

## **BARRIERE FRANGIFLUTTI VIRTUALI: DAL MODELLO REALE AL MODELLO NUMERICO**

Salvatore BARBA<sup>1</sup>, Fabio DENTALE<sup>2</sup>, Barbara MESSINA<sup>3</sup>

<sup>(1,3)</sup> Laboratorio Modelli - <sup>(2)</sup> MEDUS, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Salerno, Italia  
sbarba@unisa.it, fdentale@unisa.it, bmessina@unisa.it

### **Abstract**

The paper is a summary of a multidisciplinary research activities developed at the Civil Engineering Department, University of Salerno, to support the hydraulic and structural efficiency tests of maritime breakwaters, emerged or submerged.

Following an innovative approach, by digital photogrammetry, remote sensing and the CAD/CAM techniques, was developed a numerical procedure to reproduce a physical scale model or prototype breakwaters in a three-dimensional virtual geometry. Thus, using a specific numerical software (Computation Fluid Dynamics) will be possible evaluate the hydrodynamic wave-structures interaction and the stability of the armour layer elements.

**Parole chiave:** tutela dei litorali; modellazione solida; modellazione numerica; sistema di presa laser-photo scanner e prototipazione.

### **1. La proposta metodologica <sup>(2)</sup>**

Le dighe marittime (frangiflutti) rappresentano forse le più antiche e sicuramente le più diffuse opere (portuali o di difesa), praticamente, le più semplici da realizzare per difendersi dai marosi. La tecnica costruttiva, che si avvale del procedimento di versare scogli o massi (in materiale lapideo naturale o artificiale), ha suggerito i termini a "gettata" o a "scogliera" con cui vengono riconosciute.

Generalmente costruite per successiva disposizione di strati presentano nella loro sagoma degli elementi caratteristici: una infrastruttura o nucleo di pietrame disposti a scarpa sia verso l'esterno che verso l'interno; uno o più strati filtro disposti tra nucleo e la mantellata (rivestimento esterno); uno o più strati di rivestimento (mantellata) costituiti da massi naturali o artificiali (di varia forma), che assolve la funzione di protezione della struttura dall'attacco del moto ondoso; un coronamento che può comprendere o meno un massiccio di calcestruzzo ed un eventuale muro paraonde (Fig. 1).

Per il dimensionamento, in conseguenza della loro interazione con un sistema naturale complesso come quello del mare e delle spiagge, è ormai di consolidata esperienza non far riferimento solo alle teorie disponibili in letteratura.

È pratica comune verificare l'efficienza idraulica e la stabilità dell'opera mediante l'ausilio di modellazioni numeriche o fisiche. Nella maggior parte dei casi la scelta della tipologia di simulazione da impiegare non è solo funzione dei fenomeni che si vogliono analizzare ma è anche soprattutto legata a fattori di tipo economico.

È pur vero però, fino a questo momento, che le modellazioni fisiche permettevano di analizzare aspetti non facilmente valutabili mediante l'approccio numerico, soprattutto per le strutture a gettata composte cioè da massi o blocchi di calcestruzzo tra i quali l'acqua si incunea con moto non stazionario attraverso percorsi complessi, a volte caratterizzati anche dalla presenza di aria.

Il progettista pertanto, volendo avere un valido supporto per il dimensionamento idraulico (overtopping, frangimento, risalita, riflessione) e strutturale, in relazione soprattutto alla stabilità dei massi, ha avuto finora come unica possibilità la realizzazione di prove fisiche in laboratorio.

L'approccio numerico, in particolare per problemi dalla geometria così complessa, aveva fino a poco tempo fa il difetto di non fornire indicazioni soddisfacenti, in quanto i fenomeni di interazione che si riuscivano a riprodurre erano sicuramente inadeguati alla realtà. In questo caso la costruzione della struttura non poteva rappresentare fedelmente la geometria di un'opera a gettata realizzata mediante la sovrapposizione di singoli elementi per strati (nucleo, filtro, mantellata) e quindi le maggiori limitazioni si avevano sul calcolo del moto di filtrazione.

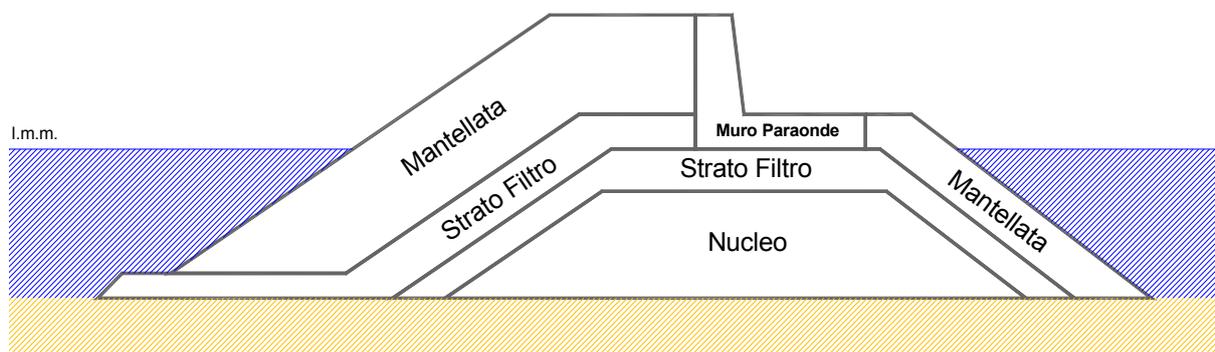


Fig.1: Esempio barriera frangiflutti.

Numericamente, le possibili soluzioni al problema erano generalmente trattate secondo due differenti metodologie.

La prima, di semplice impiego, è basata sull'ipotesi che la geometria porosa, pur influenzando il fenomeno, non abbia un rilievo predominante sulle caratteristiche di movimento del fluido e, quindi, l'elemento solido è considerato all'interno del dominio di calcolo come un unico blocco impermeabile trascurando gli effetti della porosità (Fig. 2 - sinistra). Le equazioni, qualunque sia la loro forma, vengono discretizzate alle differenze finite su una maglia che presenta dei nodi di calcolo nulli in corrispondenza dell'opera. È evidente che più fitta è la griglia di calcolo, maggiori sono i punti di frontiera posizionati sulle superfici di contatto liquido-solido, maggiore è l'accuratezza del calcolo soprattutto per ciò che concerne le interazioni.

La seconda ("mezzo poroso"), ormai abbastanza diffusa, ritenendo invece non trascurabile l'influenza della porosità sulle caratteristiche idrodinamiche del fluido, prevede che in corrispondenza della gettata le equazioni siano modificate per tener conto del moto di filtrazione – Darcy o Forchheimer, a seconda che si consideri la perdita di carico lineare o quadratica – (Fig. 2 - destra). In pratica, si introduce un termine aggiuntivo che riproduce le interazioni del fluido con i meati interni, mediante coefficienti omogenei per tutta l'estensione del dominio filtrante.

Nonostante quest'ultima metodologia abbia fornito validissimi risultati, è opinione comune che in molte situazioni non sia completamente adeguata. Inoltre, da una parte la necessità di calibrazione dei parametri numerici legati alla risoluzione del moto all'interno del mezzo poroso, dall'altra il considerare volumi di controllo più grandi della scala dei percorsi random interni alla gettata, portano necessariamente a trascurare alcuni aspetti molto importanti.

Pertanto, partendo da queste considerazioni e sulla base dei progressi tecnologici è stata sviluppata una procedura digitale che mediante l'ausilio di software CAD per la modellazione tridimensionale ha permesso di costruire le strutture in ambito numerico, così come avviene nella realtà o per le modellazioni di laboratorio.

Per riuscire ad ottenere tale conformazione geometrica, inizialmente è stato necessario riprodurre le diverse tipologie di massi costituenti la struttura, da quella naturale, a quelle artificiali di uso comune: cubo, cubo modificato, Antifer, Tetrapodo, Accropode™, Core-loc™, Xbloc®, Massi naturali (Fig. 3).

In merito a questi aspetti, nelle pagine seguenti (§ 2) sono state sintetizzate alcune delle fasi sviluppate per definire uno degli elementi artificiali costituente la mantellata. In particolare, si è fatto riferimento all'Xbloc® in quanto utilizzato anche per ulteriori elaborazioni (§ 3).

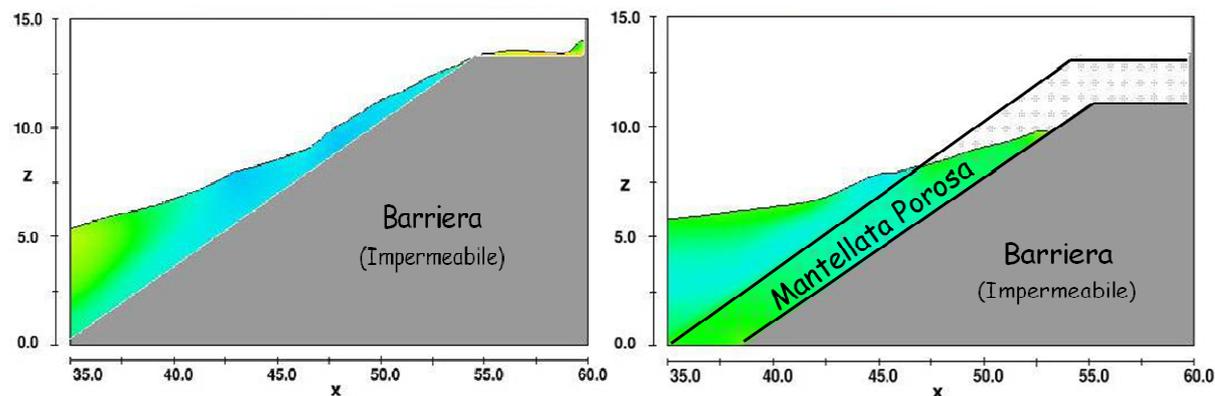


Fig. 2: Esempio modellazione numerica.

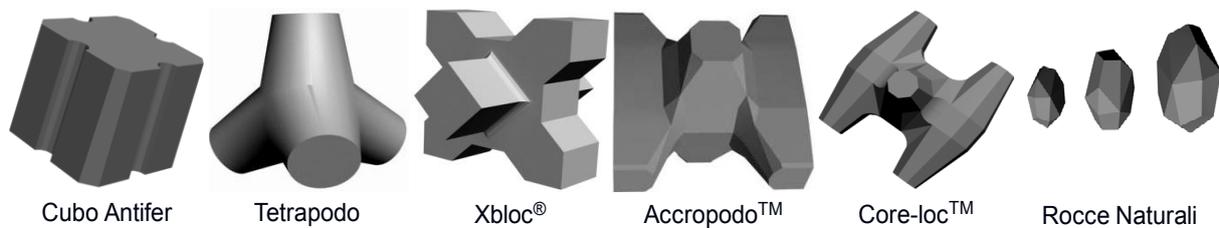


Fig. 3: Blocchi frangiflutti.

In seguito, sempre mediante l'impiego di tecniche CAD, si è stata definita la sagoma virtuale del frangiflutto mediante la sovrapposizione dei singoli elementi tridimensionali, uno alla volta rispettando le condizioni di gravità ed incastro, secondo uno schema geometrico reale, quindi modellando la struttura così come avviene nell'ambito costruttivo o di laboratorio.

Infine, tali configurazioni geometriche sono state importate in un software di fluidodinamica e definendo una griglia di calcolo infittita al punto tale da avere dei nodi computazionali all'interno dei meati, è stato possibile valutare direttamente i fenomeni idrodinamici all'interno dei meati. Dalla Fig. 4 è possibile notare, come la variazione delle caratteristiche di movimento del fluido sia nei meati che lungo il contorno solido dei singoli elementi, sia stimata con maggiore precisione rispetto a quanto definito con i metodi tradizionali. Tale condizione è maggiormente visibile nella ricostruzione tridimensionale della superficie libera dove possono essere visualizzati con maggior dettaglio gli effetti del moto ondoso sull'opera ed internamente ad essa [1,2].

Dal punto di vista della ricerca una tale opportunità d'analisi consente, come descritto in precedenza, di avere delle prospettive completamente diverse in quanto permette di valutare alcune condizioni che fino a questo momento potevano essere affrontate soltanto con la sperimentazione di laboratorio in scala prototipo o modello.

Per questo, volendo spingere il modello numerico ad un grado di definizione elevato e quanto più simile alla realtà, gli Autori hanno iniziato la codifica di una procedura basata su tecniche di digital scanning. Lo scopo è quello di poter ricostruire in ambito virtuale la geometria della struttura così come realizzata in ambito fisico per quanto concerne la posizione e la rotazione di ogni singolo elemento in modo tale che tra le due opere (reale/numerica) ci sia la massima corrispondenza. Tutto ciò permetterebbe all'analisi numerica di essere utilizzata dal progettista come estensione o completamento di quella fisica, essendo praticamente basata sulla stessa opera. Una sintesi preliminare delle attività sviluppate in tal senso sono descritte nelle pagine seguenti (§ 3).

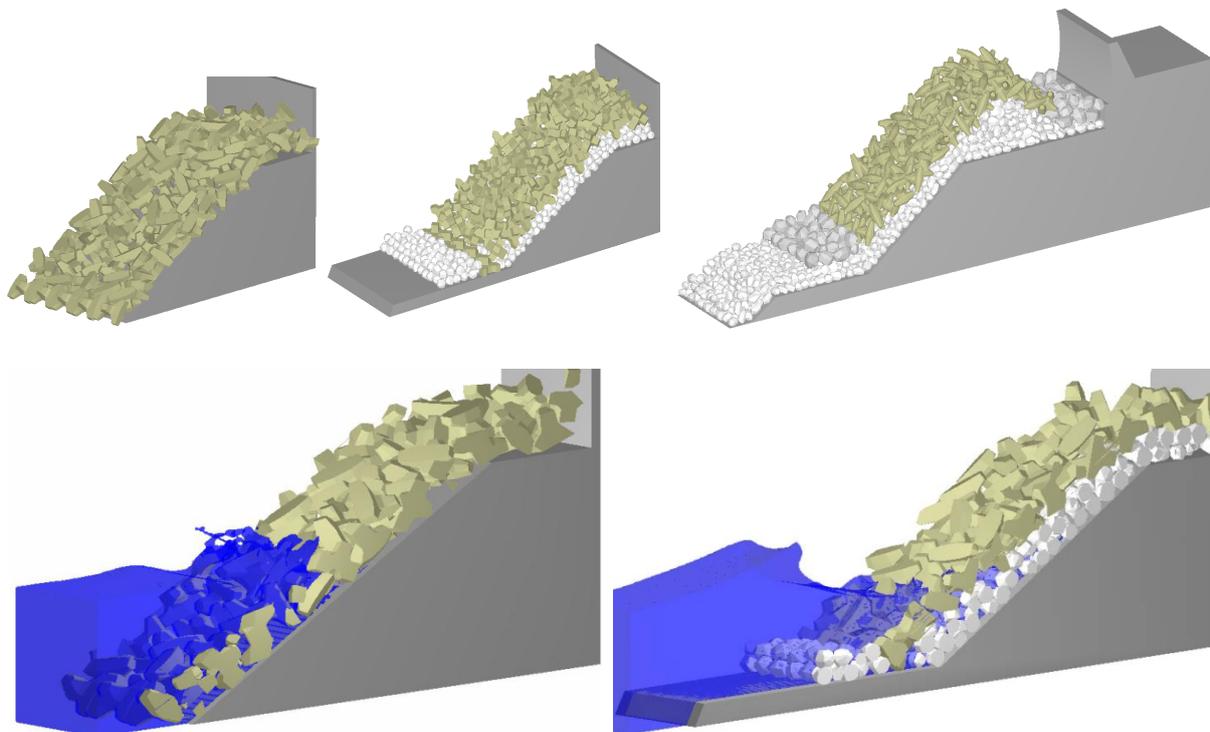


Fig. 4: Strutture e interazione virtuale onda-struttura.

## 2. Modellazione solida di frangiflutti <sup>(3)</sup>

La necessità di verificare il comportamento delle opere marittime oggetto di indagine, attraverso un confronto tra il modello reale ed il modello numerico, ha indotto innanzitutto alla ricostruzione geometrica dei singoli elementi frangiflutti, che sono stati quindi analizzati nella loro configurazione tridimensionale e trattati come modelli solidi (Fig. 3).

Più precisamente l'elaborazione dei suddetti modelli è stata condotta assumendo, quale presupposto imprescindibile, l'idea di rintracciare le proprietà geometriche fondamentali dei blocchi presi in esame, con l'intento di semplificarne la rappresentazione. In tal senso, essendo in generale i frangiflutti assimilabili a unità volumetricamente complesse, è apparso corretto concepire tali elementi non come corpi monoblocco, ma piuttosto come un aggregato di più blocchi strutturali, ottenuti attraverso la discretizzazione della forma originaria.

In questa fase, liberando gli oggetti da una serie di specificità intrinseche – quali ad esempio caratteristiche di tipo materico o percettivo – e prescindendo dalle eventuali irregolarità che sempre connotano la realtà oggettiva, si è tentato di risalire alle precise regole generative che consentono di ricostruire tridimensionalmente la volumetria dei suddetti corpi. Solo seguendo un graduale processo di astrazione della realtà si può infatti pervenire alla natura geometrica degli oggetti, che possono quindi essere correttamente interpretati come un insieme di solidi elementari.

Così intesa, la rappresentazione di realtà concrete – nello specifico i frangiflutti posti a difesa dei litorali – si esplicita semplicemente attraverso la proiezione degli enti geometrici che, nel loro insieme, definiscono i solidi ai quali sono riconducibili i corpi in esame. Il che non significa rappresentarne tutti i punti, ma individuare i soli elementi che rendono riconoscibile l'oggetto reale. D'altra parte ogni superficie può intendersi originata dal moto di una linea, retta o curva che sia, nello spazio tridimensionale secondo precise leggi geometriche. Quindi, si potrebbe in generale supporre di poter rappresentare un solido individuandone la generatrice e la legge che ne regola il moto nello spazio. Appare tuttavia opportuno sottolineare che la discretizzazione dell'oggetto da rappresentare, e la sua conseguente geometrizzazione, non segue un percorso univoco ma, in funzione del metodo di rappresentazione prescelto e nel rispetto di considerazioni più generali di carattere grafico – quali ad esempio la maggiore rapidità di esecuzione o ancora l'economia del disegno – conducono ad una scelta piuttosto che ad un'altra [3].

Trattandosi nello specifico di blocchi concepiti per creare barriere frangiflutti – ossia opere a gettata realizzate mediante l'affiancamento e la sovrapposizione casuale, per strati successivi, dei singoli moduli – il cui buon funzionamento dipende anche dal ridotto spazio interstiziale tra le varie unità costitutive, è stato possibile constatare che tutti gli oggetti analizzati sono concepiti come blocchi regolari dotati di simmetrie piane e spaziali: per ciascun elemento, sono state quindi rintracciate le relazioni geometriche generative, quasi sempre riconducibili a traslazioni, rotazioni o rototraslazioni rispetto ad un sistema di riferimento cartesiano interno al volume stesso.

Partendo da tale assunto, e nell'ottica di definire un approccio generalmente valido, la modellazione dei frangiflutti ha seguito un percorso graduale di discretizzazione della forma reale che, nel rispetto delle misure e delle proporzioni delle singole parti costitutive ricavate da dati di letteratura, è stata tradotta in insieme di solidi elementari. Questi ultimi sono stati ulteriormente ridotti, essendo apparso infatti opportuno pervenire ai volumi finali mediante l'aggregazione di unità strutturali 'generative' a geometria semplificata. Ovvero partizioni minime del modello, di volta in volta individuate in funzione delle suddette simmetrie, che trattate con operazioni booleane, o opportunamente riprodotte (ruotate, traslate, rastremate) nello spazio, danno luogo alla configurazione finale dei moduli da rappresentare.

Tralasciando, per ragioni di sintesi, tutte le analisi geometrico-formali condotte nel corso della ricerca illustrata, ci si sofferma, a titolo esemplificativo, sulle considerazioni che hanno portato alla modellazione del cosiddetto Xbloc<sup>®</sup>, ritenendosi la procedura descritta indicativa di una proposta metodologica più generale (Fig. 5).

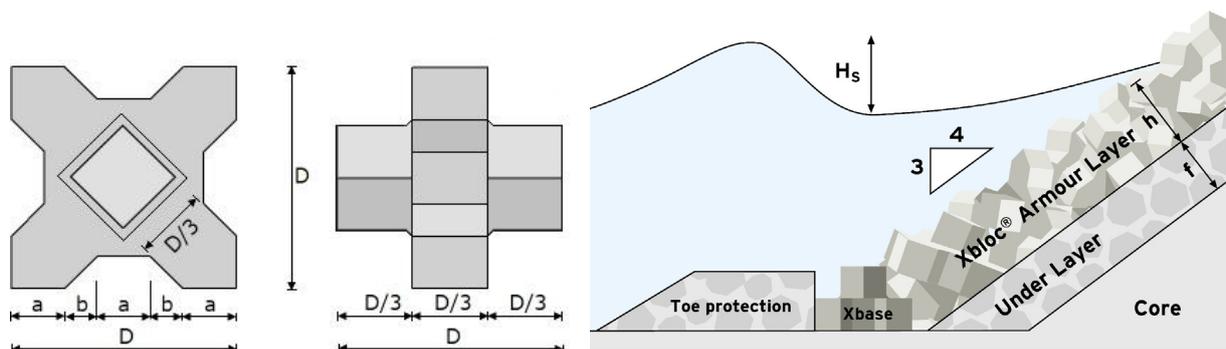


Fig. 5: Proiezioni ortogonali dell'Xbloc<sup>®</sup> e schema in sezione della mantellata ottenuta con tali elementi.

Si tratta in particolare di un'unità geometricamente assimilabile ad un corpo definito dalla combinazione di due volumi elementari regolari: un prisma retto a ventidue facce, con base ad X, ed un parallelepipedo retto a base quadrata che si innesta nel primo, attraversandolo in corrispondenza del relativo asse verticale baricentrico (quest'ultimo pertanto coincide con l'asse verticale del parallelepipedo stesso). La continuità strutturale, e conseguentemente la coesione dei due solidi, è garantita da una cornice di raccordo tra le parti, caratterizzata da un profilo smussato onde ridurre il rischio di frattura tra i singoli elementi.

In virtù dell'intrinseca semplicità geometrica e della regolarità propria della morfologia descritta, l'Xbloc<sup>®</sup> risulta dunque robusto, affidabile, facile da realizzare e da collocare *in situ*, non sussistendo particolari requisiti per l'orientamento dei moduli. Il blocco infatti, perfettamente inscrittibile in un cubo, è dotato di simmetria assiale rispetto al piano orizzontale  $xy$  e ai due piani verticali  $xz$ ,  $yz$ , individuabili qualora si assuma una terna di assi cartesiani con origine nel centro del suddetto cubo. Il che consente, tra l'altro, di avvalersi della possibilità di costruire il modello complessivo del solido sviluppandone una sola porzione e sfruttando poi le simmetrie evidenziate.

La prima fase di studio ha pertanto richiesto un'analisi grafica volta all'individuazione delle relazioni geometriche sottese al volume, nella sua morfologia complessiva: prescindendo quindi dai dati metrici, riportati in specifiche tabelle, è apparso utile piuttosto ricercare la genesi geometrico-strutturale, ossia quell'insieme di linee che, opportunamente traslate, ruotate, sovrapposte o 'intrecciate', rappresentano i principi elementari generatori delle singole forme, invarianti e riconoscibili anche al di là della complessità configurativa di un oggetto. Dei blocchi presi in esame, più che un'indagine quantitativa, viene proposta una lettura qualitativa tesa alla ricerca della geometria primigenia sottesa al disegno degli elementi analizzati, con l'intento di pervenire ad una loro corretta interpretazione e, conseguentemente, ad una più agevole modellazione. L'analisi geometrico-formale dunque si propone di rintracciare la matrice generativa della forma complessiva, soffermandosi soprattutto sulle relazioni di simmetria e di proporzionalità rispetto ad una misura assunta quale modulo.

Nel caso specifico, l'indagine è partita dalla proiezione ortogonale del volume sul piano orizzontale  $xy$ , assumendo quale dato numerico, cui riferire il dimensionamento del tutto, il lato del cubo in cui l'Xbloc<sup>®</sup> è inscrittibile (Fig. 6 - sinistra). Dalla prima proiezione del suddetto cubo, che equivale ad un quadrato di lato dato, e nel rispetto delle proporzioni tra le parti desunte dalle tabelle prima citate, si è quindi pervenuti al disegno della geometria che regola la configurazione dell'intero oggetto: una geometria che evidenzia con forza la sussistenza di rapporti proporzionali, di precisi allineamenti o rotazioni delle parti, nonché una rigorosa modularità che trova riscontro nella produzione industriale di tipo seriale, per la quale la necessità di pervenire alla prototipazione degli oggetti e di conseguenza alla loro rapida esecuzione, è inevitabilmente legata alla chiarezza geometrica delle forme e delle specifiche relazioni tra queste. Individuata dunque la matrice geometrica attraverso cui definire, in piano, la proiezione orizzontale, del blocco, l'attenzione è stata rivolta alla sua configurazione tridimensionale: sulla base di considerazioni di carattere generale ed ancora procedendo con verifiche grafiche preliminari, sono stati riconosciuti i presupposti geometrici che guidano il disegno spaziale dell'oggetto, ossia si è valutata la possibilità di modellare una sola porzione del volume, pervenendo poi alla rappresentazione complessiva grazie alle simmetrie e alle relazioni evidenziate dalle analisi condotte.

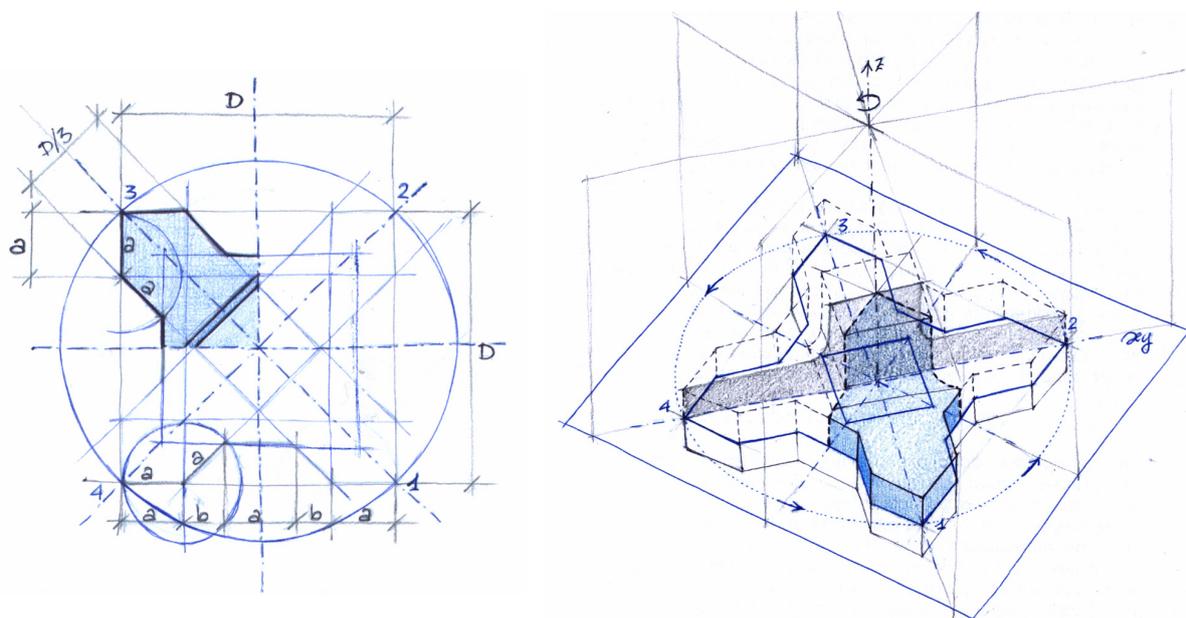


Fig. 6: Analisi geometrico-strutturale dell'Xbloc<sup>®</sup>, in configurazione planimetrica e spaziale.

Ancora una volta, la sussistenza di specifiche simmetrie e di una profonda regolarità strutturale ha messo in luce la possibilità di procedere secondo percorsi alternativi, ma tutti validi, ai fini della modellazione finale dell'Xbloc®. Le verifiche preliminarmente condotte hanno innanzitutto consentito di riconoscere, quale condizione più interessante per il disegno del blocco, la simmetria rispetto al piano orizzontale baricentrico, ossia quello che lo separa in due porzioni congruenti, la metà superiore e quella inferiore, avendo disposto il corpo in maniera che l'asse del parallelepipedo, e conseguentemente gli spigoli del poliedro ad esso paralleli, siano verticali. Per ciascuna delle porzioni così ottenute è stata quindi valutata la possibilità di procedere ad un'ulteriore scomposizione in moduli elementari, onde semplificarne la modellazione tridimensionale. Si è tentato cioè di pervenire alla definizione della partizione più efficace in termini di rappresentazione dell'oggetto finale: in tal senso, diversi tentativi sono stati condotti, elaborando – seppur attraverso schizzi di studio eseguiti a mano – una serie di visualizzazioni allusive, in un certo qual modo, dell'evoluzione dinamica della forma, intesa come combinazione di singole parti.

La scelta è infine ricaduta su una porzione corrispondente ad 1/8 della figura originale, essendo in essa contenuti tutti gli elementi necessari ai fini della decodificazione dell'oggetto e al tempo stesso risultando questa più facilmente riproducibile tramite i software CAD impiegati allo scopo. In particolare, limitatamente alla metà superiore, si è considerata una sola delle quattro porzioni di volume comprese tra i due piani verticali tracciati lungo le diagonali del parallelepipedo (Fig. 6 - destra).

Definita dunque la struttura generale del blocco, e individuata la partizione minima alla quale riferirsi, si è proceduto all'elaborazione CAD del solido che, in virtù delle semplificazioni costruttive poste in essere, è stata condotta attraverso una serie di passaggi operativi distinti ma consequenziali. Nello specifico, ed in riferimento alla porzione assunta, è risultato innanzitutto necessario realizzare, separatamente, i volumi associati al prisma e al parallelepipedo. Gli stessi sono stati quindi sovrapposti nel rispetto delle caratteristiche desunte dalle matrici geometriche sottese al disegno planimetrico del blocco, per il quale si evidenzia la collinearità tra la diagonale del quadrato circoscritto alla base del poliedro maggiore (ovvero la retta che passa per i vertici 1 e 3 della stessa) e l'asse del quadrato di base dell'unità minore, il parallelepipedo, essendo stata imposta la coincidenza dei centri delle suddette figure.

I volumi così ottenuti sono stati poi raccordati tramite una cornice smussata concava superiormente che, seguendo il perimetro della base inferiore del parallelepipedo e allargandosi fino a disporsi sulla base superiore del prisma, garantisce la continuità tra le singole parti.

La modellazione del raccordo è avvenuta per sottrazione di solidi: il primo identificato in un prisma triangolare ad asse orizzontale, il secondo in un cilindro circolare retto, ad asse ancora orizzontale, disposto in maniera da risultare tangente al piano verticale e a quello orizzontale che contengono le facce del primo elemento. Tale procedimento ha consentito di definire le fasce del raccordo che seguono ciascun lato del quadrato di base del parallelepipedo, elaborate in questa prima fase come elementi distinti. Per pervenire alla rappresentazione della cornice, nella sua unitarietà, è stato quindi necessario un ulteriore passaggio, consistente nella modellazione di un 'addendo' angolare, ovvero un elemento complementare al raccordo, ottenuto attraverso opportuni tagli della fascia precedentemente modellata (Fig. 7).

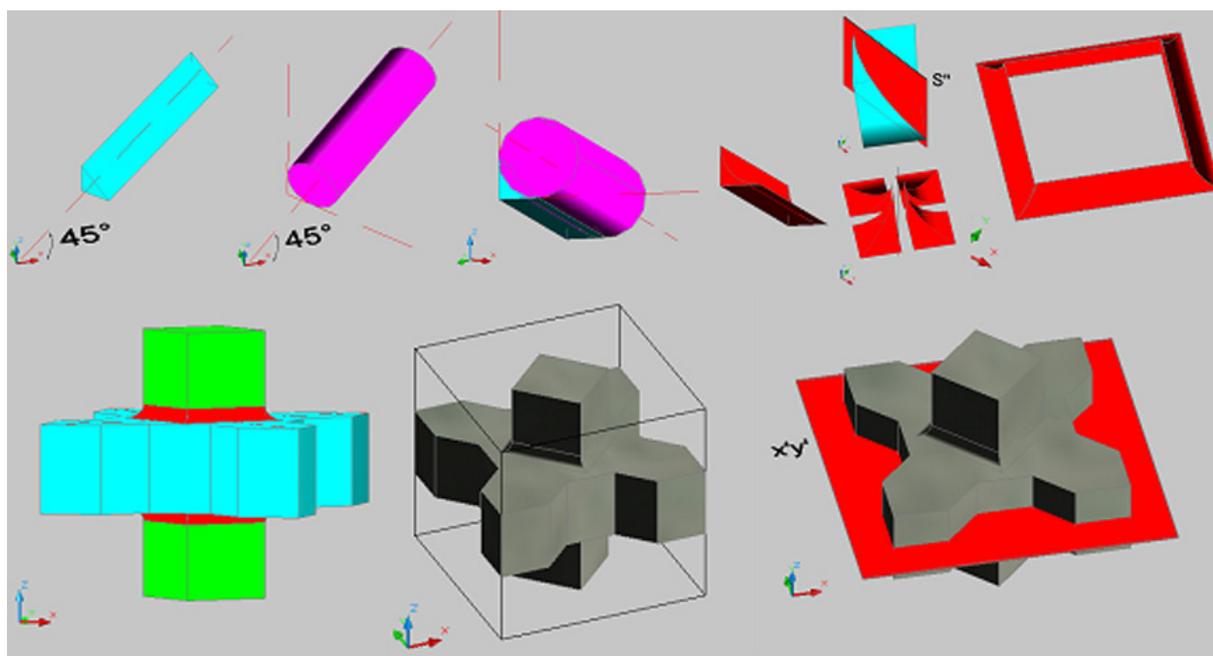


Fig. 7: Modellazione solida del blocco mediante software CAD.

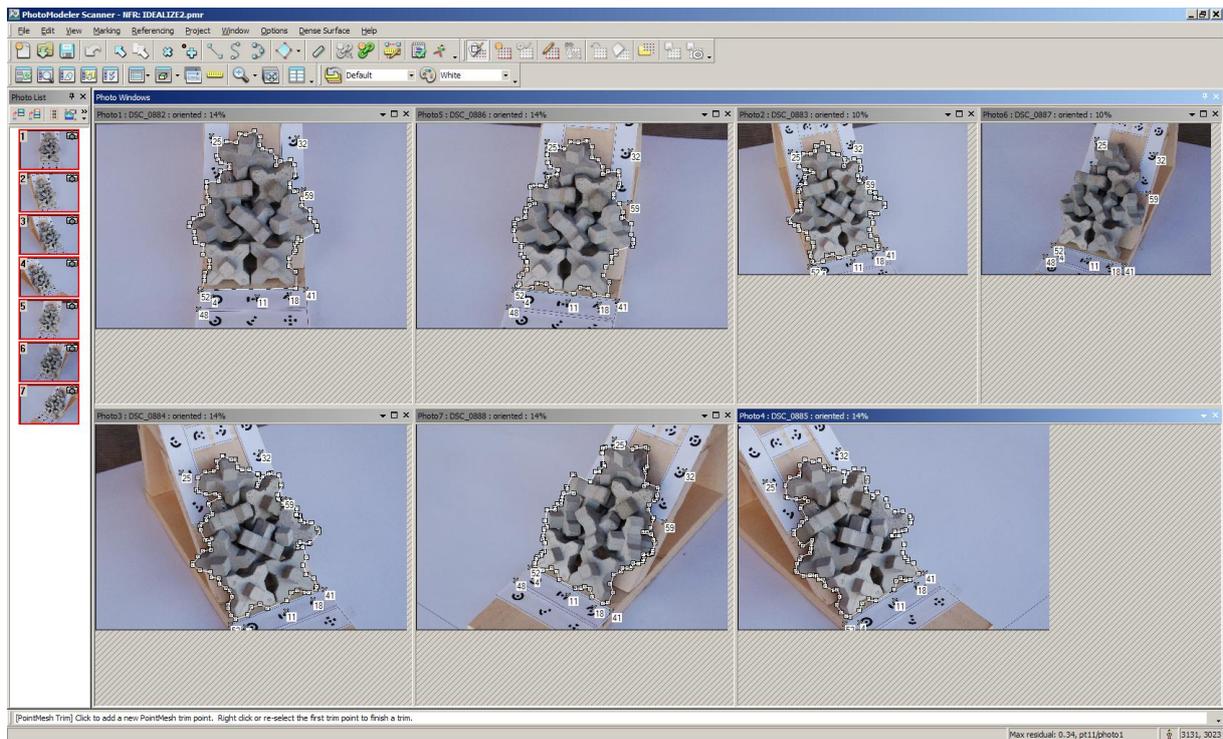


Fig. 8: Visualizzazione dei fotogrammi e dei *Tie Points* (PhotoModeler).

Più precisamente, riprodotta su base quadrata la cornice concava, la stessa è stata sezionata con un piano verticale diagonale, generandosi conseguentemente la porzione angolare da affiancare ed collegare alla fascia lineare già modellata. Le tre unità elementari così ottenute sono state quindi unite, a formare il modulo-base che, opportunamente reiterato nello spazio, in funzione delle simmetrie già individuate, ha generato la configurazione finale del blocco.

### 3. Dal physical al digital mock-up <sup>(1)</sup>

Sulla base di quanto descritto in precedenza, al fine di poter ricostruire in ambito virtuale la geometria della struttura così come realizzata in ambito fisico per quanto concerne la posizione e la rotazione di ogni singolo elemento, in modo tale che tra le due opere reale e numerica ci sia la massima corrispondenza, è in fase di codifica una procedura di digital scanning.

In merito a quest'ultima fase della proposta metodologica, si illustra il confronto tra modelli generati da nuvole di punti, l'una ottenuta tramite fotogrammetria 3D e l'altra da scansione laser [4]; durante le applicazioni sono state valutate le relative precisioni, al fine di validare i risultati dell'approccio proposto. L'oggetto rilevato è una mantellata di Xbloc<sup>®</sup> disposti in modo da formare un modello fisico in scala di una barriera frangiflutti (Fig. 8), di cui erano state fornite le caratteristiche dimensionali.

L'acquisizione dei dati in ambiente PhotoModeler 6.4 è stata effettuata a partire da sette prese fotografiche (con il supporto di un cavalletto), impostando una rotazione dell'asse principale della camera di circa 15° – valutati mediante l'utilizzo di una griglia di base – rispetto alla stazione precedente, per un'adeguata sovrapposizione delle prese. Per velocizzare la successiva fase di registrazione sono state utilizzate delle marche codificate così da avere dei *Tie Points* di rapida visualizzazione in ogni fotogramma. Terminata la fase di registrazione, è stata avviata la fase di processamento dei dati che ci ha restituito la cosiddetta nuvola di punti: laddove si manifestino dei vuoti di informazione (*holes*), la causa è da ricercare nella mancata determinazione automatica di una corrispondenza biunivoca fra le prese omologhe, da cui deriva l'impossibilità di restituire punti nello spazio digitale.

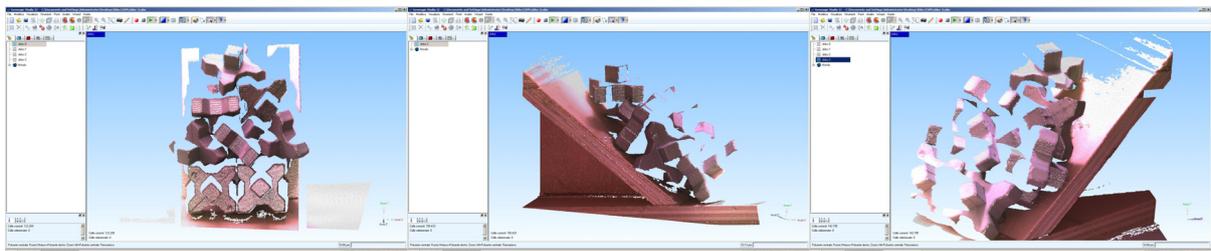


Fig. 9: Vista delle scansioni (Vivid 910).

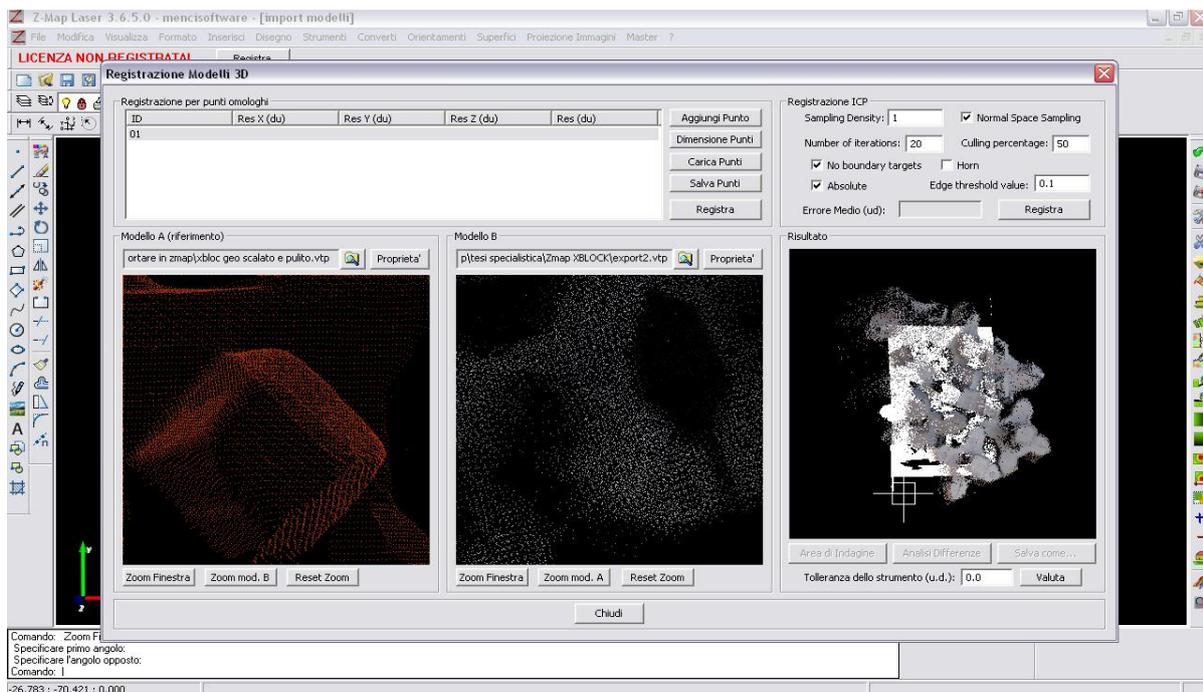


Fig. 10: Registrazione dei modelli 3D (Z-Map).

Altra problematica può essere legata alla presenza di un rumore (*noise*) che, nello specifico, si è manifestato nella parte retrostante del modello e più in generale lungo il perimetro degli Xbloc®; si può, tuttavia, ridurre questo fattore acquisendo le prese fotografiche in condizioni di illuminazione uniforme, assenza di luce diretta e di ombre autoportate.

Si è successivamente resa necessaria la triangolazione della nuvola di punti, dando origine a una mesh con l'implementazione di Geomagic Studio 11. Nel modello poligonale sono andate perse alcune tracce, spesso in corrispondenza dei bordi dove il rumore era maggiore, a causa della impossibilità di effettuare delle triangolazioni corrette in aree con un numero di punti non elevato o con dati caratterizzati da una minor qualità delle informazioni.

Lo stesso prototipo è stato in un secondo momento acquisito con il sistema di presa laser scanner a triangolazione "Vivid 910" [5], effettuando tre scansioni: una frontale e due laterali (Fig. 9).

Attraverso le operazioni di pulizia iniziale del dato grezzo, registrazione manuale e globale, unione, si è ottenuto un altro modello "poligonalizzato"; è risultato comunque necessario pulire quest'ultimo dai poligoni valutati errati e da quelle parti che non costituivano motivo di interesse, per avere come output un modello tridimensionale pronto per essere importato in un ulteriore software per la generazione dei DEM.

Tuttavia, per importare in Z-Map della MenciSoftware (Fig. 10) i due modelli precedentemente elaborati, si è dovuto dapprima modificare l'estensione dei relativi file: quello generato da PhotoModeler, che originariamente aveva estensione XYZ, e il file OBJ della scansione laser sono stati trasformati in VTP, per essere processati in Z-Map [6].

Successivamente si è passati alla georeferenziazione – sulla base di punti omologhi – di un modello rispetto all'altro considerato fisso (Fig. 11). Si è ottenuto un modello roto-traslato nella posizione del modello di riferimento, potendo così studiare la corretta sovrapposizione a seguito della registrazione (algoritmo reiterato più volte al fine di ottenere risultati convergenti e quanto più prossimi alla realtà).

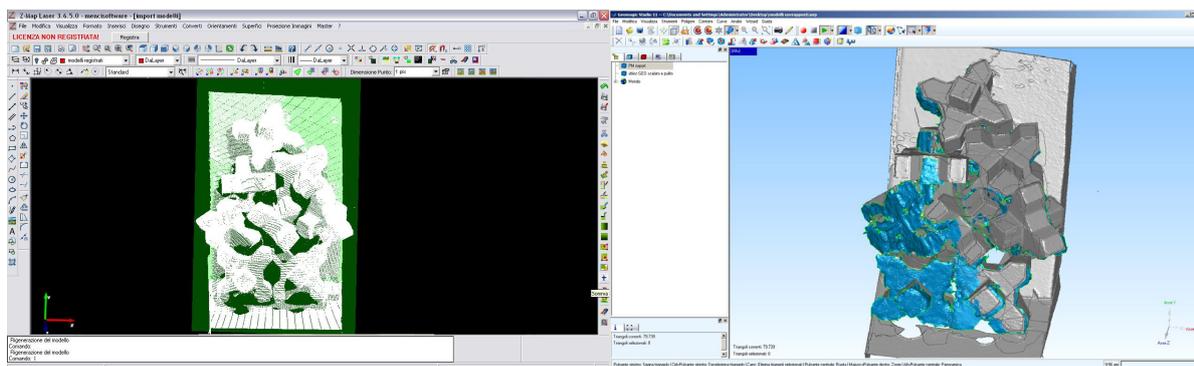


Fig. 11: Piano di riferimento per la generazione dei DEM (Z-Map) e sovrapposizione (Geomagic Studio 11).

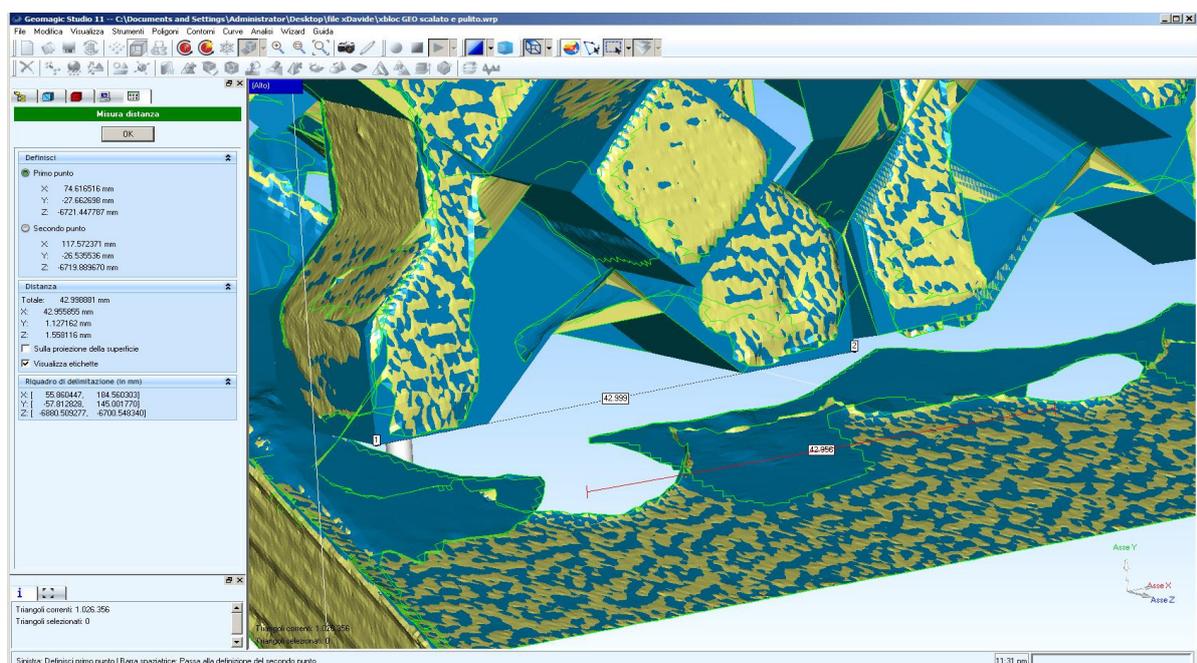


Fig. 12: Confronto tra dato metrico reale e restituzione laser scanner.

L'operazione si è resa necessaria per effettuare un confronto tra i due DEM – fotogrammetrico e laser scanner – utilizzando un unico piano di riferimento, comune a entrambi i modelli, scelto coincidente con la superficie posteriore di appoggio degli Xbloc®, significativa, fissa e nota.

Da una sintetica analisi dei principali dati di input e output, si rileva, con PhotoModeler la restituzione di un totale di 45.407 punti ottenuti da sette prese fotografiche e sei superfici di riferimento. Nel caso dell'applicazione laser, la nuvola risulta invece costituita da 416.437 punti ottenuti da tre scansioni.

Dalla fase di "poligonalizzazione" dei dati fotogrammetrici sono stati restituiti 'solamente' 79.739 poligoni, a causa di un modello di partenza più 'sporco' per il rumore che non è stato possibile ridurre in fase di calcolo, in quanto avrebbe schiacciato/appiattito oltremodo i punti in un modello dimensionalmente impreciso. Poligonalizzando, invece, la nuvola della scansione laser si ottiene un modello tridimensionale che già a vista restituisce fedelmente il modello reale in ogni sua superficie, senza l'esigenza di una vera e propria fase di postprocessamento, per un totale di 1.026.356 poligoni.

Già da una prima analisi, si conferma quindi, come il laser scanner appaia più adatto per la ricostruzione di particolari e dettagli, con uno scarto dimensionale tra il modello reale e quello così restituito pari a  $1,119 \times 10^{-3}$  mm (dato verificato alla base della maquette in Fig. 12). Ovviamente, per il tipo di sperimentazione che stiamo sviluppando, tale aspetto non è di primario interesse in quanto l'obiettivo principale è inverso nella lettura della forma dell'oggetto in tutta la sua complessità spaziale. Inoltre, in termini qualitativi, i due DEM (estratti con lo stesso intervallo di gamma) risultano concordanti metricamente e confrontabili nella variabile colore, anche se con lievi differenze di valore apprezzabili al livello della base di appoggio (Fig. 13).

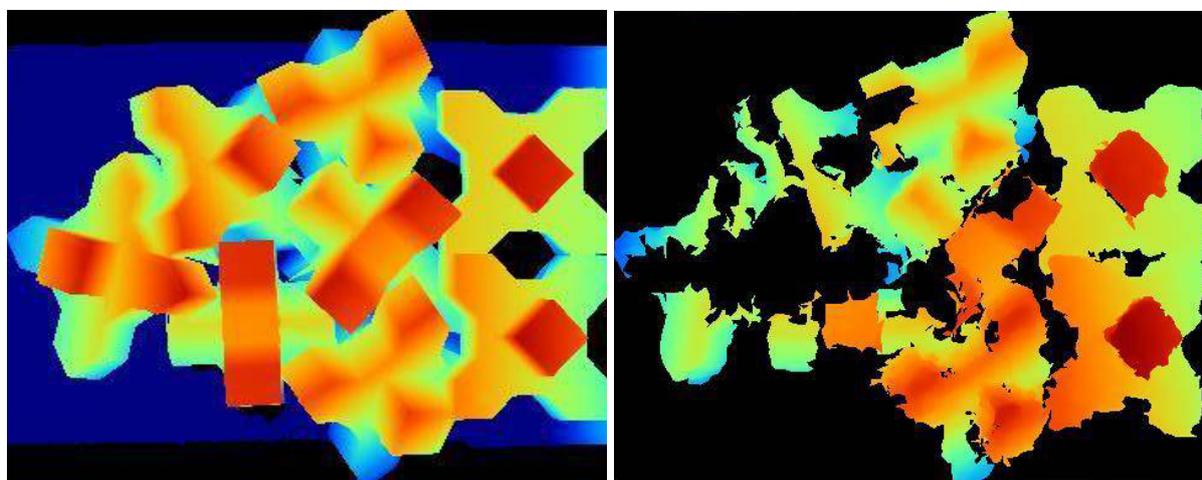


Fig. 13: DEM "laser scanner" e "fotogrammetrico" (ruotati di 90°).

Sulla generazione di modelli fotogrammetrici 3D metricamente corretti e completi – spesso di difficile gestione – incidono, come anticipato brevemente, diverse condizioni al contorno: luci dirette, zone troppo in ombra, ma soprattutto, come evidenziato durante le attività di laboratorio (svolte con il supporto dell'ing. Davide BARBATO), la necessaria fase preventiva di calibrazione della camera. Tuttavia, sebbene i primi risultati restituiti con PhotoModeler non sempre siano stati caratterizzati da completezza e continuità dei dati (in alcuni casi anche poco definiti), è banale osservare come l'implementazione di un sistema di presa laser scanner, che restituisce generalmente una nuvola più fitta, non sia sempre realistica per questioni economiche e/o logistiche. Ciò ribadisce, ancora una volta, l'importanza di una metodologia infografica integrata fra modellazione, prototipazione e rilievo.

#### 4. Conclusioni

Il contributo è dunque la sintesi di un'attività di ricerca multidisciplinare, in corso presso il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Salerno, a supporto di studi per la verifica idraulica e strutturale dell'efficienza di opere marittime, emerse o sommerse, finalizzata alla valutazione della efficacia di opere per la tutela di sistemi naturali complessi, come i litorali e le fasce costiere.

Seguendo un approccio innovativo, mediante l'utilizzo di tecniche di fotogrammetria digitale, laser scanner e CAD/CAM, si è codificata una procedura numerica che consente di riprodurre in ambito virtuale la geometria tridimensionale di opere marittime, a scala reale, di modello o prototipo. In questo modo, grazie all'impiego di specifici software di modellazione e di controllo numerico avanzato, si possono stimare gli effetti del moto ondoso sull'opera, valutandone così, anche, la stabilità.

#### Riferimenti bibliografici

[1] DENTALE, Fabio; RUSSO, Salvatore Davide; PUGLIESE CARRATELLI, Eugenio. Innovative numerical simulation to study the fluid motion within rubble mound breakwaters and the armour stability. In. AA.VV. *17th Armourstone user meeting*, Wallingford UK, articolo selezionato per l'Award for Innovation 2010.

[2] *BOLLETTINO AIOM*. DENTALE Fabio; RUSSO, Salvatore Davide; PUGLIESE CARRATELLI, Eugenio; MASCETTI, Stefano. "Nuove applicazioni della cfd per la verifica delle opere marittime a gettata", vol. 38, pp. 6-12.

[3] MESSINA, Barbara. Cyberarchitettura e progettazione digitalizzata. In AA.VV. *Actas del XVII Congreso Internacional INGEGRAF-ADM: De la tradición al futuro*. Siviglia: Maquet@ Fco. Javier Martín, 2005, pp. 1-9, ISBN 84-923253-3-X.

[4] REMONDINO, Fabio. Il rilievo 3D fotogrammetrico. In SALERNO, Rossella (a cura di). *Teorie e tecniche della rappresentazione contemporanea*. Milano: Maggioli Editore, 2011, pp. 195-216.

[5] *Journal of ISPRS*. BARBA, Salvatore; FIORILLO, Fausta; CORDER, Pedro Ortiz; D'AURIA, Saverio; DE FEO, Emanuela. "An application for cultural heritage in erasmus placement. Surveys and 3D cataloging archaeological finds in Mérida (Spain)", vol. XXXVIII-5/W16, ISSN 1682-1777, 4<sup>th</sup> International Workshop "3D-ARCH'2011" - 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures.

[6] BARBA, Salvatore. *Tecniche digitali per il rilievo di contatto*. Salerno: CUES, 2008. ISBN 978-88-95028-23-1.