

DALLA NUVOLA ALLA STRUTTURA: modelli FE e BIM per la conservazione degli edifici storici

Giovanni Castellazzi, Antonio Maria D'Altri,
Stefano de Miranda, Francesco Ubertini

*Alma Mater Studiorum Università di Bologna,
Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali*

Introduzione

Negli ultimi anni la digitalizzazione del costruito ha rivoluzionato la documentazione degli edifici storici: fotogrammetria e *laser scanning* producono nuvole di punti millimetriche e ricchissime di dettaglio. Tuttavia, la nuvola, priva di topologia e semantica, non è di per sé un modello utilizzabile per diagnosi, progettazione o gestione¹.

La letteratura ha messo in evidenza limiti e costi dei flussi tradizionali basati su ricostruzione di superfici o su *scan-to-BIM-to-FEM*, soprattutto su geometrie irregolari e rilievi incompleti². In particolare, le nuvole prodotte su edifici storici presentano spesso lacune (Fig. 1), come coperture non acquisite o parti inaccessibili, che rendono necessario un approccio robusto al rumore e alle mancanze.

In questo contesto, la letteratura di settore riconosce cinque famiglie di approcci *'from point cloud'*, che dominano il panorama³: modellazione manuale, *scan-to-BIM-to-FEM*, *mesh-to-BIM*/segmentazione, riconoscimento di primitive geometriche e metodi *voxel-* o *grid-based*.

In quest'ultima categoria si colloca Cloud2FEM⁴, un *workflow* semiautomatico sviluppato per generare rapidamente modelli volumetrici coerenti per FE e geometrie BIM semplificate, anche da rilievi parziali. Nel seguito il lavoro sintetizza i metodi esistenti, descrive la *pipeline voxel* di Cloud2FEM e, in relazione ai metodi esistenti, ne mostra l'applicazione a casi sintetici e reali, con la prospettiva di *digital twin* per il patrimonio⁵.

¹ EASTMAN *et al.* 2011; SUCCAR 2009.

² KIM, KIM 2021; ROCHA *et al.* 2020; ARAYICI *et al.* 2011.

³ TURCHETTI *et al.* 2025.

⁴ CASTELLAZZI *et al.* 2015;
CASTELLAZZI *et al.* 2022.

⁵ VUOTO, FUNARI, LOURENÇO 2023a;
VUOTO, FUNARI, LOURENÇO 2023b.

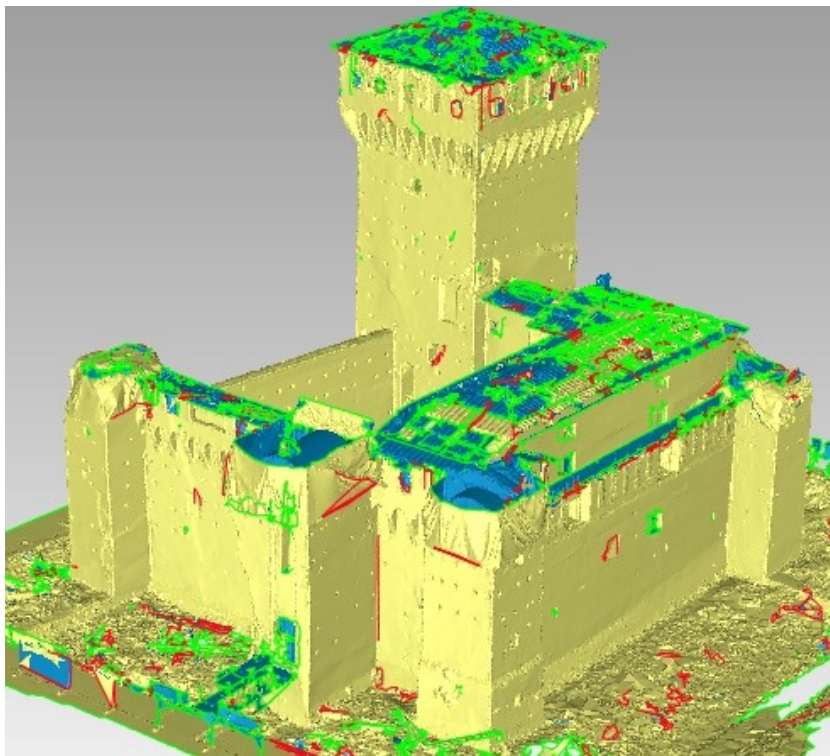
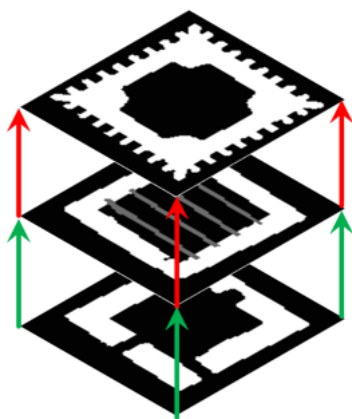
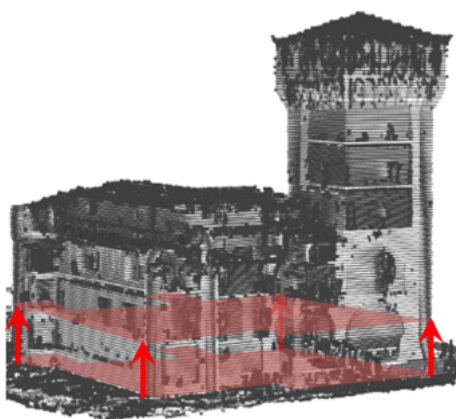


Figura 1
Esempio di ricostruzione volumetrica da nuvole di punti incomplete: la Rocca Estense di San Felice sul Panaro.



(a)



(b)

Figura 2
Esempio di rappresentazione per sezioni: (a) immagine originale della sezione con materiali distinti; (b), interpretazione geometrica con colori rappresentativi.

Dal rilievo alla modellazione: contesto e criticità

La nuvola di punti è oggi la rappresentazione più fedele e completa della geometria di un edificio storico. Tuttavia essa non distingue superfici, volumi, pieni e vuoti: è un insieme non strutturato di coordinate e pertanto richiede una fase di interpretazione e trasformazione prima di poter essere utilizzata nei flussi di modellazione strutturale o BIM. Le principali criticità operative includono: (i) densità variabile e presenza di rumore; (ii) assenza di informazione topologica; (iii) geometrie complesse, spesso lontane dai modelli ideali BIM; (iv) difficoltà a ottenere modelli solidi per FE; (v) tempi elevati dei flussi *scan-to-BIM* tradizionali. Rispetto a questi punti prendiamo in esame i cinque metodi principali proposti in letteratura per la modellazione da nuvola di punti, evidenziandone vantaggi e limiti⁶.

- *Modellazione manuale*: robusta a dati sporchi e incompleti, ma senza automazione e con tempi elevati; l'accuratezza geometrica resta limitata

- *Scan-to-BIM-to-FEM - Workflow nuvola → BIM → FEM*: robusto al rumore e applicabile a *dataset* estesi, ma lento e poco preciso su geometrie storiche complesse.

- *Approccio voxel-based*: discretizza direttamente il volume, con buona accuratezza globale, automazione alta, tolleranza a lacune; richiede *pre-processing* per *dataset* enormi.

- *Conversione mesh → NURBS*: *mesh* triangolare convertita in superfici continue, con alta accuratezza locale e automazione, ma scarsa robustezza a rumore/buchi e difficoltà a scalare.

- *Conversione mesh → modello solido*: superfici chiuse e solidi CAD via *fitting*, con accuratezza elevata e buona automazione nei software avanzati, ma poca tolleranza a lacune e scalabilità limitata.

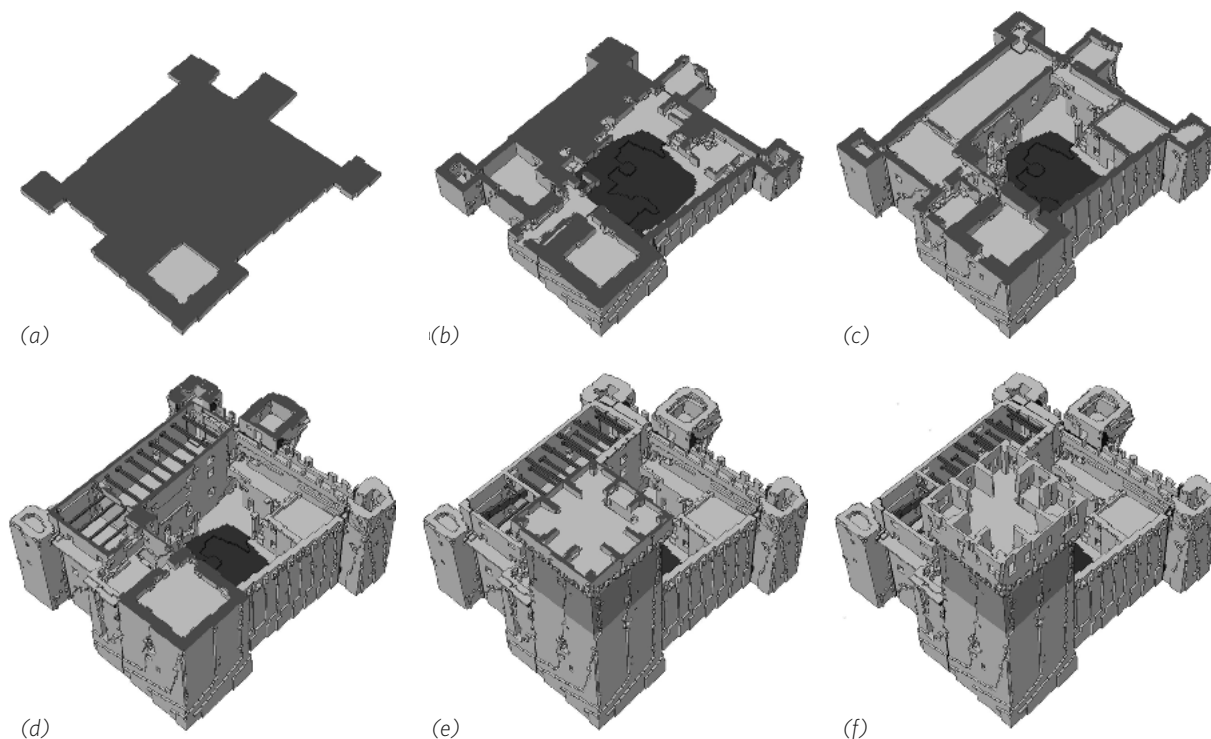
Questo quadro comparativo mostra chiaramente che non esiste un metodo universalmente migliore: ogni approccio risponde a necessità differenti. L'approccio *voxel-based* – su cui si fonda Cloud2FEM – si distingue come una soluzione equilibrata che combina automazione, robustezza, velocità e fedeltà geometrica. Proprio per questo risulta particolarmente adatto alla modellazione strutturale preliminare di edifici storici caratterizzati da geometrie irregolari e da rilievi incompleti.

Il metodo Cloud2FEM: principi e pipeline

Il principio alla base della procedura Cloud2FEM⁷ è illustrato in Fig. 2. Come per le Tomografie Assiali Computerizzate (TAC), la nuvola di punti viene

⁶ TURCHETTI *et al.* 2025.

⁷ CASTELLAZZI *et al.* 2015.



sezionata con piani orizzontali e le sezioni ottenute vengono interpretate come una sequenza di immagini, in cui diversi colori rappresentano materiali differenti (Fig. 2a): il nero indica l'aria (vuoto), il bianco la muratura e il grigio il legno. Anche una semplice rappresentazione per sezioni permette di cogliere immediatamente l'organizzazione interna dell'edificio. La ricostruzione del modello FEM avviene tramite una procedura semiautomatica, nella quale l'intervento dell'utente consiste principalmente nella scelta dei parametri fondamentali: il grado di raffinamento, la dimensione caratteristica della griglia e la soglia di classificazione pieno/vuoto. La Fig. 3 mostra come la procedura riconosca automaticamente i punti appartenenti a regioni materiali e non materiali, consentendo poi l'estrusione delle aree piene per ricostruire rapidamente volumi complessi. Successivamente, è possibile assegnare o modificare i materiali (Fig. 4a). Costruito il modello solido è possibile definire il problema discreto per elementi finiti: il voxel è sostituito dall'elemento finito

Figura 3

Esempio di ricostruzione volumetrica: (a)-(f) identificazione delle regioni materiali e non materiali per il caso della Rocca Estense di San Felice sul Panaro.

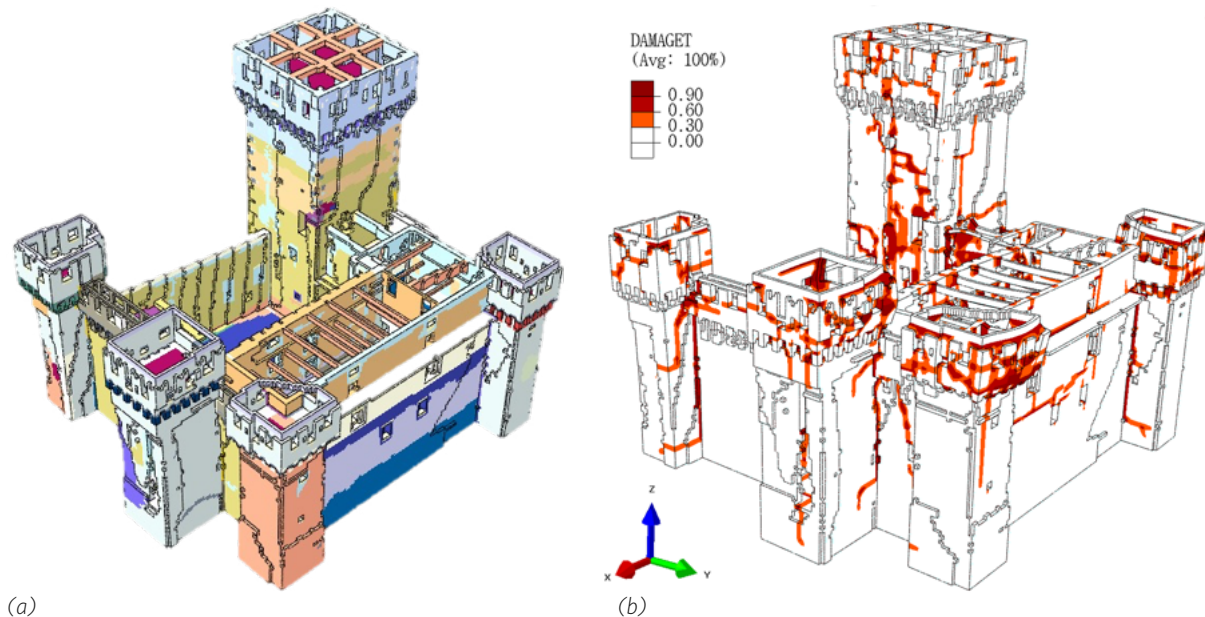


Figura 4

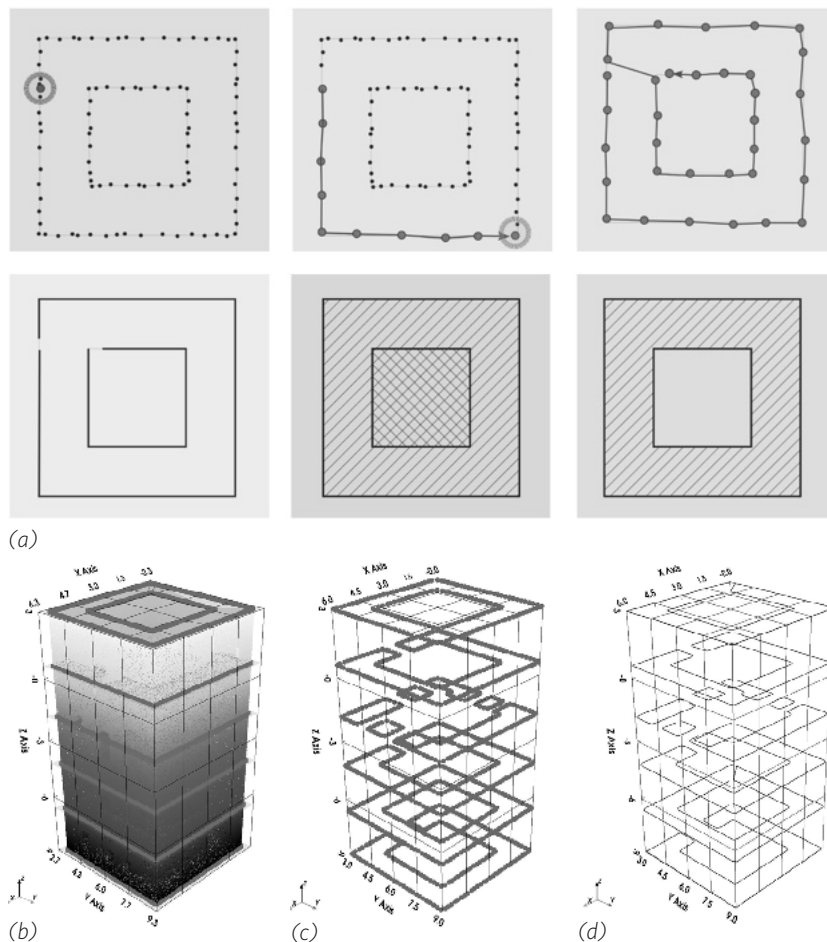
Modello FEM della Rocca Estense:
 (a) definizione dei materiali;
 (b) analisi dinamica nel dominio del tempo con accelerogramma imposto: rappresentazione del danno simulato.

brick HEX8. La Fig. 4 mostra il modello FEM ottenuto per la Rocca Estense di San Felice sul Panaro, con la definizione dei materiali e un esempio di analisi dinamica nel dominio del tempo con accelerogramma imposto.

Cloud2FEM segue tre passaggi chiave (Fig. 5): (i) *slicing* della nuvola con piani orizzontali per ottenere sezioni bidimensionali; (ii) estrazione e regolarizzazione delle polilinee per costruire il MultiPolygon di ciascuna sezione; (iii) sovrapposizione di una griglia tridimensionale e generazione della *mesh* FE brick. Il processo è rapido, robusto e adattabile a scale e complessità diverse.

Ricostruzione dei volumi e gestione delle lacune

In presenza di nuvole incomplete – crolli, coperture non accessibili, ostacoli – il metodo consente interventi mirati: (i) chiudere profili incompleti, (ii) ripristinare continuità geometriche, (iii) uniformare sezioni mancanti, (iv) integrare volumi non rilevati. L'approccio resta automatico ma correggibile, così da ottenere modelli coerenti anche con rilievi imperfetti. In Fig. 6 è mostrato il caso di studio del Mausoleo di Teodorico a Ravenna per il quale

**Figura 5**

Pipeline del metodo Cloud2FEM: (a) sulla singola slice dai punti della sezione al poligono bidimensionale; (b) slicing della nuvola di punti; (c) estrazione dei centroidi; (d) generazione delle polilinee e costruzione del Multi-Polygon.

la scansione in esame risulta parzialmente incompleta nella parte sommitale (rilievo laser scanner effettuato da terra) e la complessità dell'edificio varia nel suo sviluppo verticale. Per questo esempio, a titolo esemplificativo, sono state estratte sezioni orizzontali a passo costante (Fig. 6b), e successivamente l'utente ha definito le sezioni con passo variabile seguendo la complessità della struttura (Fig. 7a) (A alta complessità, B bassa complessità)⁸. Per le sezioni carenti (Fig. 7b), l'utente ha inserito i poligoni completati sulle parti mancanti (Fig. 7c), ricostruiti a partire dalle sezioni adiacenti (se presenti)

Figura 6

Caso di studio: (a) Mausoleo di Teodorico a Ravenna; (b) nuvola di punti con indicazione delle sezioni preliminari ottenute con passo costante.

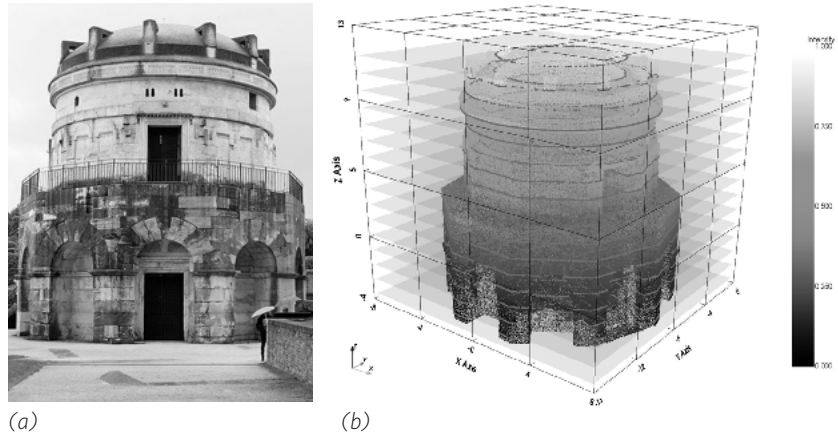
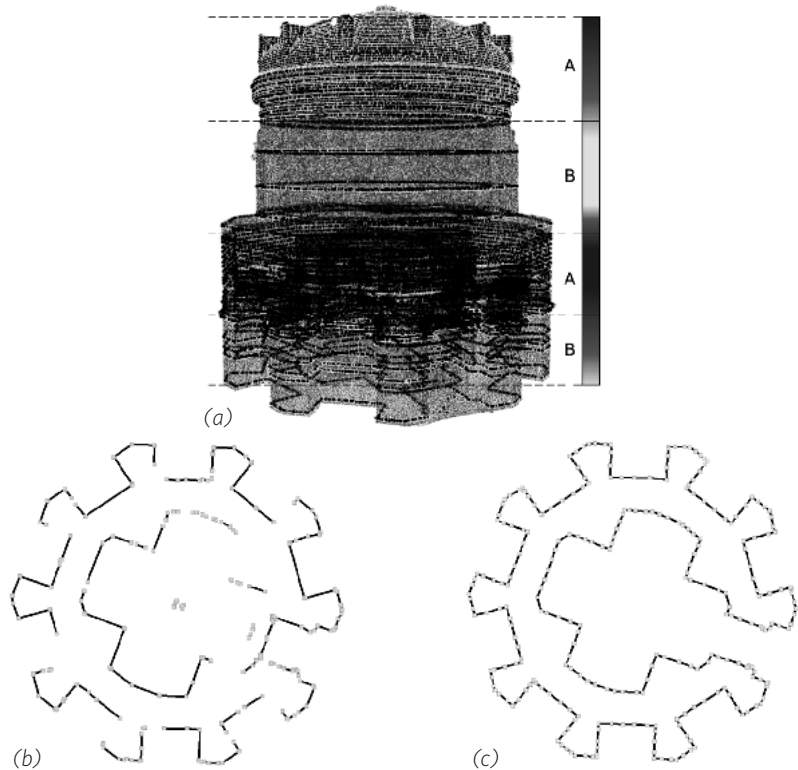


Figura 7

(a) Possibile definizione delle sezioni a passo variabile a seconda della complessità architettonica: A zone ad alta variazione geometrica; B zone a bassa variazione geometrica. (b) Esempio di sezione con profilo lacunoso su cui operare una ricostruzione manuale; (c) poligoni completati sulle parti mancanti.



mediante copie o modifiche della posizione dei nodi dei poligoni (funzioni *move*, *cancel*, *offset*, etc). Per tale esempio sono state generate quattro mesh con griglie (x, y) di dimensione decrescente che utilizzano le medesime sezioni (a passo variabile) nella direzione z (Fig. 7a), per coglierne l'effetto della dimensione delle griglie nell'analisi delle frequenze naturali, Tab. 1.

Mesh n.	griglia [cm]	n. di nodi	n. di elementi HEX8	Gradi di libertà (DoF)
1	50 x 50	24,393	17,315	73,179
2	40 x 40	36,041	26,894	108,123
3	30 x 30	60,922	48,057	182,766
4	20 x 20	129,436	107,979	388,308

Tabella 1
Caratteristiche delle mesh utilizzate per il calcolo delle frequenze naturali.

Ispezionando i valori riportati in Tab. 2 e le forme modali illustrate in Fig. 8 si osserva come l'errore percentuale commesso nell'utilizzo di mesh più grossolane (Mesh 1, 2 e 3) rispetto alla Mesh 4 risulti complessivamente contenuto (inferiore al 1.3% per i primi sei modi naturali). Ciò dimostra come, anche in presenza di rilievi incompleti e con geometrie complesse, l'approccio *voxel-based* di Cloud2FEM consenta di generare modelli strutturali coerenti e affidabili per l'analisi dinamica.

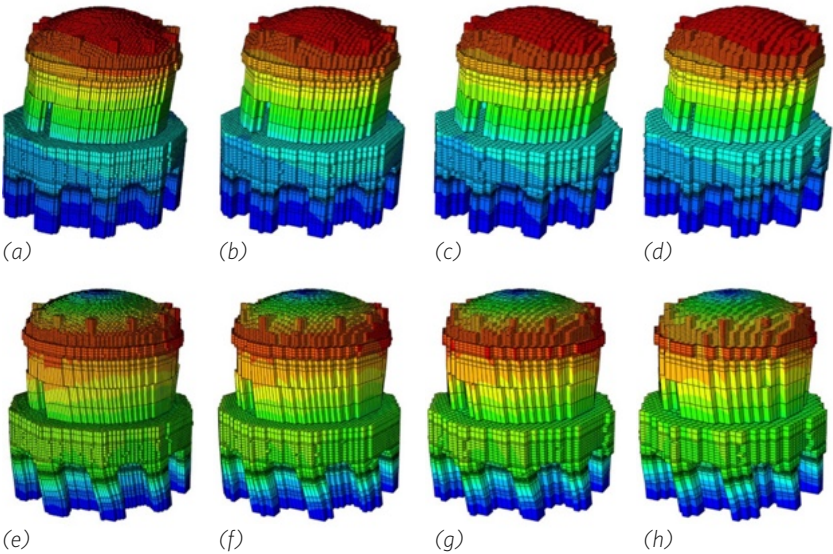


Figura 8
Modello strutturale: primo modo flessionale (a)-(d) e modo torsionale (e)-(h) ottenuti utilizzando le 4 mesh: (a) → (d) Mesh 4 → Mesh 1 e (e) → (h) Mesh 4 → Mesh 1. I valori delle rispettive frequenze sono riportati in Tab. 2.

Tabella 2

Risultati dell'analisi delle frequenze naturali del Mausoleo di Teodorico: *F* modo flessionale, *T* modo torsionale, *A* modo assiale; e errore percentuale calcolato per la Mesh 1 rispetto alla Mesh 4. Materiale: Marmo di Aurisina, densità 2659Kg/m3, Modulo Elastico 63743Mpa, Coeff. Poisson 0.35.

Modo	Mesh 4	Mesh 3	Mesh 2	Mesh 1		Tipo
	<i>f</i> [Hz]	<i>f</i> [Hz]	<i>f</i> [Hz]	<i>f</i> [Hz]	<i>e</i> [%]	
1	31.330	31.304	31.142	31.041	0.922	1 st F (N - S)
2	32.971	32.672	32.675	32.556	1.259	1 st F (E - O)
3	51.751	51.401	51.381	51.138	1.185	T
4	69.289	69.128	69.311	68.862	0.616	2 nd F (N - S)
5	72.311	72.012	72.117	71.831	0.664	2 nd F (E - O)
6	79.377	79.117	79.035	78.805	0.721	A

Dalle sezioni IFC al modello BIM

Considerato che il metodo Cloud2FEM ricostruisce in modo discreto la geometria (il volume) della struttura, associando ad essa le informazioni necessarie alla definizione del problema strutturale, l'estensione verso la generazione di modelli BIM leggeri e interoperabili rappresenta un passo naturale che richiede la semplice declinazione nel formato IFC. L'integrazione tra i flussi di modellazione strutturale e quelli BIM/HBIM⁹ avviene in tre passi: (i) ogni sezione è tradotta nella catena *IfcPolyLoop* → *IfcFace* → *IfcFacetedBrep* racchiusa in un *IfcBuildingElementProxy*; (ii) le sezioni così ottenute possono essere estruse, suddivise in parti semantiche o regolarizzate in ambiente BIM mantenendo la conformità con i principali software; (iii) la nuvola semplificata usando i soli punti delle sezioni funge da volume massivo leggero su cui innestare HBIM e modelli FE, restando aderente allo standard IFC¹⁰.

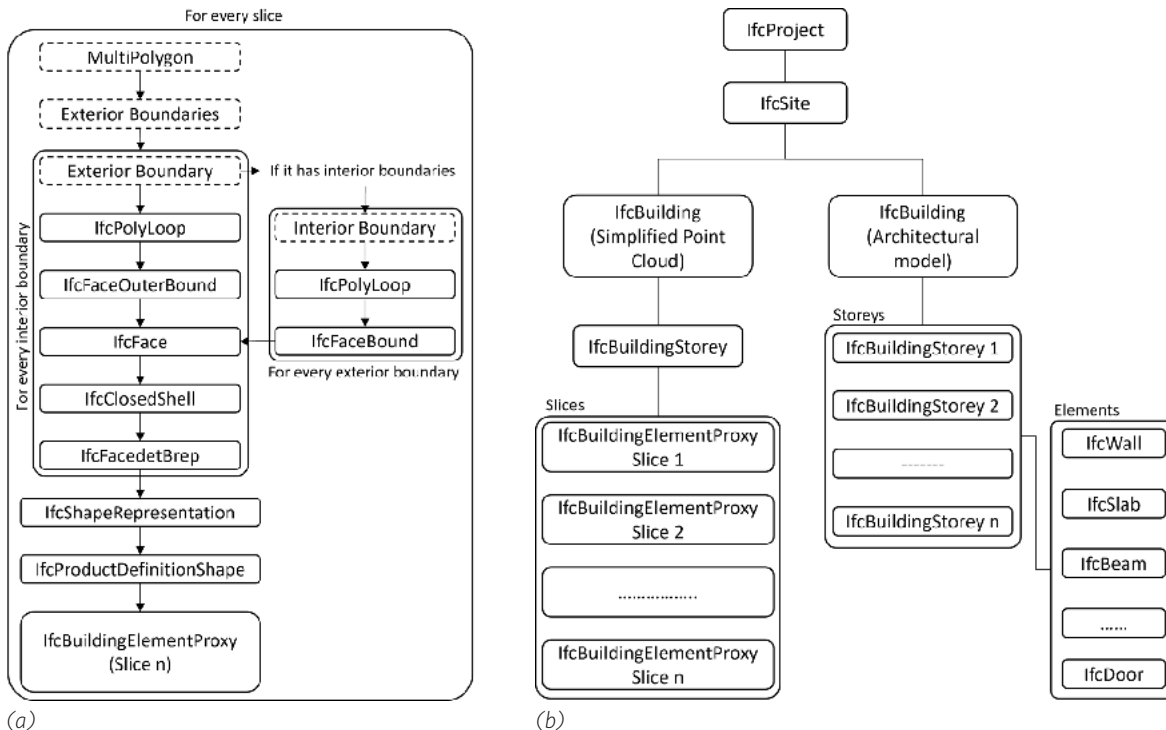
Il dizionario prodotto da Cloud2FEM¹¹ contiene *N Multi-Polygons* alle quote [*h_γ*, *h_{γ'}*, . . . , *h_N*]. La conversione (Fig. 9) li organizza in una nuvola IFC semplificata: ogni bordo esterno diventa un *IfcPolyLoop* per l'*IfcFaceOuterBound*, i bordi interni diventano *IfcPolyLoop* per le *IfcFaceBound*, e l'insieme è collocato in un *IfcBuilding-Storey* dedicato, separato dal modello architettonico sintetico ma nello stesso file IFC per favorire il lavoro collaborativo.

Dal punto di vista implementativo, la combinazione di *IfcFaceOuterBound* e *IfcFaceBound* genera lo *IfcFacetedBrep* racchiuso in un *IfcBuildingElementProxy*. Tutte le sezioni sono collocate in un *IfcBuildingStorey* dedicato nello stesso file IFC del modello sintetico.

Conclusioni

Cloud2FEM nasce per accelerare la trasformazione delle nuvole di punti in modelli FEM solidi, mantenendo robustezza a rumore e lacune e riducendo drasticamente i tempi rispetto ai *workflow mesh-* o *surface-based*. L'estensione

9 CASTELLAZZI et al. 2023; LO PRESTI et al. 2025.
10 buildingSMART 2013; IfcOpenShell 2021; VOLK, STENGEL, SCHULTMANN 2014; BEAZLEY 2009; GILLIES 2007.
11 LO PRESTI et al. 2025.



verso l'IFC apre il fronte BIM: la stessa voxelizzazione che regge l'analisi strutturale diventa base massiva interoperabile, utile per processi HBIM rapidi e controllabili. Il confronto con altri approcci conferma che la voxelizzazione offre un ottimo compromesso tra automazione e fedeltà geometrica nelle fasi preliminari, pur con limiti noti (dettagli sotto la scala di griglia, semantica da arricchire, interventi manuali dove i dati mancano). Le applicazioni reali mostrano che, anche da rilievi incompleti, si ottengono modelli coerenti per diagnosi e scenari di danno.

Guardando avanti, l'integrazione con segmentazione semantica, griglie adattive e gestione di *dataset* molto estesi è la strada per abilitare il passo successivo: un *digital twin* per beni monumentali e edifici storici, alimentato da Cloud2FEM e sincronizzato con aggiornamenti di rilievo. In questa prospettiva, la pipeline voxel + IFC non è solo un acceleratore di modellazione, ma l'infrastruttura di dati geometrici che può sostenere monitoraggio, manutenzione e decisioni informate lungo tutto il ciclo di vita.

Figura 9

Conversione di un Multi-Polygon in un elemento Ifc: generazione delle sezioni (a); struttura Ifc (b).

Ringraziamenti

Le elaborazioni sul Mausoleo di Teodorico presentate in questo lavoro derivano dalla tesi *Preserving the Past with Modern Techniques: Cloud2FEM and Artificial Intelligence for Accurate Meshing and Analysis of Historic Structures*, svolta da Mattia Forlesi sotto la supervisione del prof. G. Castellazzi e del dott. N. Lo Presti, per la quale la nuvola di punti è stata fornita dal gruppo di ricerca del prof. Luca Cipriani (Dipartimento di Architettura, Università di Bologna), responsabile del rilievo dell'edificio.

Riferimenti bibliografici

ARAYICI *et al.* 2011: Y. Arayici, P. Coates, L. Koskela, M. Kagioglou, C. Usher, K. O'Reilly, *Technology Adoption in the BIM Implementation for Lean Architectural Practice*, «Automation in Construction», 20(2), 2011, pp. 189-195.

BEAZLEY 2009: D.M. Beazley, *Python Essential Reference*, 4th ed., Addison-Wesley Professional, 2009.

BITELLI *et al.* 2018: G. Bitelli, G. Castellazzi, A.M. D'Altri, S. De Miranda, A. Lambertini, I. Selvaggi, *On the Generation of Numerical Models from Point Clouds for the Analysis of Damaged Cultural Heritage*, in «IOP Conference Series: Materials Science and Engineering», 364(1), 2018, 012083.

CASTELLAZZI *et al.* 2015: G. Castellazzi, N. Lo Presti, A.M. D'Altri, S. de Miranda, *Cloud2FEM: A Finite Element Mesh Generator Based on Point Clouds of Existing/ Historical Structures*, *SoftwareX*, 18, 2022, 101099.

CASTELLAZZI *et al.* 2022: G. Castellazzi, A.M. D'Altri, G. Bitelli, I. Selvaggi, A. Lambertini, *From Point Cloud to FE Model: A Semi-Automatic Approach for the Structural Analysis of Masonry Buildings*, «Automation in Construction», 58, 2015, pp. 174-187.

CASTELLAZZI *et al.* 2023: G. Castellazzi, E. Cardillo, N. Lo Presti, A.M. D'Altri, S. de Miranda, G. Bertani, F. Ferretti, C. Mazzotti, *Advancing Cultural Heritage Structures Conservation: Integrating BIM and Cloud-Based Solutions for Enhanced Management and Visualization*, in «Heritage», 6(12), 2023, pp. 7316-7342.

EASTMAN *et al.* 2011: C. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks, K. Liston, *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*, John Wiley & Sons, Hoboken, 2011.

GILLIES 2007: S. Gillies, *Shapely: Manipulation and Analysis of Geometric Objects*, 2007. Available at: <https://github.com/shapely/shapely>.

KIM, KIM 2021: H. Kim, C. Kim, *3D as-built modeling from incomplete point clouds using connectivity relations*, «Automation in Construction», 130, 2021, 103855.

LO PRESTI et al. 2025: N. Lo Presti, G. Castellazzi, A.M. D'Altri, G. Bertani, S. de Miranda, M. Azenha, D.S. Roggio, G. Bitelli, F. Ferretti, N. Rende, C. Mazzotti, *Streamlining FE and BIM Modeling for Historic Buildings with Point Cloud Transformation*, «International Journal of Architectural Heritage», 19(7), 2025, pp. 1086-1099.

ROCHA et al. 2020: G. Rocha, L. Mateus, J. Fernández, V. Ferreira, *A Scan-to-BIM Methodology Applied to Heritage Buildings*, in «Heritage», 3(1), 2020, pp. 47-67.

SUCCAR 2009: B. Succar, *Building Information Modelling Framework: A Research and Delivery Foundation for Industry Stakeholders*, in «Automation in Construction», 18, 3, 2009, pp. 357-375.

TURCHETTI et al. 2025: F. Turchetti, B. Cuca, D. Oreni, A. Agapiou, *Recording of Historic Buildings and Monuments for FEA: Current Practices and Future Directions*, «Heritage», 8(2), 2025, 55.

VOLK, STENGEL, SCHULTMANN 2014: R. Volk, J. Stengel, F. Schultmann, *Guidance for Industry Foundation Classes Deployment in Facilities Management*, in «Journal of Management in Engineering», 31, 6, 2014, 04014045.

VUOTO, FUNARI, LOURENÇO 2023a: A. Vuoto, M.F. Funari, P.B. Lourenço, *Shaping Digital Twin Concept for Built Cultural Heritage Conservation: A Systematic Literature Review*, «International Journal of Architectural Heritage», 18, 2023, pp. 1-34.

VUOTO, FUNARI, LOURENÇO 2023b: A. Vuoto, M.F. Funari, P.B. Lourenço, *On the Use of the Digital Twin Concept for the Structural Integrity Protection of Architectural Heritage*, «Infrastructures», 8(5), 2023, 86.

buildingSMART 2013: *buildingSMART International, Industry Foundation Classes (IFC) - Version 4*, 2013. Available at: <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc>.

IfcOpenShell 2021: IfcOpenShell Community, IfcOpenShell, 2021. Available at: <https://ifcopenshell.org>.