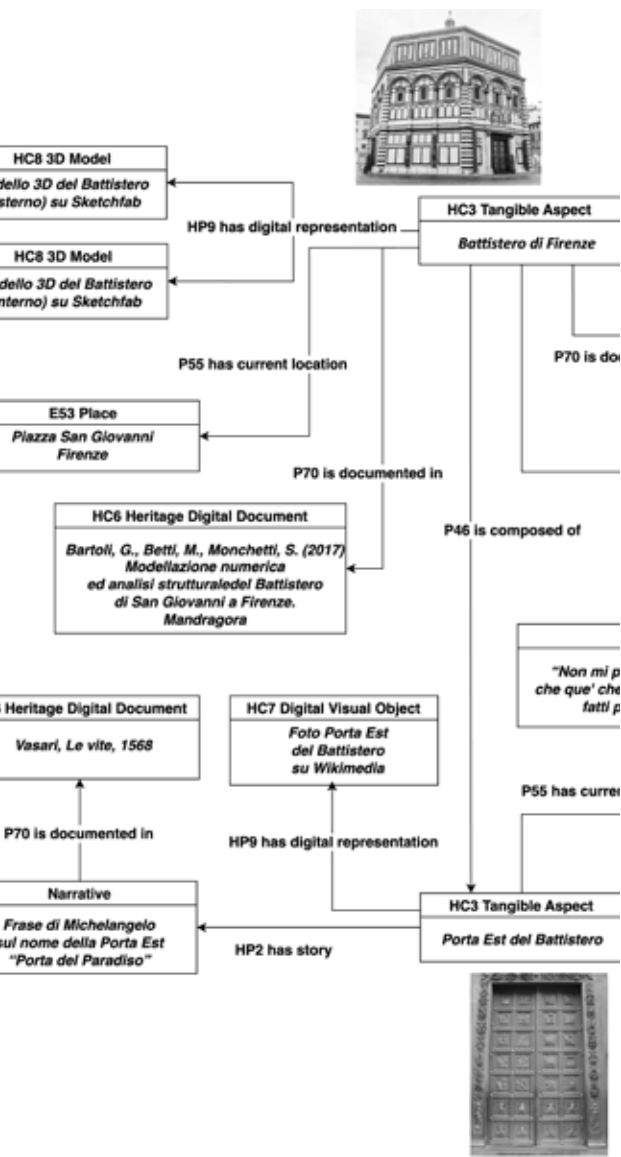




a cura di Marco Pretelli
e Alessia Zampini



Digital twins and ontological models for digital historic architectural documentation

Franco Niccolucci, Achille Felicetti (Università degli Studi di Firenze)

Digital Twins are complex systems, created in the industrial sector as digital replicas of real objects and recently extended to the documentation for the conservation and restoration of cultural heritage based on 3D models, organizing their structural and functional data. To manage this information, ontologies offer a more flexible and efficient tool for organizing knowledge. Models such as CRMba, the extension of CIDOC CRM for buildings, allow to document their components, spatial and functional relationships, construction aspects and their placement in spatial, historical and cultural contexts. The present contribution proposes an innovative approach for digital historical-architectural documentation, introducing a model, the Heritage Digital Twin, which guarantees the optimal management of all information aspects and ensures compatibility with the most used data models, for example those based on BIM and HBIM.

Historic Preservation Foundation Classes

Procedure e ontologie per l'interoperabilità nella tutela del patrimonio storico architettonico

www.archistor.unirc.it

ArchistoR EXTRA 12 (2024)

ISSN 2384-8898

Supplemento di ArchistoR 19/2023

ISBN 978-88-85479-39-5

DOI: 10.14633/AHR446



Gemelli digitali e modelli ontologici per la documentazione storico-architettonica digitale

Franco Niccolucci, Achille Felicetti

Come in tutti i campi della ricerca sui beni culturali, la documentazione riveste un ruolo di fondamentale importanza anche nel campo storico-architettonico e in questa direzione le tecnologie digitali assumono particolare valore. Se inizialmente la produzione di dati ha rivestito il ruolo più importante creando una documentazione più facilmente utilizzabile, formata da dati provenienti dalla digitalizzazione di documenti analogici e da nativi digitali, anche in questo campo si è assistito al cosiddetto *data deluge*, cioè alla disponibilità di una quantità crescente di dati impossibile da maneggiare senza supporto tecnologico. Una volta che la digitalizzazione della documentazione è divenuta una prassi corrente, la loro organizzazione è quindi diventata una priorità assoluta. Inizialmente, negli anni Settanta del secolo scorso, si è risolto il problema predisponendo delle schede in un formato rigidamente codificato come ad esempio quelle del SIGEC, create in Italia per la gestione dei beni culturali dal ministero competente. Nonostante questo fosse un passo in avanti nell'organizzazione dei dati la rigidità di questi sistemi di catalogazione si è presto rivelata un fattore negativo che ha portato, ad esempio, a un uso eccessivo dei campi a testo libero (le "note") accessibili solo con una lettura diretta, e quindi riaprendo il problema di una gestione efficiente dei dati documentari. Impossibile poi gestire con questi sistemi dati grafici o risultanti da digitalizzazione di documenti storici, trattati soltanto come allegati. Il problema è stato affrontato e (parzialmente) risolto con i metadati, informazioni che descrivono i dati, e le parole chiave (*keyword*), informazioni

succinte del contenuto di un testo. Ogni base di dati, cioè un insieme di dati organizzato secondo una precisa struttura, utilizza al proprio interno lo stesso sistema di metadati. Resta il problema dell'interoperabilità semantica fra basi di dati diverse, organizzate in modo differente, e quindi la necessità di introdurre degli standard accettati se non da tutti perlomeno da molti, e quello di correlare internamente a una base di dati documenti diversi ma in qualche modo legati fra di loro, come ad esempio le schede personali degli autori di un testo con il documento che lo contiene, affrontato con il concetto di relazione fra dati, espresso attraverso una locuzione verbale, nell'esempio "è autore di". Si viene così a creare una rete astratta di concetti e relazioni che individua i dati di un sistema e le loro relazioni interne, da ripetere nello stesso modo per tutti i dati e le rispettive relazioni, utilizzando i concetti e le relazioni pertinenti. I dati di una stessa base sono così organizzati nello stesso modo, specificando per ognuno il valore che assume il concetto generale. Un tale sistema di concetti e relazioni prende, com'è noto, il nome di ontologia, che è quindi costituita da concetti (tecnicamente chiamati *classi*) e relazioni che li collegano (chiamate *proprietà*). Le classi sono quindi categorie generali, a cui appartengono gli oggetti specifici (denominati *istanze* della classe): per esempio, la classe "chiesa" ha come istanze "Duomo di Firenze", "San Pietro", "Sant'Ambrogio" e così via. All'interno di un'ontologia, le classi possono essere specificazioni di altre classi, e in questo caso sono definite come loro sottoclassi: così la classe "edificio" può avere come sottoclassi "chiesa", "castello", "grattacielo", e altre ancora a secondo delle necessità. Come si può vedere da questi esempi, la denominazione di una classe è usata al singolare. Invece le proprietà si esprimono con un'espressione verbale, per esempio, "si trova a": "edificio" si trova a "città". Questa espressione generale si declina rispetto alle istanze delle due classi: "San Pietro" si trova a "Roma". L'uso dell'inglese favorisce l'uso e la comprensione internazionale.

Nel caso dei beni storico-architettonici l'estrema complessità dei dati rilevanti richiede un'ontologia efficiente e dettagliata. Per quanto riguarda i testi, si va infatti da documenti di carattere storico, comprese le digitalizzazioni di documenti originali d'archivio, alle pubblicazioni di settore: articoli, rapporti, libri. I dati grafici comprendono disegni, mappe, piante, alzati, fotografie e – in misura sempre crescente – modelli tridimensionali. I dati tecnici riguardano i materiali costruttivi, la statica, le analisi sulle condizioni fisiche e chimiche. I dati topologici riguardano le relazioni fra ambienti e la mereologia, cioè le relazioni delle parti fra di loro e con il tutto. I dati personali riguardano le persone (architetti, artisti, ingegneri, e così via) e gli enti collegati all'oggetto architettonico (committente, proprietario, gestore). Infine, sono necessarie le informazioni relative alle condizioni dell'oggetto e agli interventi di conservazione e restauro.

Il sommario elenco precedente riguarda informazioni relative alla componente materiale dell'oggetto architettonico: il progetto, le fotografie, i materiali, chi l'ha progettato, le sue condizioni di conservazione, e così via. Mancano ancora però le categorie di concetti, e le loro relazioni, che riguardano la componente intangibile, immateriale. Questa componente è stata da tempo riconosciuta come indispensabile a caratterizzare un bene come culturale. Come ricordato da Mounir Bouchenaki, allora vicedirettore dell'UNESCO, nel suo intervento di apertura¹ all'assemblea generale di ICOMOS nel 2003, esiste una relazione simbiotica fra materiale e immateriale. Quest'ultima componente deve essere considerata il contesto in cui la componente materiale prende forma e significato. I dati che riguardano la componente immateriale devono quindi fare parte di un sistema olistico che racchiude entrambi gli aspetti. È una considerazione ormai largamente condivisa e presente in molti documenti internazionali che integrano ed estendono i concetti della Carta di Venezia².

Gli standard internazionali di classificazione

Basi di dati diverse potranno essere integrate fra di loro se usano la stessa ontologia. Nasce così la soluzione al problema dell'interoperabilità, risolto con l'adozione preferenziale di standard condivisi. Per i beni culturali il sistema oggi universalmente accettato come standard si chiama, in breve, CIDOC CRM. La sigla CIDOC si riferisce alla sua nascita, promossa oltre 20 anni fa dal *Comité International pour la Documentation* dell'ICOM (*International Council for Museums*), quindi il sistema nasce in ambiente museale. La sigla CRM sta invece per *Conceptual Reference Model* – Modello concettuale di riferimento, e viene usata ormai da sola per indicare “il” modello, cioè l'ontologia³.

Il CRM consiste di 99 classi e 199 proprietà che le collegano. Il CRM è ormai svincolato da CIDOC ed è gestito da uno speciale gruppo di interesse, il SIG (*Special Interest Group*) in cui sono rappresentati esperti di diversi interessi scientifici che fanno riferimento al CRM. Le sue classi e proprietà cercano di rispondere a tutte le esigenze di gestione dati del settore dei beni culturali. Tale sistema prende, più specificamente, il nome di CRM base per distinguerlo dalle estensioni descritte di seguito.

È chiaro che ogni settore (musei, biblioteche, beni architettonici) ha proprie esigenze specifiche di documentazione, a cui il CRM risponde con la propria estensibilità, che consiste nella possibilità di definire specializzazioni del sistema base concepite per le esigenze di un settore specifico,

1. Vedi BOUCHENAKI 2003.

2. AA. VV. 1964.

3. Vedi <https://cidoc-crm.org/> (ultimo accesso 30 novembre 2023).

aggiungendo sottoclassi (e sottoproprietà) tipiche del settore in considerazione. Per esempio, la classe del CRM base denominata “oggetto creato da un individuo” (traduzione del nome effettivo *human-made object*) può venire specializzata introducendo le sottoclassi “dipinto”, “scultura” e così via se si devono gestire dati relativi a musei, e altre sottoclassi come “edificio”, “ponte”, eccetera, per il settore beni architettonici. Le sottoclassi “ereditano” le proprietà della loro superclasse, cioè della classe di cui sono una specializzazione: ad esempio la proprietà “ha come dimensione” che si applica agli oggetti in generale può essere applicata agli oggetti creati dall’uomo, che sono una sottoclasse della precedente.

Le classi e le proprietà del CRM base e delle sue estensioni di settore sono individuate da un codice formato da una (o più) lettere seguite da un numero, “E” e rispettivamente “P” per le classi e le proprietà del CRM base. Sfortunatamente alcuni hanno scelto di non seguire questa regola e nel seguito incontreremo anche noi uno di questi casi in cui una classe viene indicata in modo diverso.

Questa codifica agevola l’internazionalità della denominazione e l’elaborazione dei dati. Per facilitare l’utente umano, comunque, il codice alfanumerico è generalmente accompagnato anche da un nome in inglese. Così, per esempio, la denominazione completa dell’esempio sopraccitato è: “E22 Human-Made Object”, o semplicemente E22.

Per motivi di uniformità ci atterremo anche qui alle regole editoriali stabilite per il CRM, che richiedono di usare l’iniziale maiuscola per tutte le parole che compongono il nome della classe senza tradurlo dall’inglese né modificare il carattere utilizzato che è sempre tondo. Per le proprietà valgono le stesse regole ma le lettere iniziali sono sempre in minuscolo, ad esempio “P55 has current location”.

L’interoperabilità fra basi di dati relativi a settori diversi, che perciò utilizzano specificazioni differenti del CRM base, è preservata usando la classe generale del CRM base di cui le classi aggiunte sono sottoclassi. Per esempio, in una base di dati dedicata ai provvedimenti di tutela, che integra quindi informazioni eterogenee relative a beni museali, architettonici, archeologici ed altri ancora, si potrà fare riferimento alla superclasse comune “oggetto creato da un individuo”, cioè la classe CRM “E71 Human-Made Thing”, di cui “dipinto”, “scultura”, eccetera sono sottoclassi per il settore dei musei mentre “edificio”, “ponte” e così via lo sono per il settore dei beni architettonici.

La definizione di specializzazioni dedicate a settori specifici è basata sul rasoio di Occam: *entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem*. Per garantire una standardizzazione internazionale, l’introduzione di una nuova ontologia che specializza il CRM base è sottoposta al vaglio del SIG, che, dopo un’approfondita verifica e l’eventuale richiesta di modifiche, la approva come sistema

compatibile con lo standard. L'elenco delle estensioni attualmente approvate è pubblicato sul sito già ricordato del CRM. Un'estensione può, ovviamente, essere proposta e pubblicata anche prima di tale approvazione in modo da allargare la discussione all'interno della comunità scientifica di riferimento. In questo modo sono nati quelli che vengono chiamati modelli compatibili, cioè le estensioni dedicate all'archeologia, alle analisi scientifiche, ai testi antichi, e così via. Va notato che mancano ancora le estensioni ufficiali dedicate all'architettura, alla conservazione e restauro, e a diversi altri settori. La sempre maggiore diffusione del CRM fra gli specialisti dei beni culturali e l'uso sempre più diffuso delle tecnologie digitali sta comunque spingendo verso la consapevolezza della necessità di provvedere a colmare queste lacune. D'altro canto, è necessario evitare una frammentazione eccessiva richiamandosi al principio di Occam sopra ricordato.

Gemelli digitali

Nel presente contributo non proporremo un'ulteriore specializzazione del CRM dedicata a uno specifico settore. Ne suggeriremo invece un'estensione che rafforzi le caratteristiche olistiche, permetta di documentare e collocare nella giusta prospettiva sviluppi sempre più importanti della tecnologia informatica come la modellazione 3D, prenda in considerazione la necessità prima ricordata di collegare i dati sulla componente tangibile degli oggetti a quelli sulla loro componente immateriale e si possa utilizzare per integrare settori diversi ma correlati quali la documentazione storico-architettonica, la conservazione e il restauro.

Lo sviluppo di questo approccio nasce dall'esperienza fatta all'interno di progetti applicativi su cui abbiamo lavorato negli ultimi anni. I più importanti a questo riguardo sono i progetti ARIADNE e 4CH.

ARIADNE, sviluppato in due fasi distinte ARIADNE (*Advanced Research Infrastructure for Archaeological Data Networking in Europe, 2013-2016*) e la sua prosecuzione ARIADNEplus (2017-2022) chiamati collettivamente ARIADNE per brevità, è finalizzato a creare un catalogo consultabile online dei dati archeologici di ricerca, che rinvia attraverso un link al deposito specifico contenente i dati e le informazioni di dettaglio desiderate. Esso attualmente contiene oltre 4.000.000 di voci ed è gestito da un'associazione internazionale senza fine di lucro (AISBL) di diritto belga con sede a Bruxelles, denominata ARIADNE Research Infrastructure AISBL⁴. Il secondo progetto è 4CH⁵ (*Competence Centre for the Conservation of Cultural Heritage*) che sta disegnando la struttura di un

4. Vedi <https://www.ariadne-research-infrastructure.eu/> (ultimo accesso 30 novembre 2023).

5. Vedi <https://www.4ch-project.eu/> (ultimo accesso 30 novembre 2023).

centro di competenza europeo sulla conservazione del patrimonio culturale materiale. Tale Centro comprende la creazione di un catalogo di dati su monumenti e siti all'interno di un sistema digitale di gestione, denominato base della conoscenza, organizzandovi le informazioni relative a condizioni e interventi di conservazione e restauro: è la definizione di questo sistema che ci ha portato ai risultati che presentiamo in questo contributo.

Il nuovo modello si basa sul concetto di gemello digitale, o *digital twin*. A seconda del contesto in cui viene usato, il gemello digitale riceve definizioni diverse che accentuano alcune delle sue caratteristiche rispetto ad altre, meno rilevanti per il suo uso specifico. L'origine dei gemelli digitali è in campo industriale, per simulare il comportamento di sistemi o apparati complessi. In queste applicazioni l'organizzazione dei dati è più semplice che nella nostra, mentre l'accento è sulla simulazione del comportamento del sistema. Le definizioni di gemello digitale risentono perciò dell'uso che si intende farne, ponendone in evidenza le caratteristiche più rilevanti per lo scopo desiderato. Una definizione abbastanza generale di *digital twin*, contenuta in una ricognizione della letteratura corrente⁶, è la seguente: un *gemello digitale* – o *digital twin* – è la *rappresentazione virtuale di un sistema fisico continuamente aggiornata attraverso lo scambio di informazioni fra tale sistema fisico e quello virtuale*. Questa definizione include i tre aspetti del gemello digitale: l'organizzazione dei dati che lo formano, rappresentando diverse caratteristiche del sistema reale; l'aggiornamento di tali dati; la simulazione del comportamento del sistema reale a fronte di circostanze esterne. Si noti che abbiamo sostituito il termine “sistema fisico” usato nella precedente definizione con quello più ampio di “sistema reale” per incorporarvi anche le componenti immateriali del sistema. Per quanto riguarda i gemelli digitali qui proposti, ne sarà descritta solo l'organizzazione dei dati, già complessa di suo rispetto ad altre applicazioni, riservando a futuri sviluppi l'aggiornamento e la simulazione. Tra le applicazioni in aree prossime a quelle dei beni culturali val la pena di citare i gemelli digitali di città usati nelle applicazioni di *smart cities*, cioè di città “intelligenti”, i cui parametri principali sono continuamente monitorati per garantire l'efficienza e la qualità dei servizi. Un esempio efficiente di queste città con un digital twin in attività è Singapore. In Italia, Bologna ha progettato di dotarsene progettando di completarlo entro qualche anno.

Le caratteristiche che interessano per le nostre applicazioni sono in primo luogo l'organizzazione olistica dei dati, su cui potremo successivamente sviluppare gli altri aspetti di modellazione di risposta agli stimoli esterni. È necessario, a nostro avviso, realizzare un sistema in grado di integrare

6. Vedi CRESPI, DROBOT, MINERVA 2023.

informazioni della più diversa natura, la cui complessità rispecchia la natura sfaccettata del concetto di bene culturale.

Occorre perciò fare una precisazione rispetto a un uso quantomeno improprio del termine *digital twin*. Ci si imbatte spesso in applicazioni che sottintendono – o peggio, esplicitamente affermano – che il *digital twin* di un oggetto fisico, in particolare di un bene culturale materiale, consiste nel modello 3D realizzato con varie tecniche, modalità e approcci scientifici. Quest'affermazione equivale, in sostanza, a dire che la fotografia di una persona sulla sua carta d'identità (digitale) è il suo gemello digitale, arricchito dagli scarni dati presenti sulla carta stessa, come il nome, la data di nascita e così via. È chiaro che invece il gemello digitale deve essere una struttura che raccoglie quante più informazioni possibili sul soggetto, incluse naturalmente quelle grafiche e modellistiche. In altri termini, il gemello digitale è il complesso delle informazioni, e non soltanto una (il modello 3D) a cui sarebbero “appese” – eventualmente in suoi punti o parti specifiche – altri dati ausiliari.

Anche se la differenza fra le due impostazioni può sembrare un cavillo, si tratta invece di due approcci sostanzialmente diversi. Nel nostro, il modello 3D può esserci o (come spesso accade) non esserci. Le altre informazioni presenti possono riferirsi all'oggetto nella sua totalità e non necessariamente a un suo dettaglio fisico. Quest'ultimo caso si presenta specialmente per informazioni di carattere generale, oppure riferite a più oggetti o – come nel caso della componente immateriale – a nessun dettaglio in particolare.

Per esempio, si consideri la Cattedrale di Siviglia. Si può visualizzare su Sketchfab⁷ un modello 3D dell'esterno della chiesa insieme al suo campanile noto come la Giralda. La chiesa è stata costruita in fasi successive iniziate nel XV secolo e completate solo nel secolo scorso, sostituendo una moschea risalente al XII secolo. Ne fanno parte un chiostro, noto come *Patio de los Naranjos* (Giardino degli Aranci) e il campanile chiamato la Giralda. Le informazioni relative a questo complesso richiedono così un sistema articolato di suddivisione del modello 3D per individuare a che oggetto o parte dell'edificio ogni singola informazione si riferisce. La documentazione sullo stato di conservazione e sui restauri effettuati, che possono riferirsi a parti complesse della chiesa, prevede un'ulteriore scomposizione del suo modello che può sovrapporsi a quella necessaria per la documentazione storico-artistica e che comunque cambia di caso in caso, a seconda delle parti coinvolte in ciascun intervento. L'importanza della Cattedrale deriva anche dai Riti della Settimana Santa, durante la quale numerose processioni sfilano per la città per concludersi alla Cattedrale. Essa fa parte, insieme

7. Sketchfab (<https://sketchfab.com/>) è un archivio commerciale online di modelli 3D, molti dei quali sono visibili gratuitamente. Il modello 3D citato di seguito può essere visualizzato mediante la funzione di ricerca del sito.

ad altri monumenti, del sito Patrimonio UNESCO di Siviglia, mentre i Riti sono parte del patrimonio immateriale di Siviglia e quindi della componente immateriale della Cattedrale dove si svolgono nelle loro fasi finali. Questi esempi mostrano come sia improprio considerare il modello 3D l'equivalente digitale dell'oggetto culturale, perché si perdono le connessioni di quest'ultimo con altri aspetti ugualmente importanti, *in primis* la sua componente immateriale.

Fra le applicazioni al restauro spicca quella per Notre Dame⁸ dopo il disastroso incendio del 2019. L'iniziativa, di indubbio prestigio, ha prodotto un modello di grande qualità per documentarne il restauro, che rimane tuttavia essenzialmente geometrico, con tutte le implicazioni che ciò comporta sul piano dell'organizzazione della conoscenza. Uno dei limiti più evidenti, di questo come di altri modelli simili, risiede infatti nella difficoltà, tipica del 3D, di integrare in modo strutturato, relazionale e durevole elementi di natura semantica. L'approccio comunemente adottato, fondato sull'aggiunta di annotazioni, si rivela inadeguato e concettualmente fragile: le annotazioni consistono per lo più in etichette informative associate a singoli frammenti della geometria, prive della capacità di esprimere relazioni complesse e significative né tra loro né con entità esterne. Così, ad esempio, un'annotazione riferita a una colonna non stabilisce alcun legame formale con quella apposta al capitello che la sovrasta, né con il documento storico che ne descrive l'intervento di restauro. Informazioni di questo tipo, non essendo radicate in una struttura logica sottostante, risultano fragili, vincolate al modello e al software che le ha generate, e fortemente esposte al rischio di perdita durante conversioni di formato o migrazioni dei dati. Inoltre, un sistema basato su annotazioni non consente interrogazioni avanzate: non è possibile formulare *query* che attraversino relazioni multiple né integrare il modello in modo nativo con altre basi di conoscenza. Ne deriva un'isola informativa, un sistema chiuso, incapace di partecipare a quell'ecosistema di conoscenza ampio e interconnesso che costituisce invece il vero obiettivo e il principale punto di forza di un approccio ontologico.

Le altre caratteristiche tipiche del gemello digitale come la sua evoluzione cronologica e la risposta a stimoli esterni restano ancora sviluppi futuri del modello. Nel caso di un edificio, il gemello digitale dovrebbe infatti essere in grado di contenerne tutte le informazioni rilevanti, fra di loro collegate, comprese quelle relative alla componente immateriale; di includerne i cambiamenti nel tempo e nello spazio; di modellarne le reazioni a stimoli esterni. Il nostro gemello digitale rappresenta invece (per ora) solo il modello statico di un oggetto a un certo stadio della sua "vita", ma ancora non ne comprende l'evoluzione né è capace di rappresentare le sue reazioni rispetto a stimoli esterni. Vi abbiamo inserito (o meglio, iniziato a inserire) le informazioni rilevanti e i loro collegamenti attraverso

8. Vedi DE LUCA 2023.

proprietà; abbiamo considerato informazioni cronologiche e spaziali; non abbiamo ancora sviluppato la modellazione del comportamento del gemello digitale rispetto a stimoli esterni o interni al sistema. Nel caso di un edificio, per esempio, si inseriscono nel suo gemello digitale digitale tutti i dati ad esso relativi disponibili, collegati fra di loro mediante opportune proprietà; sono naturalmente compresi fra questi le rappresentazioni grafiche e i modelli 3D. Per considerare lo sviluppo cronologico, i dati possono essere dotati di una marca temporale che consente di rappresentarne l'evoluzione. Tale organizzazione dei dati ovviamente prevede di considerare anche la componente immateriale dell'oggetto in questione.

Ci proponiamo di sviluppare anche la modellistica delle reazioni a fenomeni esterni, per esempio per valutare le condizioni della facciata di un edificio storico conoscendone le condizioni attuali, i meccanismi di degrado e, parallelamente, la previsione delle condizioni esterne meteorologiche, ambientali e di ogni altro genere che possa avere un impatto sulla facciata. Un altro esempio riguarda un edificio storico posto in un'area a rischio sismico conoscendone la struttura; oppure i possibili danni, in base alla configurazione dell'edificio, alla sua collocazione, alle previsioni meteo e il conseguente rischio di allagamento. Quest'ultimo caso è stato considerato nel progetto 4CH sopra ricordato in quanto relativamente facile da implementare perché si basa su semplici dati dell'edificio (localizzazione, struttura, uso, caratteristiche costruttive) e sulle previsioni meteorologiche ormai disponibili su grande scala.

Gemelli digitali culturali e ontologie

Da quanto sopra descritto appare chiaro che la costruzione del gemello digitale culturale, tanto di un oggetto artistico o archeologico quanto di un edificio storico, non può che fondarsi su una gestione efficiente di tutti i dati disponibili che lo riguardano. Si tratta di informazioni presenti in documenti di varia natura, quali fonti letterarie, giornalistiche, storiche, relazioni tecniche e altre testimonianze testuali, ma anche di fotografie, mappe, disegni, audiovisivi e altro materiale d'archivio, che occorre selezionare, digitalizzare e rendere consultabile. La documentazione sulla conservazione di edifici e monumenti si avvale inoltre del contributo della ricerca scientifica e risulta impegnativa poiché le analisi, le osservazioni, le misurazioni e le indagini strumentali tipiche delle scienze applicate generano grandi quantità di dati che richiedono un'adeguata organizzazione e analisi. Il complesso di tutte queste informazioni costituisce l'essenza stessa del gemello digitale culturale, poiché di fatto offre una replica digitale completa della forma, della sostanza e della storia dell'edificio oggetto di studio.

I modelli 3D e quelli BIM⁹ offrono strumenti potenti e particolarmente adatti per riprodurre e visualizzare le caratteristiche fisiche e materiali degli oggetti culturali, specialmente in termini di dimensioni, forme, colori, orientamento ecc. In particolari condizioni, modelli di questo genere possono fungere da piattaforma per l'integrazione di informazioni anche complesse di edifici e monumenti. Tuttavia, essi risultano poco efficaci nella rappresentazione di eventi storici, valenze artistiche, significati culturali e sociali, così come di tutti gli altri aspetti immateriali non direttamente traducibili in termini geometrici o visivi. Questi elementi, infatti, richiedono strumenti di codifica pertinenti all'ambito delle ontologie e della semantica più che ai sistemi di progettazione e modellazione grafica.

In quest'ottica, le ontologie si configurano come strumenti privilegiati per rappresentare i beni culturali ed esprimere la rete di conoscenza che li riguarda¹⁰. Esse, infatti, forniscono una struttura concettuale flessibile e adatta ad organizzare l'informazione, rendendola non solo accessibile ma anche interpretabile sia da utenti umani sia da sistemi informatici evoluti. L'uso di vocabolari standardizzati, inoltre, garantisce la coerenza e l'uniformità dei dati, aspetto essenziale per assicurare l'interoperabilità tra diversi sistemi e piattaforme e facilitare lo scambio di informazioni tra enti e istituzioni che operano nel campo della conservazione e della valorizzazione del patrimonio culturale. Grazie a queste caratteristiche e alla capacità di orchestrare efficacemente l'utilizzo della documentazione aggregata, le ontologie possono fungere da "motore" dei gemelli digitali culturali in ogni loro fase operativa.

CIDOC CRM, come già detto, riveste una particolare importanza nel panorama attuale delle ontologie, poiché offre un contesto estremamente versatile per l'integrazione, la mediazione e l'interscambio di informazioni legate al patrimonio culturale. La sua applicabilità nel campo dell'architettura è particolarmente significativa, data la complessità e la ricchezza di dati che caratterizzano questa disciplina. Estensioni¹¹ quali CRMba e CRMarchaeo, ad esempio, permettono di modellare in modo dettagliato le informazioni relative a edifici storici, strutture urbane, contesti architettonici e archeologici, trasformandole in descrizioni semantiche strutturate. Il paradigma del

9. BIM (*Building Information Modelling*) è un metodo per la gestione dei dati relativi alla pianificazione, realizzazione e gestione di costruzioni attraverso un modello 3D realizzato in CAD. BIM è uno standard internazionale ISO 16739:2013, organizzato mediante l'ontologia IFC (*International Foundation Classes*). Viene anche utilizzato per i beni culturali con un'estensione denominata HBIM, dove H sta per *heritage*.

10. Vedi TIBAUT, KAUČIČ, DVORNIK PERHAVEC 2018.

11. Per una definizione completa di questi modelli si veda il sito del CRM già citato alla nota 3.

CRM, basato su eventi, semplifica inoltre la rappresentazione di dati cronologici, aspetti funzionali, interventi di restauro, evoluzione di stili costruttivi e tecniche architettoniche, rendendo possibile un'analisi dinamica e diacronica dei dati acquisiti. La scelta di aderire a questa filosofia per lo sviluppo del nostro modello ontologico è dunque motivata dalla solidità che il CIDOC CRM e il suo ecosistema garantiscono in ogni fase della modellazione della conoscenza.

L'ontologia Heritage Digital Twin

L'ontologia *Heritage Digital Twin* (in sigla, HDT) che stiamo sviluppando¹² rappresenta una soluzione innovativa per gestire e interconnettere l'ampio spettro di dati che formano il nucleo informativo del gemello digitale di un bene culturale. La scelta metodologica di progettare quest'ontologia come estensione del CIDOC CRM deriva dall'assoluta novità del concetto di gemello digitale culturale e della struttura logica che lo descrive. L'ontologia HDT, infatti, definisce ex novo le entità necessarie a descrivere gli elementi specifici di questo dominio e a modellarli in modo adeguato, mantenendo la coerenza col modello principale (il CRM base) e le sue altre estensioni, utilizzati per modellare entità quali tempi, luoghi, eventi, agenti e oggetti fisici, e le loro mutue correlazioni. Questa sinergia implementa un alto grado di interoperabilità nella documentazione e nell'analisi del patrimonio architettonico, poiché permette di allineare la struttura dell'ontologia HDT con quelle utilizzate in altri ambiti della ricerca sui beni culturali (quali, ad esempio, quello archeologico e storico-artistico). Essa consente ad esempio di identificare e classificare elementi architettonici secondo periodi storici specifici, stili, tecniche costruttive e materiali utilizzati, e di definire in diacronia le destinazioni e l'uso di specifici spazi o elementi di un determinato edificio.

L'ontologia HDT è pensata principalmente come strumento per catturare la duplice natura del patrimonio culturale, quella tangibile e quella intangibile, e per fornire, attraverso specifiche classi e proprietà, un meccanismo per documentare e analizzare dinamicamente le loro mutue relazioni. È progettata inoltre per modellare le loro controparti digitali e i meccanismi che le rendono interoperabili come elementi interconnessi del gemello digitale culturale.

Le classi e le proprietà di questa ontologia sono individuate da una sigla formata dalle lettere HC per le classi e HP per le proprietà, seguite da un numero.

La classe "HC1 Heritage Entity" rappresenta entità del mondo reale rilevanti per il loro contributo alla società, alla conoscenza e alla cultura. È una classe di livello generale che include entità sia

12. Vedi: NICCOLUCCI *ET ALII* 2023; NICCOLUCCI, FELICETTI 2023; FELICETTI, NICCOLUCCI 2024.

materiali che immateriali, a loro volta modellate per mezzo delle sue due sottoclassi “HC3 Tangible Aspect” e “HC4 Intangible Aspect”. Quest’ultima in particolare è destinata alla modellazione degli eventi storici e culturali, delle tradizioni, dei culti e delle pratiche tipiche del patrimonio immateriale. La nuova classe “HC2 Heritage Digital Twin” rappresenta invece i gemelli digitali culturali come la rete delle informazioni che li caratterizzano, configurandoli di fatto come repliche digitali informative delle entità del mondo reale.

L’ontologia prevede nuove classi come ulteriori componenti dei gemelli digitali, usate per la modellazione delle rappresentazioni digitali iconografiche e multimediali (“HC5 Digital Representation”, “HC7 Digital Visual Object”, “HC8 3D Model”). Classi specifiche esistono anche per esprimere gli elementi della documentazione digitale (“HC6 Digital Heritage Document”) che concorrono a definire l’identità e la storia degli oggetti culturali descritti. Una classe particolare (“HC9 Heritage Activity”) è dedicata ad una specifica tipologia di attività legati allo studio, l’indagine scientifica e la riproduzione digitale di entità culturali. La stessa classe può essere usata per qualunque altra attività pertinente ai fini della creazione e gestione del gemello digitale.

Per modellare le storie, cioè quei frammenti di conoscenza derivati direttamente dalla documentazione o dalla tradizione orale, e posti in forma narrativa ad arricchire il patrimonio intangibile degli oggetti culturali descritti abbiamo usato alcune classi definite nella *Narrative Ontology* (NOnt), un modello ontologico¹³ sviluppato nell’ambito del progetto MINGEI e compatibile con CIDOC CRM. La classe “Narrative” di questa ontologia si adatta perfettamente al concetto di storia che abbiamo formulato. Ugualmente interessante è il caso dello *storytelling*, che è invece il modo in cui i fatti che compongono una storia vengono presentati e condivisi, in forma scritta o orale, e con modalità idonee a diffondere le storie e a preservarne i valori sociali e culturali. Abbiamo preferito utilizzare per ora direttamente come nomi delle classi “Narrative” (il contenuto del racconto) e “Narration” (l’azione di raccontarlo) introdotte nella *Narrative Ontology* anziché sviluppare nuove classi equivalenti nel nostro modello. Come già detto, però, il mancato adeguamento al sistema standard di notazione delle classi può risultare fastidioso ed è possibile che questa nostra scelta sia modificata in futuro.

La nostra ontologia prevede che le istanze di tutte le classi utilizzate siano sempre dotate delle modalità necessarie per essere poste in mutua correlazione. Questo si realizza sia attraverso l’utilizzo delle proprietà ereditate dalle classi del CIDOC CRM, sia per mezzo di nuove proprietà appositamente predisposte per esprimere i complessi legami che intercorrono fra le entità culturali, la loro storia, la

13. Vedi MEGHINI, BARTALESI, METILLI 2019.

documentazione ad esse relativa e la loro rappresentazione digitale. Fra le nuove proprietà introdotte, segnaliamo la “HP1 has digital twin”, predisposta per indicare la relazione fra entità culturali (HC1) e i loro gemelli digitali (HC2); “HP5 has intangible aspect”, pensata per associare aspetti materiali (HC2) e immateriali (HC4); “HP3 has story”, per legare le entità culturali (HC1) con le storie (“Narrative”) in cui esse sono menzionate; e “HP4 is narrated through”, per indicare le modalità di storytelling con le quali una storia (“Narrative”) è raccontata (“Narration”). Ciò consente la creazione di grafi della conoscenza particolarmente dettagliati ed estesi, e al tempo stesso perfettamente compatibili con ogni altro archivio costruito secondo gli stessi criteri. Questo inoltre garantisce una perfetta interoperabilità fra le informazioni sugli edifici e quelle relative ai siti che li ospitano, agli oggetti che essi contengono, ai complessi di cui fanno parte e così via, oltre all’estensibilità futura della rete informativa, in caso di disponibilità di nuovi dati.

Sviluppi più recenti hanno arricchito l’architettura del gemello digitale di una componente reattiva, essenziale per l’interazione con gli oggetti fisici attraverso una rete di sensori, decisori e attuatori, che fungono da mediatori fra il mondo digitale e quello reale. Grazie a questa infrastruttura, il digital twin integra rappresentazioni dinamiche e interattive del bene culturale, capaci di restituirne le condizioni attuali e di anticiparne le possibili evoluzioni. La simulazione di scenari futuri e l’analisi critica dei rischi consentono di trasformare la conservazione da disciplina essenzialmente reattiva a scienza predittiva, offrendo ai ricercatori strumenti per sviluppare strategie preventive mirate e interventi tempestivi, così da garantire una trasmissione più sicura e consapevole del patrimonio culturale.

Per modellare la complessità di un tale sistema, l’ontologia HDTO (divenuta RHDT grazie alla sua nuova componente reattiva) introduce classi specifiche per la rappresentazione semantica di tutte le componenti in gioco. La classe “HC9 Sensor”, ad esempio, è impiegata per descrivere i dispositivi di rilevamento (sensori, dispositivi IoT e quant’altro) dedicati al monitoraggio degli oggetti culturali, mentre la classe “HC10 Decider” rappresenta i componenti incaricati di analizzare gli input da essi inviati e generare istruzioni operative. Il processo decisionale è formalizzato come evento attraverso la classe “HC14 Activation Event”. Le istruzioni elaborate vengono poi eseguite dagli attuatori, modellati come “HC11 Activator”, che intervengono direttamente sul mondo reale.

L’ontologia RHDT consente inoltre di descrivere con precisione aspetti peculiari delle attività di monitoraggio, come il posizionamento dei sensori (“HP15 is positioned on”), il software di controllo (“HP11 is operated by”), le misurazioni effettuate (“HC13 Sensor Measurement”) e i segnali prodotti (“HC12 Signal”).

Infine, l'ontologia introduce specifiche classi per documentare formalmente il ruolo dell'IA nel processo decisionale. La classe "HC15 AI Component", ad esempio, è concepita per rappresentare i sistemi di intelligenza artificiale integrati nel gemello digitale, delegati ad effettuare simulazioni e formulare ipotesi per potenziare attività quali l'analisi dei dati e la simulazione predittiva. Queste operazioni svolte dall'IA sono formalizzate come eventi mediante la classe "HC16 Simulation or Prediction", sottoclasse di "E5 Event" del CIDOC CRM, che consente la registrazione, l'analisi e il riutilizzo dei dati sulle attività svolte dagli agenti digitali in scenari futuri. Centrale rimane comunque l'interazione con gli operatori umani, modellati tramite la classe "E39 Actor" del CIDOC CRM, alla cui esperienza è delegata ogni decisione ultima circa la sicurezza del patrimonio culturale. Le caratteristiche tecniche complete dell'ontologia HDT sono descritte dettagliatamente nei tre articoli già citati¹⁴, pubblicati dagli autori in collaborazione con altri ricercatori.

Metodi evoluti di utilizzo

È interessante notare come alcuni meccanismi offerti dalle ontologie in generale e dall'ecosistema CIDOC CRM in particolare, possano essere impiegati per rendere particolarmente ricca e articolata la formulazione della conoscenza di oggetti complessi come i beni architettonici. Ad esempio, l'estensione CRMba, progettata per la descrizione di edifici storici, fornisce classi quali "B1 Built Work" e "B2 Morphological Building Section", con le relative proprietà, per descrivere le componenti strutturali degli edifici e delle loro parti. Ma se un particolare edificio riveste anche un interesse storico o artistico, è possibile arricchire la sua descrizione attraverso la tecnica dell'istanziamento multipla, spesso utilizzata nella modellazione semantica, che consente di rappresentare ontologicamente un oggetto come istanza di due classi di un certo ecosistema. Con questa tecnica è possibile, ad esempio, classificare un determinato edificio come istanza di "Built Work" (classe di CRMba) e "Heritage Entity" (classe della nostra ontologia HDT) allo stesso tempo, in modo da evidenziarne la natura strutturale oltre a quella culturale. Fatto questo, il meccanismo dell'ereditarietà fra classi e proprietà, tipico delle ontologie, permette successivamente di utilizzare le proprietà di tutte le classi istanziate per definire relazioni di vario genere. La ricchezza semantica garantita da metodologie di questo genere dimostra con evidenza le grandi potenzialità dei sistemi ontologici quando si renda necessario codificare in

14. Vedi nota 12.

modo capillare e quanto più fedelmente possibile al vero la natura e le caratteristiche degli oggetti culturali.

Un esempio di utilizzo dell'ontologia RHDT

Per illustrare le caratteristiche di RHDT svilupperemo un semplice esempio riferito al Battistero di Firenze e alle sue famose Porte, di grande rilievo artistico. I modelli costruiti su un'ontologia sono destinati all'uso da parte di sistemi informatici e quindi sono verbosi e risultano lunghi e forse anche noiosi per un utente umano. Ci limiteremo perciò a elencare solo alcune informazioni come esempi di possibili contenuti del modello, istanze delle classi sopra ricordate. Anche le relazioni fra di loro e il grafo della conoscenza risultante sono qui rappresentate in modo abbreviato e a solo titolo esemplificativo.

Lo schema mostrato (fig. 1) illustra come gli aspetti materiali e intangibili del Battistero siano stati rappresentati combinando le classi e le proprietà dell'ontologia RHDT con quelle di CIDOC CRM. Il Battistero può essere descritto per mezzo della classe "HC3 Tangible Aspect" di RHDT. È composto da molteplici elementi, fra i quali di particolare rilievo è la porta orientale, detta "Porta del Paradiso", opera di Lorenzo Ghiberti. Anch'esso si può rappresentare per mezzo della classe HC3. La pertinenza della porta al Battistero si esplicita con la proprietà "P46 is composed of" del CRM, che mette in relazione diretta gli oggetti fisici con le loro componenti. Le rispettive collocazioni dei due manufatti (HC3) sono espresse tramite la proprietà "P55 has current location" del CIDOC CRM. Il Battistero e le sue parti sono citate in un gran numero di opere letterarie descritte nel modello con la classe "Narrative" dell'ontologia NOnt. Fra queste sono citate la frase di Michelangelo relativa alla Porta e le terzine di Dante per il Battistero. La relazione tra le istanze di HC3 e le opere che ad esse si riferiscono può essere espressa per mezzo della proprietà "HP2 has story". La proprietà "P70 is documented in" collega il Battistero alla sua documentazione, di cui sono citati vari esempi. Il Battistero di Firenze e le sue componenti sono, inoltre, raffigurati in numerose fotografie ("HC7 Digital Visual Object") e riproduzioni digitali, oltre ad essere riprodotte in vari modelli tridimensionali ("HC8 3D Model"). Questi elementi possono essere messi in relazione con l'oggetto culturale rappresentato attraverso la proprietà "HP9 has digital representation". Infine, il legame tra i vari HC3 e la loro replica nel mondo digitale ("HC2 Heritage Digital Twin") viene espresso tramite la relazione "HP1 has digital twin". La stessa relazione che lega il monumento e le sue componenti nel mondo reale può essere riprodotta anche per le loro rappresentazioni digitali, per cui il digital twin del Battistero (HC2) è legato al digital twin della porta orientale (HC2) tramite la proprietà "HP3 has digital twin component".

Integrazione fra ontologie e BIM / H-BIM

La possibilità di integrare i sistemi costruiti su base ontologica con i sistemi BIM/HBIM rappresenta un tema di ricerca particolarmente rilevante per la documentazione dei beni storico-architettonici. La definizione di metodologie di integrazione fra queste informazioni apparentemente diverse potrebbe infatti apportare un notevole contributo aggiuntivo alla costruzione di basi di conoscenza più complesse e, di conseguenza, di gemelli digitali più completi. Se da un lato è possibile, almeno in linea di principio, sviluppare strumenti per includere dati semantici nei modelli HBIM, sembra d'altra parte più promettente, e per certi versi più interessante, la possibilità di derivare informazioni dai modelli stessi codificati in tale sistema in modo da collegarli o incorporarli nel gemello digitale, per implementare sistemi di gestione dati più efficienti e una migliore comprensione degli edifici nel loro complesso. In virtù di tali benefici, stiamo investigando la possibilità di derivare conoscenza dai modelli BIM/HBIM o dai software utilizzati per crearli, estraendo dal loro contenuto informazioni sulla struttura degli edifici rappresentati.

In un lavoro precedente¹⁵, abbiamo già descritto un esperimento simile condotto per esaminare la possibilità di dotare modelli 3D di metadati aggiuntivi, anche sotto forma di annotazione, per una più completa documentazione di siti e scavi archeologici. A questo riguardo, abbiamo anche sviluppato un plugin per dotare software come Blender¹⁶ e altri simili applicativi Open Source della capacità di aggiungere funzioni per interagire con i modelli 3D e incorporare informazioni semantiche direttamente nella loro struttura digitale. Un approccio di questo tipo potrebbe trovare un'applicazione ancora più agevole in ambiti procedurali, specialmente per arricchire modelli di siti, edifici e monumenti creati utilizzando tecnologie e software BIM. Sarebbe infatti possibile dotare i modelli di livelli aggiuntivi di conoscenza relativa ai dati storici, culturali e intangibili derivati dalla documentazione, un'operazione che favorirebbe una gestione sostenibile del patrimonio storico e avrebbe un notevole impatto sulla preservazione delle informazioni sul lungo periodo. I modelli HBIM arricchiti con dati ontologici potrebbero infatti essere utilizzati non solo per monitorare lo stato di conservazione degli edifici nel tempo e pianificare interventi di manutenzione, ma anche per

15. Vedi FELICETTI, LORENZINI 2011.

16. Blender è un software Open Source per la modellazione 3D, <https://www.blender.org/> (ultimo accesso 30 novembre 2023).

conservare e trasmettere alle generazioni future una documentazione digitale dettagliata di ogni loro aspetto, non solo di quello strutturale¹⁷.

Più interessante per il nostro ambito di ricerca è l'operazione inversa, quella cioè di estrarre informazioni strutturali e materiali dai modelli BIM e trasformarle in altrettanti nodi dei grafi della conoscenza implementati attraverso le ontologie. Una grande quantità di dati può essere infatti derivata dal formato di scambio IFC, utilizzato in ambito BIM, per essere poi ricodificata e trasformata in metadati semantici. Operazioni di questo tipo sono già state sperimentate più volte in passato¹⁸ e sono rese agevoli dal fatto che IFC utilizza principalmente lo standard ISO EXPRESS, un linguaggio di specifica dei dati in grado di descrivere ogni aspetto degli edifici rappresentati in 3D, inclusi gli elementi strutturali e funzionali e le reciproche relazioni tra i loro componenti. Sebbene non sia completamente compatibile con i linguaggi semantici più comunemente usati per esprimere le ontologie, la sintassi di EXPRESS può essere agevolmente convertita, attraverso opportune operazioni di mappatura e ricodifica, in formati standard come RDF, OWL, JSON-LD¹⁹. Tale procedimento può rendere possibile l'identificazione di elementi caratteristici o rilevanti per lo studio di siti e monumenti culturali e la definizione di nuove istanze per le classi e proprietà dell'ecosistema ontologico, in modo da descrivere le relazioni che questi elementi possiedono all'interno dei modelli 3D e da compararli e collegarli con quelli del mondo reale, documentati, ad esempio, per mezzo di CRMba e RHDT. Da elementi IFC quali *ifcSite*, *ifcBuilding*, *ifcWall*, *ifcSpace* sarebbe infatti possibile ottenere, in modo semi-automatico, istanze per classi quali "E27 Site" di CIDOC CRM, "B1 Built Work", "B2 Morphological Building Section" e "B4 Empty Morphological Building Section" di CRMba, per poi utilizzare le tecniche sopra descritte dell'istanziamento multipla – cioè considerare gli oggetti contemporaneamente come istanze di classi diverse – e dell'ereditarietà per aggiungere livelli di conoscenza riguardo la valenza culturale degli elementi rappresentati in BIM. Questo avrebbe un enorme impatto sull'integrazione fra documentazione e modelli digitali all'interno dell'infrastruttura dei gemelli culturali, un motivo più che sufficiente per convincerci a proseguire questa sperimentazione nell'immediato futuro.

Per illustrare concretamente le potenzialità di questo approccio, si delinea di seguito una metodologia di integrazione che dimostra come l'ontologia RHDT possa arricchire semanticamente i modelli H-BIM, superando la mera rappresentazione geometrica e contribuendo alla costruzione di un autentico gemello digitale culturale. Un riferimento metodologico interessante in questo campo

17. Vedi MESSAOUDI, VÉRON, HALIN 2018.

18. Vedi: ACIERNO ET ALII 2017; PREVITALI ET ALII 2020.

19. Vedi: BEETZ, VAN LEUVEN, DE VRIES 2009; ZHANG, EL-GOHARY 2020.

è offerto da recenti studi sull'integrazione tra modelli dell'ecosistema CIDOC CRM e lo schema IFC, fra i quali ad esempio quello condotto sul Teatro Romano di Adrianopoli in Albania²⁰. In questa ricerca l'ontologia CRMba è stata mappata direttamente sullo schema IFC. Sfruttando al meglio le classi "IfcSpace" e "IfcSpatialZone", è stato possibile gestire l'analisi spaziale e la scomposizione funzionale dei resti archeologici senza ricorrere a conversioni intermedie, che spesso comportano una perdita di informazione. Il processo logico seguito e la validazione sul campo offrono un modello operativo direttamente trasferibile e applicabile alla nostra ontologia RHDT e definiscono un percorso per tradurre la ricchezza concettuale del nostro modello in un formato interoperabile e standardizzato. Il processo si fonda su una mappatura sistematica in cui, ad esempio, un'entità IFC come "IfcBuilding" viene classificata simultaneamente come istanza della classe "B1 Built Work" di CRMba e della classe "HC1 Heritage Entity" di RHDT. Attraverso il meccanismo dell'istanziamento multipla, l'oggetto eredita le proprietà di entrambe, descrivendone con un unico atto sia la natura strutturale sia la valenza culturale. Questa metodologia non rappresenta una semplice trasposizione tecnica, bensì il fondamento per la costruzione di grafi della conoscenza densi e articolati, attraverso i quali il paradigma del gemello digitale culturale si realizza pienamente. L'operazione di mappatura trasforma in relazioni ontologiche i costrutti IFC, creando una rete semantica in cui ogni nodo del modello H-BIM è connesso agli altri attraverso legami espliciti, al tempo stesso human- e machine-readable. La relazione "HP5 has intangible aspect", ad esempio, trova una precisa corrispondenza nella relazione "IfcRelDefinesByProperties", che permette di associare a un elemento fisico ("IfcBuildingElement") un set di proprietà ("IfcPropertySet") personalizzato che ne veicola gli attributi immateriali. Analogamente, le componenti narrative, modellate tramite la classe "Narrative" della Narrative Ontology, possono essere collegate all'entità principale attraverso la relazione "IfcRelAssociatesDocument".

A complemento di questa strategia, esperimenti preliminari condotti dal nostro gruppo di ricerca²¹ hanno investigato la possibilità di sviluppare un'estensione ontologica per BIM/H-BIM capace di generare automaticamente istanze a partire da entità IFC. Tramite script di mappatura e conversione, è infatti possibile definire nuove classi che rappresentino esplicitamente gli ambienti 3D (ad esempio, "3DEx_Site", "3DEx_Building", "3DEx_Space") e popolarle con istanze derivate da elementi IFC quali "IfcSite", "IfcBuilding" e "IfcSpace". Successivamente, utilizzando proprietà del CIDOC-CRM come "P138 represents" o "P67 refers to", sarà possibile collegare queste entità digitali alle istanze delle

20. Vedi MUNOZ-CÁDIZ *ET ALII* 2025.

21. Vedi AMICO, FELICETTI 2021.

classi che descrivono il mondo reale (come “E27 Site”, “B1 Built Work” o “B2 Morphological Building Section”). Questo approccio permette di stabilire una corrispondenza semantica precisa e non ambigua tra il dominio digitale e quello fisico, con un enorme impatto potenziale sull'integrazione profonda dei modelli 3D all'interno di grandi archivi digitali del patrimonio culturale. È attraverso questi grafi che il paradigma del gemello digitale culturale si realizza pienamente. L'operazione di mappatura trasforma le relazioni ontologiche in costrutti IFC, creando una rete semantica in cui ogni nodo del modello H-BIM è connesso agli altri attraverso legami espliciti e machine-readable. In tal modo, il dato strutturale derivato dall'IFC e il dato semantico-culturale espresso dal CRM e da RHDT non sono più entità separate, ma nodi interconnessi di un unico, coerente grafo informativo che costituisce il cuore stesso del sistema. Il gemello digitale cessa in tal modo di essere una replica geometrica per evolvere in una base di conoscenza olistica e dinamica in cui la documentazione strutturale, gestita dalle classi di CRMba, si fonde con quella storica, narrativa e culturale. Questo non solo valida il potenziale del nostro modello, ma traccia un percorso concreto per la creazione di infrastrutture informative realmente integrate, pronte a supportare la gestione, la conservazione programmata e la valorizzazione dei beni nel lungo periodo.

Conclusioni: la costruzione del gemello digitale

La parte teorica di definizione dei gemelli digitali su base ontologica offre una panoramica sulla natura e le funzionalità che un gemello digitale culturale costruito secondo il nostro paradigma potrebbe garantire. D'altro canto, l'implementazione tecnologica di questo paradigma richiede l'impiego di varie tecnologie e l'integrazione di diverse infrastrutture digitali come reti, servizi cloud e altre piattaforme di archiviazione e gestione della conoscenza. La prima operazione consiste nella raccolta e nella strutturazione dei dati sul bene culturale o architettonico del quale si intende creare una riproduzione digitale, quali modelli 3D, fotografie, documentazione storica e informazioni sulla struttura fisica e sullo stato di conservazione dell'oggetto reale. La preparazione e l'acquisizione dati richiede, per ognuna di queste tipologie, un'accurata pianificazione e una serie di strumenti per la creazione di metadati descrittivi. I dati modellati secondo l'ontologia RHDT dovranno poi essere archiviati in un database a grafo²² ospitato su un'infrastruttura robusta e affidabile, come un server

22. Un database a grafo è una struttura informatica basata sui concetti di nodo (le classi) e gli archi (le relazioni) per rappresentare e archiviare le informazioni. È cioè la struttura operativa corrispondente al diagramma rappresentato in figura 1.

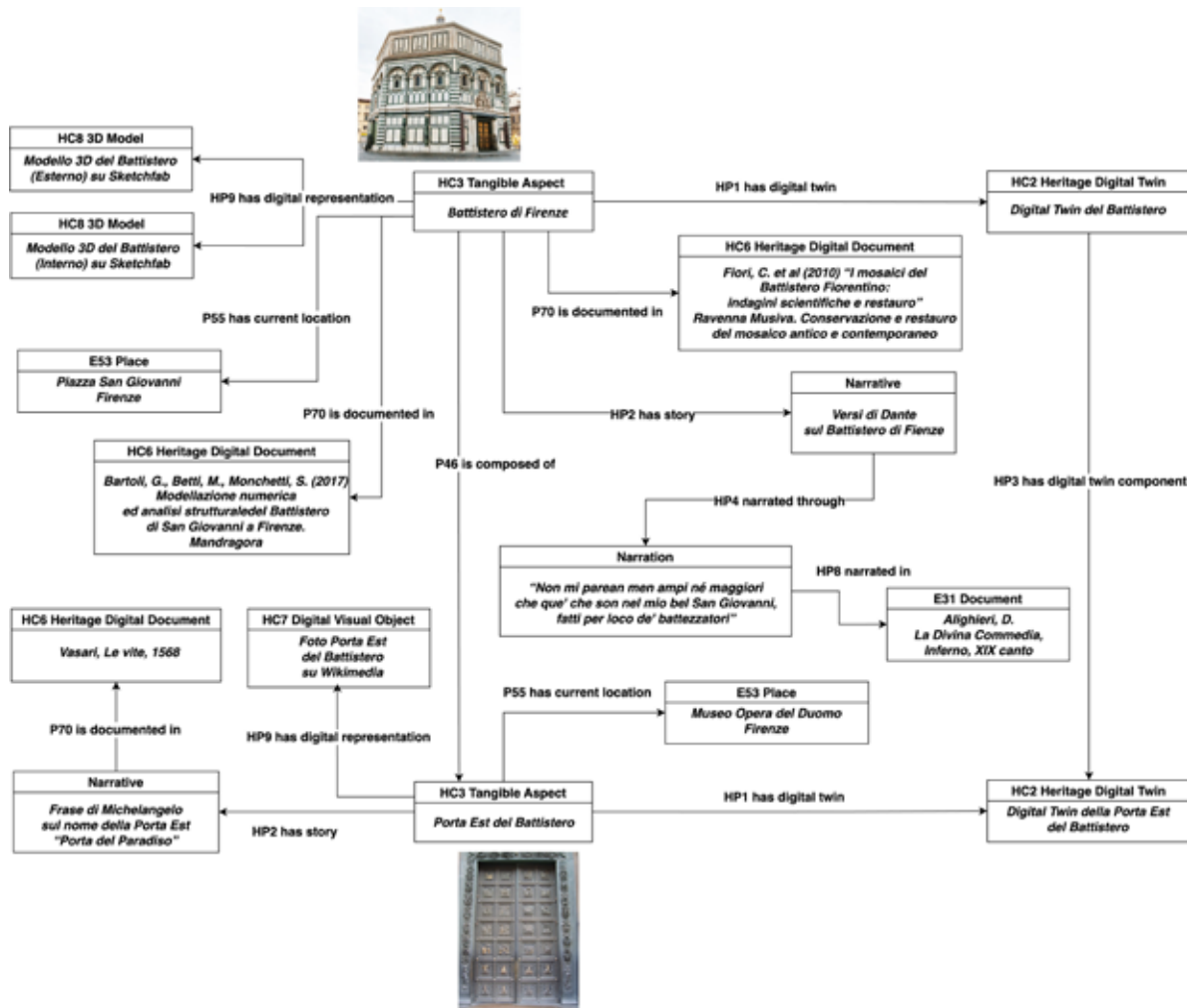


Figura 1. Diagramma di modellazione del Battistero di Firenze e di alcuni suoi aspetti secondo l'ontologia HDT e il sistema CIDOC CRM (elaborazione F. Niccolucci, A. Felicetti, 2023).

in cloud o piattaforme dedicate, che ne consentano un facile accesso e una gestione efficiente. La scelta della piattaforma di archiviazione è cruciale e deve tenere conto di fattori come la capacità di storage, la velocità di accesso ai dati e la sicurezza informatica. Il progetto 4CH sopra menzionato sta sperimentando questo tipo di approccio, realizzando una base della conoscenza (cioè un sistema informativo) finalizzato alla conservazione e al restauro.

L'implementazione dell'interoperabilità del sistema è la fase successiva, che consentirà al gemello digitale di interfacciarsi con altri servizi (per esempio il monitoraggio di eventi dannosi o distruttivi) e database esterni con cui scambiare informazioni. L'impiego di ontologie e standard favorirà inoltre la collaborazione con piattaforme di altri settori e collegare ai dati architettonici informazioni derivanti, ad esempio, dalla ricerca storica e dall'archeologia.

Infine, attraverso l'infrastruttura e le opportune interfacce, il gemello digitale culturale potrà essere impiegato come strumento di ricerca per lo studio e la conservazione del patrimonio culturale, come il monitoraggio dello stato di conservazione, la pianificazione di interventi di restauro, la simulazione e l'analisi predittiva dei rischi, con l'ausilio di meccanismi di *reasoning* sui dati, facilitati dall'utilizzo delle ontologie e resi efficienti dall'applicazioni di tecniche di *machine learning* e intelligenza artificiale.

Bibliografia

AA.VV. 1964 - AA.VV., *International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites*, ICOMOS, Parigi, 1964.

ACIERNO ET ALII 2017 - M. ACIERNO, S. CURSI, D. SIMEONE, D. FIORANI,, *Architectural heritage knowledge modelling: An ontology-based framework for conservation process*, in «Journal of Cultural Heritage», 2017, 24, pp. 124-133. DOI: 0.1016/j.culher.2016.09.010.

AMICO, FELICETTI 2021 - N. AMICO, A. FELICETTI, *Ontological Entities for Planning and Describing Cultural Heritage 3D Models Creation*, in «arxiv», 2021, 2106.07277. DOI: 10.48550/arXiv.2106.07277.

BEETZ, VAN LEUVEN, DE VRIES 2009 - J. BEETZ, J. VAN LEUVEN, B. DE VRIES, *IfcOWL: A Case of Transforming EXPRESS Schemas into Ontologies*, in «AI EDAM», I(2009), 23, pp. 89-101. DOI: 10.1017/S0890060409000122.

BOUCHENAKI 2003 - M. BOUCHENAKI, *The Interdependency of the Tangible and Intangible Cultural Heritage Keynote address*, in *ICOMOS 14th General Assembly and Scientific Symposium: Place, memory, meaning: preserving intangible values in monuments and sites*, 27-31 oct 2003, Victoria Falls, Zimbabwe 2003.

CRESPI, DROBOT, MINERVA 2023 - N. CRESPI, A.T. DROBOT, R. MINERVA (eds.), *The Digital Twin*, Springer International Publishing , Cham 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-21343-4.

DE LUCA 2023 - L. DE LUCA, *A digital ecosystem for the multidisciplinary study of Notre-Dame de Paris*, in «Journal of Cultural Heritage», 2023, 65. DOI: 10.1016/j.culher.2023.09.011.

FELICETTI, LORENZINI 2011 - A. FELICETTI, M. LORENZINI, *Metadata and tools for integration and preservation of cultural heritage 3D information*, in «Geoinformatics FCE CTU», 6, 2011, pp. 118-124. DOI: 10.14311/gi.6.16.

JONES ET ALII 2020 - D. JONES, C. SNIDER, A. NASSEHI, J. YON, B. HICKS, *Characterising the Digital Twin: A systematic literature review*, in «CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology», 2020, 229, pp. 36-52.

FELICETTI, NICCOLUCCI 2024 - A. FELICETTI, F. NICCOLUCCI, *Artificial Intelligence and Ontologies for the Management of Heritage Digital Twins Data*, in «Data», I(2024), 10. DOI: 10.3390/data10010001.

MEGHINI, BARTALESI, METILLI 2019 - C. MAGHINI, V. BARTALEI, D. METILLI, *Representing Narratives in Digital Libraries: The Narrative Ontology*, in «Semantic Web Journal», 2019, 12, 2, disponibile online: <https://www.semantic-web-journal.net/content/representing-narratives-digital-libraries-narrative-ontology-1> (ultimo accesso 30 novembre 2023)

MESSAOUDI, VÉRON, HALIN 2018 - T. MESSAOUDI, P. VÉRON, G. HALIN, *An ontological model for the reality-based 3D annotation of heritage building conservation state*, in «Journal of Cultural Heritage», 2018, 29, pp. 100-112. DOI: doi.org/10.1016/j.culher.2017.05.017.

MUNOZ-CÁDIZ ET ALII 2025 - J. MUNOZ-CÁDIZ, C. MARIOTTI, R. NESPECA, L. BOLOGNESE, *A Methodology for Integrating CIDOC-CRMba Ontology into the IFC Schema to Support the Spatial Analysis in Archaeological Heritage. Digital Applications*, in «Archaeology and Cultural Heritage», 2025, e00431. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.daach.2025.e00431>.

NICCOLUCCI, FELICETTI 2024 - F. NICCOLUCCI, A. FELICETTI, *Digital Twin Sensors in Cultural Heritage Ontology Applications*, in «Sensors», 2024, 24, 12, 3978. DOI: 10.3390/s24123978.

NICCOLUCCI, FELICETTI 2025 - F. NICCOLUCCI, A. FELICETTI, *Digital Twins and the Stendhal Syndrome*, in «Computers», 2025, 14, 4, 136. DOI: 10.3390/computers14040136.

PREVITALI ET ALII. 2020 - M. PREVITALI, R. BRUMANA, C. STANGA, F. BANFI, *An Ontology-Based Representation of Vaulted System for HBIM*, in «Applied Sciences», 2020, 4, 1377. DOI: 10.3390/app10041377.

TIBAUT, KAUČIČ, DVORNIK PERHAVEC 2018 - A. TIBAUT, K.B. KAUČIČ, P. DVORNIK PERHAVEC, *Ontology-Based Data Collection for Heritage Buildings*, in M. IOANNIDES (eds.), *Digital Cultural Heritage*, Springer, Cham 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-75826-8_6.

VANDERHORN, SANKARAN 2021 - E. VANDERHORN, M. SANKARAN, *Digital Twin: Generalization, characterization and implementation*, in «Decision Support Systems», 2021, 145, 113524. DOI: 10.1016/j.dss.2021.113524.

ZHANG, EL-GOHARY 2020 - L. ZHANG, N.M. EL-GOHARY, *Automated IFC-based building information modelling and extraction for supporting value analysis of buildings*, in «International Journal of Construction Management», 2020, 20, 4, pp. 269-288. DOI: 10.1080/15623599.2018.1484850.