

ARCHAEOBIM ED EXTENDED MATRIX. ANALISI E POTENZIALITÀ DI DUE PROCESSI PER L'ELABORAZIONE DI MODELLI INFORMATIVI

1. INTRODUZIONE

Sin dalle loro prime applicazioni, i processi di ricostruzione virtuale di contesti archeologici sono stati accolti dalla comunità scientifica in maniera disomogenea (GARAGNANI *et al.* 2021, 77-83). Se da un lato è stata ampiamente rimarcata la potenzialità di questi mezzi espressivi in quanto strumenti di sintesi conoscitiva e divulgativa di dati complessi (YU HOOK 2016, 684), d'altro canto ne è stata parimenti sottolineata la potenziale ambiguità dei prodotti e la fisiologica difficoltà nel rintracciare le fonti e i processi logico-deduttivi che hanno portato alla loro elaborazione (DEMETRESCU 2018). In quest'ottica, la possibilità di generare modelli virtuali informativi si sta configurando a tutti gli effetti come una delle nuove linee di sviluppo della Virtual Archaeology (VA); disciplina che, dopo anni di dibattito sulla sua legittimità come strumento di visualizzazione, ha trovato una sua sistemazione metodologica nelle carte di Londra (LONDON CHARTER 2009) e soprattutto di Siviglia (SEVILLE CHARTER 2012).

L'opportunità di configurare i modelli virtuali come veri e propri contenitori di informazioni porta dunque alla possibilità di costruire dei prodotti che trascendono la sola rappresentazione visuale, diventando parimenti degli efficaci contenitori dei processi logico-deduttivi necessari alla loro realizzazione (paradati). Nel corso di questo articolo verranno prese in esame due di queste metodologie, l'ArchaeoBIM e l'Extended Matrix. Questi due processi, messi a punto in anni recenti, rispondono entrambi alla necessità di trasformare i modelli virtuali in contenitori di informazioni, associando alle istanze che li costituiscono una serie di metadati e paradati, richiamabili e interrogabili in fase di fruizione e studio. Entrambi i processi si inseriscono pienamente nella cornice metodologica della VA, configurandosi come implementazioni rispetto ai più "tradizionali" processi di modellazione e visualizzazione, in pieno accordo ai principi 3 e 4 della Carta di Londra e ai principi 4, 5 e 7 di quella di Siviglia.

Nella prima parte di questo contributo si proporrà dunque un confronto sistematico tra questi due processi, considerando sia gli obiettivi che ne orientano l'applicazione che i risultati ottenibili da entrambi, mentre nella seconda parte del contributo verrà invece proposto un protocollo di integrazione tra i due. L'obiettivo è quello di individuare una metodologia efficace per descrivere al meglio la proposta ricostruttiva di un contesto archeologico

non più preservato e caratterizzato dalla presenza di molteplici fasi di vita. Lo spunto per un confronto strutturato tra i due metodi nasce dalla recente applicazione di entrambi al medesimo contesto di Marzabotto, la Casa 1 della *Regio IV, Insula 2* (R.IV, 2).

Il sito di Marzabotto è stato negli anni al centro di numerosi progetti di VA, diretti e coordinati dalla cattedra di Etruscologia dell'Università di Bologna, volti a migliorare la comprensione delle strutture archeologiche per il pubblico non specialista, colmando l'imponente divario che intercorre tra la percezione delle evidenze archeologiche sul campo (conservate perlopiù solo a livello di fondazioni) e il ruolo architettonico degli edifici in antico, comprensibile solo al termine di un lungo e filologico lavoro di studio e analisi archeologica (GAUCCI *et al.* 2015).

A partire dai primi esperimenti della fine degli anni '90 (SASSATELLI, TAGLIONI 2000) e dei primi anni 2000 (BELTRAMI 2010, specificatamente incentrato sulla Casa 1), i più importanti risultati sono stati ottenuti nel corso del progetto FIR 2013: *KAINUA. Restituire, percepire, divulgare l'assente. Tecnologie transmediali per la città etrusca di Marzabotto* che ha permesso di approdare ad una filologica restituzione dell'abitato (GARAGNANI 2017; GAUCCI 2017; GOVI 2017; GRUŠKA *et al.* 2017; MUZZARELLI, FRANZOIA 2017) e di trasformare il sito di Marzabotto in un vero e proprio laboratorio di VA (GARAGNANI *et al.* 2017, 15). In tempi recenti il sito è stato poi tra i protagonisti del progetto e-Archeo (<https://e-archeo.it/>), nel corso del quale alcuni contesti, tra cui la Casa 1, sono stati selezionati sulla base della loro importanza sul piano storico e della loro potenzialità narrativa e ricostruiti mediante il processo dell'Extended Matrix.

2. EXTENDED MATRIX E ARCHAEOBIM: PROCESSI A CONFRONTO

Prima di entrare nel dettaglio del confronto tra le due metodologie, rispetto agli obiettivi e ai risultati ottenibili con entrambe, sembra lecito richiamare brevemente i principi fondamentali dell'Extended Matrix e dell'ArchaeoBIM, rimandando all'ampia bibliografia disponibile per i necessari approfondimenti metodologici di entrambi.

2.1 *Extended Matrix*

L'Extended Matrix (EM) è un linguaggio descrittivo semantico basato sulla teoria dei grafi, e più specificatamente sull'Harris Matrix (HARRIS 1979; HARRIS *et al.* 1993), quest'ultimo ampiamente utilizzato in ambito archeologico come tecnica di rappresentazione della stratificazione dei depositi archeologici e degli alzati degli edifici. Nell'EM (DEMETRESCU 2015, 2018; DEMETRESCU, FANINI 2017; DEMETRESCU, FERDANI 2021), alle Unità Stratigrafiche (US) che descrivono la successione di azioni di un determinato

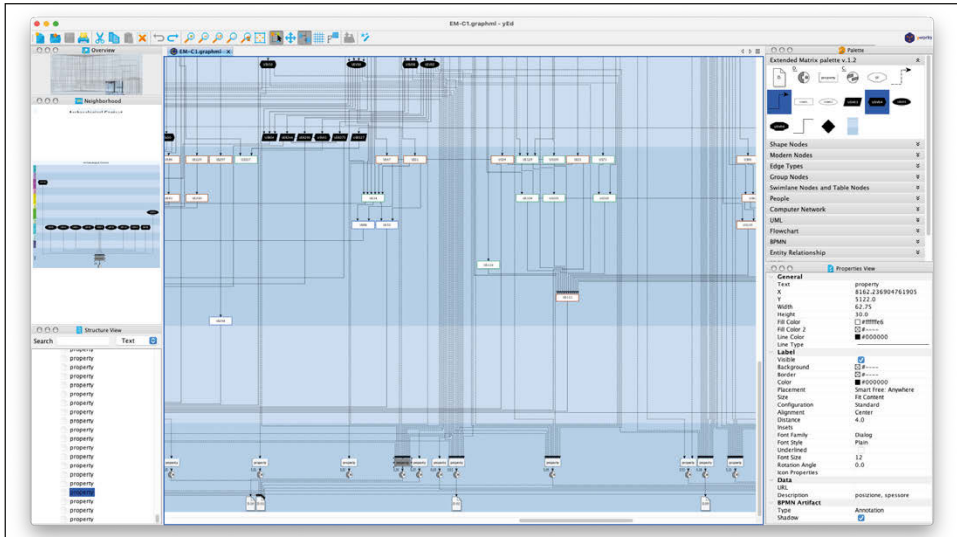


Fig. 1 – Particolare dell'EM realizzato per il caso studio della Casa 1 della R.IV, 2 di Marzabotto.

contesto vengono associate delle Unità Stratigrafiche Virtuali (USV), ovvero le ipotesi ricostruttive riguardanti una o più specifiche US ora non più esistenti a causa di una interruzione nella storia del contesto archeologico, come ad esempio la distruzione del tetto o il crollo delle pareti (DEMETRESCU 2015, 47). Il processo logico-deduttivo che porta alla creazione di una specifica USV è documentabile attraverso diversi nodi, volti ad inserire all'interno del grafo le fonti consultate (document node), le informazioni desumibili dalle stesse (extractor node) e le proprietà che quella combinazione di informazioni ha prodotto (property node) (DEMETRESCU, FANINI 2017).

Il risultato finale di questo processo è un unico grafo che descrive lo stato del deposito archeologico e la sua (o le sue) ipotesi ricostruttive, organizzando i dati secondo una sintassi visuale standardizzata (Fig. 1). Il grafo viene poi importato in un software di modellazione poligonale, dove le informazioni e i paradata relativi alle singole US e USV vengono associati alle geometrie. Il risultato finale è quindi un source-based model del singolo contesto, in cui le fonti e i processi messi a punto per la ricostruzione vengono associati alle geometrie corrispondenti, fornendone una annotazione semantica.

Il processo, come descritto nella letteratura più recente (DEMETRESCU, FERDANI 2021) si compone di cinque step, a partire dalla collezione dei dati (che prevede la loro sistemazione all'interno di una tabella delle fonti), procedendo per l'analisi stratigrafica, l'annotazione dei resti archeologici e la loro visualizzazione in ambiente 3D grazie a modelli proxy. A questi vengono poi

aggiunte le ipotesi ricostruttive, sviluppate sia in forma di modelli proxy, che di nodi all'interno dell'EM. Si genera così un modello collaborativo, che può essere messo a disposizione per ulteriori modifiche e per la validazione, ed il cui aspetto cooperativo si sostanzia nella possibilità di far operare in modo asincrono molteplici utenti sul modello e sul grafo.

Gli step successivi prevedono poi la realizzazione di un modello di dettaglio, che ricalca la struttura sviluppata sulla base dei proxy, ma con una miglior risoluzione grafica e un livello di dettaglio (LoD) superiore, e la pubblicazione di tutti i dati usati per la ricostruzione assieme al modello stesso. Il processo di modellazione segue in senso inverso quello descrittivo del grafo, partendo dall'esistente (generalmente le fondazioni e i muri), passando per l'anastilosi virtuale degli elementi conservati (definiti "special finds") fino ad arrivare agli elementi strutturali oggi inesistenti (coperture).

Va infine sottolineato che, nonostante l'EM sia stato sviluppato per essere svincolato da specifici software, esiste ad oggi un ottimo ecosistema di programmi e plug-in che permettono di gestire l'intero flusso di lavoro mediante software freeware e open source usati per gestire ed elaborare il database grafico (yEd), connettere il grafo con il modello 3D (Blender con l'add-on EMtools: DEMETRESCU 2022) e visualizzarne la ricostruzione (EMviq).

2.2 *ArchaeoBIM*

L'ArchaeoBIM è una metodologia di ricostruzione sviluppata per la restituzione di edifici parzialmente perduti, o di cui si conservano solo poche tracce, e incentrata su processi di modellazione delle informazioni di costruzione espressi per mezzo di modelli BIM (GARAGNANI *et al.* 2021). Il Building Information Modeling risulta ampiamente utilizzato nella moderna scienza delle costruzioni come metodo di progettazione e ottimizzazione della pianificazione, in quanto tutti i dati del progetto di un edificio vengono raccolti, combinati e collegati digitalmente. Rispetto ad altri processi che utilizzano i modelli virtuali come mezzo descrittivo, il BIM si caratterizza per l'utilizzo di una rigorosa semantica architettonica, in cui i vari componenti che descrivono un edificio vengono generati parametricamente attraverso una coerente sintassi strutturale. Gli elementi strutturali sono gerarchicamente organizzati in famiglie (per es., muri, travi, tetti, porte, finestre, etc.) e suddivisi in tipi, per i quali è possibile definire puntualmente misure, proprietà, componenti e rapporti (Fig. 2).

Nella declinazione archeologica dell'ArchaeoBIM, il flusso di lavoro non differisce molto da quello applicato all'architettura moderna, per il quale il BIM è stato creato. Concentrandosi su contesti conservati perlopiù a livello di fondazioni, il processo prevede la "ri-progettazione" dell'edificio antico a partire dall'analisi tecnica delle fonti archeologiche disponibili per il contesto. Il processo di modellazione segue dunque quello di progettazione (antica e

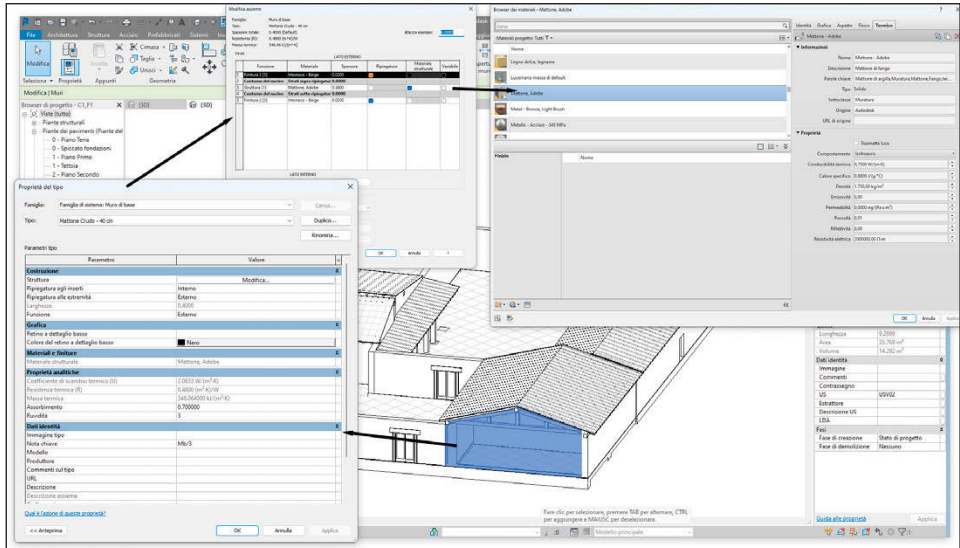


Fig. 2 – Particolare del processo di definizione delle proprietà di un muro in mattoni crudi nella ricostruzione BIM della Casa 1 della R.IV, 2. In evidenza i pannelli di definizione del tipo, della stratigrafia e dei materiali utilizzati.

moderna; cfr. GIULIANI 2006, 53-60) e prevede primariamente la definizione degli elementi architettonici (cioè muri, pavimenti, tetti, etc.), che daranno la forma all'edificio, per arrivare poi a quelli strutturali (fondazioni, pilastri, travi, etc.), vincolati ai primi con funzione di supporto. Lo scopo è infatti quello di arrivare alla plausibile restituzione di un edificio antico in una o più fasi del suo alzata. Il processo nasce primariamente con l'intento di fornire una validazione di credibilità architettonica all'edificio ricostruito (GAUCCI 2017, 101), facilitandone la revisione a tutti gli step del processo, dalla riflessione iniziale sulle tecniche e i materiali costruttivi, attraverso la loro messa in opera virtuale, fino alla simulazione finale rispetto a stimoli esterni: fisici, termici, meteorici, luminosi (GARAGNANI *et al.* 2016a, 2016b; GAUCCI 2017).

Un rilevante aspetto dei modelli BIM è la loro natura come insieme di oggetti parametrici contenenti informazioni, di fatto dei database 3D con i dati e i paradatai dei loro stessi elementi costituenti; in quanto raggruppamenti di dati, questi possono essere implementati e arricchiti fino a generare dei veri e propri modelli federati (GARAGNANI *et al.* 2021, 152-154). La rappresentazione geometrica diventa così una dei molti possibili attributi che descrivono feature che caratterizzano un edificio non più esistente. Anche nel metodo ArchaeoBIM l'aspetto collaborativo gioca un ruolo di primaria importanza, soprattutto grazie alla possibilità di esportare i dati in schemi standardizzati,

quali IFC, fondamentali per rendere i singoli modelli interoperabili tra molteplici software (cfr. *infra*), favorendo pertanto il confronto multidisciplinare (GERBINO *et al.* 2021).

2.3 Considerazioni preliminari

Da queste considerazioni preliminari sui due metodi emergono alcuni spunti di confronto. *In primis* va sottolineato come entrambi i processi condividano il medesimo obiettivo finale, cioè quello di approdare alla descrizione dell'ipotesi ricostruttiva di un contesto archeologico mediante un modello virtuale. In entrambi i casi, inoltre, il modello deve necessariamente configurarsi come un contenitore di informazioni, raggruppando al suo interno dati, paradata e metadati che possano essere messi a disposizione dell'utenza finale e/o che possano essere utilizzati per generare ulteriori forme di visualizzazione informativa basata sugli stessi. Per entrambi, inoltre, la base dati risulta in gran parte sovrapponibile e consiste almeno in un rilievo del contesto, in un'analisi tecnica dei resti architettonici rinvenuti (GIULIANI 2006, 26-27) e in una riflessione strutturata sulla sequenza di fasi dello stesso. Per il processo EM questa si sostanzia nell'Harris Matrix, fondamentale punto di partenza per la redazione dell'EM.

Il livello di dettaglio dei reperti o lo stato di conservazione delle strutture di per sé non sembrano inficiare il risultato ottenibile con entrambi i metodi, come testimoniano i risultati delle diverse esperienze di modellazione del contesto della Casa 1 della R.IV,2 (MANCUSO 2023b). Entrambi i processi sembrano poi parimenti utilizzabili per la realizzazione di una ricostruzione multifase, pur con alcune differenze sul piano dei risultati, dettate primariamente dal tipo di software utilizzato per la generazione dei modelli (cfr. *infra*). Rispetto ai risultati ottenibili, una riflessione comparativa può essere strutturata su due fattori principali: il processo di generazione dell'elemento informativo e il suo prodotto finale. Nel caso dell'EM, l'aspetto informativo si concentra maggiormente sul processo logico-deduttivo e descrittivo dei paradata del modello, per cui si propone una strutturazione espositiva formale, standardizzata ed efficace all'interno del grafo descrittivo del contesto (DEMETRESCU, FANINI 2017). Nell'ArchaeoBIM, invece, questo stesso aspetto si incentra sulle proprietà architettoniche e strutturali dell'elemento ricostruito e soprattutto sul ruolo svolto all'interno del progetto, imponendo meno vincoli per quanto riguarda la mappatura e l'uso delle fonti utilizzate nella ricostruzione o il livello di affidabilità della porzione ricostruita (GARAGNANI *et al.* 2021, 120-122).

Questo differente approccio all'aspetto informativo della ricostruzione sembra sostanziarsi in una maggior devozione al dato archeologico nel primo metodo e ad un più spiccato interesse a quello architettonico-strutturale nel secondo. Così, per la generazione del medesimo elemento, ad esempio

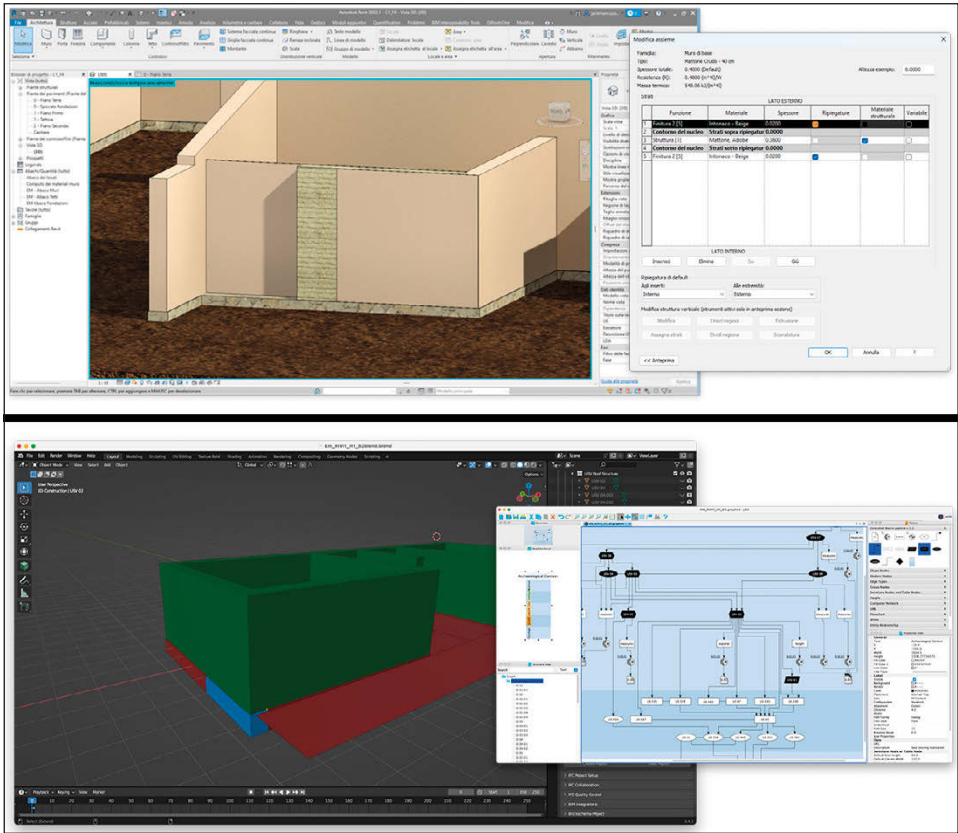


Fig. 3 – Differente approccio alla descrizione della stratigrafia muraria tra i processi BIM (in alto) ed EM (in basso), con particolare attenzione alla componente geometrica della ricostruzione.

un muro, il processo ArchaeoBIM rivolge primariamente l'attenzione sulla definizione puntuale dei suoi aspetti architettonici: i materiali usati, la loro tecnica di messa in opera, la stratigrafia, fino ad arrivare alla precisa definizione delle caratteristiche termico-fisiche di quell'elemento. Questa attenzione viene richiesta dal processo BIM stesso e trova uno spazio espositivo ottimale all'interno del software, configurato appositamente per la gestione di questo tipo di informazioni. Per contro il processo EM incentra il processo espositivo dei paradata dell'elemento (altezza, larghezza, materiale, etc.) sul percorso logico-deduttivo che ha portato alla loro definizione, imponendo di espletarne chiaramente il processo nel corso della definizione dell'EM. Alcune informazioni, dunque, quali la stratigrafia muraria, per cui pure è configurabile uno spazio descrittivo idoneo all'interno del grafo, non sembrano però trovare

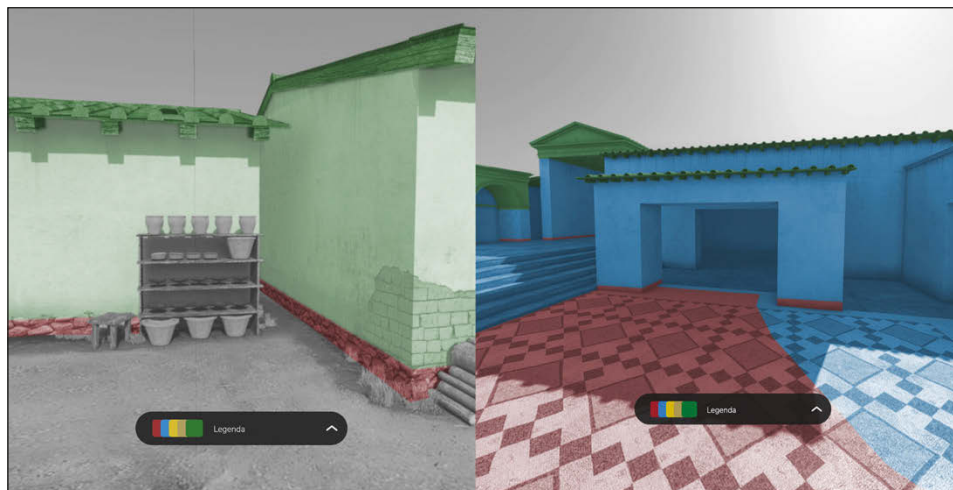


Fig. 4 – Render ricostruttivo realizzato con EM della Casa 1 (a sinistra) e del Santuario di Esclupio di Nora (a destra). In rosso le US, in verde le USV e in blu il restauro virtuale a partire da evidenze fisiche (da E-ARCHEO 2022; render: Katatexilux).

un altrettanto efficace corrispettivo nella fase di modellazione, in un software non costruito per la gestione di dati specificatamente architettonici, ma più generalmente poligonali (Fig. 3).

Un ulteriore e forte elemento di distinzione tra i due processi riguarda il tipo di prodotto che viene generato. Il flusso di lavoro dell'EM porta infatti alla realizzazione di almeno due modelli poligonali (proxy e di dettaglio) che si differenziano per il diverso LoD delle geometrie, ma che rimangono fondamentalmente due ricostruzioni distinte all'interno di una o più scene virtuali connesse ad un database di informazioni (DEMETRESCU, FERDANI 2021). Questi, pur diventando efficaci contenitori del processo intellettuale percorso per generarli e descritto dall'EM, risultano però meno idonei a produrre nuove informazioni che trascendano l'aspetto più schiettamente visuale. Nel prodotto finale risulta dunque sacrificato l'aspetto di sperimentazione che si può condurre sul modello (simulazioni fluido-dinamiche, illuminazione, etc.), fondamentalmente limitata ai soli aspetti visuali (DEMETRESCU 2018, 103-106). Certamente, la possibilità di generare proceduralmente forme di visualizzazione basate sul livello di affidabilità dei dati a disposizione risulta uno dei risultati più interessanti del processo ricostruttivo, che produce così un output standardizzabile e facilmente confrontabile. Ad ogni tipo di nodo usato per la descrizione del contesto il sistema assegna infatti automaticamente un codice cromatico che differenzia le USM (rosso), il loro completamento (blu), gli elementi di anastilosi virtuale (giallo scuro), il loro restauro virtuale

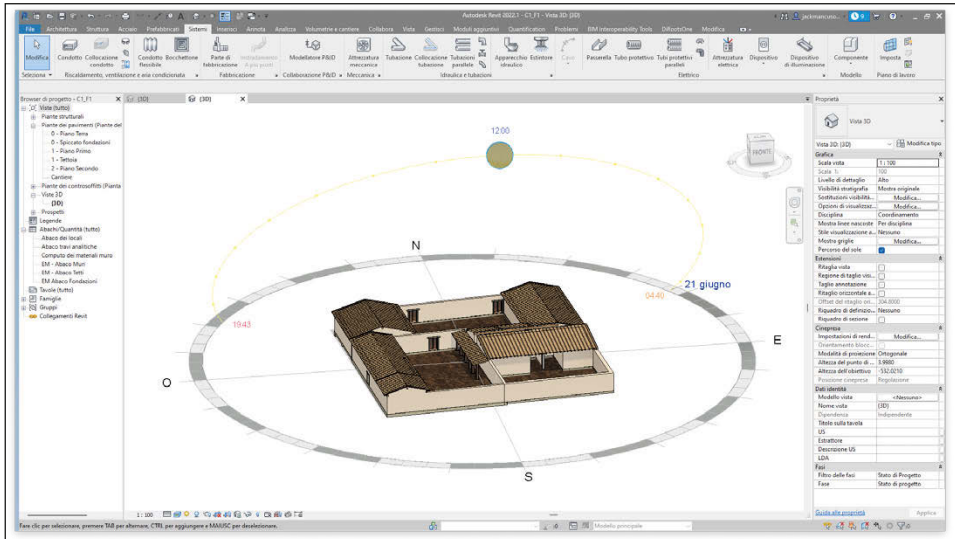


Fig. 5 – Modello ricostruttivo BIM della prima fase della Casa 1.

(giallo chiaro) e gli elementi architettonici il cui posizionamento viene fatto sulla base dell'analisi tecnica dell'edificio (verde) (DEMETRESCU, FERDANI 2021, con ampia selezione di casi studio).

Questa procedura, per quanto molto efficace in contesti ad elevata complessità architettonica e ricchi di elementi di cui fare anastilosi (colonne, capitelli, fregi decorati), tende tuttavia ad appiattire visivamente l'esito del processo ricostruttivo nelle situazioni in cui questo viene svolto primariamente su materiali architettonici scarsamente conservati o quasi interamente perduti, le cui proprietà (presenza, posizione, messa in opera) sono dedotte quasi interamente sulla base dell'analisi tecnica. Il problema si osserva ad esempio nella caratterizzazione dei modelli di contesti scarsamente preservati sul piano archeologico, dove, ad eccezione delle fondazioni, la quasi totalità delle strutture ricostruite viene descritta da USV e appare pertanto di colore verde (Fig. 4). Ne risulta pertanto un fisiologico appiattimento nella definizione visuale del livello di affidabilità, senza una apparente distinzione tra gli elementi con una credibilità ricostruttiva maggiore (muri, elementi di copertura del tetto, per cui si dispone generalmente di chiare tracce archeologiche) e quelli più incerti (porte, finestre, intelaiature lignee, tutte costituite da materiali deperibili).

Per contro, l'ArchaeoBIM si può configurare non solo come un altrettanto efficace contenitore di informazioni, ma risulta uno strumento ottimale proprio per la produzione di nuove informazioni sul contesto a partire dalla

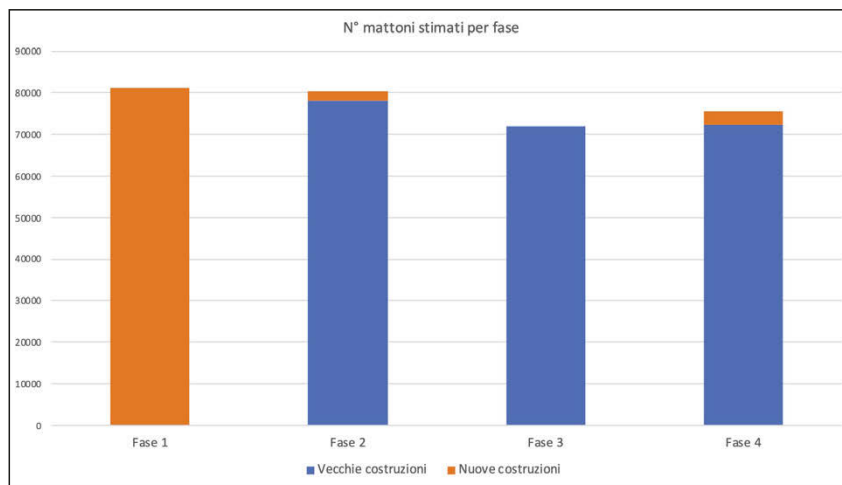


Fig. 6 – Grafico riportante la stima dell’uso di mattoni (28×18×12 cm) nelle varie fasi di vita dell’abitazione, differenziando per ogni fase le quantità riferibili allo stato di fatto.

verifica della sua fattibilità strutturale. La rigorosa strutturazione del dato architettonico permette infatti al software di elaborare informazioni complesse, che vanno ad incrementare la conoscenza del contesto stesso ben oltre l’aspetto visuale, producendo dati misurabili (e dunque confrontabili) quali il computo dei materiali utilizzati per la costruzione, il volume e la superficie degli ambienti, il rapporto tra le aree aperte e chiuse, fino ad arrivare a complesse simulazioni di tipo statico, termico o luminoso (GARAGNANI *et al.* 2021, 95-97). L’elaborazione del modello BIM della Casa 1 (Fig. 5) ha permesso così di stimare efficacemente l’impiego diversificato di materiale edilizio nelle varie fasi dell’abitazione, quantificando con buona approssimazione l’uso delle risorse nel tempo (Fig. 6).

L’efficacia dell’ArchaeoBIM risulta però vincolata agli elementi che possono essere inquadrati nelle famiglie BIM e come tali generati parametricamente e processati dal sistema. Elaborato per l’architettura moderna, l’adattamento di questo processo al mondo antico non risulta pertanto privo di complicazioni e pone alcuni problemi nell’inserimento di elementi architettonici non parametrizzabili (e.g. decorazioni architettoniche) o non contemplati dal moderno codice edilizio (e.g. antefisse). Tutto ciò che esula da questo tipo di parametrizzazione può comunque essere inserito nel sistema sotto forma di geometria poligonale, ma con importanti limitazioni sul piano dell’analisi, circoscritta in questo caso al solo aspetto visuale. Va inoltre sottolineato che il processo di modellazione BIM, proprio per la natura parametrica del processo di costruzione delle geometrie, tende a produrre modelli piuttosto

schematici sotto il profilo grafico e si può affermare che i relativi software non dispongono delle potenzialità espressive sul piano grafico dei programmi di modellazione poligonale tradizionali.

Sulla base delle considerazioni sopra esposte emerge come, a parità di obiettivi, i modelli BIM presentano prospettive di analisi più stimolanti per quanto riguarda la sperimentazione, pur rimanendo maggiormente limitati sul piano della restituzione visuale di dettaglio. Per contro, i prodotti elaborati in un modellatore poligonale presentano un alto grado di potenzialità espressiva sul piano della resa grafica, privi della limitazione derivante dalla strutturazione per famiglie tipica dell'ambiente BIM, configurandosi come strumenti di gran lunga superiori per quanto riguarda l'aspetto della visualizzazione pura e semplice.

3. IL CASO STUDIO: LA CASA 1 (R. IV, 2) DI *KAINUA*-MARZABOTTO

Come anticipato il contesto della Casa 1 della R.IV, 2 di *Kainua*-Marzabotto ha costituito la cornice in cui condurre le sperimentazioni su entrambe le metodologie. L'abitazione costituisce sicuramente uno dei contesti più stimolanti del sito di Marzabotto su cui impostare una ricostruzione virtuale, in ragione della sua lunga e articolata sequenza di fasi edilizie e delle molteplici soluzioni architettoniche adottate. L'abitazione presenta quattro fasi edilizie a partire dalla fondazione databile tra la fine del VI e gli inizi del V secolo a.C. fino all'abbandono nell'inoltrato IV secolo a.C. (GOVI 2010). Nel corso degli anni la Casa 1 è già stata protagonista di diverse proposte ricostruttive (BELTRAMI 2010; GOVI 2016, fig. 4; cfr. anche <https://e-archeo.it/marzabotto/>), volte a restituire specifiche fasi o distinte aree, ma risultava ad oggi ancora priva di un modello che ne descrivesse integralmente tutte le varie evoluzioni nel corso del tempo.

Il prodotto che si presenta nasce proprio con questo specifico intento, cioè quello di restituire estensivamente tutte le fasi edilizie della casa, dall'esordio alla dismissione, all'interno di un unico sistema informativo che permetta, oltre alla visualizzazione, anche la consultazione delle informazioni usate per la sua realizzazione (MANCUSO 2023b). Tra i vari intenti, oltre alla gestione del dato multifase, di primaria importanza è anche quello di riconsiderare con nuovi mezzi il problema delle coperture degli edifici che compongono la casa, anche alla luce delle numerose riflessioni fatte per il sito di Marzabotto (GRUŠKA *et al.* 2017).

Tenuto conto delle particolarità metodologiche dei due processi di ricostruzione, si è cercato di procedere all'elaborazione del modello della Casa 1 integrando i due metodi. Considerate le limitazioni imposte dai modellatori BIM sul piano grafico, e dunque l'impossibilità di sostituire al modello di rappresentazione del processo EM un prodotto BIM, il punto di giunzione

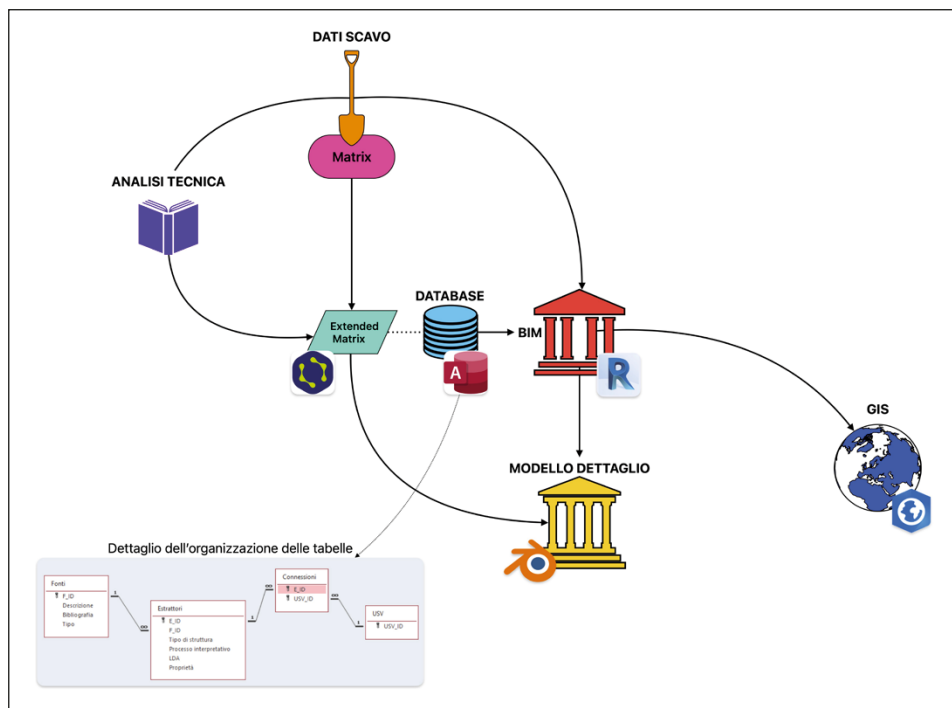


Fig. 7 – Mappa concettuale del processo di integrazione tra ArchaeoBIM ed EM. In basso a sinistra: dettaglio dello schema di relazioni tra le tabelle nel database.

tra i due processi è diventata la realizzazione del modello proxy dell'edificio, che è stato modellato mediante un processo ArchaeoBIM. Si è infatti precedentemente osservato come entrambi i metodi abbiano fundamentalmente il medesimo punto di partenza, ovvero il rilievo del contesto, l'analisi tecnica dell'edificio e la definizione delle fasi edilizie dello stesso. Il primo step ha dunque riguardato il recupero della documentazione e la realizzazione di una tabella delle fonti da utilizzare nel corso della ricostruzione. La casa, scavata tra il 1988 e il 1998, risulta priva di documentazione nativamente digitale e le fondazioni in ciottoli sono state ricoperte al termine delle operazioni di scavo per ragioni di conservazione. Considerata dunque l'impossibilità di procedere sul campo con un rilievo 3D delle strutture, la documentazione topografica di base su cui impostare la ricostruzione è quella costituita dall'insieme di planimetrie, sezioni e prospetti poi confluiti nella pubblicazione integrale dello scavo (GOVI, SASSATELLI 2010). A questa si è aggiunta l'elaborazione del matrix dello scavo, che ha costituito il punto di partenza per la realizzazione dell'EM (MANCUSO 2023b).

Questi dati, elaborati nel corso della modellazione sotto forma di grafo, sono stati parallelamente trasferiti anche in un database, costruito su quattro tabelle: fonti, estrattori, connessioni e USV. La struttura pluri-tabellare del database è funzionale alla gestione delle relazioni uno-a-uno tra le tabelle fonti ed estrattori e quelle uno-a-molti tra gli estrattori e le USV, passando per la tabella connessioni (Fig. 7). Nel corso dell'elaborazione dell'EM si è infatti osservato che la descrizione di alcune proprietà, come l'altezza dei muri, tendesse a basarsi sui medesimi processi deduttivi, ripetibili per la quasi totalità delle strutture modellate. Dunque, nell'ottica di ottimizzare la realizzazione del grafo eliminando inutili ripetizioni di informazioni, si è preferito, dove possibile, descrivere la medesima proprietà di molteplici USV con un'unica rete di nodi estrattori-fonti. Il grafo è stato sviluppato nel software yEd usando la palette di nodi dell'EM; nella sua trasposizione tabulare si è tralasciato l'uso dei nodi di proprietà, che nel processo EM sono connessi direttamente alle USV. Il tipo di proprietà architettoniche che gli estrattori definivano è stato infatti integrato nella descrizione dell'estrattore stesso, rimandando così ai parametri del tipo del modello BIM per la loro applicazione.

Parallelamente a questo processo si è proceduto alla modellazione BIM delle strutture architettoniche, elaborate contemporaneamente alla costruzione dell'EM. Il modello BIM è stato elaborato in Autodesk Revit 2022. Tra gli innumerevoli vantaggi di questo software è rilevante menzionare, per quanto riguarda il processo di integrazione delle due metodologie, la possibilità di connettere il progetto ad un database per la gestione differenziata delle tabelle generate dal sistema e per l'importazione e l'esportazione dei metadati. La connessione tra i due strumenti (l'elaborazione in tabella del grafo descrittivo dell'EM e il BIM) è possibile attraverso la definizione in quest'ultimo di parametri condivisi, utilizzabili come foreign key nella relazione tra i paradata delle istanze BIM e i record della versione tabulare dell'EM. L'unico parametro necessario per raccordare le informazioni tra i diversi strumenti è il campo US, che è stato aggiunto alla tabella dei dati di identità delle geometrie in Revit.

Rispetto al flusso di lavoro proposto per l'EM, l'unica problematica cui si è dovuto fare fronte, aggiustando lievemente il processo, riguarda la gestione delle fondazioni che in ambiente BIM, sulla scia della logica del processo costruttivo, si configurano come elementi direttamente dipendenti dai muri e difficilmente gestibili come entità autonome. Il problema si è posto dunque per quelle fondazioni che presentano porzioni conservate (e descritte dunque da US) e lacerti mancanti (reintegrati da USV). In ambiente BIM la replica di tale suddivisione presupporrebbe il frazionamento dei muri soprastanti, generando parcellizzazioni artificiali all'interno della medesima azione costruttiva. In questi casi si è generato in EM un nuovo tipo di nodo denominato USR (Unità Stratigrafica Restaurata) a cui sono stati connesse le USV dei muri; la stessa nomenclatura è stata poi seguita anche in Revit.

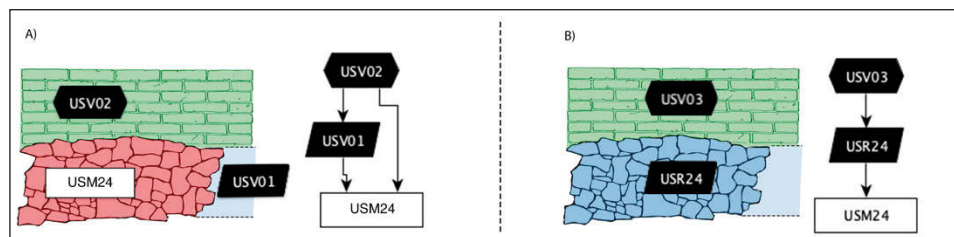


Fig. 8 – Schema dell’uso delle USR (B) rispetto all’uso tradizionalmente suggerito nel processo EM (A).

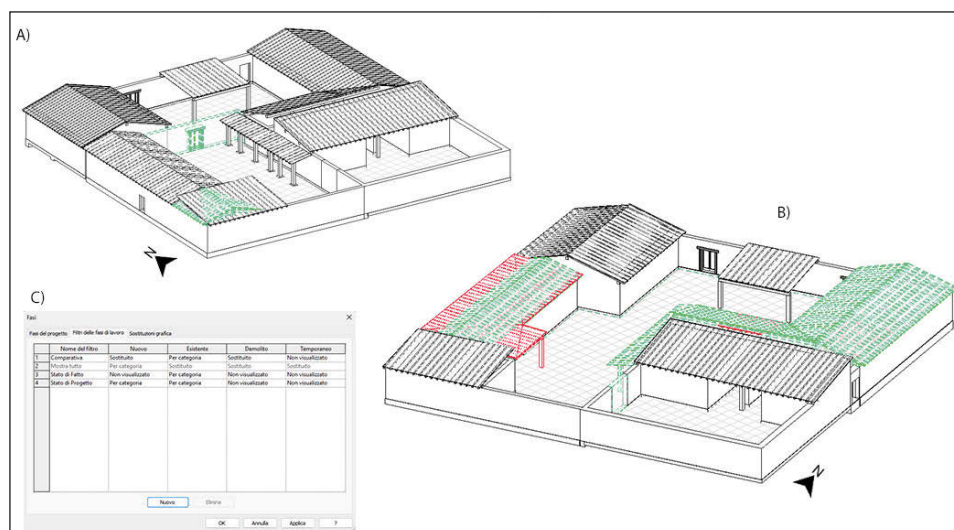


Fig. 9 – Particolari della gestione dei dati strutturali della Casa 1 in Revit. A) Fase 2, in verde le modifiche intercorse con la fase precedente; B) Fase 3, in rosso le modifiche intercorse con la Fase 2 e in verde quelle con la Fase 1; C) particolare della tabella di filtro delle fasi.

Alle USR sono stati assegnati i medesimi numeri delle US, al fine di evitare una ulteriore moltiplicazione della nomenclatura procedendo anche per le prime in modo crescente a partire da 1; così, ad esempio, l’operazione di restauro virtuale della fondazione US4, pur essendo la prima, viene descritta da USR4 (Fig. 8).

L’elaborazione della ricostruzione della casa ha posto numerosi spunti di riflessione, sia sul piano delle tecniche costruttive utilizzate, che su quello dell’elaborazione delle coperture, da sempre un aspetto problematico delle ricostruzioni di Marzabotto (GRUŠKA *et al.* 2017). L’elaborazione del modello informativo mediante EM esime dalla necessità di descrivere puntualmente

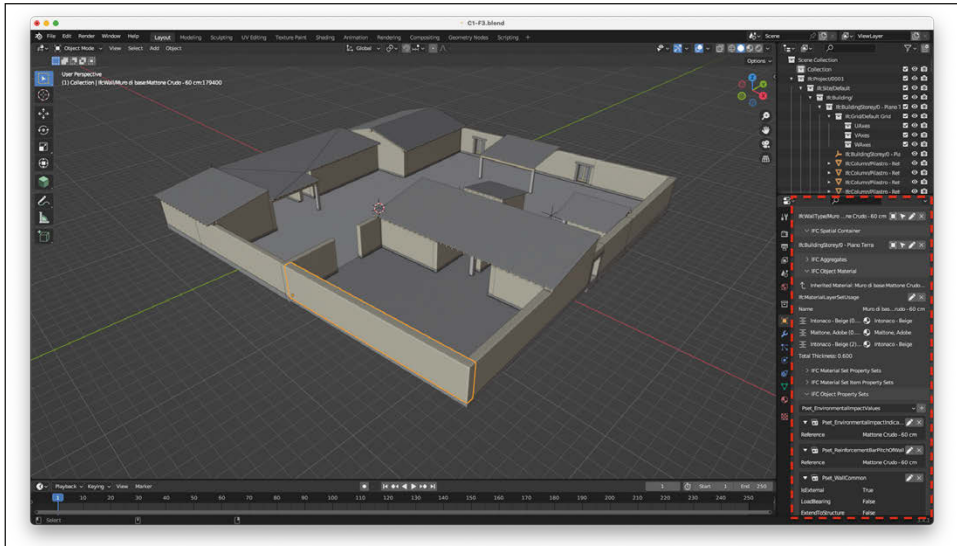


Fig. 10 – Modello BIM della Casa 1 (Fase 3) importato in Blender in formato IFC. In evidenza a destra una parte delle proprietà BIM dell’oggetto selezionato.

le soluzioni architettoniche presentate, rimandando a questo strumento la giustificazione delle scelte operate sul piano archeologico (MANCUSO 2023b). Su un piano più tecnico, va infine sottolineato come gli strumenti messi a disposizione da Revit si rivelino ottimali per l’elaborazione di un singolo modello contenente tutte le fasi edilizie del complesso. Frequentemente, infatti, la visualizzazione di prodotti multifase pone alcuni problemi, soprattutto nei casi in cui il contesto vede una costante successione di parziali demolizioni e rifacimenti dei medesimi corpi di fabbrica con strutture realizzate riutilizzando una parte di quelle della fase precedente. Risulta così difficile filtrare visivamente le costruzioni che vengono edificate in un determinato periodo e permangono nel corso delle fasi successive, in quanto scompaiono al cambiamento dei parametri della ricerca per singola fase. In Revit, la possibilità di differenziare per ogni istanza le fasi di costruzione e demolizione si è rivelata fondamentale nella restituzione del contesto in prospettiva diacronica. Questo accorgimento, accompagnato ad un altrettanto efficace filtro di fase (che permette di differenziare la visualizzazione per categorie tra elementi di nuova realizzazione, precedenti e demoliti) consente di accedere in maniera particolarmente intuitiva a forme avanzate di visualizzazione e gestione di dati multifase (Fig. 9).

Tale configurazione, benché funzionale in ambiente Revit, presenta purtroppo alcune problematiche nell’esportazione dei dati del modello verso altri

software dove questi strumenti di visualizzazione mancano. Così, al termine dell'elaborazione della ricostruzione multifase, le quattro fasi edilizie sono state suddivise in altrettanti progetti BIM, in cui le costruzioni riferibili a fasi precedenti sono rientrate nello "stato di fatto", mentre quelle della fase corrente nello "stato di progetto". Al termine dell'elaborazione del modello proxy in BIM, lo stesso è stato esportato in Blender in formato IFC, dove, grazie all'add-on BlenderBIM, i dati relativi alle famiglie e i tipi vengono letti e rimangono consultabili (Fig. 10). Questo passaggio risulta fondamentale non solo per la prosecuzione del processo EM, ma anche per implementare l'accessibilità del prodotto BIM, che si svincola così dal software proprietario con cui viene elaborato, e favorirne la sua sostenibilità a lungo termine in accordo agli omologhi principi della carta di Londra (LONDON CHARTER 2009). In Blender il modello IFC può essere connesso con il grafo EM, rendendo disponibili alla consultazione anche i dati di quest'ultimo strumento nel suo flusso di lavoro originario (DEMETRESCU, FERDANI 2021). Dal medesimo software è poi possibile elaborare il modello di dettaglio e procedere alla pubblicazione dei dati, secondo il flusso di lavoro già elaborato per il processo EM.

4. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE E PROSPETTIVE FUTURE

Al termine di questo processo, finalizzato all'integrazione tra le due metodologie applicate al contesto della Casa 1, sembra lecito formulare alcune considerazioni conclusive. In primo luogo, va sottolineato come l'integrazione tra i due metodi di ricostruzione sia possibile, benché perfezionabile ottimizzandone il flusso di lavoro. Il processo dell'EM si rivela infatti ottimale per la descrizione semplificata di dati complessi, a partire da quelli archeologici. Proprio la forte devozione al dato archeologico del metodo permette di giustificare più che adeguatamente le scelte ricostruttive operate nel corso del processo.

La struttura del grafo, se da un lato permette di gestire intuitivamente le relazioni multi-a-multi che intercorrono tra fonti ed estrattori di informazioni, d'altro canto, però, non sembra altrettanto intuitivo come strumento di descrizione progettuale. Questo problema emerge soprattutto in contesti che, come nel nostro caso, sono costituiti quasi esclusivamente da USV e nei quali, dunque, la descrizione dello sviluppo verticale degli elementi architettonici della struttura per mezzo del grafo risulta quasi pleonastica e sostituibile con la sua stessa rappresentazione grafica. Infatti, in assenza di elementi architettonici di cui fare anastilosi, il grafo traduce fundamentalmente una sequenza di fondazioni, murature, strutture di supporto del tetto ed elementi di copertura, cioè una successione altrettanto ben apprezzabile per mezzo della sua rappresentazione grafica. Nel nostro caso dunque, la sostituzione

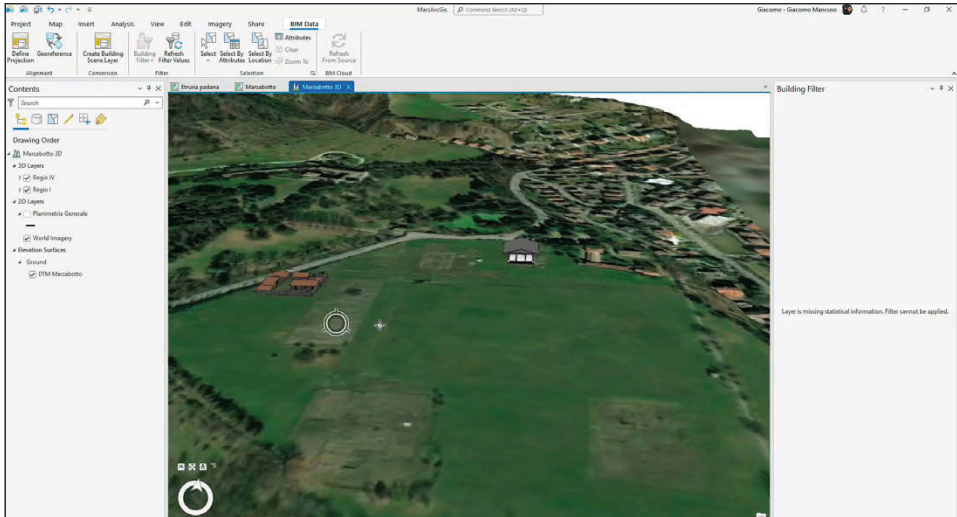


Fig. 11 – Vista generale della scena ArcGIS contenente i modelli Revit della Casa 1 (a sinistra) e del Tempio di Uni (a destra).

o l'uso parallelo del grafo con un database tabulare connesso alle geometrie parametriche in ambiente BIM si sono rivelati altrettanto efficaci, permettendo una adeguata giustificazione delle scelte strutturali operate sulla base dei dati archeologici e architettonici.

Se dunque il processo EM consente di esprimere efficacemente l'uso delle fonti nella ricostruzione, l'ArchaeoBIM permette di approdare in maniera più che efficace e ben oltre l'aspetto visuale alla descrizione di un edificio che potrebbe essere esistito in passato, aprendo ad una serie di sperimentazioni che possono incrementare le conoscenze del contesto sul piano architettonico e strutturale (GARAGNANI *et al.* 2021, 95-97). L'uso congiunto di entrambe le metodologie colma le lacune dell'ArchaeoBIM nella ricostruzione di elementi non parametrizzabili in famiglie architettoniche, la cui ricostruzione può essere tralasciata nel modello BIM, per essere poi elaborata successivamente nel modello di restituzione e descritta dall'EM.

Un ulteriore interessante sviluppo analitico dell'integrazione di questi due processi ricostruttivi consiste poi nella possibilità di importare e gestire i modelli BIM in ambiente GIS (Fig. 7). Sotto un profilo tecnico questa integrazione risulta configurabile solamente in ArcGis Pro, dove è possibile collegare un progetto realizzato in Autodesk Revit direttamente nel suo formato nativo. L'aspetto interessante è proprio la possibilità di gestire dinamicamente tutti gli aspetti informativi che caratterizzano il progetto BIM, integrandoli con gli altri tipi di dati ospitabili all'interno di un sistema informativo territoriale.

Nello specifico caso di Marzabotto, è stata dunque configurata una scena 3D impostata sul DTM della città antica (GAUCCI *et al.* 2015, 2022; MUZZARELLI, FRANZOIA 2017; MANCUSO 2023a), sul quale sono stati caricati i dati relativi alle infrastrutture e alle ripartizioni urbanistiche, oltre alla planimetria generale dell'insediamento (Fig. 11).

All'interno di questa scena sono stati posizionati i modelli BIM della Casa 1 e del tempio di *Uni* (GARAGNANI *et al.* 2016b, 2021, 101-122, 146-154; GARAGNANI 2017, 145-149). Nonostante la preliminarità di questa specifica fase della ricerca, emerge come l'integrazione tra BIM e GIS arricchisca due aspetti chiave della VA: la visualizzazione e l'analisi. Per quanto riguarda la prima, il progressivo popolamento della scena con modelli BIM renderà possibile accedere a nuove forme di visualizzazione spaziale del dato architettonico su scala urbanistica, molto utili per organizzare visualmente dataset complessi in ragione della cronologia o di specifici elementi, caratterizzandoli proceduralmente in ragione di uno o più attributi. Dal momento che il modello mantiene i parametri condivisi impostati nel progetto Revit, risulta possibile variarne la simbologia sulla base di specifiche caratteristiche, analogamente a qualsiasi altro dato vettoriale in ambiente GIS. La possibilità di collegare mediante join questi attributi con altri dati tabulari amplifica poi esponenzialmente le possibilità di visualizzazione. A un livello molto basilare gli edifici possono così essere caratterizzati su scala urbana con colori differenti a seconda del livello di affidabilità della ricostruzione o in ragione del materiale da costruzione utilizzato.

Il secondo aspetto riguarda ovviamente l'analisi dei dati e più specificamente degli attributi degli elementi architettonici. La natura del BIM come database 3D permette infatti di estendere in GIS l'elaborazione di abachi e computi a molteplici modelli nella medesima scena, elaborando dataset utili per l'analisi dell'impatto umano sul territorio antico e aprendo a riflessioni sul carico degli insediamenti sul territorio circostante, stimando, ad esempio, il consumo di materiale per l'edilizia in specifiche fasi cronologiche e il conseguente irraggiamento sul territorio in funzione delle risorse.

GIACOMO MANCUSO

Dipartimento di Storia Culture Civiltà
Alma Mater Studiorum, Università di Bologna
giacomo.mancuso3@unibo.it

BIBLIOGRAFIA

- BELTRAMI F. 2010, *La ricostruzione virtuale della Casa 1. Una proposta*, in GOVI, SASSATELLI 2010, 283-287.
- DEMETRESCU E. 2015, *Archaeological stratigraphy as a formal language for virtual reconstruction. Theory and practice*, «Journal of Archaeological Science», 57, 42-55 (<https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.02.004>).

- DEMETRESCU E. 2018, *Virtual reconstruction as a scientific tool: The Extended Matrix and source-based modelling approach*, in S. MÜNSTER, S. FRIEDRICH, F. NIEBLING, A. SEIDEL-GRZESIŃSKA (eds.), *Digital Research and Education in Architectural Heritage (UHDL DECH, Dresden 2017)*, Springer, Cham, 102-116 (https://doi.org/10.1007/978-3-319-76992-9_7).
- DEMETRESCU E. 2022, *Extended Matrix. A Tool for Virtual Reconstruction in Archaeology* (<https://www.extendedmatrix.org/>).
- DEMETRESCU E., FANINI B. 2017, *A white-box framework to oversee archaeological virtual reconstructions in space and time: Methods and tools*, «Journal of Archaeological Science: Reports», 14, 500-514.
- DEMETRESCU E., FERDANI D. 2021, *From field archaeology to virtual reconstruction: A five steps method using the Extended Matrix*, «Applied Sciences», 11, 5206 (<https://doi.org/10.3390/app11115206>).
- GARAGNANI S. 2017, *Archaeological Building Information Modeling: Beyond scalable representation in architecture and archaeology*, in GARAGNANI, GAUCCI 2017, 141-149 (<https://doi.org/10.19282/AC.28.2.2017.09>).
- GARAGNANI S., GAUCCI A. (eds.) 2017, *Knowledge, Analysis and Innovative Methods for the Study and the Dissemination of Ancient Urban Areas, Proceedings of the KAINUA 2017 International Conference (Bologna 2017)*, «Archeologia e Calcolatori», 28, 2 (<http://www.archcalc.cnr.it/journal/IDyear.php?IDyear=2017-01-07>).
- GARAGNANI S., GAUCCI A., GOVI E. 2016a, *ArchaeoBIM: dallo scavo al Building Information Modeling di una struttura sepolta. Il caso del tempio etrusco di Uni a Marzabotto*, «Archeologia e Calcolatori», 27, 251-270 (<https://doi.org/10.19282/AC.27.2016.13>).
- GARAGNANI S., GAUCCI A., GOVI E. 2017, *Ancient reality and contemporary research. An introduction to the Conference KAINUA 2017 and its Proceedings*, in GARAGNANI, GAUCCI 2017, 11-23 (<https://doi.org/10.19282/AC.28.2.2017.01>).
- GARAGNANI S., GAUCCI A., GRUŠKA B. 2016b, *From the archaeological record to ArchaeoBIM. The case study of the Etruscan temple of Uni in Marzabotto*, «Virtual Archaeology Review», 7, 15, 77-86 (<https://doi.org/10.4995/var.2016.5846>).
- GARAGNANI S., GAUCCI A., MOSCATI P., GAIANI M. 2021, *ArchaeoBIM. Theory, Processes and Digital Methodologies for the Lost Heritage*, Bologna, Bononia University Press.
- GAUCCI A. 2017, *Kainua project: Principles, theoretical framework and archaeological analysis*, in GARAGNANI, GAUCCI 2017, 99-112 (<https://doi.org/10.19282/AC.28.2.2017.06>).
- GAUCCI A., GARAGNANI S., MANFERDINI A.M. 2015, *Reconstructing the lost reality. Archaeological analysis and transmedial technologies for a perspective of virtual reality in the Etruscan city of Kainua*, in G. GUIDI et al. (eds.), *2nd Digital Heritage International Congress, DigitalHERITAGE 2015 (Granada 2015)*, IEEE, 227-234.
- GAUCCI A., GARAGNANI S., MANFERDINI A.M., DUBBINI M., MANCUSO G. 2022, *Marzabotto, DTM della città etrusca* (<https://doi.org/10.5281/zenodo.5734013>).
- GERBINO S., CIERI L., RAINIERI C., FABBROCINO G. 2021, *On BIM interoperability via the IFC standard: An assessment from the structural engineering and design viewpoint*, «Applied Sciences», 11, 11430 (<https://doi.org/10.3390/app112311430>).
- GIULIANI C. F. 2006, *L'edilizia nell'antichità*, Roma, Carocci Editore.
- GOVI E. 2010, *L'analisi planimetrica e la ricostruzione delle fasi edilizie*, in GOVI, SASSATELLI 2010, 179-204.
- GOVI E. 2016, *L'architettura domestica di Marzabotto tra vecchi scavi e nuove indagini*, «Annali della Fondazione per il Museo "Claudio Faina"», 23, 187-241.
- GOVI E. 2017, *Kainua-Marzabotto: The archaeological framework*, in GARAGNANI, GAUCCI 2017, 87-97 (<https://doi.org/10.19282/AC.28.2.2017.05>).
- GOVI E., SASSATELLI G. (eds.) 2010, *Marzabotto. La Casa 1 della Regio IV – Insula 2*, Imola, Antequem.

- GRUŠKA B., MANCUSO G., ZAMPIERI E. 2017, *Building materials and virtual models of the Etruscan city of Kainua*, in GARAGNANI, GAUCCI 2017, 165-176 (<https://doi.org/10.19282/AC.28.2.2017.11>).
- HARRIS E. 1979, *Principles of Archaeological Stratigraphy*, Suffolk, Academic Press.
- HARRIS E., BROWN III M.R., BROWN G.J. (eds.) 1993, *Practices of Archaeological Stratigraphy*, Cambridge, MA, Academic Press.
- LONDON CHARTER 2009, *London Charter for the Computer-based Visualization of Cultural Heritage, Draft 2.1-2009* (www.londoncharter.org).
- MANCUSO G. 2023a, *Marzabotto, Kainua 3D. Base GIS* (<https://doi.org/10.5281/zenodo.7540522>).
- MANCUSO G. 2023b, *Marzabotto, Regio IV, Insula 2, Casa 1. Modello ricostruttivo BIM* (<https://doi.org/10.5281/zenodo.7540382>).
- MUZZARELLI A., FRANZOIA M. 2017, *The ancient Digital Terrain Model and the infrastructure of the Etruscan city*, in GARAGNANI, GAUCCI 2017, 151-164 (<https://doi.org/10.19282/AC.28.2.2017.10>).
- SASSATELLI G., TAGLIONI C. 2000, *Città etrusca di Marzabotto*, Bologna, HitStudio Editori.
- SEVILLE CHARTER 2012, *International Principles of Virtual Archaeology* (<http://sevilleprinciples.com/>).
- YU HOOK D. 2016, *From illusions to reality: Transformation of the term “virtual archaeology”*, «Archaeological and Anthropological Sciences», 8, 4, 647-650.

ABSTRACT

The article systematically explores two processes of virtual reconstruction of archaeological contexts: ArchaeoBIM and Extended Matrix. The focus is on the theoretical frameworks behind their development, the proposed operational processes, and the products derived from both methodologies. The informative potential of the virtual models resulting from these reconstruction processes will be discussed, as well as the application-related issues. A substantial part of the article will be dedicated to the development of an integrative protocol aimed at incorporating the informational structure of the Extended Matrix within an ArchaeoBIM model. The process has been applied to the case study of House 1 in Regio IV, Insula 2 of the Etruscan city of Marzabotto, which was excavated in recent years (1988-1998) and thoroughly documented. Final considerations are then directed towards future development prospects and the integration of this virtual product within a Geographic Information System.