

IL CoSIM PER IL RESTAURO GENERALE DELLA BASILICA DI S. MARIA DI COLLEMAGGIO A L'AQUILA

Marco Lorenzo Trani¹, Manuele Cassano²

¹ Dipartimento ABC, Politecnico di Milano, marco.trani@polimi.it

² Dipartimento ABC, Politecnico di Milano, manuele.cassano@polimi.it

Keywords: CoSIM, BHIMM, modellazione informativa, cantiere, restauro, Collemaggio

Abstract

L'approccio metodologico sviluppato nell'ambito della modellazione informativa BIM a servizio della progettazione cantieristica (Co.S.I.M.) ha trovato riscontro e, conseguentemente, validazione, nell'applicazione delle metodologie e degli strumenti sviluppati nell'ambito di casi di studio reali. Da questo punto di vista, la ricerca dipartimentale ha potuto indagare, tra gli altri, un importante caso di studio che ha permesso una effettiva integrazione tra le diverse discipline progettuali e tra i diversi ambiti di ricerca applicati alla modellazione informativa del patrimonio architettonico. Si tratta del restauro generale della Basilica di Santa Maria di Collemaggio a L'Aquila. Particolare attenzione è stata posta nell'analisi dei livelli di dettaglio della modellazione sia dal punto di vista grafico che informativo. La necessaria integrazione delle diverse discipline nell'ambito della progettazione di un intervento di tale complessità, ha portato a valutare, per ogni disciplina, quale possa essere la rappresentazione maggiormente efficiente degli elementi caratterizzanti la basilica e il restauro nel loro contesto. In quest'ambito si inserisce anche la progettazione cantieristica la quale ha contribuito alle determinazioni dei livelli di dettaglio in funzione delle necessità di progettazione funzionale-spaziale e tecnologico-produttiva, oltre che operativa, del sistema cantieristico.

1. Introduzione

L'intervento di restauro generale della basilica di Santa Maria di Collemaggio ha rappresentato un importante caso di studio per l'analisi della modellazione informativa applicata al patrimonio architettonico. Il coinvolgimento di diversi ambiti, progettuali e di ricerca, ha permesso di analizzare e contestualmente implementare le tematiche di collaborazione e interoperabilità dei modelli informativi in ambito progettuale. Il terremoto che ha colpito la città di L'Aquila nel 2009 ha apportato gravi danni alla basilica. In particolare la porzione maggiormente sollecitata dal sisma è stata quella del transetto, il quale ha subito il crollo delle due piliere e, conseguentemente, della copertura soprastante, sostituita temporaneamente da una copertura provvisoria (cfr. Fig. 1a). Gravi danni strutturali si sono registrati anche sulle colonne e le murature di navata, tenute in sicurezza nella fase preventiva i lavori da strutture provvisorie (cfr. fig. 1b). Il progetto di restauro, finanziato e sponsorizzato da ENIservizi, ha visto la collaborazione della soprintendenza per i beni architettonici e paesaggistici per l'Abruzzo con le università degli studi di Roma (La Sapienza) e L'Aquila, oltre che con il Politecnico di Milano. I lavori da svolgersi per l'intervento in oggetto consistono principalmente nella ricostruzione del transetto, parte maggiormente danneggiata a causa della direzione principale del sisma, nell'adeguamento strutturale delle colonne di navata le quali hanno subito molti danni e per le quali è stata prevista la sostituzione di alcuni dei conci di pietra. Inoltre si prevede il rinforzo della copertura tramite l'inserimento dei pannelli in x-lam e il rinforzo degli elementi murari.



Figura 1. (a) Vista aerea della Basilica e della copertura provvisoria e (b) rinforzi provvisori navate

La progettazione dell'intervento è stata realizzata, ognuno per la sua area di competenza, da gruppi di lavoro degli enti sopra citati, a partire dalla restituzione dello stato di fatto fino alla progettazione operativa delle fasi di lavoro. Tutto il processo di progettazione è stato supportato dall'utilizzo di modelli informativi BIM. La realizzazione del modello BIM dell'intervento ha, pertanto, avuto origine dal rilievo dello stato di fatto realizzato dal laboratorio GICarus del Dipartimento ABC (Oreni et al. 2014, Barazzetti et al. 2014), mediante il quale è stato realizzato il modello di partenza utilizzato per la realizzazione del progetto nei suoi diversi ambiti. Un importante lavoro è consistito infatti nell'affinamento del modello al fine di renderlo efficiente per utilizzi differenti quali ad esempio la progettazione strutturale (Crespi et al. 2016), quella impiantistica (Aste et al. 2016) e, come sarà approfondito in seguito, la progettazione cantieristica (Cassano et al. 2015, Trani et al. 2016). In linea del tutto generale si è notato come, nell'ambito di una modellazione relativa al patrimonio architettonico, il modello realizzato tramite il rilievo tridimensionale abbia dovuto subire diverse semplificazioni, per soddisfare le diverse esigenze di rappresentazione, discretizzazione e apparato informativo degli elementi relativamente al loro utilizzo in ambito strutturale o cantieristico. Tale semplificazione è dovuta in prima istanza ad aspetti di tipo funzionale, che hanno portato a un livello di dettaglio inferiore in modo da non appesantire troppo i modelli e a garantirne una certa efficienza di utilizzo. Tuttavia lo studio dei livelli di dettaglio va oltre i meri aspetti tecnici e si basa soprattutto sul patrimonio informativo di cui gli elementi BIM sono arricchiti. Il presente testo analizzerà in particolare l'apparato informativo per la modellazione delle fasi cantieristiche che richiede, dal punto di vista del dettaglio grafico, una notevole semplificazione dei modelli, raggiungendo un dettaglio elevato (cfr. Fig. 2) solo in viste a scopo rappresentativo e comunicativo.

Il caso di studio è stato indagato, dal punto di vista della progettazione ergotecnica, sotto diversi aspetti: in primo luogo è stata effettuata la contestualizzazione dell'intervento in modo da analizzare i vincoli incidenti sul cantiere e procedere alla progettazione funzionale-spaziale e tecnologico-impiantistica del cantiere. Più nel dettaglio si è andati ad analizzare gli aspetti riguardanti le procedure operative per lo svolgimento delle lavorazioni per l'analisi operativa del restauro e la programmazione dell'intervento, senza tralasciare gli aspetti relativi alla salute e sicurezza delle maestranze. Il tutto, in stretto contatto con le altre discipline progettuali secondo lo schema metodologico della progettazione Co.S.I.M. nelle sue diverse fasi e nei suoi diversi livelli di dettaglio (*v.supra*. "Il progetto ergotecnico degli interventi sul costruito. la modellazione informativa Co.S.I.M. e i suoi strumenti").

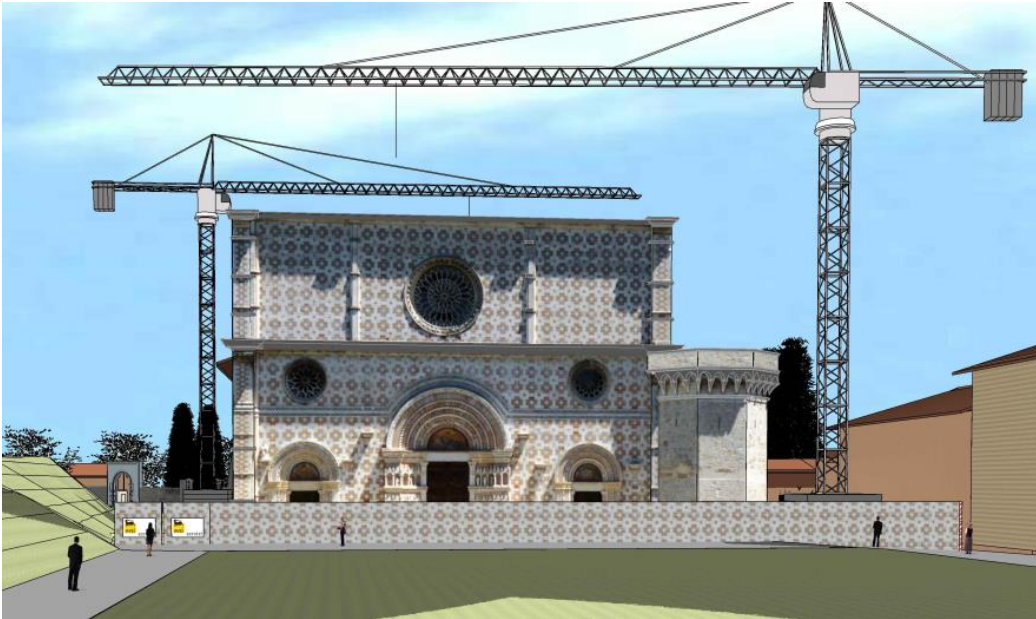


Figura 2. Vista del cantiere e della facciata dal prato antistante

2.1 Progettazione funzionale-spaziale

La progettazione cantieristica in ambito BIM parte, fin dalla progettazione preliminare, dall'analisi di contesto la quale permette di rilevare possibili fattori di criticità (Di Melchiorre et. al. 2005) dovuti all'ambiente in cui si svolgono i lavori nei confronti dell'impianto di cantiere. Seppur la disponibilità di un modello tridimensionale informativo non sostituisce la necessità per un progettista di cantiere di visitare di persona i luoghi di intervento, essa permette di avere a disposizione un contenitore grafico delle informazioni relative al contesto raccolte durante i sopralluoghi preliminari. In tal senso, prezioso è stato il lavoro di restituzione del rilievo effettuato che ha rappresentato all'interno del modello la basilica e l'ambiente circostante con una notevole precisione in termini di elementi presenti e relative caratteristiche geometriche. Per quanto riguarda l'integrazione dell'impianto cantieristico con le esigenze di contesto sono stati analizzati diversi aspetti. In primo luogo l'estensione del cantiere e la sua posizione rispetto alle aree limitrofe alla basilica. Analizzando il contesto (cfr. fig. 3) si può notare come il cantiere avrebbe potuto essere realizzato sulla spianata antistante la basilica avendo in questo modo una buona disponibilità di spazi a servizio delle attività da svolgersi. Tuttavia le esigenze spaziali del cantiere non possono non tenere conto del contesto e in particolare delle attività antropiche al contorno. Il piazzale di Collemaggio, anche dopo il terremoto, è molto frequentato dalla collettività e risulta pertanto impossibile occupare tale area con il cantiere. Pertanto l'analisi di contesto ha portato a una diversa conformazione funzionale-spaziale del cantiere il quale si è dovuto articolare sul fianco e sul retro della basilica andando a occupare aree di minori dimensioni e in posizioni meno vantaggiose dal punto di vista della logistica generale di supporto alle lavorazioni (cfr. fig. 4). Tuttavia tale configurazione permette la completa fruizione del piazzale antistante la basilica (a parte il sagrato) e, in generale, non impatta in maniera radicale sul territorio occupando solamente la strada di accesso alla basilica stessa e parte del parco retrostante, comunque poco utilizzato prima dell'inizio dei lavori e in cui risultano già stoccati gli elementi lapidei recuperati dopo il terremoto. Come visibile dalla figura 2, infatti, la visione del cantiere dal piazzale lascia comunque molto spazio alla facciata (anche grazie alla particolare pannellatura della recinzione di cantiere) in modo che la cittadinanza possa comunque godere, durante i lavori della vista della basilica, anche grazie al fatto che la facciata è l'elemento meno danneggiato dal terremoto.

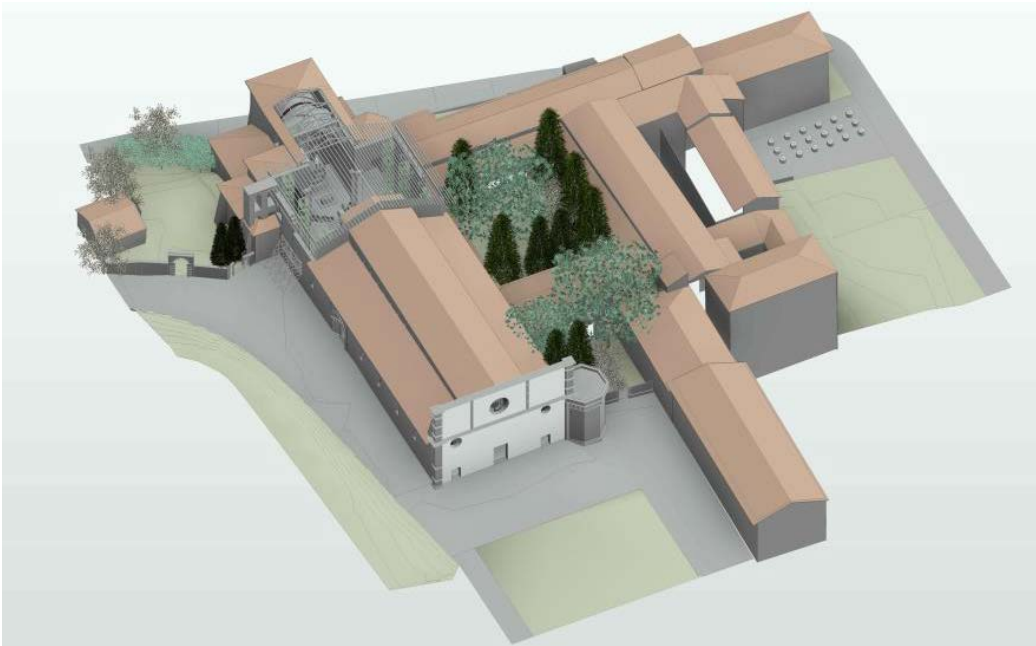


Figura 3. Stato di fatto

Un'altra criticità di contesto immediatamente visibile (Figura 3) a seguito dell'inserimento delle gru a torre nel modello di cantiere è la presenza di alberi ad alto fusto interferenti con le esigenze di movimentazione aerea del cantiere. La progettazione del cantiere ha previsto pertanto, come attività preliminare, la cimatura o l'asportazione di tali alberi al fine di non provocare interferenze con le movimentazioni aeree e col montaggio del ponteggio sul lato sud della basilica.

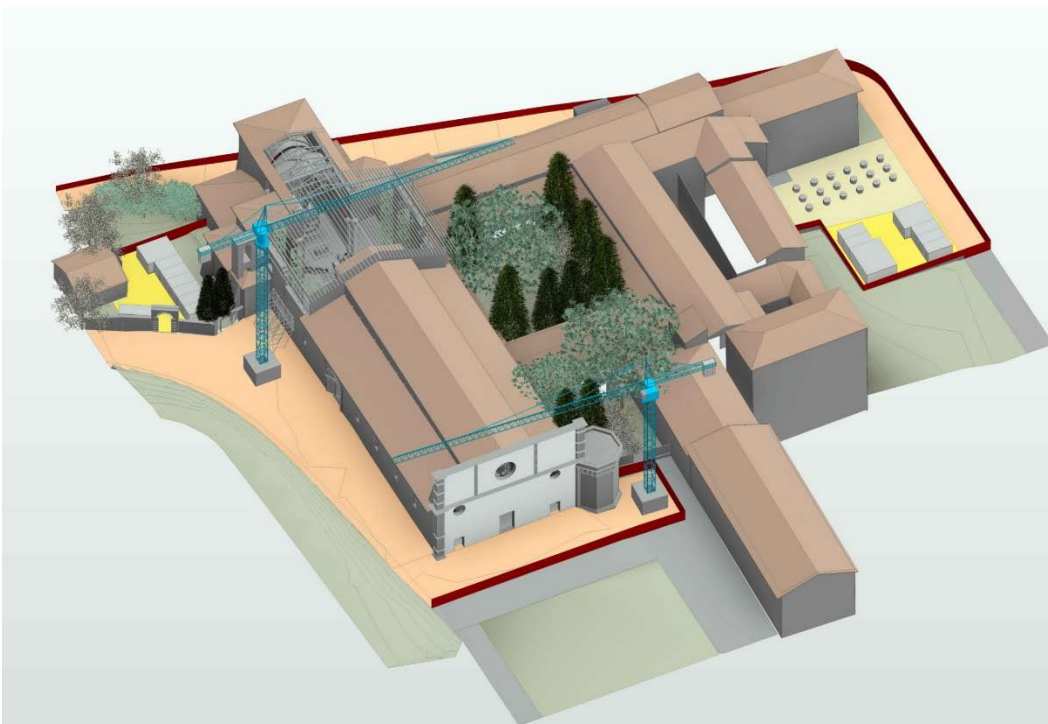


Figura 4. Layout di cantiere e vincoli di contesto

Come visibile dalle immagini soprastanti, il livello di dettaglio della modellazione in tale fase di progettazione cantieristica si avvale graficamente di una serie di superfici e solidi non dettagliati quali ad esempio la recinzione, i servizi logistici e le stesse aree di cantiere. In particolare si nota come, seguendo la scansione data dall'American Institute of Architects, a tale fase di modellazione cantieristica preliminare si possa associare un LOD 200, ovvero, secondo la neonata UNI 11337, un LOD-B. Oltre alla loro rappresentazione grafica, gli elementi sono dotati un pacchetto di informazioni idonee al livello di dettaglio - LOD- considerato che in questo caso ne esprime le caratteristiche geometriche e funzionali.

È pertanto visibile come gli elementi (intesi come oggetti modellati) di cantiere siano stati sviluppati nel corso della progettazione secondo diversi livelli di dettaglio contenenti informazioni man mano più specifiche a seconda del livello di progettazione affrontato. Nel livello di progettazione preliminare si vanno ad esprimere quelle che sono le esigenze in termini cantieristici degli elementi e quindi, ad esempio, l'esigenza di aree, percorsi, logistica oltre che di una recinzione cieca di cantiere che in questa fase non è ancora caratterizzata da uno specifico modello ma è l'espressione di una esigenza che verrà più compiutamente declinata nei livelli successivi di progettazione.

2.2 Progettazione tecnologico-impiantistica

La progettazione funzionale spaziale del cantiere è da eseguirsi parallelamente alla progettazione degli apparati tecnologico e produttivo del sistema cantieristico. Dopo le scelte preliminari effettuate in termini di masterplan cantieristico, nell'ambito di una progettazione definitiva è necessario entrare in maggior dettaglio e inserire in maniera più precisa gli elementi cantieristici rappresentati con un LOD maggiore. In tal senso il caso di studio della Basilica di Collemaggio è stata una buona scuola per lo sviluppo dei livelli di dettaglio dei ponteggi. In questo caso, data anche la complessità dell'opera la progettazione del ponteggio si è fermata a un LOD di livello definitivo che può essere associato a un LOD 300/350, ovvero un LOD C/D della UNI 11337. Infatti esso non risulta più essere rappresentato come un semplice volume (LOD 200) ma neppure contiene tutti gli elementi di dettaglio che lo compongono (LOD 400). In particolare, in questa fase, la modellazione del ponteggio a un livello di dettaglio pari al LOD C/D è risultato utile in quanto le informazioni contenute dal modello hanno permesso di estrapolarne con precisione e in maniera automatica il relativo costo.

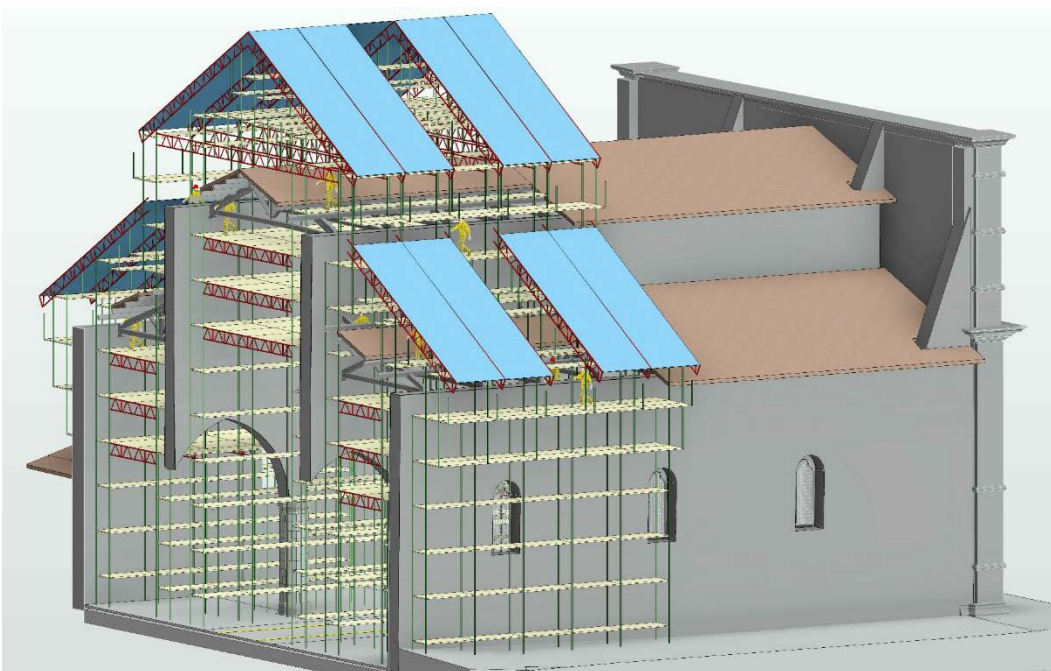


Figura 5. Porzione di ponteggio esterno e interno

Tale vantaggio si nota soprattutto tenendo conto della complessità dell'intervento e della poca regolarità delle facciate. Un calcolo del ponteggio attraverso elaborati planimetrici e sezioni avrebbe presentato notevoli difficoltà nell'individuazione di tutti gli elementi connotanti l'opera provvisoria, motivo per cui attraverso la sua modellazione e il calcolo delle superfici direttamente dal modello BIM è stato possibile calcolarne il costo in modo automatico e accurato. Naturalmente la progettazione tecnologico impiantistica del cantiere di restauro non si è esaurita con la modellazione e la computazione del ponteggio ma ha tenuto conto di diversi aspetti operativi quali ad esempio la protezione della pavimentazione di pregio, la realizzazione di percorsi pedonali e carrai (anche protetti) all'interno della basilica. Tali aspetti vanno tuttavia analizzati nelle singole fasi di lavoro e pertanto vengono compiutamente dettagliati nella progettazione operativa del cantiere la quale si basa in gran parte sull'apparato informativo reso disponibile dal modello.

3. Patrimonio informativo e progettazione operativa

In fase di progettazione operativa diventa di particolare importanza il patrimonio informativo dei modelli sia per quanto riguarda gli elementi di tipo cantieristico ma anche per quanto riguarda gli elementi tecnici oggetto di intervento. Due esempi da sottolineare sono quello relativo alle informazioni associate alle colonne e quello relativo alla modellazione degli interventi sulle murature.

Il primo dei due ha visto una forte integrazione delle diverse discipline progettuali e ambiti di modellazione. Il rilievo effettuato sulle colonne è stato condotto in maniera molto accurata restituendo un modello specifico per ogni colonna con la definizione geometrica dei singoli conci. Un tale livello di accuratezza è risultato utile in una prima fase per l'analisi di dettaglio di aspetti relativi alla movimentazione dei conci (peso, dimensione, posizione, etc.). Tuttavia, nell'ambito di un modello cantieristico allo stadio di progettazione il livello di dettaglio da prendere in considerazione è quello relativo alla lavorazione nella sua interezza piuttosto che alle operazioni elementari, da approfondire invece nell'ambito di una progettazione ergotecnica riferita allo stadio di produzione. Per tale motivo, nel Co.S.I.M., le informazioni cantieristiche da associare alla lavorazione di "adeguamento colonne" sono state inserite in un unico elemento 'colonna' semplificato.

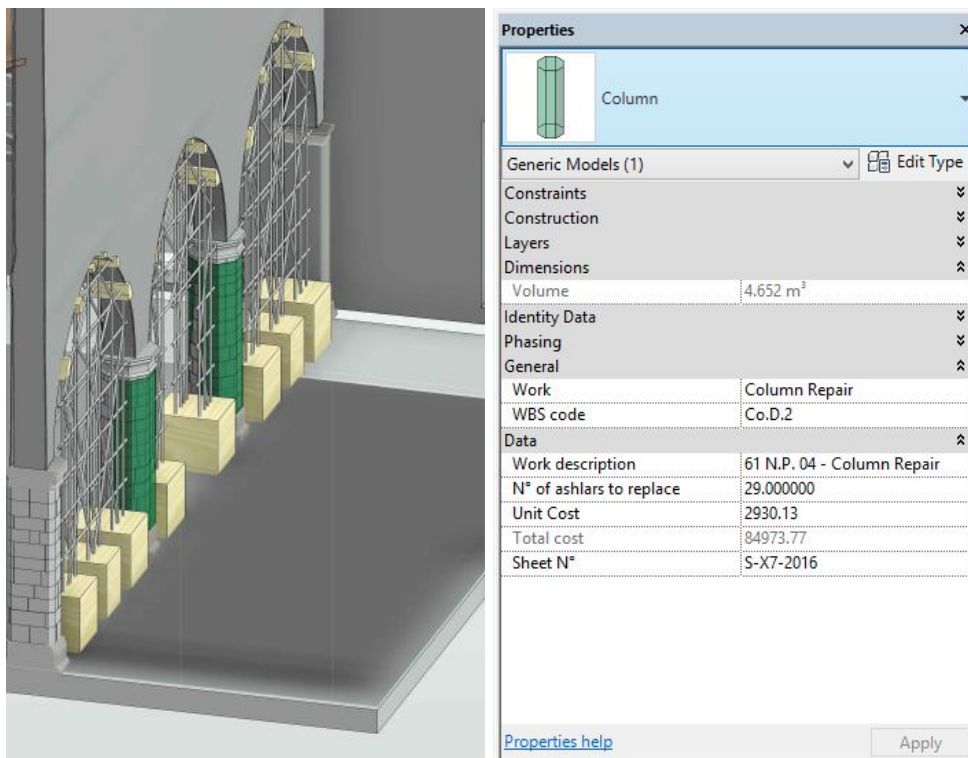


Figura 6. Rappresentazione dell'elemento colonna e informazioni correlate

Le immagini in figura 6 rappresentano l'adeguamento della lavorazione di rifacimento delle colonne in funzione delle esigenze di rappresentazione cantieristica degli elementi. In tal modo è possibile raggruppare in un unico oggetto informazioni quali la voce di computo e la descrizione del lavoro, oltre che il relativo prezzo riferito alla singola colonna. Da questo punto è possibile partire per l'inserimento delle informazioni di tipo strettamente ergotecnico con le quali effettuare l'analisi operativa delle opere e procedere alla loro programmazione. Le immagini in figura 7 rappresentano l'implementazione della precedente con l'aggiunta di informazioni improntate sulla fase operativa della lavorazione. Tale implementazione avviene sia dal punto di vista grafico (aggiunta di elementi cantieristici caratterizzanti la lavorazione) quanto dal punto di vista informativo.

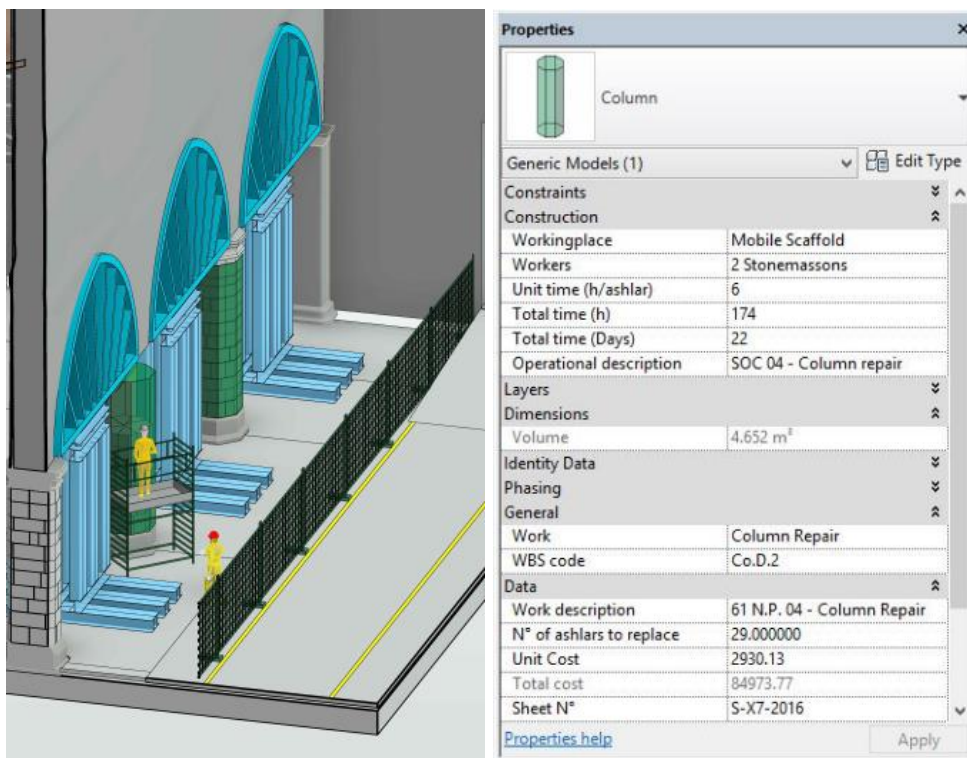


Figura 7. Rappresentazione della lavorazione sull'elemento colonna e informazioni correlate

Per quanto riguarda l'apparato informativo vi sono importanti aggiunte all'elemento su cui intervenire raggruppate, in particolare, sotto il riepilogo "Construction". Si può notare come siano state inserite informazioni relativamente alle durate di lavorazione, calcolate grazie alle quantità reperite nel modello, e alle squadre operative impegnate in particolari postazioni di lavoro. L'aggiunta di informazioni operative, inoltre, comporta una maggiore accuratezza descrittiva del lavoro, che prende in considerazione elementi operativi di dettaglio della lavorazione quali ad esempio le modalità di movimentazione e stoccaggio degli elementi lapidei prima della loro messa in opera.

Tali informazioni, implementate in ognuno degli elementi oggetto di intervento, permettono una analisi operativa dettagliata di tutto il lavoro che può essere successivamente tradotta in un programma dei lavori. Un secondo studio applicativo è stato condotto sulle lavorazioni di rinforzo da eseguirsi direttamente sulle murature esterne e di navata con la tecnica del *reticolatus*, consistente nella posa di un reticolo di trattenuta nei corsi dei conci di muratura successivamente messo in tensione tramite barre filettate inserite nella muratura stessa. Anche in questo caso la scelta della rappresentazione grafica di tale lavorazione è stata mediata sulle reali esigenze di progettazione ergotecnica. Una modellazione accurata di livello 'esecutivo' (i.e. LOD D) avrebbe implicato infatti la rappresentazione di tutte le barre filettate e dello sviluppo dei cavi d'acciaio inseriti. Anche in questo caso, l'approccio CoSIM., ha portato ad una semplificazione del modello

assumendo come spunto la metodologia di computazione della lavorazione stessa. Come la gran parte delle lavorazioni di facciata, infatti, il *reticolatus* implica una computazione al metro quadrato di superficie. Pertanto si è scelto di rappresentare tale soluzione tecnica nel modello CoSIM come una serie di superfici contenenti informazioni di tipo operativo del tutto simili a quelle delle colonne, come visibile in figura 8.

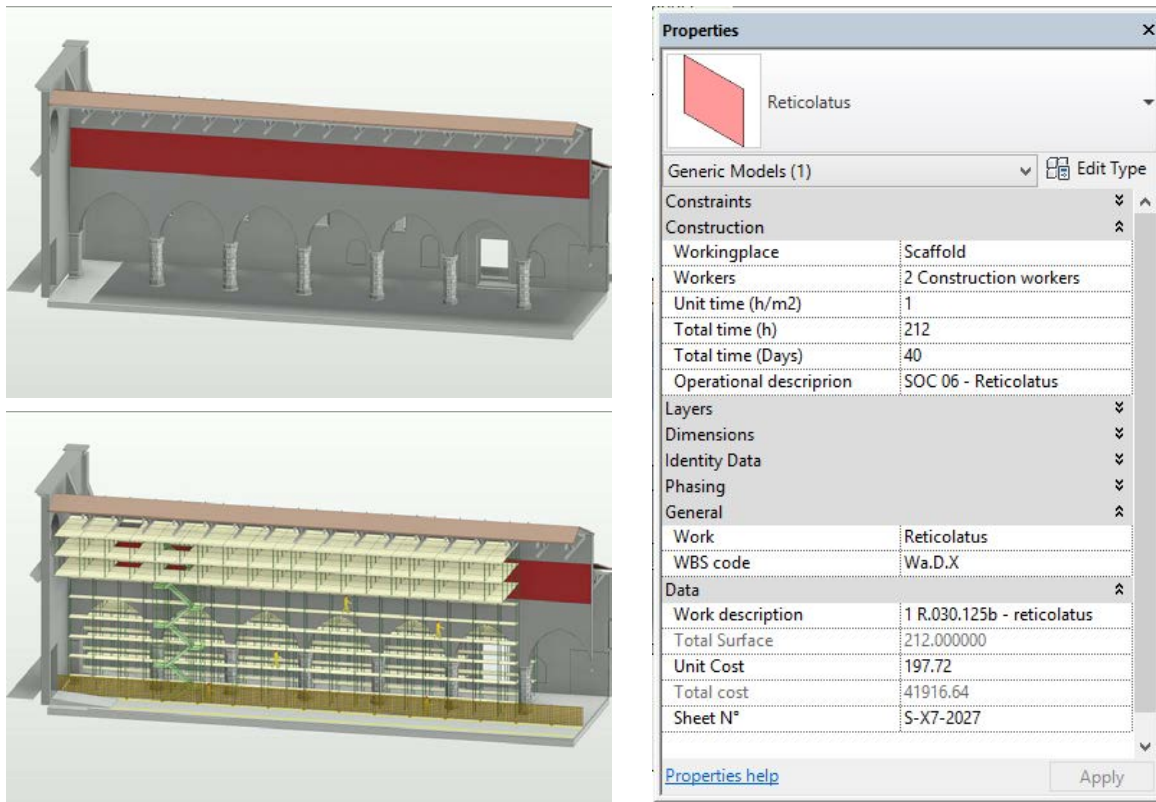


Figura 8. Rappresentazione della lavorazione *reticolatus* e informazioni correlate

La disponibilità di informazioni di tipo cantieristico associate agli elementi oggetto di intervento ha permesso, come si è detto, una programmazione operativa dell'intervento maggiormente plausibile consentendo quindi una gestione in 4D del modello in grado di valutare le contemporaneità ammissibili - necessarie per rispettare i tempi attesi - in modo da prevenire progettualmente pericolose situazioni di interferenza operativa. L'analisi dei rischi interferenziali è risultata quindi maggiormente mirata consentendo, nel medesimo tempo, una più accurata stima economica dei presidi di prevenzione e protezione necessari a soddisfare l'esigenza di sicurezza e salute delle maestranze di cantiere. Tale analisi, in particolare, è stata condotta avvalendosi di uno strumento BIM appositamente studiato e messo a punto dalla ricerca per la progettazione dei presidi necessari a contrastare i fenomeni interferenziali di cantiere, a partire da un data base di possibili configurazioni spaziali cantieristiche, di cui si è dato conto in una precedente memoria (*v.supra* "Il progetto ergotecnico degli interventi sul costruito. la modellazione informativa Co.S.I.M. e i suoi strumenti"). Il modello della Basilica è stato quindi assoggettato ad una discretizzazione tipologica di unità spaziali cantieristiche individuate da un codice colore previsto dal *template* utilizzato le cui mutue relazioni sono state analizzate dal punto di vista interferenziale interrogando il data base precedentemente strutturato e popolato (Figura 9). Il modello è stato quindi implementato con ulteriori misure tecniche di sicurezza relative alle aree analizzate fase per fase. Esemplificando, la soluzione alle interferenze della fase analizzata in figura 9 sono visibili in figura 10.

Tale operazione, effettuata per tutte le fasi di lavorazione ha permesso una più semplice individuazione, e successiva computazione, degli apprestamenti e delle misure organizzative anti interferenza da prevedersi nell'ambito della progettazione cantieristica a livello di appalto.

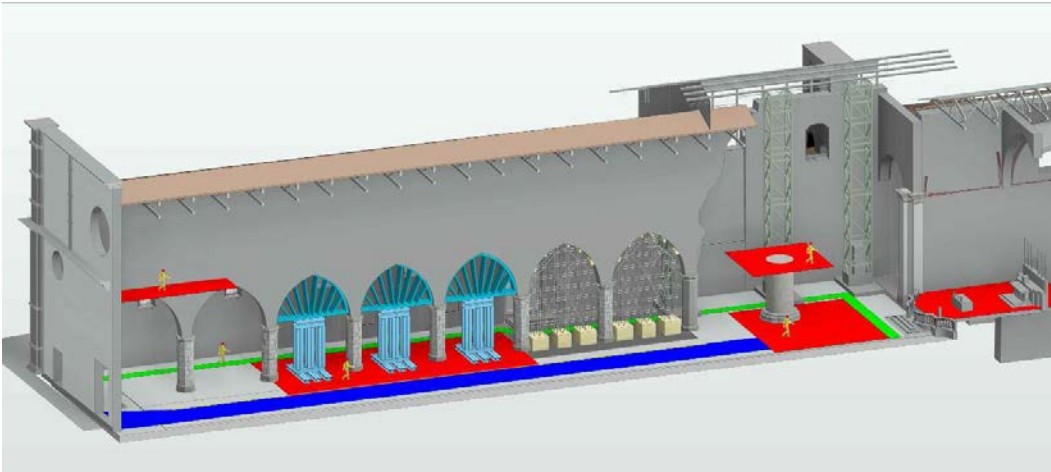


Figura 9. Aree di cantiere potenzialmente interferenti

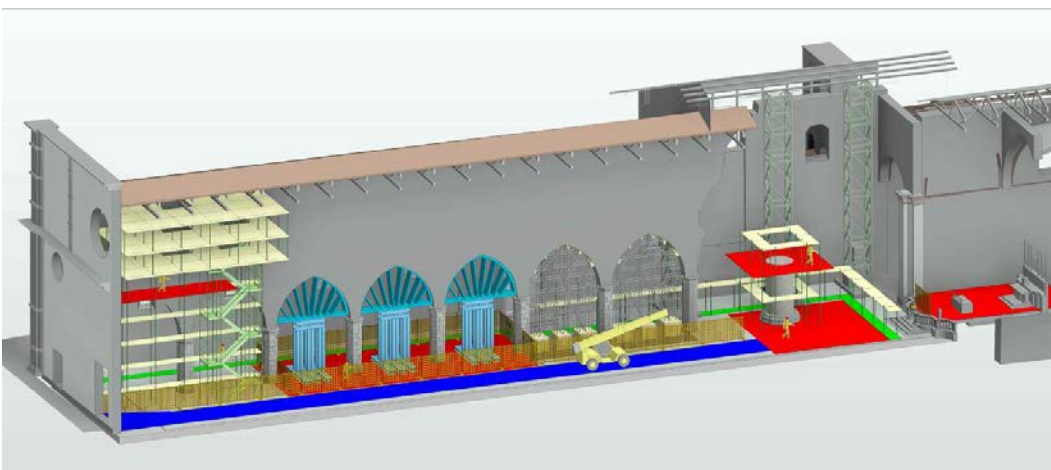


Figura 10. Aree di cantiere potenzialmente interferenti e relativi apprestamenti

4. Conclusioni

Gli studi condotti nell'ambito del progetto di restauro della Basilica di Santa Maria di Collemaggio hanno certamente rappresentato un importante banco di prova per la messa a punto della modellazione ergotecnica di un intervento sul patrimonio storico-architettonico e le sue interazioni con la progettazione degli interventi di recupero e restauro. La progettazione cantieristica e il suo apparato di modellazione informativa (Co.S.I.M), integrata con le altre discipline progettuali in campo, ha avuto un ruolo non secondario anche nell'indirizzamento e affinamento delle scelte progettuali finalizzate ad una fattibilità, in termini operativi e di sicurezza, delle lavorazioni da effettuare. Un intervento di tale importanza e complessità, gestito quasi interamente con la modellazione BIM, ha permesso di valutare al meglio gli aspetti di collaborazione e interoperabilità delle diverse discipline progettuali, e i livelli di dettaglio da utilizzarsi in tal genere di interventi nelle diverse fasi di progettazione; il tema trattato ha consentito altresì la strutturazione e il popolamento di database informativi per la progettazione cantieristica interoperabili con gli strumenti di modellazione oggi disponibili.

L'assunzione di una visione '*CoSIM oriented*' anche nella recentissima norma UNI 11337 mediante l'introduzione normativa di alcuni concetti e definizioni (*i.e.* modellazione informativa del progetto ergotecnico, LOD macchine e attrezzature) messi a punto dalla ricerca qui presentata lungi dall'esaurire la necessità di avanzamento della conoscenza in tale campo rappresenta comunque un importante passo avanti verso l'auspicata diffusione del metodo BIM, rimanendo dimostrata l'efficacia del contributo che il CoSIM è in grado di offrire, specialmente negli interventi di restauro sul patrimonio architettonico nazionale.

Bibliografia

- Arayici, Y. 2008. Towards building information modelling for existing structures. In *Structural Survey Vol 26 No. 3, 2008*, pp. 210-222.
- Aste, N., Della Torre, S., Adhikari, R.S., Buzzetti, M., Del Pero, C., Leonforte, F., Manfren M. 2016 Sustainable church heating: The Basilica di Collemaggio case-study *Energy & Buildings*, 15 March 2016, Vol.116, pp.218-231
- Barazzetti, L., Brumana, R., Oreni, D., Previtali, M., Roncoroni, F. 2014. UAV-based orthophoto generation in urban area: The Basilica of Santa Maria di Collemaggio in L'Aquila, *Lecture Notes in Computer Science*, 2014, Vol.8582(4), Part 4, pp.1-13.
- Cassano, M., Trani, M., Della Torre, S., Bossi, B. 2015 Construction site information modelling and operational planning, in: *Le Vie Dei Mercanti XIII International forum*, Aversa, Capri 11-13 June
- Cennamo G., Savoia S., The approach to BIM - Building Information Modelling as excellent instrument for the definition of design strategies and for knowledge, simulation and management of the buildings and architectural heritage, 2014, *International journal of systems applications, engineering & development*.
- Di Melchiorre, S., Trani M.L. 2005. Operating & safety information in the construction stage a performance-based approach. In: "CIB W102-2005", Lisbon, Portugal
- Crespi, P., Franchi, A., Giordano, N., Scamardo, M., Ronca, P. 2016. Structural analysis of stone masonry columns of the Basilica S. Maria di Collemaggio, *Engineering Structures*, 15 December 2016, Vol.129, pp.81-90.
- Kim, H., Anderson, K., Lee, S., Hildreth, J. 2013. Generating construction schedules through automatic data extraction using open BIM (building information modeling) technology. *Automation in Construction*, 2013, 35, 285-295.
- Oreni, D., Brumana, R., Della Torre, S., Banfi, F., Previtali, M. 2014. Survey turned into HBIM: the restoration and the work involved concerning the basilica di Collemaggio after the earthquake (L'Aquila). In *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-5, 2014, pp. 267-273.
- Trani, M. L., Cassano, M., Minotti, M., Todaro, D. 2014. Construction site BIM requirements, *Procs. 30th Annual ARCOM Conference*, 1-3 September 2014, Portsmouth, UK, 2014, 663-672.
- Trani, M., Bossi, B., Cassano, M. 2012. BIM Technology for Restoration Site Design. In: "Research, Development, and Practice in Structural Engineering and Construction" ASEA-SEC-1, 2012, Perth, Australia
- Trani, M., Bossi, B., Cassano, M., Todaro, D. 2015. BIM oriented equipment choice on construction site, in: *ISEC 2015, Sustainable Solutions in Structural Engineering and Construction*
- Trani, M., Cassano, M., Todaro, D. 2016. Assisted analysis on works interferences on restoration construction projects, in: *Le Vie Dei Mercanti XIV International forum*, Aversa, Capri