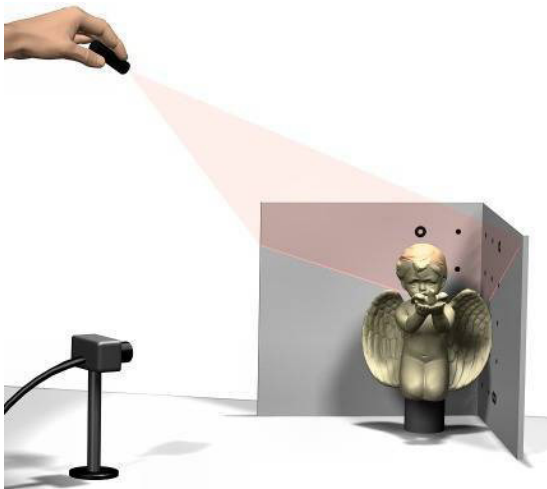
Questa ricerca, diversamente, vuole riportare in auge il ruolo del prototipo all'interno del percorso progettuale del designer, ruolo dequalificato con l'avvento dell'era digitale (Capitolo 1), motivo per cui in questo capitolo conclusivo, gli ingredienti precedentemente trattati verranno nuovamente ripresi nell'ordine che esige il percorso ideativo, evidenziando l'importante contributo che il modello fisico esprime all'interno del flusso progettuale (fig. 5.01).

Avendo compreso l'importanza del modello fisico per il designer, ci rendiamo conto come questa ricerca vuole alimentare il dialogo serrato tra prototipo e modello mentale, attraverso un confronto diretto tra le modifiche effettuate sul prototipo ed un suo immediato riscontro con il modello matematico creato in fase progettuale. Come è stato ampiamente spiegato nel primo capitolo, il ciclo ideativo ha sempre trovato un importante elemento di valutazione nel modello fisico, unica rappresentazione tangibile dell'idea. Pur se rappresentato fisicamente, quello che otteniamo dal prototipatore è comunque un'immagine che tende alla rappresentazione del modello mentale. In questa fase è ammessa la modifica che, all'interno del ciclo ideativo, assume valore aggiunto in quanto frutto di azione tangibile. Se nell'era pre-informatica il prototipo era collocato a monte della fase produttiva, oggi quel ruolo nodale è stato preso dal modello CAD; lo spazio digitale è il luogo in cui il modello viene selezionato: se l'idea è matura, passa alla produzione, altrimenti si effettuano ulteriori modifiche mirate ad una possibile concretizzazione del modello



5.01\_ Dialogo tra designer e prototipo.





5.02\_ *Acquisizione 3D effettuata con webcam e puntatore laser.*

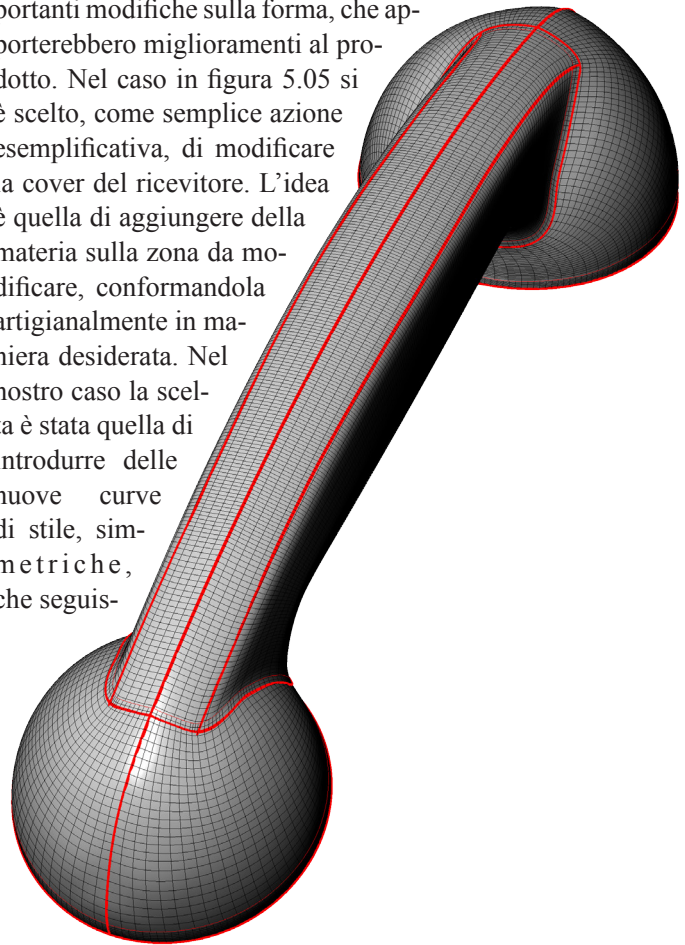
mentale. La ricerca vuole ridurre la distanza tra modello matematico e prototipo, innescando uno stretto dialogo tra le due immagini per mezzo di un rapido e controllato processo di Reverse Modeling.

Si comincia con l'acquisizione della forma attraverso un qualunque strumento di rilievo in grado di generare la nuvola di punti (fig. 5.02). Pur avendo utilizzato, nella serie di esperienze presentate, uno scanner tridimensionale ad alta prestazione, ci rendiamo conto che il fattore strumentale è una condizione sufficiente ma non necessaria a garantire l'esito dell'esperienza. Siamo nell'ambito dell'ideazione della forma, luogo in cui l'accuratezza non ha termini di paragone avendo come elemento di confronto il modello mentale, esente da misura per sua natura, ma fortemente caratterizzato da proporzioni e qualità geometriche. Il dato numerico acquisito rappresenta il prototipo modificato, da porre in relazione alla rappresentazione matematica dell'oggetto originariamente prototipato. L'indagine dei problemi, i metodi e le tecniche di conversione della rappresentazione numerica nella rappresentazione matematica, aiutano a trovare un ponte tra le due rappresentazioni in modo da mettere in evidenza le parti modificate ed affrontando il Reverse Modeling solo della parte utile ad aggiornare il modello matematico. Il ponte è dato dalle geometrie strutturanti che caratterizzano il prodotto nella sua genesi progettuale; le stesse modifiche locali avvengono senza trascurarne la presenza, e per questo, considerarle come caratteristiche per l'allineamento, significa creare un solido rapporto tra modello reale e modello matematico.

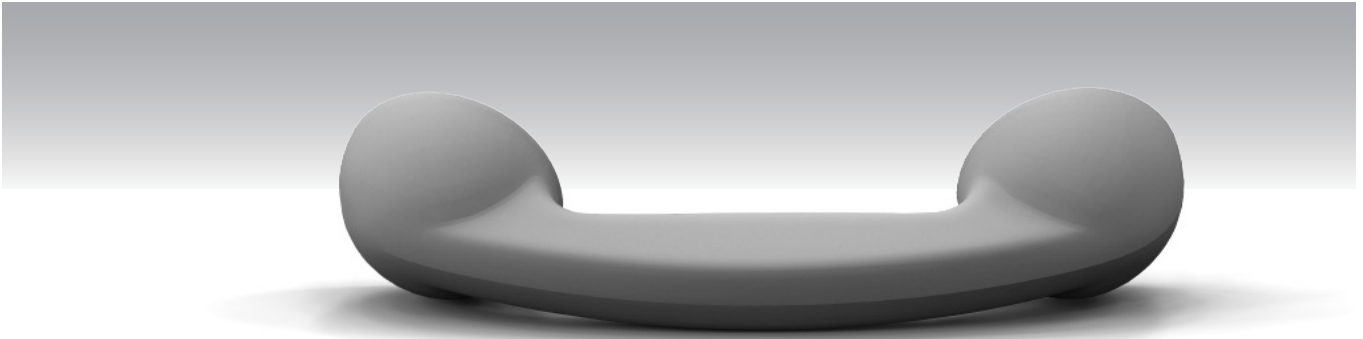
## 5.2 Il percorso del progetto di design

In figura 5.03 è rappresentato il modello della cornetta di cui stiamo progettando la forma; essendo un modello matematico ideato da noi, riconosciamo la presenza e la posizione delle geometrie strutturanti e delle curve di carattere da noi disegnate. Adesso ne vogliamo valutare l'ergonomia, la relazione della forma con il contesto attraverso la stampa del modello fisico. Un'apposita macchina prototipatrice, quale potrebbe essere una stampante 3D, crea il modello fisico (fig. 5.04) a partire dalla tassellazione del modello progettato.

Maneggiando il prototipo ci rendiamo conto di alcune importanti modifiche sulla forma, che apporterebbero miglioramenti al prodotto. Nel caso in figura 5.05 si è scelta, come semplice azione esemplificativa, di modificare la cover del ricevitore. L'idea è quella di aggiungere della materia sulla zona da modificare, conformandola artigianalmente in maniera desiderata. Nel nostro caso la scelta è stata quella di introdurre delle nuove curve di stile, simmetriche, che seguis-



5.03\_ *Rappresentazione matematica del modello di progetto della cornetta.*



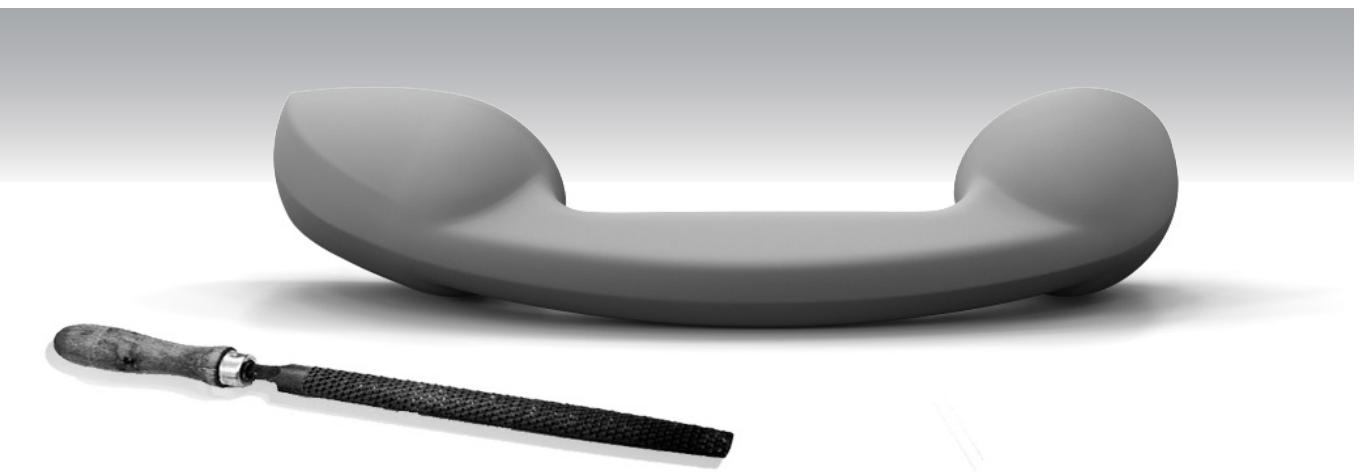
5.04\_ Modello fisico della cornetta progettata, realizzato per mezzo di una stampante 3D. Il prototipo verrà sottoposto a modifiche artigianali.

sero l'andamento dell'impugnatura in maniera armonica. Quest'azione, come si è detto, è di carattere del tutto artigianale ed espressiva, legata a delle considerazioni sulla forma e sulle sue proprietà simmetriche dell'oggetto. Le due nuove curve speculari articolano la forma solo su una parte della cornetta, senza influenzare il resto del prodotto, imponendo comunque l'aggiornamento del modello matematico originario, per consentire la costruzione degli stampi di produzione.

Anche attraverso semplici strumentazioni per l'acquisizione della forma, rileviamo l'oggetto modificato che, come appurato nelle esperienze precedenti, a seguito delle operazioni di filtraggio, editing e fusione, assume un orientamento nello spazio digitale non concorde a quello del

modello matematico di progetto.

Il modello numerico ottenuto, differirà dal modello matematico non solo nell'orientamento, ma anche nelle modifiche effettuate sul prototipo. Le operazioni di Reverse Modeling saranno fatte esclusivamente sulla parte di modello numerico modificato. Allineiamo le due rappresentazioni che in comune hanno la forma di buona parte del modello ed il piano di simmetria. Il modello matematico della cornetta, essendo un modello progettato, possiede il piano di simmetria chiaramente identificato; il modello numerico, essendo frutto di acquisizione, non ha storia di costruzione, quindi priva di primitive di riferimento con cui effettuare l'orientamento della cornetta modificata. L'assenza di spigoli, come dichiarato nel testo, non consente di ag-



5.05\_ Prototipo modificato artigianalmente per ottenere la variazione della forma di una delle due cover. La modifica deve essere digitalizzata.

ganciare una superficie all'altra; il piano di simmetria è l'unica caratteristica geometrica che può essere utilizzata per orientare la mesh con la rappresentazione matematica. La priorità è determinare il piano di simmetria della rappresentazione poliedrica della cornetta modificata.

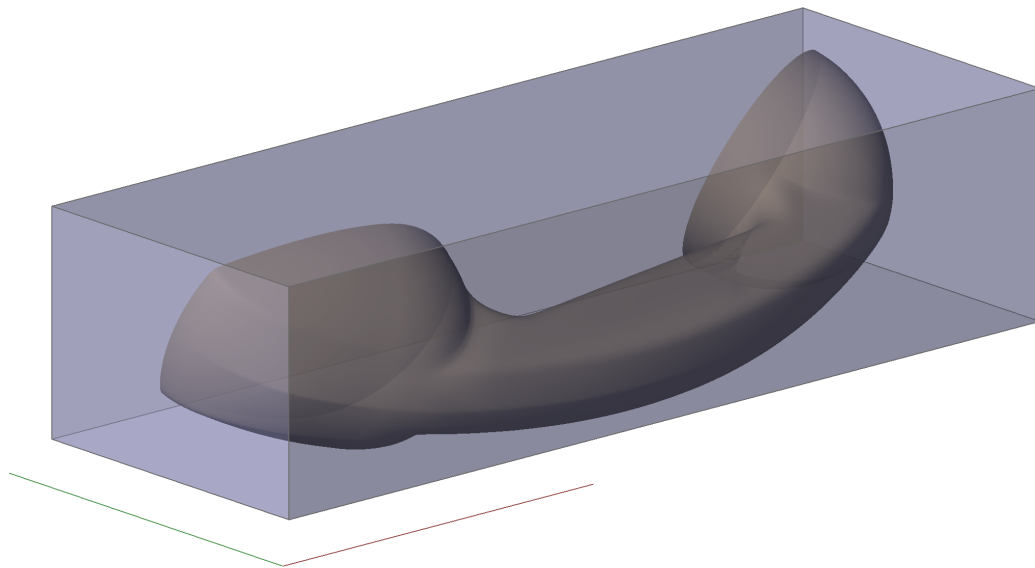
Potremmo identificare le geometrie strutturanti con il metodo della sfera, com'è stato ampiamente sperimentato nei casi di studio precedentemente affrontati; soluzione puramente geometrica che consente di affrontare il problema in maniera ragionata e consapevole. Le stesse geometrie si possono trovare mediante la determinazione automatica del piano di simmetria da parte di software specializzati nella "modellazione inversa": operazioni di geometria computazionali sempre valide, risolvono il problema del piano di simmetria e dell'asse di rivoluzione, pur non consentendo di apprezzare le qualità geometriche dell'oggetto che sottendono l'essenza della forma.

In questa ricerca si è cercato di privilegiare l'aspetto geometrico, che porta alla consapevolezza della forma, ma contemporaneamente non si vuole rinunciare agli ausili computazionali che esaltano l'intuizione geometrica e velocizzano il processo conoscitivo dell'oggetto.

### 5.3 Un altro metodo risolutivo

L'esperienza ha portato, in questo caso, all'utilizzo della piattaforma software Grasshopper della Mcneel, plug-in di Rhinoceros<sup>1</sup>. Il software consente di progettare relazioni tra i dati geometrici innescando rapporti parametrici variabili, mediante la concatenazione di componenti geometriche e componenti puramente computazionali. Si creano apposite definizioni con cui organizzare dati di diversa natura, facendoli confluire verso valori scelti. È interessante capire questo concetto inserendolo come strumento risolutivo a questo punto della trattazione.

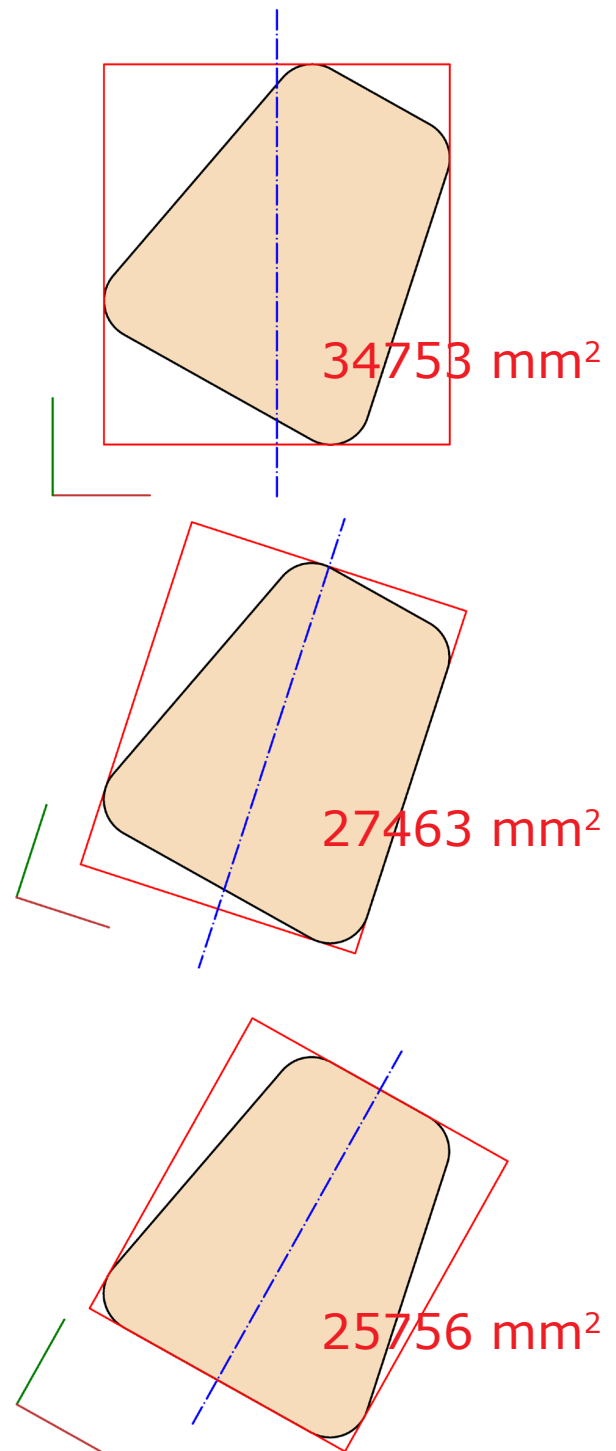
Riprendiamo un argomento trattato nel capitolo 3, dove si introduceva il concetto di "box ausiliario", intendendo quel parallelepipedo capace di sintetizzare le geometrie strutturanti del modello analizzato contenuto al suo interno. Nei casi presi in esame, la forma chiara della gamba del tavolo rappresentata numericamente, consentiva di orientare il parallelepipedo in maniera tale che i piani di simmetria di quest'ultimo, coincidessero con quelle del prodotto acquisito. Nella generalità dei casi, la costruzione del "bounding box", termine inglese con cui i software chiamano



5.06\_ Costruzione automatica del parallelepipedo limite (bounding box). Per costruzione si posiziona in maniera coordinata rispetto alla terna triortogonale.

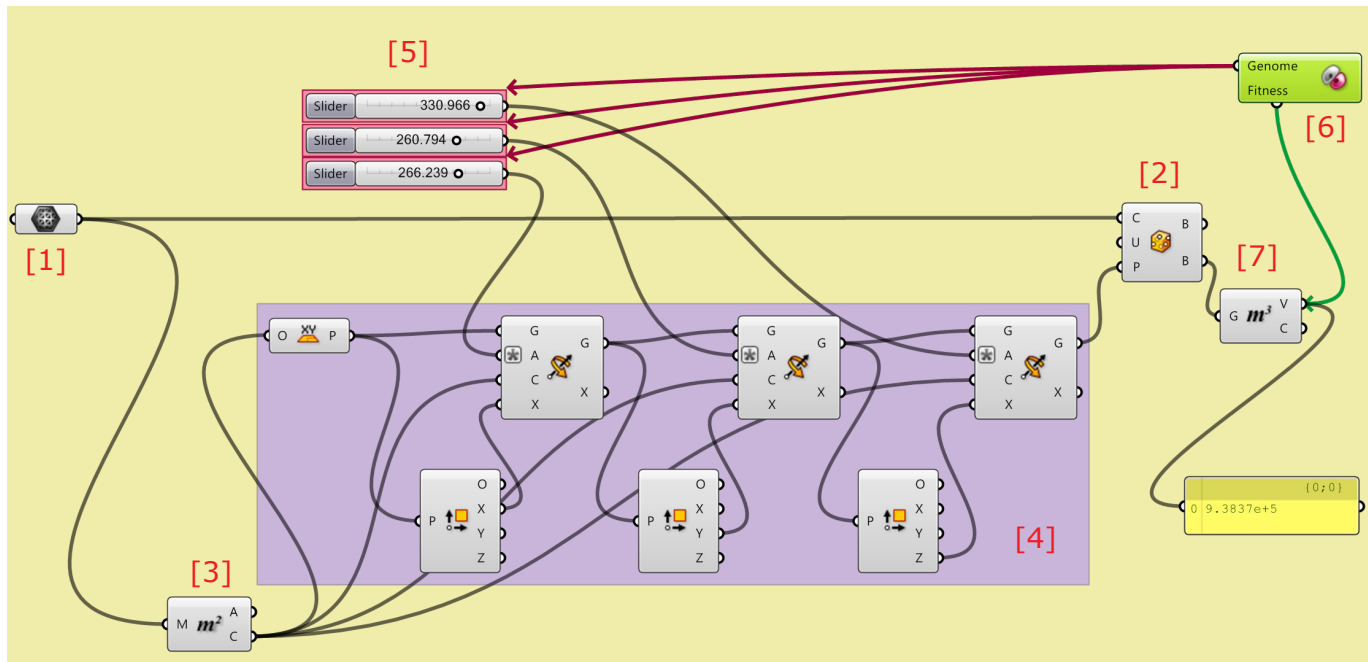
il parallelepipedo limite, non è un'operazione immediata. Infatti, lo strumento informatico, per sua natura limitato, costruisce il bounding box con le facce sempre parallele ai piani coordinati di costruzione. Una soluzione di questo tipo, per la nostra cornetta, da luogo ad un poliedro completamente inadeguata agli obiettivi prefissati poiché identifica delle geometrie strutturanti non in aderenza con quelle della cornetta analizzata (fig. 5.06). La variabile su cui operare è la posizione del piano di costruzione, ma per far ciò è necessario relazionare la variabile alla condizione limite che si vuole raggiungere, quella che permette di ottenere il più adeguato bounding box per il quale uno dei piani di simmetria è coincidente con quello della cornetta.

In figura 5.07, attraverso un disegno esemplificativo bidimensionale, sono presentate alcune riflessioni riguardanti la ricerca del miglior rettangolo limite, per il quale l'asse di simmetria è coincidente con l'asse di simmetria della figura inscritta. In queste immagini è proposta la semplificazione sul piano del problema nello spazio. La prima immagine in alto, mostra la forma casualmente posizionata rispetto ad un sistema di assi cartesiani dove l'asse  $x$  è rosso e l'asse  $y$  è verde. Il rettangolo limite si pone, per costruzione, parallelamente agli assi coordinati identificando una superficie interna di pertinenza. Leggiamo l'area del poligono il cui valore deve essere preso esclusivamente come indice di paragone, che risulta pari a  $34756 \text{ mm}^2$ . La seconda immagine vede il sistema cartesiano ruotato intorno all'origine, permettendo al rettangolo limite di far aderire il suo lato lungo al lato destro del trapezio inscritto. Leggiamo nuovamente l'area del poligono rosso e ci rendiamo conto che il valore è diminuito a  $27463 \text{ mm}^2$ . Nell'ultima immagine in basso, abbiamo ulteriormente ruotato il sistema cartesiano in modo da avere l'asse  $x$  parallelo alla base del trapezio inscritto. Il rettangolo limite che si forma, è quello da noi cercato, in quanto il suo asse di simmetria, coincide con l'asse di simmetria del trapezio. L'area del poligono ottenuto è di  $25757 \text{ mm}^2$ , la più piccola sino ad ora rilevata. Ma continuando a ruotare il sistema cartesiano, notiamo che il valore numerico riprende a crescere, di conseguenza la condizione di rettangolo limite con area più piccola in assoluto, è quella che soddisfa le nostre esigenze. Trasponendo la soluzione nello spazio di-



5.07\_ Serie di disegni che mettono in evidenza la relazione tra rettangolo d'ingombro, suo asse di simmetria e oggetto inscritto.

5.08\_ Definizione parametrica dell'algoritmo in grado di trovare automaticamente il parallelepipedo limite di minor ingombro, che garantisce la corretta posizione del piano di simmetria del modello numerico.



gitale, possiamo affermare con certezza, che nel caso della cornetta modificata, il bounding box migliore sarà quello con volume minimo.

La variabile sulla quale operare è quindi l'orientamento del piano di costruzione; l'obiettivo da perseguire è il minimo ingombro del bounding box. Possiamo sfruttare lo strumento Grasshopper, per creare una definizione che metta insieme condizioni geometriche e condizioni computazionali, per la ricerca dell'orientamento del piano che determini il minor volume. Il software adoperato è un visual scripting, quindi un linguaggio di programmazione per componenti preimpostate: in figura 5.08 vediamo la definizione con la quale ottenere il risultato desiderato.

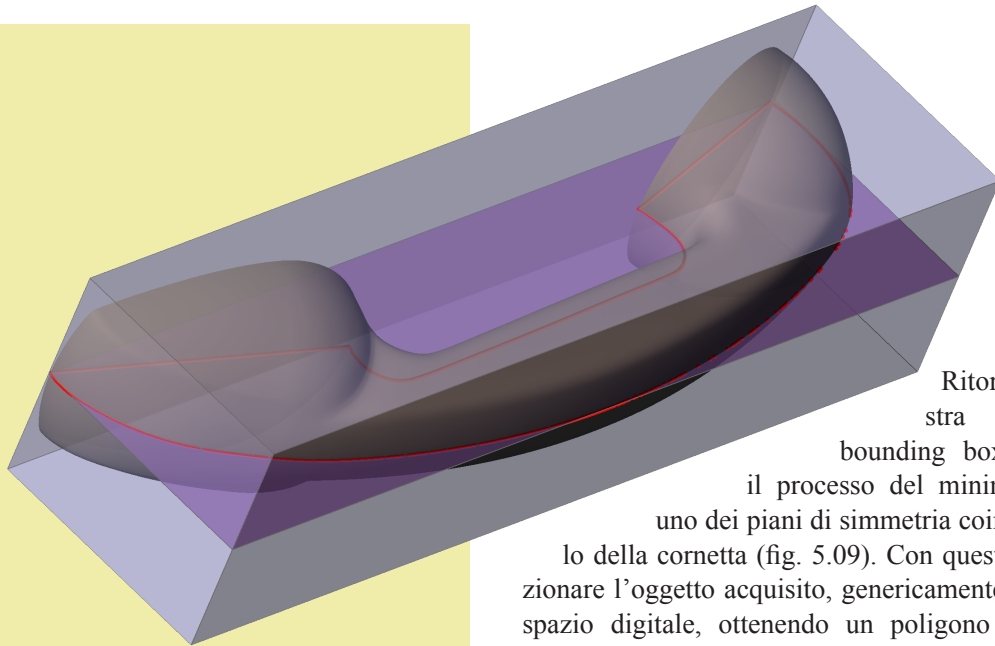
Il parametro di partenza è la rappresentazione numerica della cornetta (1), intorno a questo si costruirà il bounding box (2) ovviamente orientato in relazione al piano di costruzione corrente. Identifichiamo per comodità l'origine del piano di costruzione nel baricentro della mesh (3) e

costruiamo una definizione che consenta al piano di ruotare liberamente nello spazio, concedendo come gradi di libertà le tre rotazioni principali (4). Gli sliders (5) identificano i range di rotazione intorno ai tre assi coordinati e vanno da zero a trecentosessanta gradi, l'intero angolo giro. Solo adesso si introdurrà la componente computazionale (6), collegata agli sliders e ad un lettore di volume (7) del bounding box. La componente (6), innesca un processo iterativo in cui vengono variati i valori degli sliders e volta per volta, vengono letti i volumi<sup>2</sup>. Andando avanti con la reiterazione i valori dei parametri variabili (5) vengono posizionati nell'intorno di quei dati che forniscono il volume più basso, dando vita ad un processo asintotico che sempre più si avvicina al valore ottimale del parallelepipedo di ingombro minimo. Il percorso, essendo asintotico, non ha termine, ma grazie alla tolleranza posseduta dal software, superato un certo valore di precisione, il dato ottenuto sarà considerato esatto.

Il processo descritto, non è sempre valido, ed è fortemente

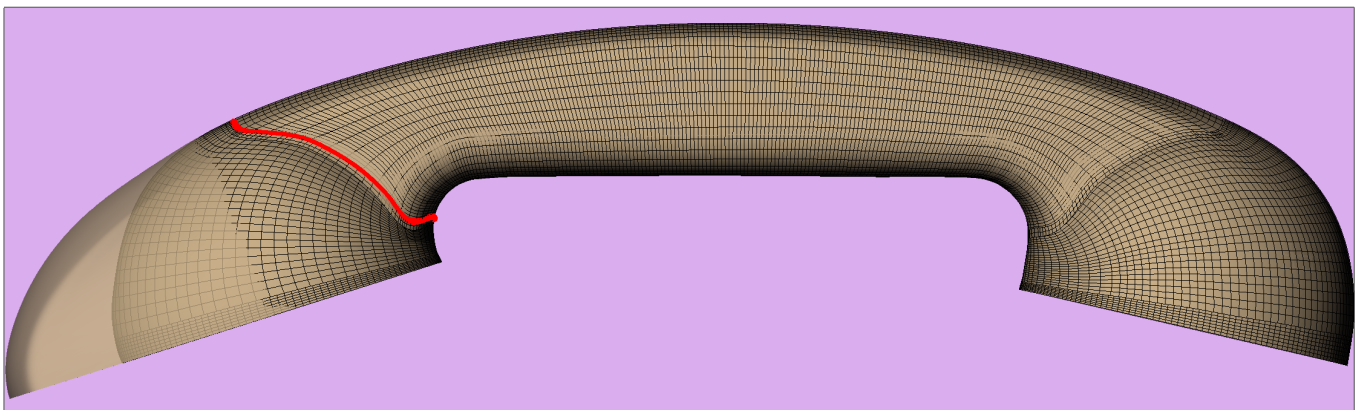
5.09\_ (sopra) Corretta posizione del parallelepipedo limite per il quale il piano di simmetria coincide con quello del modello numerico.

5.10\_ (sotto) Confronto del modello numerico modificato, con il modello matematico progettato per l'individuazione delle parti da aggiornare.



Ritornando alla nostra esperienza, il bounding box ottenuto con il processo del minimo volume, ha uno dei piani di simmetria coincidente a quello della cornetta (fig. 5.09). Con questo possiamo sezionare l'oggetto acquisito, genericamente disposto nello spazio digitale, ottenendo un poligono d'intersezione, rappresentante in maniera discreta il profilo della cornetta artigianalmente modificata. La stessa cosa sarà fatta con la rappresentazione matematica di progetto, identificando la curva sezione del modello originale. Avendo i due profili ed i piani di simmetria dell'uno e dell'altro modello, questi si possono sovrapporre identificando le zone difformi (fig. 5.10). Adesso dobbiamo isolare la porzione di poliedro che raccoglie le modifiche fatte sul prototipo e per questo è utile appoggiarsi ad un progetto di pezzatura. In base

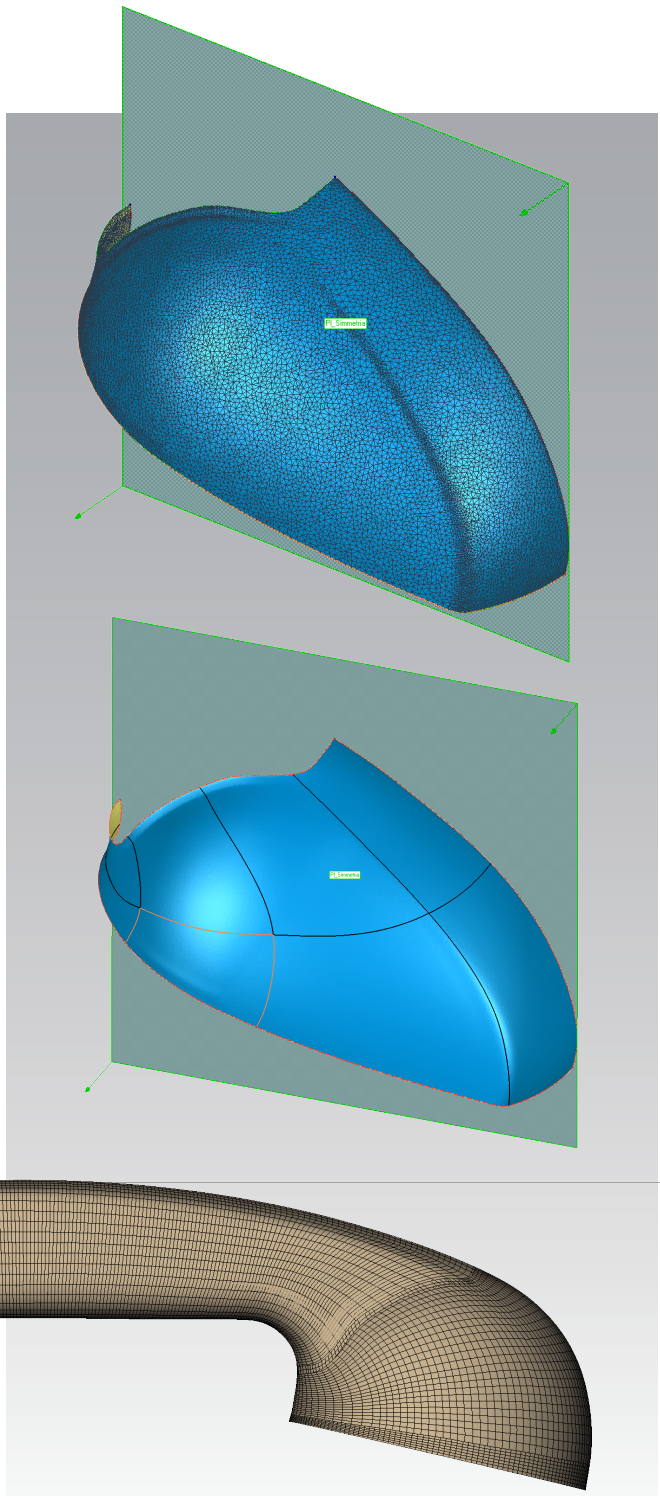
legato all'oggetto che si sta analizzando. Altri casi impongono una diversa articolazione della definizione, attraverso l'aggiunta di componenti e parametri, imponendo un ampio processo di analisi che lega l'azione all'oggetto, portando l'operatore ad una profonda comprensione della forma.



alle riflessioni fatte sulla genesi delle superfici numeriche, possiamo individuare il luogo del taglio lungo la curva evidenziata in rosso in figura. Il modello matematico già prevede in quella parte di superficie, la presenza di bordi di superfici secondarie utili al nostro scopo. Proiettiamo normalmente alle facce del poliedro la curva continua considerata, spezzando la mesh con la polilinea risultante. Le operazioni di Reverse Modeling saranno effettuate esclusivamente sulla porzione di mesh deformata.

Con un software di gestione delle mesh tronciamo la calotta modificata con il piano di simmetria e cancelliamo l'intera porzione piana del modello poliedrico, lasciando esclusivamente la superficie complessa, caratterizzata dalle nuove curve di carattere che disegnano la superficie (fig. 5.11). Attraverso l'analisi della curvatura della mesh, riusciamo facilmente ad estrapolare le curve caratterizzanti, d'aiuto al disegno delle patch Nurbs che rappresenteranno la superficie (fig. 5.12). Come per le esperienze precedenti, anche in questo caso non bisogna dimenticare di utilizzare un numero pari di patch, in modo da avere orientamenti concordi delle isoparametriche per garantire l'unione delle pezze in un'unica superficie.

La porzione di modello appena creato, andrà a sostituire quella di progetto, costruendo il nuovo modello matematico della cornetta modificata (fig. 5.13). Da qui possiamo ripartire con un nuovo modello numerico per la prototipazione o inserire nuovamente la rappresentazione nel circuito ideativo descritto, in modo tale da avvicinare sempre più il progetto al modello mentale che si delinea nella mente del progettista.



5.13\_ Modello matematico della cornetta modificata, frutto del processo di Reverse Modeling.

5.11\_ Porzione di mesh sulla quale effettuare il Reverse Modeling.  
5.12\_ Disegno delle curve di bordo per le superfici Nurbs,

Note:

1. Sito di riferimento del software Grasshopper:

<http://www.grasshopper3d.com/>

2. La componente di visual scripting utilizzata per la ricerca del volume ha una definizione computazionale estremamente complessa ed interessante e può essere approfondita visitando il seguente sito:

<http://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles>









## Bibliografia

- [1] M. Eck, H. Hoppe, *Automatic Reconstruction of B-Spline Surfaces of Arbitrary Topological Type*, in: Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM Press, New York, NY, USA, pp. 325-33, 1996.
- [2] T. Várady, R. R. Martin, J. Coxt, *Reverse engineering of geometric models – an introduction*, in Computer Aided Design, Vol.29, pp.255-268, 1997.
- [3] W. B. Thompson, *Feature-Based Reverse Engineering of Mechanical Parts*, IEEE Transaction of Robotics and Automation, Vol.15, No.1, Feb.1999.
- [4] H. Q. Dinh, *A sampling of surface reconstruction technique*, College of Computing Georgia Institute of Technology, 2000.
- [5] G. B. Broggiato, F. Campana, S. Gerbino, M. Martorelli, *Confronto tra diverse tecniche di digitalizzazione delle forme per il reverse engineering*, XIV Congresso Internacional de Ingenieria Grafica, Santander (E), 2002.
- [6] S. Gerbino, M. Martorelli, V. Nigrelli, D. Speranza, *Reverse Engineering Techniques in improving the development phases of a new footwear*, Proc. of 3rd CIRP International Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME), pp. 395-400, Ischia, Italy, July 3rd-5th, 2002, .
- [7] F. Piatto, E. Bassoli, G. Sansoni, A. Gatto, *Applicazione di tecniche di Reverse Engineering allo sviluppo di prodotto nel settore dell'arredameto*, I giornata nazionale sulla Reverse Engineering "Il ruolo del reverse engineering nelle tecniche di time compression", Modena, 2002.
- [8] F. Caputo, M. Martorelli, *Disegno e Progettazione per la Gestione Industriale*, Edizioni Scientifiche Italiane, Napoli, Ottobre 2003.
- [9] M. Germani, F. Mandorli, A. Gatto, E. Bassoli, F. Piatto, N. Tulloch, *A time compression approach for styling design*, Proc. of CE 2003, Madeira Island, Portugal, 2003.
- [10] F. Cappello, S. Gerbino, M. Martorelli, V. Nigrelli, A. Orlando, *3D Data Acquisition and Numerical Analysis of a Footwear in Walking*, Proc. of 4th CIRP International Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Sorrento, Italy, June 30th-2nd 2004.
- [11] F. Brevi, *Il Design delle Superfici. I modelli digitali per il disegno industriale*, ed. Poli.Design, Milano, 2004.
- [12] M. Martorelli, C. Pensa, D. Speranza, *Ricostruzione di carene navali mediante l'impiego di tecniche CAD/RE*, Il Progettista Industriale, Marzo 2006.

- [13] AA.VV., *La rappresentazione riconfigurata. Un viaggio lungo il processo di produzione del progetto di disegno industriale*, ed Poli.Design, Milano, 2006.
- [14] G. Guidi, M. Russo, J. Beraldin, *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*, ed McGraw-Hill, Milano, 2010.
- [15] Graziano Mario Valenti, *HySpace 0.2*. In UNALI, Maurizio. *Lo spazio digitale dell'architettura italiana*, Kappa pp.222-225, Roma, 2008.
- [16] Graziano Mario Valenti, *MI Il modello integrato*. In MIGLIARI, Riccardo. *Disegno come Modello*, Kappa, pp.59-62, 2004.
- [17] Graziano Mario Valenti, *De.form. are - De.form. ing*, Rdesignpress, pp.1-195, Roma, 2008.
- [18] A. Casale, G. M. Valenti, M. Calvano, *Tra rappresentazione e fabbricazione, dalla costruzione del modello al modello costruito*. In *Le vie dei mercanti*. SAVE Heritage Safeguard of Architectural, Visual, Environmental Heritage, La Scuola di Pitagora s.r.l., Napoli, 2011. vol. 10.
- [19] A. Casale, *Geometria Creativa. Intuizione e ragione del disegno dell'oggetto*. Nuovi quaderni di Applicazioni della Geometria Descrittiva, Kappa, Roma, 2010.
- [20] R. Migliari, *Geometria descrittiva - Tecniche e applicazioni*, CittàStudi – De Agostini, Novara, 2009.
- [21] Issa, R. *Essential Mathematics for Computational Design*, Robert McNneel & Associates, 2009.

## Abstract

Reverse Modelling (RM) is the process that makes it possible to deduce the representation of the of physical model's shape by digital acquisition.

The aim of the process can be various, in design it can be used both for restyling operations and for more strictly design operations. Today, methodologies and techniques used don't follow standard procedures, in some cases craft operations are prevailing, in other cases actions aim to the highest strictness to reach extreme accuracy in the result. In the design process of the object, RM has a further task: working out the existing detachment between prototype and projected model, taking an active role in the ideational path of the object.

Only an experimental applicative research allows analyzing problems, methods and techniques of commutation from a numerical model (cloud of points, survey) to a mathematical model (digital project).

The study's goal is to solve problems in the RM process applied to the design project. The experience was carried out making use of new potentialities given by digital devices, used to integrate the typical tools of design and descriptive geometry in their most contemporary acceptance. The research has led also to alternative results compared to today's computational techniques used in the resolving procedures of the problem.

The research was dealt with a systematic methodology, which is structured in a first step of cognitive investigation phase, a second step of analysis, then the survey, afterwards an experimental application.

The cognitive phase has examined the tools of digital survey, the software of analysis and editing of numerical data and the software of mathematical modelling.

The analysis phase was addressed to the problems of ma-

thematical representation in design object. The following phase of survey was characterized by the searching of geometric entities of the object, deduced from the acquired numerical data, therefore the experimentation solved the relationships between prototype, acquired data and ideational mental model. The results come through the tools of our field of study, which express in this research their potential as means of comprehension and solution of the Reverse Modelling process.